UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES TECHNOLOGIE SANTE (547)

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : ***MÉCANIQUE DES FLUIDES, ÉNERGÉTIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION, ACOUSTIQUE***

Présentée et soutenue publiquement par

Kamel MOUHOUBI

Le 28 novembre 2016

Thermographie infrarouge stimulée appliquée à la détection et à la caractérisation d'altérations structurales de peintures murales du patrimoine

Thèse dirigée par **Thierry DUVAUT**

JURY

M. Gérard MARY,	, Professeur,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne ,	**, Président**
M. Laurent IBOS,	, Maître de Conférences HDR,	à l'Université Paris 12 Val de Marne ,	**, Rapporteur**
M. Xavier MALDAGUE,	, Professeur,	à l'Université de Laval, Ste Foy, Quebec ,	**, Rapporteur**
M. Jean-Luc BODNAR,	, Maître de Conférences HDR,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne ,	**, Examinateur**
M. Vincent DETALLE,	, Ingénieur de Recherche RF,	Laboratoire Rech. Monuments Historiques ,	**, Examinateur**
M. Thierry DUVAUT,	, Professeur,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne ,	**, Examinateur**
M. Jean-Marc VALLET,	, Ingénieur de Recherche RF,	CICRP ,	**, Examinateur**
Mme. Patricia VASQUEZ,	, Maître de Conférences HDR,	à l'Université de Reims Champagne-Ardenne ,	**, Examinateur**

À mes chers parents.

Jean Jaurès devant des lycéens de Toulouse, le 31 juillet 1892

Il faut que vous appreniez à dire "moi", non par les témérités de l'indiscipline ou de l'orgueil, mais par la force de la vie intérieure. Il faut que, par un surcroît d'efforts et par l'exaltation de toutes vos passions nobles, vous amassiez en votre âme des trésors inviolables. Il faut que vous vous arrachiez parfois à tous les soucis extérieurs, à toutes les nécessités extérieures, aux examens de métier, à la société elle-même, pour retrouver en profondeur la pleine solitude et la pleine liberté: il faut que vous lisiez les belles pages des grands écrivains et les beaux vers des grands poètes, que vous vous pénétriez à fond et de leur inspiration et du détail même de leur mécanisme; qu'ainsi leur beauté entre en vous par tous les sens et s'établisse dans toutes vos facultés; que leur musique divine soit en vous, qu'elle soit vous-mêmes; qu'elle se confonde avec les pulsations les plus larges et les vibrations les plus délicates de votre être, et qu'à travers la société quelle qu'elle soit, vous portiez toujours en vous l'accompagnement sublime des chants immortels.

Il faut, lorsque vous étudiez les propriétés du cercle, de la sphère et des sections coniques, que vous vous sentiez frère par l'esprit d'Euclide et d'Archimède et que, comme eux, vous voyiez avec ravissement se développer le monde idéal des figures et des proportions dont les harmonies enchanteresses se retrouvent ensuite dans le monde réel. Il faut, lorsque vous étudiez en physiciens, par l'observation et le calcul, la subtilité et la complexité mobile des forces, que vous sentiez le prestige de l'univers, relativement stable et toujours mouvant, tremblotant et éternel, et que votre conception positive des choses s'élargisse dans le mystère et dans le rêve comme ces horizons des soirs d'été où la lumière s'éteint, où l'éclair s'allume et où l'oeil croit démêler les subtiles mutations des forces dans l'infini mystérieux.

Alors, jeunes gens, vous aurez développé en vous la seule puissance qui ne passera pas, la puissance de l'âme; alors vous serez haussés au-dessus de toutes les nécessités, de toutes les fatalités et de la société elle-même, en ce qu'elle aura toujours de matériel et de brutal. Alors, dans les institutions extérieures, en quelque manière que l'avenir les transforme, vous ferez passer la liberté et la fierté de vos âmes. Et de quelque façon qu'elle soit aménagée, vous ferez jaillir dans la vieille forêt humaine, l'immortelle fraîcheur des sources.

Jean Jaures

Je condamne l'ignorance qui règne en ce moment dans les démocraties aussi bien que dans les régimes totalitaires. Cette ignorance est si forte, souvent si totale, qu'on la dirait voulue par le système, sinon par le régime. J'ai souvent réfléchi à ce que pourrait être l'éducation de l'enfant. Je pense qu'il faudrait des études de base, très simples, où l'enfant apprendrait qu'il existe au sein de l'univers, sur une planète dont il devra plus tard ménager les ressources, qu'il dépend de l'air, de l'eau, de tous les êtres vivants, et que la moindre erreur ou la moindre violence risque de tout détruire.

Il apprendrait que les hommes se sont entretués dans des guerres qui n'ont jamais fait que produire d'autres guerres, et que chaque pays arrange son histoire, mensongèrement, de façon à flatter son orgueil.

On lui apprendrait assez du passé pour qu'il se sente relié aux hommes qui l'ont précédé, pour qu'il les admire là où ils méritent de l'être, sans s'en faire des idoles, non plus que du présent ou d'un hypothétique avenir.

On essaierait de le familiariser à la fois avec les livres et les choses ; il saurait le nom des plantes, il connaîtrait les animaux sans se livrer aux hideuses vivisections imposées aux enfants et aux très jeunes adolescents sous prétexte de biologie ; il apprendrait à donner les premiers soins aux blessés ; son éducation sexuelle comprendrait la présence à un accouchement, son éducation mentale la vue des grands malades et des morts.

On lui donnerait aussi les simples notions de morale sans laquelle la vie en société est impossible, instruction que les écoles élémentaires et moyennes n'osent plus donner dans ce pays.

En matière de religion, on ne lui imposerait aucune pratique ou aucun dogme, mais on lui dirait quelque chose de toutes les grandes religions du monde, et surtout de celle du pays où il se trouve, pour éveiller en lui le respect et détruire d'avance certains odieux préjugés.

On lui apprendrait à aimer le travail quand le travail est utile, et à ne pas se laisser prendre à l'imposture publicitaire, en commençant par celle qui lui vante des friandises plus ou moins frelatées, en lui préparant des caries et des diabètes futurs.

Il y a certainement un moyen de parler aux enfants de choses véritablement importantes plus tôt qu'on ne le fait.

Marguerite Yourcenar

Remerciements

Les remerciements sont un passage obligé dans une thèse, souvent convenus, parfois enjoués et passionnés, ils accueillent le lecteur en lui donnant un aperçu de la personnalité du doctorant avant son effacement presque définitif tout au long des pages qui suivent. Effacement face à la rigueur nécessaire de l'exercice de la thèse face au savoir et à la quête de connaissance qui invitent toujours à l'humilité et à l'écoute.

Je ne ferai pas exception, car j'ai été aidé soutenu et encouragé tout au long de ces années passés au GRESPI de l'Université de Reims. Je remercie bien entendu mon directeur de thèse, Mr **Thierry Duvaut** pour avoir accepté de superviser mon travail. **Mr Duvaut** a fait preuve à mon égard d'un esprit ouvert et plein de gentillesse, qu'il en soit remercié

Je n'oublie pas mes co-encadrants du quotidien et en premier lieu **Jean-Luc Bodnar** avec lequel j'ai passé des années passionnantes ? Enrichissantes ? Réjouissantes ? Je m'interroge sur l'adjectif qui pourrait résumer ma relation à Jean-Luc… Jean-Luc m'a transmis sa passion pour la recherche et un peu de son intarissable optimisme, j'en avais il est vrai, parfois besoin. Si je devais résumer une qualité dont je le suis le plus redevable ce, serait la persévérance. C'est une qualité chère au chercheur. Ne jamais abandonner, ne jamais se détourner de son objectif, car à tout problème il y a une solution et à toute difficulté il y a une explication. Mes remerciements vont aussi aux deux laboratoires qui ont permis à cette thèse d'exister : le Laboratoire de Recherche sur les Monuments Historiques (LRMH) et plus particulièrement à **Mr Vincent Detalle**, responsable du département des peintures murales au LRMH ainsi qu'au Centre Interrégional de Conservation et de Recherche sur le Patrimoine de Marseille, représenté par **Jean-Marc Vallet**, ingénieur. Vincent et Jean Marc m'ont donné la possibilité de découvrir des lieux merveilleux et chargés d'histoire ainsi que des personnes formidables, ces rencontres m'ont permis de tester des hypothèses de travail sur de véritables œuvres d'art sous le contrôle et le regard avisé de restaurateurs du patrimoine. Leur générosité et leur disponibilité m'ont touché Je leur dois des nuits presque blanches de rédaction, de corrections pour un résumé ou un article à remettre avant la deadline fatidique, mais je leur dois aussi ma reconnaissance. Merci encore.

Remerciements aussi pour feu notre **région Champagne Ardenne** qui a soutenu cette thèse.

Le personnel du laboratoire a aussi beaucoup contribué à ce travail de recherche et en premier lieu **Jean-Louis Nicolas**, ingénieur du GRESPI, qui m'a soutenu et n'a jamais été avare de son temps pour corriger un dysfonctionnement technique ou mettre au point des améliorations du dispositif avec lequel j'ai œuvré C'est à lui que nous devons l'essentiel des outils que j'ai utilisé tout au long de ces années. J'adresse de même mes salutations à notre technicien, **Mr Didier Caron**, pour son aimable concours et la réalisation des éprouvettes de laboratoire et des échantillons sur lesquels j'ai travaillé

J'aurais aussi beaucoup de reconnaissance pour les laboratoires partenaires qui ont accepté de m'accueillir pour mes recherches et m'ont fait participer à leurs travaux, je pense au **Gegena²** de l'université de Reims et en particulier à **Mlle Patricia Vasquez** et **Mme Céline Schneider**, j'adresse aussi mes salutations à **Mr Valeriu Vrabie** et **Francis Perrin** du Crestic (Universite de Reims), à **Mr Laurent Ibos** du CERTES (Universite de Créteil), au laboratoire IDK de Dresdes, et en particulier à **Christoph Franzen**, au laboratoire Forth d'Héraklion (Crète , aux équipes d'**Arcelor Mittal** (Montigny-les-Metz) et au **CETIM** (Senlis) qui ont mis à ma disposition leur matériel, à celle de VISIOM (Antony) et à toutes les personnes et équipe qui ont collaboré avec nous en nous envoyant des échantillons ou en nous aidant à traiter des données.

Au cours de ces années, j'ai aussi encadré des étudiants, je pense les avoir aidés, mais j'aimerais aussi les remercier de l'aide qu'ils m'ont aussi apportée dans mes expérimentations et pour leur infinie patience a endurer mon caractère. Que soient remerciés **Nashad Kamal**, **Malacarne Romain**, **Thibault Rennesson**, **Willi Paul**, **Housseini Saïd**, **Gomis Salif**, **Paul Esteves**, **Maximes Krall**, **Louris Kassim**, **Éric Benneteau**, **Damien Quinchez**, **Halm Bruno**, **Augustin Faye**, **Zacharias, Enora, Paul, Sihem** et d'autres dont les noms

m'é happent... J'ai gardé de chacun d'entre vous le souvenir affectueux que l'on a pour des compagnons de route.

J'adresse aussi mes salutations au personnel de l'École Doctorale et en particulier à **Mme Nathalie LE BARC'H** et à **Estelle ODINOT** pour leur disponibilité.

Enfin merci aux rapporteurs et membres du jury qui m'ont fait l'honneur de me relire, de corriger et d'é aluer ce travail.

Maintenant j'aimerais é oquer les personnes que je ne remercie pas. Je ne remercie pas Mr **Mark Zuckerberg** de l'entreprise Facebook pour les heures passé s inutilement sur son réseau social, que de temps perdu !

J'ai été heureux de cette aventure inoubliable, merci encore !

Kamel Mouhoubi

Radiométrie photothermique appliquée à la détection et à la caractérisation d'altérations structurales de peintures murales du patrimoine

RÉSUME :

L'objectif de cette étude est de développer des méthodes d'analyse et de caractérisation des défauts structurels des matériaux s'appuyant sur la thermographie infrarouge stimulée.

Nous pouvons à l'aide d'une excitation photothermique distante et d'un outil d'analyse que nous avons développé en laboratoire, déterminer la structure sous-jacente d'un matériau, repérer précisément ses défauts et les mesurer. L'application qui nous intéresse ici porte sur la prévention, le diagnostic et la restauration des œuvres d'art. Dans ce contexte, nous avons démontré lors de précédents travaux la pertinence de cette approche et son application potentielle importante dans de nombreux domaines, qu'ils soient industriels, culturels, médicales ou autres. Nous avons fait la démonstration qu'il était possible d'analyser des matériaux fragiles de façon fiable et sans contact. Nous comptons généraliser cette approche en élargissant ses domaines d'application et en améliorant sa précision.

Photothermal radiometry applied to the detection and characterization of structural alterations mural paintings of the heritage

ABSTRACT :

The objective of this study is the development of methods of analysis and characterization of structural defects within materials based on photothermal radiometry.

Thanks to both a remote photothermal excitation and an analysis tool developed in the laboratory, the underlying structure of a material, the identification of the present flaws as well as their measurements are determined. Herein, the considered application focuses on the prevention, diagnosis and restoration of works of art. Against this background, the relevance of the proposed approach including its significant potential applications in many areas, such as cultural industry, medicine and others, have been shown in previous work. We have demonstrated that it has been possible to reliably analyze brittle materials and besides without contact. The generalisation of the proposed approach by extending its areas of application and its accuracy as well is in progress.

MOTS CLEF :

Thermographie infrarouge stimulée Peinture murale Fresque Patrimoine Œuvres d'art Contrôle non destructif Caracterisation thermophysique Diffusivité thermique Effusivité thermique Détection de défauts Sels hygroscopiques Post-traitements Pierre calcaire

KEYWORDS :

Stimulated infrared thermography Mural painting Fresco Heritage Work of art Nondestructive testing Thermophysical characterization Thermal diffusivity Thermal effusivity Defects detection Hygroscopic salts Postprocessing Limestone

Université de Reims Champagne-Ardenne, GRESPI / ECATHERM EA 4301, UFR Sciences exactes et naturelles, Moulin de la housse, BP 1039, 51687 Reims cedex 02

Table des matières

Chapitre I

1. Introduction du chapitre I 1

2. Conservation du patrimoine culturel et contrôle non destructif 2

2.1. Fresques et peinture murales 3
2.1.1. Origines des peintures murales 3
2.1.2. Principe de la peinture murale 4
2.1.3. Types de peintures murales 5

2.2. Le contrôle non destructif 6

3. La thermographie infrarouge stimulée. 10

3.1. Rappel général sur les lois du rayonnement thermique et de la conduction 11
3.1.1. Le rayonnement infrarouge 12
3.1.2. Lois du rayonnement 13
3.1.3. La conduction thermique 17

3.2. Aspects technologiques 19
3.2.1. Types de caméras thermiques 21

3.3. Principe du CND par thermographie infrarouge stimulée 22

4. Apports possibles de la thermographie IR stimulée à la conservation du patrimoine artistique. ... 23

4.1. Mise en œuvre de la thermographie à la détection d'altérations structurales 24
4.1.1. Détection passive 25
4.1.2. Détection active 27

4.2. Utilisation de la thermographie infrarouge en matière de caractérisation 29

4.3. Vue d'ensemble des techniques d'analyse classiquement utilisées en thermographie infrarouge stimulée 30
4.3.1. L'analyse pulsée (PT) 30
4.3.2. Le Lock-in ou Modulated Infrared Thermography (MT) 37
4.3.3. L'analyse aléatoire 39
4.3.4. Autres méthodes de traitement 41

5. Conclusion du chapitre I et perspectives 45

Chapitre II

6. Introduction du chapitre II 48

7. Le dispositif de détection SAMMTHIR 49

7.1. Pertinence du dispositif 50
7.1.1. Type de défauts recherchés 50
7.1.2. Mise en œuvre de SAMMTHIR 50
7.1.3. Exemples de détection de défauts sur des éprouvettes de laboratoire 50
7.1.4. Problématique et axes de recherche 53

8. Approche instrumentale : amélioration du dispositif, étude sur les sources 54

8.1. Amélioration de la configuration expérimentale, aspects géométriques. 55

8.1.1. Dispositif ... 55
8.1.2. Influence de la distance ... 56
8.1.3. Influence de l'angle de visée des sources ... 60
8.1.4. Influence de la distance à angle fixe ... 62
8.1.5. Ajout de sources supplémentaires ... 64
8.1.6. Conclusion ... 67

8.2. Analyse des sources, étude spectrale ... 68
8.2.1. Étude d'échantillons académiques à l'aide de différentes sources d'excitation ... 68
8.2.2. Conclusion ... 74
8.2.3. Possibilité de réduction des effets optiques ; approfondissements. ... 75
8.2.4. Étude d'un échantillon académique à l'aide d'une source adaptée ... 79

9. Approche logicielle : amélioration du dispositif par l'utilisation de post-traitements ... 83

9.1. Aspects théoriques et présentation de quelques post-traitements ... 84
9.1.1. Filtres ... 84
9.1.2. Traitement exploitant le principe du contraste thermique ... 85
9.1.3. Post-traitements exploitant des transformations ... 86
9.1.4. Post-traitements exploitant des méthodes statistiques ... 89

9.2. Simulation ... 95
9.2.1. Analyse d'un résultat de simulation sous excitation créneau à l'aide de post-traitements ... 95
9.2.2. Analyse d'un résultat de simulation sous excitation PRBS à l'aide de post-traitements ... 99

9.3. Évaluation de l'apport des post-traitements sur des échantillons de laboratoire ... 101
9.3.1. Étude de l'éprouvette de laboratoire, « Le Picasso » ... 102
9.3.2. Étude de l'éprouvette dite « St Savin » ... 106

9.4. Comparaison des bénéfices obtenus selon le mode d'excitation ... 110
9.4.1. Protocole ... 110

9.5. Conclusion ... 116

10. Comparaison des bénéfices obtenus selon l'approche instrumentale et logicielle ... 117

10.1. Conclusion ... 119

11. Approche combinée : sources infrarouges et post-traitement ... 119

11.1. Protocole et dispositif expérimental ... 120

11.2. Conclusion ... 123

12. Conclusion du chapitre II ... 124

Chapitre III

13. Introduction du chapitre III ... 127

14. Méthodes et finalités de la caractérisation thermique, problématique ... 128

14.1. Objectif de la caractérisation thermique ... 128

14.2. Problématique ... 129

15. Détermination de la diffusivité thermique ... 130

15.1. Rappel sur les méthodes de caractérisation thermique classiquement utilisées ... 130
15.1.1. La Méthode de Parker et ses dérivés ... 130
15.1.2. Limites des méthodes de caractérisation classiques ... 133

15.2. Connaissance de la diffusivité thermique et finalités 135

15.3. Méthodes alternatives, modèle théorique 136

15.4. Mise en œuvre de la « méthode radiale » 138
15.4.1. Simulation théorique 139
15.4.2. Validations expérimentales 142

15.5. Mise en œuvre de la « méthode du Tmax » 146
15.5.1. Simulation théorique 147
15.5.2. Validations expérimentales 148

15.6. Méthode des « moments » 149
15.6.1. Simulation théorique 151
15.6.2. Validations expérimentales 152
15.6.3. Récapitulatif 153

15.7. Application : Estimation de profondeurs de défauts 153

15.8. Description de la configuration expérimentale 156

15.9. Conclusion 158

16. Détermination de l'effusivité thermique 160

16.1. Connaissance de l'effusivité thermique et finalités 160

16.2. Approche surfacique 160
16.2.1. Aspects théoriques et mode opératoire 160
16.2.2. Simulation théorique 164
16.2.3. Validation expérimentale 165

16.3. Nouvelle méthode : approche locale 171
16.3.1. Considérations générales 171
16.3.2. Approche au moyen d'un simulation numérique 172
16.3.3. Validation expérimentale 179

17. Conclusion du chapitre III 186

Chapitre IV

18. Introduction chapitre IV 190

19. Les infiltrations de sels hygroscopiques et effets sur les peintures murales 191

19.1. Principes physiques 193
19.1.1. Milieux poreux et diffusion d'espèces chimiques 193
19.1.2. Lois d'équilibre 194
19.1.3. Pressions de cristallisation et d'hydratation 197
19.1.4. Facteurs déclenchants 198
19.1.5. Conclusion 199

20. Études sur échantillons 200

20.1. Analyse d'échantillons minces. 201
20.1.1. Échantillons 201
20.1.2. Analyse par des méthodes de laboratoire 202
20.1.3. Analyse d'échantillons minces par thermographie infrarouge stimulée 208
20.1.4. Conclusion 244

20.2. Analyse d'échantillons épais 244
20.2.1. Analyse du Bloc 1 avec une excitation flash 244

20.3. Analyse locale ... *251*
20.3.1. Analyse d'échantillons minces ... 252
20.3.2. Conclusion ... 259

21. Études sur site ... 260

21.1. Analyse sur site cas de l'abbaye d'Orval ... *260*
21.1.1. Présentation du site étudié ... 260
21.1.2. Excitation Flash ... 261

21.2. Cas de l'Abbaye Royale de Chaalis ... *268*
21.2.1. Présentation du site étudié ... 268
21.2.2. Observation visuelle ... 269
21.2.3. Relevé effectué à l'aide du dispositif SUSI ... 270
21.2.4. Étude expérimentale à l'aide d'une excitation créneau ... 272

22. Conclusion chapitre IV ... 275

Chapitre V

23. Introduction chapitre V ... 277

24. Repérage de défauts sur un échantillon non plan ... 278

24.1. Objectif ... *278*

24.2. Échantillon ... *278*

24.3. Résultats obtenus avec des méthodes alternatives ... *279*

24.4. Protocole expérimental ... *279*

25. Repérage de peintures murales recouvertes de badigeon ... 281

25.1. Description de l'échantillon ... *282*
25.1.1. Étude préliminaire ... 283

25.2. Possibilités en infrarouge lointain ... *284*
25.2.1. Objectifs ... 284
25.2.2. Les Térahertz ... 284
25.2.3. Le dispositif et principe ... 285
25.2.4. Étude expérimentale ... 285

25.3. Excitation au moyen d'un système par induction ... *287*
25.3.1. Dispositif expérimental ... 287
25.3.2. Étude expérimentale ... 287
25.3.3. Résultat ... 288

25.4. Conclusion ... *289*

26. Caractérisation de couche picturale ... 289

26.1. Mise en évidence de techniques de peinture murale ... *289*

26.2. Simulation ... *289*

26.3. Étude de plaquettes ... *290*

26.4. Conclusion ... *292*

26.5. Étude sur site : Étude d'une peinture murale de la Chapelle Notre-Dame-des-Fontaines, la Brigue 293
26.5.1. Contexte de l'étude ... 293

26.5.2. Objectif de la mission 294
26.5.3. Relevés du restaurateur 294
26.5.4. Analyse de la technique picturale 295

26.6. Étude sur site : Chapelle St Martial Palais des papes – Avignon 297
26.6.1. Contexte de l'étude 298
26.6.2. Objectifs 298
26.6.3. Dispositif et protocole expérimental 298
26.6.4. Identification de la technique picturale utilisée 299

26.7. Conclusion 304

27. Suivi de restauration 305

27.1. Étude préliminaire sur un échantillon composé de 3 types de plâtres. 305

27.2. Études in situ portant sur des restaurations 306
27.2.1. Détection et caractérisation de restaurations anciennes 306

27.3. Conclusion 309

28. Projet de perfectionnement du dispositif 310

28.1. Un système performant, mais perfectible 310
28.1.1. Renforcer la robustesse 310
28.1.2. Améliorer l'ergonomie 310
28.1.3. Augmenter la fiabilité 310

28.2. Mise en œuvre 310
28.2.1. Projet de conception d'intégration : 310

28.3. Conclusion 313

29. Conclusion chapitre V 313

Conclusion générale **315**

Bibliographie 318

A. Annexe chapitre I 328

29.1. Exemple de résolution d'un problème de conduction 328

B. Annexes du chapitre II 331

29.2. Résultats Analyse d'un résultat de simulation sous excitation créneau à l'aide de post-traitements (9.2.1) 331

29.3. Résultats Analyse d'un résultat de simulation sous excitation PRBS à l'aide de post-traitements (9.2.2) 335

29.4. Résultats Étude de l'éprouvette de laboratoire, « Le Picasso » (9.3.1) 340

29.5. Résultats Étude de l'éprouvette dite « St Savin » (9.3.2) 347

29.6. Perfectionnement des sources infrarouges 353

29.7. Publications 355

29.8. Congrès 356

C. Annexes du chapitre III 357

29.9. Publications 357

29.10. Congrès 359

29.11. Comparaison des méthodes : calcul d'incertitude et sensibilité aux paramètres. 361

29.12. Analyse de faisceau 364

29.13. Le dispositif DICO 366

29.14. Logiciels de traitement développés 368

D. Annexe du chapitre IV 373

29.15. Publications 373

29.16. Conférence et congrès 374

29.17. Résultats mesure de la diffusivité sur échantillons minces à l'aide de la méthode flash 376

29.18. Résultats mesures sur échantillons minces en face avant 378

29.19. Résultat mesure de diffusivité echantillons mince en face avant par ThIR 378

29.20. Résultats mesures diffusivité thermique sur échantillons minces en face arrière 379

29.21. Analyse en aléatoire d'echantillons mince : Détermination de l'effusivité thermique et du Tmax (Paramètre na = nb = 5) 380

29.22. Complément à l'analyse d'un bloc épais (peint en face avant) 381

29.22.1. Analyse avec des halogènes en créneau 381

29.22.2. Analyse avec des halogènes en aléatoire 382

29.23. Table de Student 384

E. Annexe chapitre V 384

29.24. Publications et actes de congrès 384

Nomenclature

Q	**Énergie d'excitation ou fluence**	**[J.m^{-2}]**	a	**diffusivité thermique**	**[m².s^{-1}]**
λ	Conductivité thermique	[W.m^{-1}.K^{-1}]	b	Effusivité thermique	[J.m^{-2}.K^{-1}.s$^{-½}$]
ρ	Masse volumique	[kg.m^{-3}]	t	Coordonnée de temps	[s]
C_p	Capacité thermique à pression constante	[J.kg^{-1}.K^{-1}]	T	température	[K]
e	épaisseur	[m]	Fo	Nombre de Fourier	
r	Rayon en coordonnées cylindriques	[m]	Δ	Opérateur *Laplacien* ou différentiel	
σ, ω, p	Variables dans les espaces de Hankel, Fourier et Laplace		x, y, z	Coordonnées d'espace en représentation cartésienne	[m]
i	Unité dans l'espace imaginaire telle que $i^2 = -1$ et angle d'incidence.		J_0	Fonction de Bessel de 1ère espèce d'ordre 0	

Introduction générale

Ce travail de recherche s'intéressera à la détection et à la caractérisation d'altération dans les œuvres du patrimoine au moyen de la thermographie infrarouge stimulée. Par alté ation nous entendons les défectuosités structurales ou chimiques pouvant affecter l'intégrité d'un bien culturel.

Les œuvres du patrimoine ou biens culturels auxquelles nous nous intéresserons seront principalement des peintures murales réelles, étudiées sur site, ou reconstituées par des restaurateurs que nous étudierons en laboratoire. Notre technique de travail se basera sur la thermographie infrarouge stimulée et nous démontrerons au moyen du dispositif SAMMTHIR, un certain nombre de possibilités offertes par cette technique de contrôle non destructif.

L'analyse par thermographie infrarouge est connue, elle consiste à soumettre un matériau à une perturbation et à observer son comportement dans l'infrarouge au moyen d'une camé a thermique afin de repé er d'é entuelles irré ularité spatiales ou temporelles dans l'émission de son rayonnement. Ces irrégularités peuvent découler de la présence de défauts.

La mise au point de techniques rigoureuses de repérage de défauts dans les biens culturels au moyen de la thermographie IR est une thématique de recherche qui a débuté en Italie il y a une trentaine d'anné s. L'objectif était de mettre au point une technique d'analyse de ces œuvres qui soit rigoureuse sur le plan mé hodologique et respectueuse des œuvres d'art, tout en é ant rapide et bon marché. Cette recherche visait à apporter de nouveaux moyens d'investigation et des répon es aux équ pes en charge de la conservation et de la restauration de ces œuvres. L'émergence de cette thématique a donné lieu à de nombreux travaux qui trouvent dans ce travail un prolongement.

Ce travail de thèse se situe dans la suite du travail de thèse de Jean-Charles Candorés (2010). Il vise à compléter un certain nombre de points introduits par ce travail. Plusieurs axes de recherche avaient été évoqués dans la thèse de Jean-Charles Candoré : celui de la détection des défauts et celui de la caractérisation de ces défauts. Nous développerons ces points, nous présenterons un certain nombre d'amé iorations et nous introduirons de nouveaux axes de recherche.

Cette thèse comportera cinq chapitres. Tout d'abord nous pré enterons dans le **chapitre I**, l'état de l'art dans le domaine nous définirons un certain nombre de termes et de notions, nous ferons des rappels et nous citerons un certain nombre de travaux significatifs. Nous consacrerons notre **chapitre II** à la dé ection des altérations structurales et surtout à l'amé ioration de celle-ci. Deux

approches seront explorées : une approche expérimentale et une approche s'appuyant sur des post-traitements, enfin nous présenterons une approche combinée qui regroupera les avantages des deux méthodes. Le **chapitre III** sera consacré aux méthodes de caractérisation thermo physiques. Cette étape est indispensable pour caractériser les défauts et déterminer par exemple la profondeur de l'un d'entre eux. Plusieurs méthodes nouvelles seront présentées. Nous démontrerons qu'il est possible d'accéder à plusieurs paramètres thermo physiques comme la diffusivité thermique et l'effusivité thermique à partir de l'analyse d'une excitation locale produite à l'aide d'un tir laser. Nous avons mentionné la détection de défauts structuraux, nous consacrerons le **quatrième chapitre** à l'étude d'un nouveau type de défaut de nature chimique pouvant affecter la peinture murale, les infiltrations de sels hygroscopiques. Ces sels peuvent diffuser dans la pierre quand les conditions s'y prêtent et occasionner de graves altérations. C'est pour cette raison que nous avons mis au point des méthodes d'analyse permettant la mise en évidence précoce de ces sels. Ces méthodes seront présentées. Enfin nous terminerons ce travail par un chapitre consacré aux ouvertures. Ce **chapitre V** regroupera un certain nombre de piste de recherche que nous avons commencé à explorer et qui s'avèrent prometteuses. Nous nous intéresserons à la détection sous badigeon, au suivi de restauration ou encore à la caractérisation de la technique picturale.

Nous veillerons à respecter pour chacun des chapitres une trame et une méthode de travail. Tout d'abord une description de la problématique, un rappel des difficultés et des insuffisances des approches habituelles et la présentation d'hypothèses de travail. Le problème sera ensuite modélisé sur la base de ces hypothèses, des simulations théoriques seront effectuées afin de vérifier ces hypothèses et leur faisabilité. Enfin nous présenterons le dispositif et le mode opératoire ainsi que des résultats de manipulations effectuées en laboratoire ou sur site et nous discuterons ces résultats. Nous conclurons en gardant toujours à l'esprit la nécessité d'ouvrir la problématique à la possibilité de développements ultérieurs.

Ce travail est le fruit d'efforts et de détermination, il vise à être une étape et un appui pour de futures recherches. Nous espérons qu'il remplira pleinement cette mission, au service de la connaissance et la préservation de notre patrimoine culturel et artistique.

Chapitre 1

1. Introduction du chapitre I

Dans ce chapitre nous dressons un panorama aussi pré is que possible de l'état de l'art en matière de contrôle non destructif (CND) du patrimoine culturel. Nous décrirons de façon plus précise le domaine de la thermographie infrarouge stimulée. Nous nous intéresserons à une application intéressante de cette technique de CND : l'analyse d'œuvres d'art du patrimoine à des fins de conservation.

Nous décrirons dans une premiè e section de chapitre l'objet de notre é ude – les fresques et peintures murales – et les spécificités propres à cet objet d'étude, nous évoquerons ensuite différentes techniques de contrôle non destructifs et leurs applications possibles au domaine des œuvres d'art.

Dans un second temps nous intéresserons plus spécifiquement à la thermographie infrarouge et à ses nombreuses possibilités dans le domaine de la détection de défauts. Cette présentation se fera après une série de rappels théoriques concernant les échanges thermiques par conduction et rayonnement. Nous montrerons l'intérêt particulier de cette mé hode d'analyse pour la conservation du patrimoine. Nous é oquerons un certain nombre de travaux de recherche et d'approches théo iques permettant d'é endre les possibilités de l'analyse par thermographie infrarouge stimulé .

Nous passerons enfin en revue les dernières avancées techniques de cette mé hode d'analyse relevant encore de la recherche.

2. Conservation du patrimoine culturel et contrôle non destructif

C'est à la fin des années 20 que les premières tentatives d'analyse technique de peintures – par rayons X – ont eu lieu au *Musée du Louvre*, c'est en 1931 que l'approche scientifique fait véritablement son entrée au musée avec l'installation dans le *pavillon de Flore* d'un petit laboratoire grâce au mécénat du docteur **Fernando Perez**, ambassadeur de la République d'Argentine et du docteur **Carlos Mainini**, professeur à la faculté de médecine de Buenos Aires. Ce laboratoire poursuivra des recherches en photographie visible, sous ultraviolet et radiographie X.

À partir des années 80, la **conservation préventive** s'est progressivement imposée, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles pratiques en termes de conservation des œuvres du patrimoine, mais aussi à l'émergence de nouvelles disciplines et approches de nature technique visant l'analyse, la restauration, la conservation et la documentation du patrimoine historique, artistique et culturel de notre pays. Ces approches à vocation pluridisciplinaire sont portées par de grands laboratoires nationaux rattachés aux Ministères de la Culture et de la Recherche tels que le C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France) ou le LRMH crée en 1970 par **Jean Taralon**[1] (Laboratoire de Recherche Sur les Monuments Historiques) ou par des laboratoires à vocation régionale comme le CICRP (Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine) de Marseille.

Figure 1 : Grands laboratoires partenaires

Ces laboratoires ont accompagné un grand nombre de travaux de recherche dans des domaines variés, ce travail de thèse découle de ce besoin. Cette recherche est soutenue par la LRMH, le CICRP de Marseille et la Région Champagne-Ardenne et a pour objectif de mettre en place des techniques d'analyse et de contrôle par thermographie infrarouge d'objets patrimoniaux tels que les fresques, peintures murales, marqueteries, mosaïques, porcelaines, mobiliers de diverses natures, etc. Les contraintes en termes de conservation nous ont amenés à privilégier des techniques d'analyse inoffensives et peu impactante relevant du contrôle non destructif (CND) et facilement déployable sur le terrain. Nous démontrerons dans les chapitres qui suivent qu'il est possible de relever ce défi technologique.

Cette section de chapitre nous permettra dans un premier temps de présenter notre objet d'étude puis de faire un tour d'horizon des grandes techniques de CND ; nous évoquerons les atouts et les insuffisances de chacune d'entre elles pour notre sujet d'étude, et enfin nous introduirons notre technique de travail, la thermographie infrarouge stimulée, que nous présenterons et décrirons.

[1] **Jean Taralon** (1909~1996) : Spécialiste du vitrail ancien, auteur de nombreux ouvrages sur les peintures murales, l'architecture, la sculpture et l'orfèvrerie. Inspecteur général, il crée le Laboratoire de Recherche sur les Monuments Historiques en 1970. Il en fut le directeur jusqu'en 1982.

2.1. Fresques et peinture murales

Figure 2 : Fresques de Pompéi

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes principalement intéressés aux **peintures murales** en général et aux **fresques** en particulier. Les techniques de peinture murale sont nombreuses et remontent aux époques les plus reculé s de l'histoire humaine. De l'Égypte antique à l'é oque romane ou à la Renaissance, les peintures murales sont présentes dans de nombreuses cultures humaines, sur tous les continents et nous renseignent sur une époque, une population humaine et un contexte historique et technologique.

2.1.1. Origines des peintures murales

L'art qui consiste à peindre une paroi (art pariétal) est trè ancien et remonte à l'origine de l'Humanité. Les peintures parié ales les plus anciennes remontent à la pré istoire (17 000 ans pour les grottes de Lascaux). La fixation des pigments sur la paroi des grottes, le plus souvent à base de noir de charbon, mais aussi d'oxydes de fer, d'ocre pour le rouge, d'oxyde de manganèse, sur des durées de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'années a été rendue possible grâce à la formation en surface d'une couche translucide de carbonate de calcium permettant d'emprisonner les pigments dépo é (carbonatation). Ce phénomène de carbonatation (voir page 5) de la surface a pour effet de fixer les pigments, de maintenir leur cohésion et de garantir leur intégrité chimique à l'abri de l'air. Ce phéno èn est le facteur dé erminant permettant d'expliquer la stabilité au cours du temps de ces représentations anciennes.

Figure 3 : Peinture rupestre (Grotte de Lascaux)

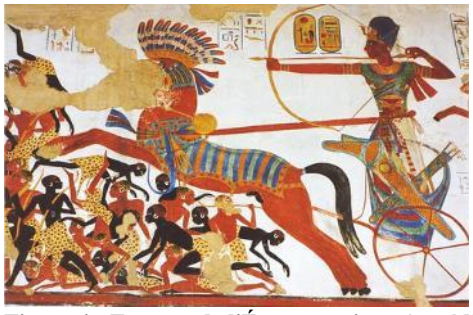


Figure 4 : Fresque de l'Égypte antique (expédition de Ramsès II en Nubie)

L'invention au Proche-Orient et en Égypte des fours à chaux a permis de reproduire ce phénomène de carbonatation de façon artificielle et donna naissance à l'art de la fresque au IIe millénaire avant J.C (présente en Asie, Égypte et en Crète). La fresque connaitra à partir de là un essor dans tout le monde méditerranéen.

En Europe, au Moyen Âge, l'art roman reprendra la tradition antique de la fresque en décorant de peintures les murs des bâtiments massifs, afin de compenser l'absence d'ouverture sur l'extérieur des constructions de ces époques et matérialiser la vocation spirituelle des lieux de culte par la représentation de scènes bibliques dans les églises et chapelles. L'art roman atteindra son apogée aux alentours du XIe et XIIe siècle. L'art gothique laissera moins de place aux peintures murales avec les nouvelles techniques architecturales (ogive), ce qui aura pour effet de privilégier les grandes baies vitrées et permettra l'essor d'un nouveau genre décoratif tourné vers l'illumination et la recherche spatiale : le vitrail. Plus tard, la Renaissance verra le renouveau de la peinture murale suscité par un attrait pour l'antiquité gréco-latine, de nombreux châteaux et églises se verront ornés de grands décors. L'intérêt pour ce style artistique ne se démentira pas tout au long des XIXe et XXe siècles, différentes techniques verront le jour avec l'invention de nouveaux types de colorants synthétiques issus de l'industrie chimique naissante (résines vinyliques, acryliques).

2.1.2. Principe de la peinture murale

Classiquement les peintures murales se décomposent en deux grandes familles : la famille des fresques (technique *a fresco*) et celle des techniques à sec (dépôt sur enduit sec de pigments mélangés à un liant). Les fresques sont exécutées *a fresco* c'est-à-dire à la fraiche, le dépôt des pigments mélangés à de l'eau s'effectue sur un enduit frais à base de chaux, les pigments diffusent dans le liant, la cohésion et le maintien des pigments a lieu grâce à une réaction chimique appelée carbonatation.

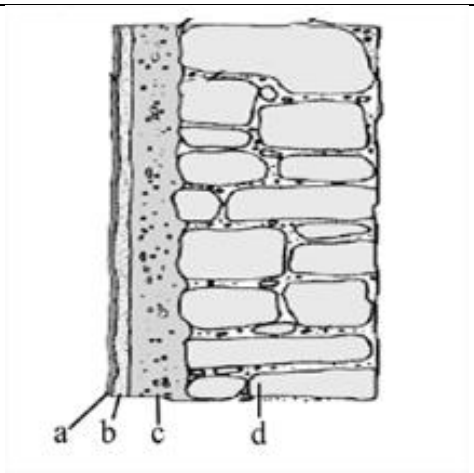


Figure 5 : Coupe transversale de la structure typique d'une fresque (a-Couche picturale, b-Intonaco, c-Arriccio, d-Mur)

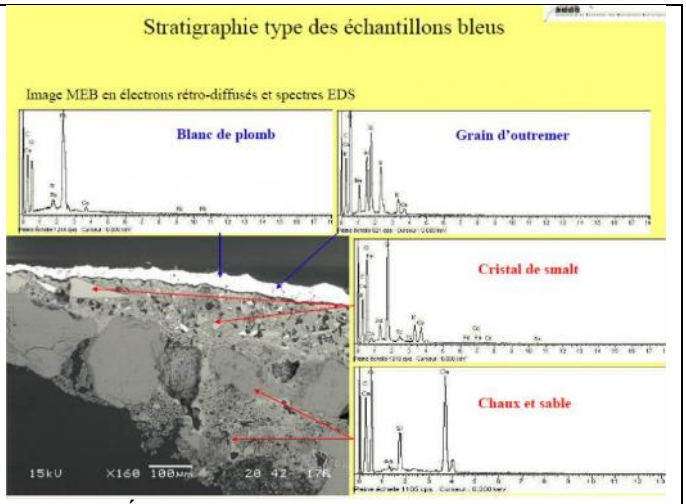


Figure 6 : Étude stratigraphique sur pigment bleu effectuée au microscope à balayage électronique – Abbaye de Chaalis – LRMH.

La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux de l'enduit frais (hydroxyde de calcium basique $Ca(OH)_2$) et le dioxyde de carbone acide de l'air (CO_2) pour former de la calcite ($CaCO_3$) – appelé aussi *calcin* – et de l'eau : $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$

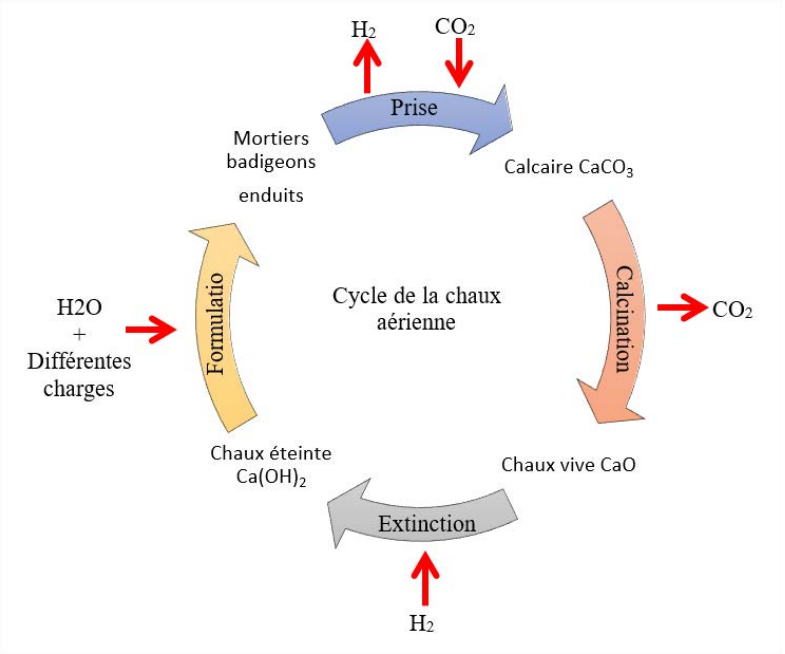


Figure 7 : Cycle de la chaux aérienne

La qualité et la pérennité de la fresque dépendront en grande partie de la qualité de cette réaction chimique qui va lier la couche picturale à l'enduit (intonaco).

On peut donc ré umer l'inté êt de la technique à la fresque à ces deux caracté istiques :

- ◊ Les pigments font corps chimiquement et physiquement avec le support (enduit), l'absence d'interfaces ré uit les possibilités 'activation d'un processus alté atif.
- ◊ La couche picturale jouit d'une grande stabilité chimique en raison de la carbonatation.

2.1.3. Types de peintures murales

La technique à la fresque n'est qu'un cas particulier de peinture murale. Lorsque le pigment est mé angé à un liant organique (colle d'os, œuf, caséine) ou artificiel (acrylique, etc.) est qu'il est dépo é sur un enduit sec, on parle alors de technique à sec. L'identification de la technique picturale in situ né essite souvent le recours à un œil expert qui par l'observation minutieuse des surfaces (repérage des *giornates* et *pontates*[2]) permettra de différentier les peintures murales des fresques, une étude stratigraphique effectué en laboratoire peut comple er ou confirmer le diagnostic par l'identification de diffé entes couches composant la peinture, , nous verrons par la suite au chapitre V qu'il est possible d'envisager d'autres possibilités pour caractériser le type de technique picturale.

[2] *Giornate* et *pontate* : Emplacements caractéristiques permettant de repérer les zones à fresques (voir définition dans le lexique EwaGlos [1]).

Tableau 1 : Les principales techniques de la peinture murale

	Technique	Enduit	Principe
Fresque	Fresque pure	Enduit frais à base de chaux $Ca(OH)_2$	Carbonatation avec pigments mélangés à l'eau
	Fresque à chaux		Carbonatation avec pigments mélangés à l'eau de chaux
Technique à sec	Peinture à la chaux	Chaux	Pigments mélangés à un liant (Lait de chaux, application sur enduit sec mouillé).
	Détrempe	Chaux, plâtre	Pigments mélangés à un liant (produits organiques en émulsion : colle, œuf, caséine…).
	Huile		Pigments mélangés à un liant (huile de lin, d'œillette, de noix…).

Tiré de Stefanaggi, *« Les techniques de la peinture murale »* [2]

Pour plus de précisions sur les peintures murales, leur histoire et les techniques de conservation se reporter au rapport de **M. Stefanaggi**, *Les techniques de la peinture murale* [2] et à l'ouvrage de **Geneviève Reille-Taillefert** (2010), *Conservation-restauration des peintures murales: De l'Antiquité à nos jours* [3].

2.2. Le contrôle non destructif

Les méthodes de CND sont nombreuses, de nombreux ouvrages spécialisés existent sur le sujet, sans vouloir être exhaustif on peut se reporter aux articles des *Techniques de l'ingénieur* de **Cherfaoui** et **Dumont-Fillon** [4], [5].

Les méthodes de contrôle non destructif exploitent des phénomènes de nature physique variés. Ces phénomènes peuvent être de nature **mécanique** tels que les méthodes exploitant des phénomènes vibratoires comme les ondes acoustiques (inspection ultrasonore) ou **électromagnétiques** (courants de Foucault par exemple) mais aussi **optiques**, **thermiques,** etc.

Le contrôle non destructif permet l'inspection d'un dispositif ou d'un matériau en le sollicitant par un signal (de façon active au moyen d'un transitoire) ou de façon passive (observation en régime permanent ou établi), sans transformation ou intrusion pouvant l'affecter de façon irréversible.

Parmi les méthodes de CND au service de l'art on peut citer l'**auscultation ultrasonique** qui nécessite toutefois un contact avec l'objet analysé, la **vibrometrie laser** [6], l'**interférométrie holographique** [7]–[10] , la **thermographie infrarouge** [11]–[13]**,** plus récemment l'utilisation des **Térahertz** [14]–[17] ou encore la **photographie visible et sous ultraviolets** (exploite la fluorescence de certains composés minéraux et de la plupart des matériaux organiques sous UV), la **réflectomètre infrarouge** (très utilisée dans l'étude des peintures de chevalet), les **rayons X** (destructifs en matière de fluorescence UV), les **ions** (accélérateur de particules *Aglaé, Musée du Louvre-France*). L'utilisation des ondes électromagnétiques pour ausculter les objets du patrimoine est très bien décrite dans la publication de **K. Janssens, J. Dik et al :** « *Photon-based techniques for non-destructive subsurface analysis of painted cultural heritage »* (2010) [18], on peut aussi se reporter à l'ouvrage très complet de

Creagh et Bradley (2000) « *Radiation in Art and Archeometry* » [19] qui recense la majorité des techniques utilisées dans l'analyse des œuvres d'art et en archéologie.

Certaines techniques de CND peuvent combiner différentes méthodes comme une sollicitation mécanique ou électromagnétique et une observation des effets thermiques induits [20], [21].

Dans tous les cas le choix de la méthode d'analyse (la stratégie ?) doit tenir compte de la nature de l'œuvre étudiée et du type de défaut recherché, cela vaut pour la thermographie IR comme pour toutes les autres techniques de CND.

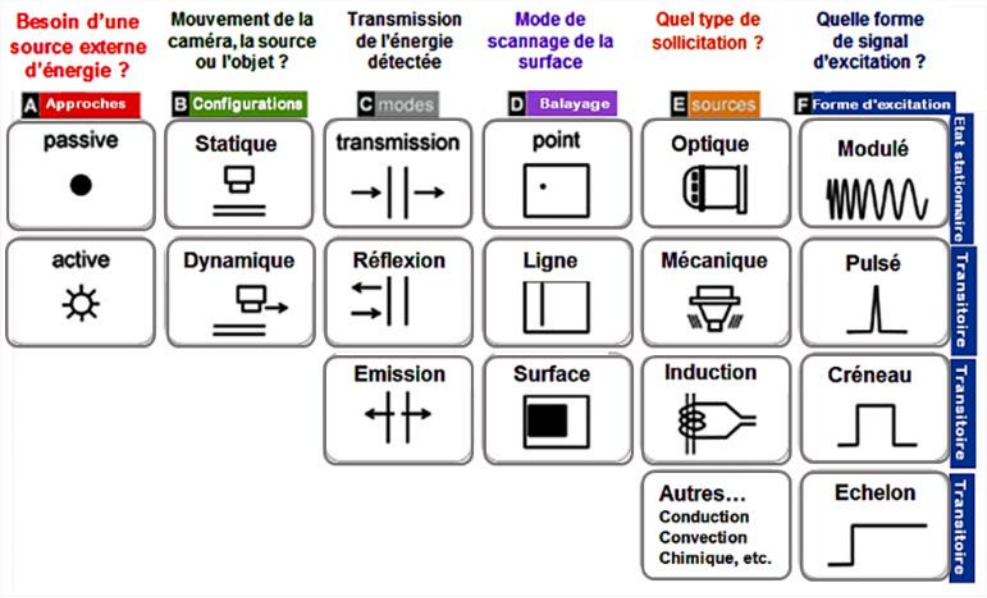


Figure 8 : Tableau synthétique des différents types de stratégie en matière de CND

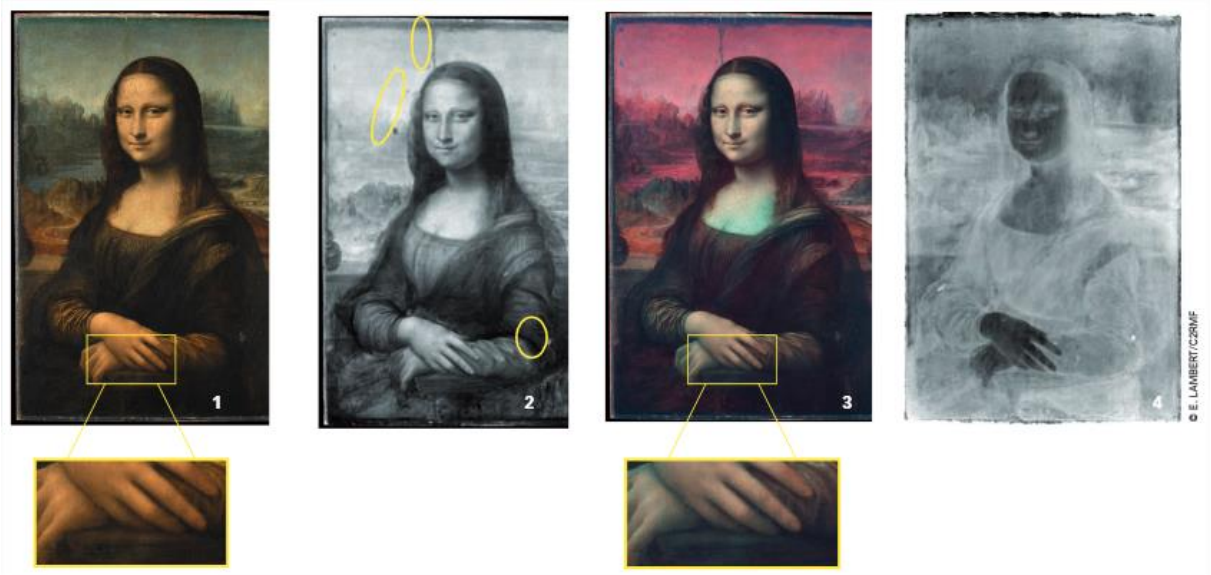


Figure 9 : La Joconde (Léonard de Vinci, Musée du Louvre Paris), vue dans le visible (1), sous UV (2), en réflectomètre IR (3) et aux rayons X (4)

Tableau 2 : Les techniques de CND dans le domaine du patrimoine (source C2RMF)

Techniques CND appliquées à l'art.	Source d'excitation	Détecteur	Principe	Type d'information fournie.	Précision, champs d'analyse, sensibilité.	Intérêt pour le CND art.
Ultrasons	Transducteur : éléments piézo-électriques émettant entre 500 kHz et 100 MHz.	Palpeur	Une onde acoustique (mécanique) est émise dans le matériau, le capteur détecte et analyse les échos provoqués par les défauts et les bords.	Permets de détecter les fissures et les délaminages.	Permets d'analyser de petites zones autour du capteur, bonne sensibilité.	Peu adapté pour les objets fragiles, nécessite un contact physique, l'utilisation d'un liquide de couplage acoustique peut être problématique (possibilité de s'en affranchir ➔ ultrasons laser), les vibrations peuvent aggraver ou provoquer des altérations mécaniques. L'interprétation des résultats est difficile.
Vibrometrie laser	Laser	Interféromètre	Un laser excite la surface de l'objet à mesurer à l'aide d'un signal périodique de fréquence connue, la variation de position de la surface a pour effet de produire un décalage en fréquence du signal réfléchi (effet Doppler). Cette variation de fréquence est évaluée avec un interféromètre	Détection de deplacages et délaminages.	Précis, champ limité.	Pas de contact physique, pas de liquide de couplage, mais risqué pour les matériaux fragiles.
Vibrothermographie	Mécanique : transducteur à ultrasons.	Caméra IR	Un transducteur au contact de la pièce entraîne la propagation d'ondes acoustiques au sein du matériau. En présence d'un ces ondes provoquent un mouvement microscopique de la matière, et donc un échauffement local repérable avec une caméra IR.	Repérage de fissures, délaminages.	Permet d'analyser les matériaux difficiles à échauffer comme les métaux, composites, organiques du moment que son coefficient d'atténuation est assez faible dans les fréquences ultrasonores. Large zone d'analyse.	Étends le spectre des matériaux analysables. Peut-être problématique sur des œuvres ou des matériaux fragiles. .
Interférométrie holographique / Shearographie	Lampes, haut-parleur, etc.	-Plaque holographique -Caméra CCD		-Détection de délaminages, fissure et porosités.	Large champ. Grande sensibilité.	-Important, mais très sensible aux conditions expérimentales (très grande sensibilité aux vibrations surtout pour l'holographie). - Interprétation des données peu aisée.
Thermographie infrarouge	Halogène, sources IR, sources thermiques variées, bobine d'induction, ultrasons…	Caméra thermique LW	Le matériau est chauffé, la caméra capte l'émission IR lors du refroidissement.	-Détection de délaminages, fissure et porosités. -Détection d'infiltration de sels hygroscopiques dans les peintures murales.	Large. Grande sensibilité à condition de maitriser l'influence des effets optiques et l'homogénéité de dépôt d'énergie.	Important, permets d'explorer les couches profondes.
Réflectographie/metrie IR		Caméra IR travaillant dans la bande VSW (voir 3.2 p19).	Les IR traversent les couches de vernis et certains glacis. Voir Creagh et Bradley [19, Chap. 3]	-Authentification. –Repentirs et repeints, élaboration du dessin..	Large champ	Important, limité à la partie superficielle.

Photographie IR		Appareil photo défiltré puis pose d'un filtre pour couper le visible (< à 800 nm)	-en réflexion entre 800 et 1000 nm	-Reconnaissance des pigments. -Détection de dessin sous-jacent.	Large champ	Important, mais détection superficielle.
Térahertz, scanner térahertz 3D.	Laser à cascade quantique, nano-transistors ou diodes Gunn.	Diode mélangeuse, maser ou bolomètres	Les rayonnements térahertz ont un fort pouvoir pénétrant, ils permettent potentiellement de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs. Voir Labaune [17]	-permets de voir à l'intérieur d'objets en térahertz 3D. -Lecture de graffitis recouverts. -Lecture de manuscrits. -Stratigraphie d'une peinture.	Variable selon les techniques.	Intérêt important, mais encore en développement.
Photographie visible	Flash	Film argentique ou capteur CCD	-En lumière rasante : L'œuvre est éclairée par un faisceau formant un angle de 15° avec la surface. -Macrophotographie	En lumière rasante : État de surface (soulèvements, cloques, craquelures), déformation du support, altérations (déchirures, rayures, enfoncements). -En macro : Technique artistique.	Variable	Important, précision micrométrique.
Photographie UV	Tubes fluorescents «lumière noire» émettant des UV ainsi qu'un minimum de lumière visible dans les bleus	Appareil photo	L'analyse peut s'intéresser : - aux UV réfléchis - à la fluorescence dans le visible. Voir Creagh et Bradley [19, Chap. 4]	-En réflexion : identification de certains pigments. -En fluorescence : analyse des vernis, localisation des restaurations antérieures, détection des repeints, identification de certains pigments, qualité et épaisseur vernis.	Large champ	Très intéressant en particulier pour les peintures au chevalet. Les rayons ultraviolets doivent être utilisés avec précaution, ils peuvent altérer de manière irréversible la nature chimique des pigments de dessins, estampes, documents d'archives et de bibliothèques…
Rayons X Tomographie	Tube à rayons X	Plaque photographique ou capteur CCD.	Analyse en transmission.	-permet de mieux comprendre la technique de fabrication, d'assemblage. -Permet de mieux connaitre l'état de conservation et de mettre en évidence les restaurations. -Permet de faire des découvertes intempestives. -Détection de repeints et repentirs. -La tomographie permet la reconstruction 3D de l'objet.	Large ou restreint. La qualité du contraste dépend des matériaux utilisés. L'analyse de peinture à base de plomb donne de bons résultats ce qui n'est pas le cas des peintures à l'acrylique.	-Intérêt élevé, mais difficile à mettre en œuvre. -Pas adapté pour les peintures murales, car l'arrière n'est pas accessible. -Détruit la fluorescence UV. -Nécessite des précautions en termes de sécurité.
Ions	Accélérateur de particules, exemple au Louvre avec AGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire)		L'œuvre est bombardée par un faisceau d'ions (noyaux H^+ ou He^+)	Composition chimique via la méthode PIXE (*particle induced X-ray emission*). Procédés de fabrication.		Voir [22], [23]
LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)	Laser	Spectromètre	Un tir laser bref et localisé sur le matériau vaporise sous la forme d'un plasma le matériau à analyser. L'analyse des éléments chimiques se fait par spectroscopie. Voir V. Detalle, Q. Glorieux 2007 [24]	Composition chimique	Ponctuel	Précis, mais destructif localement.

Les méthodes de CND sont comme nous venons de la voir, très nombreuses. Pour les besoins de notre étude, les avantages de la **thermographie infrarouge stimulée** s'imposaient d'eux-mêmes :

Les avantages de la thermographie en matiè e de contrôle pour les œuvres d'art (fragiles par nature) sont é idents. Parmi les nombreux avantages qu'on peut en tirer, on citera :

- ◊ La possibilité de faire des mesures non destructives ce qui est un impératif en matière de patrimoine.
- ◊ La possibilité de faire des mesures à distance, sans contact avec l'objet ét dié (aspect non intrusif).
- ◊ La possibilité de faire de la quantification (mesures) ce que permet la caractérisation des objets étudiés.
- ◊ La possibilité de balayer des champs larges et d'avoir ainsi une vision globale d'une scène ou d'une zone d'inté êt

En outre on peut ajouter :

- ◊ L'obtention d'images facilement interpréta les.
- ◊ La possibilité de visualiser des instantanés ou des images en temps réel (possibilité de monitoring).
- ◊ La possibilité de visualiser l'aspect dynamique d'un changement à l'aide d'un enregistrement.

En **thermographie infrarouge stimulée**, l'objet é udié est sollicité thermiquement et sa rép nse thermique est observée. Cette sollicitation doit être limitée dans le temps et en puissance afin d'être réversible.

Les plus anciennes mentions d'un contrôle non destructif au moyen d'un transitoire thermique a été décrite par **W.S. Beller** en 1965 [25], elle concernait l'inspection des missiles *Polaris*, les travaux
10 de **F. Alzofon** sur le contrôle des moteurs de fusées [26] découlent du mê e type d'approche. Notons que tous ces usages étaient à l'origine militaires avant d'ê re repris par des chercheurs en gén e civil à partir du milieu des années 60 et au début des années 70 (**Green, D.R** [27] en 1968, **Merhib et Taylor** en 1972 [28]).

C'est à partir des anné s 70 que ces techniques de CND ont é é utilisé s pour l'inspection des biens culturels.

3. La thermographie infrarouge stimulée.

Lorsque les premières caméras thermiques commerciales sont apparues à la fin des années 60 (commercialisés en 1968 par la société suédoise AGA/Bofors), les possibilités de la thermographie en matiè e de contrôle et de suivi ont suscité l'inté ê des industriels. L'inté êt de la thermographie s'est rapidement ré andu à des domaines varié tels que la sé urité ou la méd cine, cet engouement n'a pas laissé indifférents les spécialistes de la conservation des biens culturels. Depuis une vingtaine d'anné s, des recherches sont menées dans le domaine de la détection des défauts telles que les fissures et les déplacages dans les peintures murales et fresques, on peut citer par exemple les travaux de **Grinzato** [11], sur l'analyse des dép acages dans les fresques.

La thermographie consiste à capter l'é ission infrarouge des corps à l'aide d'une camé a thermique et à en faire une image interprétable, appelée thermogramme. Ce thermogramme est une visualisation en fausses couleurs des variations spatiales de luminances corrigées (voir plus bas). Le ré ultat obtenu est donc une carte de l'é ission thermique à un instant donné ou sur un intervalle de temps, ce qui permet de dérouler l'é olution d'un phé omèn thermique.

La **thermographie infrarouge <u>stimulée</u>** va beaucoup plus loin, elle soumet le matériau analysé à une contrainte physique, le plus souvent thermique afin de le forcer, en quelque sorte, à réagir, ce qui permet d'obtenir une information plus riche sur la nature de ce matériau.

Avant la thermographie, les mesures de flux infrarouge se faisaient à l'aide de capteurs mono élément appelé aussi radiomètre.

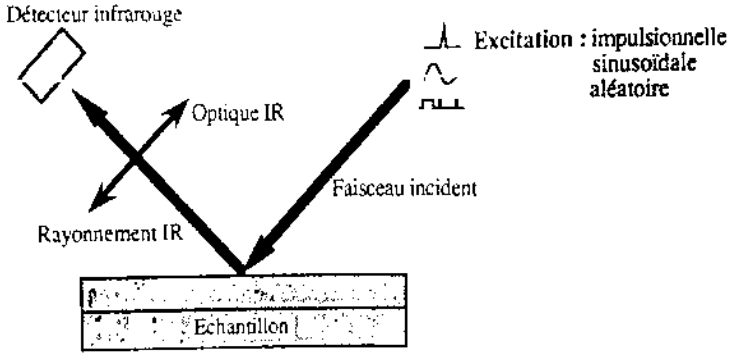
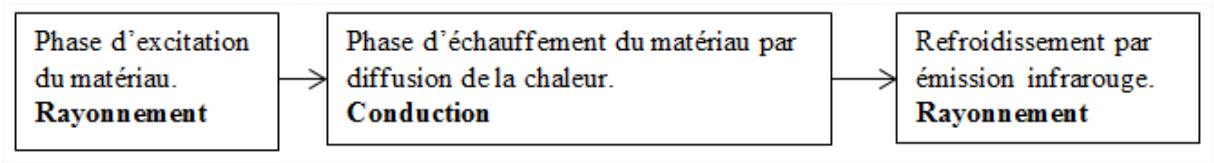


Figure 10 : Principe de la radiométrie infrarouge stimulée

C'est à partir de 1942 que la première pellicule sensible à l'infrarouge et produisant des photos en « fausses couleurs » est brevetée par la compagnie *Eastman Kodak*. Depuis les détecteurs ont considérablement évolué.

3.1. Rappel général sur les lois du rayonnement thermique et de la conduction

La thermographie infrarouge stimulée consiste à exciter thermiquement un objet et à observer sa réponse en température en analysant son rayonnement infrarouge. Nous pouvons décomposer les phénomènes physiques en jeu de la sorte :



3.1.1. Le rayonnement infrarouge

Figure 11 : William Herschel (1738~1822), compositeur et astronome, découvreur des infrarouges

Les travaux présenté dans cette thèse reposent tous sur l'analyse de l'émission infrarouge de corps soumis à une stimulation thermique. L'émission infrarouge a été mise en évidence au XIXe par **William Herschel** (1800), ces rayons sont associés à l'émission de la chaleur sous forme de rayonnement, mais il faudra attendre la compréhension de la nature des ondes électromagnétiques et de ses lois par Maxwell puis les travaux de Planck, à l'origine de la Mécanique quantique, et ceux d'Einstein (Effet photoélectrique) pour comprendre leur nature ondulatoire et corpusculaire (photons).

Les infrarouges se situent sur une vaste étendue spectrale allant du rayonnement visible aux micro-ondes (entre $\lambda \approx 0{,}8$ µm et 3 mm), à l'extrémité de ce spectre nous trouvons une bande particulière de l'infrarouge lointain située entre $\lambda \approx 1$ mm et $\lambda \approx 3$ mm appelé aussi bande *Terahertz*, connue aussi sous l'appellation de *Rayon T*, actuellement au centre de nombreuses recherches, cet aspect sera abordé dans le dernier chapitre consacré aux ouvertures.

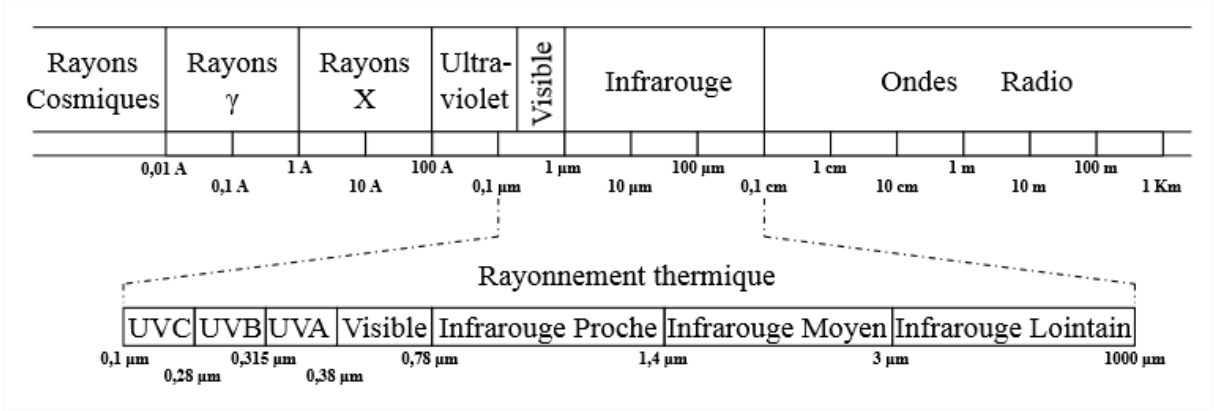


Figure 12 : Spectre électromagnétique

La **norme ISO 20473:2007** découpe l'infrarouge en 3 bandes, le proche infrarouge (PIR ou NIR pour Near InfraRed) de 0.78 à 3 µm, l'infrarouge moyen (MIR) de 3 à 50 µm et enfin l'infrarouge lointain (LIR ou FIR pour Far InfraRed) de 50 µm à 5 mm. L'essentiel du travail présenté dans ce mémoire de thèse a été effectué à l'aide de caméras *Long wave* à bolomètres travaillant entre 8 et 12 µm, ce choix technologique des constructeurs s'explique par la présence de plusieurs bandes d'absorption atmosphérique (H_2O, CO_2), mais aussi par la gamme de rayonnement des objets à température ambiante – centrée sur 10 µm. Notre choix s'explique aussi par des considérations en terme de coût.

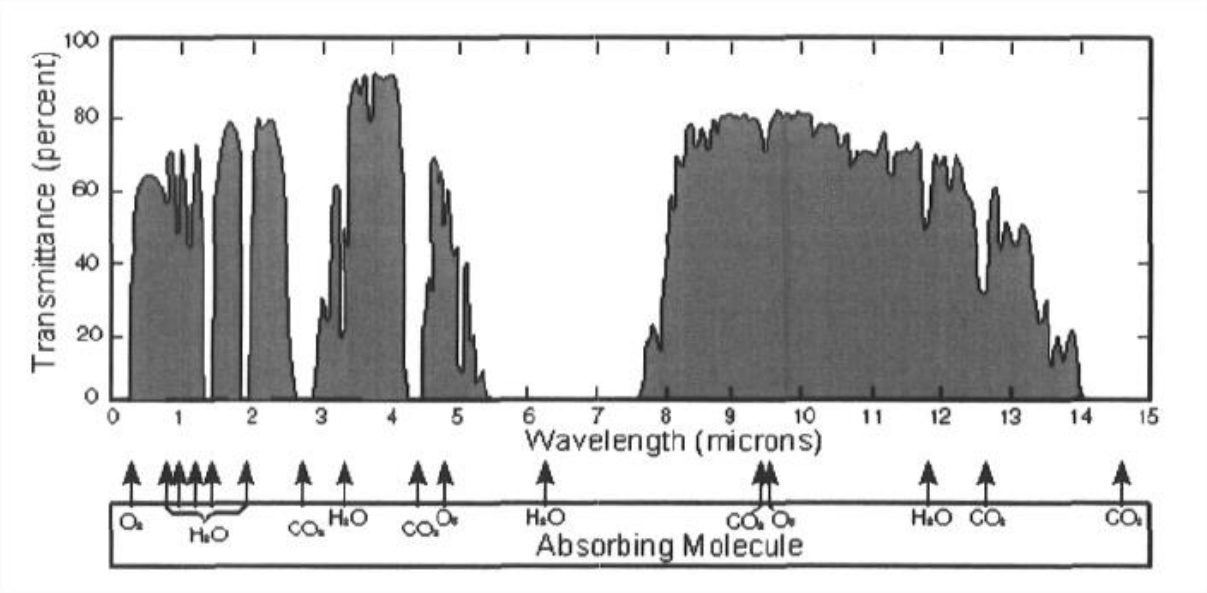


Figure 13 : Spectre de transmission de l'atmosphère

3.1.2. Lois du rayonnement

Le rayonnement est l'énergie d'un champ électromagnétique se propageant dans un milieu (matière ou vide) de proche en proche. Dans cet exposé nous nous intéresserons au rayonnement thermique. Ce rayonnement constitue avec la convection, la conduction et les changements d'état l'un des quatre modes du transfert thermique. C'est le seul mode de transfert de la chaleur parmi les quatre connus ne nécessitant pas de support matériel à sa propagation. Constitué de photons d'énergie $E = \hbar \nu$ (avec E en Joules, $\hbar$ la Constante de Planck et ν la fréquence de la radiation en Hz) et capable de se propager dans le vide à la vitesse de la lumière, il peut interagir avec la matière en étant **réfléchi**, **absorbé** ou **transmis** par elle. C'est d'ailleurs dans la matière que se trouve l'origine de cette émission, plus précisément dans les transitions électroniques s'opérant en son sein.

Il faut savoir que le rayonnement thermique est un cas particulier de rayonnement provenant de la matière lorsque ses états d'énergie prérentent une distribution de Maxwell-Boltzmann, cet état est appelé *Équilibre thermodynamique local* (ETL), c'est bien entendu ce rayonnement – le rayonnement thermique – qui intéresse la thermographie infrarouge.

3.1.2.1. Rappels

Flux énergétique $\vec{\Phi}$ [W] : Toute surface plus chaude que son environnement rayonne vers celui-ci de l'énergie sous la forme d'un flux thermique. Ce flux est la puissance rayonnée par un élément de surface $\overrightarrow{dS} = \vec{n}.dS$ ($\vec{n}$ vecteur unité normal à l'élément de surface dS), dans toutes les directions de l'espace et dans toutes les longueurs d'onde. Nous verrons qu'il dépend de la température [K] du corps, de sa surface, mais aussi de sa nature.

Densité de flux φ ($W.m^{-2}$) : Flux énergétique par unité de surface $\varphi = \dfrac{d\Phi}{dS}$

Luminance énergétique : La luminance L_{Ox} d'une surface élémentaire dε dans la direction Ox est la densité de flux semblant provenir de $d\varepsilon_n$ (projeté de dε selon O_x), dans un cône élémentaire d'ouverture dΩ (voir Figure 14).

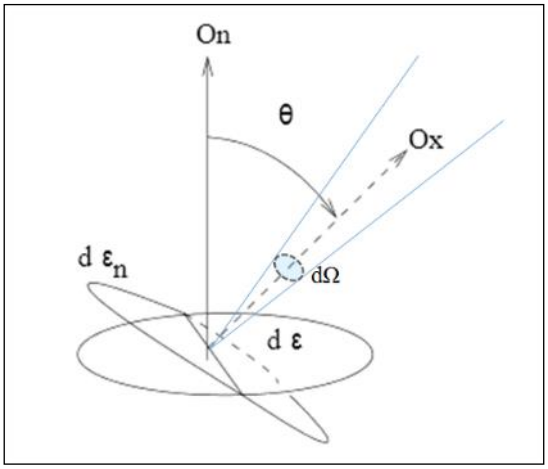


Figure 14 : Flux dans la direction Ox

$$d\varepsilon_n = d\varepsilon.\cos\theta \tag{1.1}$$

$$L_{Ox} = \frac{d^2\Phi}{d\varepsilon.\cos\theta.d\Omega} \qquad [\mathrm{W.m^{-2}.Sr^{-1}}] \tag{1.2}$$

La luminance est une grandeur directionnelle comme nous venons de le voir, mais elle a aussi une dépendance spectrale. On définit ainsi la luminance monochromatique $L_{Ox,\lambda}$.

$$L_{Ox,\lambda} = \frac{d^3\Phi}{d\varepsilon.\cos\theta.d\Omega.d\lambda} \qquad [\mathrm{W.m^{-2}.Sr^{-1}.\mu m^{-1}}] \tag{1.3}$$

La luminance totale d'une surface S dans un espace s'obtient par intégration de $L_{Ox,\lambda}$ sur l'espace considéré, sur l'étendue spectrale étudiée et sur la surface S.
Lorsqu'on intègre l'expression (1.3) sur un demi-espace, on parle alors d'**émittance** (on parle aussi d'émittance) monochromatique, l'intégration sur la totalité du spectre de cette émittance monochromatique donne l'**émittance totale** [$\mathrm{W.m^{-2}}$].

Corps noir : Lorsque les physiciens du XIXe siècle ont découvert le rayonnement thermique, ils ont observé deux points essentiels :

- ◊ Le rayonnement dépend de la température des corps et il varie en T^4 de celle-ci.
- ◊ Les corps à une température donnée ne rayonnent pas selon la même intensité

Ces observations les ont naturellement poussés à s'interroger sur l'existence d'un corps qui à une température donnée émettrait le maximum d'énergie possible autorisé par les lois de la thermodynamique. Cet objet théorisé dans un premier temps (1862) prit la forme concrète d'une cavité fermée opaque isotherme. Au sein de cette cavité fermée s'opèrent des échanges radiatifs permanents dans lesquels chaque fraction de la paroi rayonne vers toutes les autres fractions de parois et absorbe le rayonnement provenant des autres parties de cette paroi pour des raisons d'équilibre thermique et de conservation de l'énergie (**Loi de Kirchhoff**). Ces échanges de parois à parois s'équilibrent et leur intensité moyenne constitue le rayonnement du corps noir à cette température. Ce rayonnement est exclusivement thermique et ne dépend donc que de la température de la cavité et de sa longueur d'onde.

Les parois de la cavité rayonnante agissent ainsi tels un radiateur et un absorbeur parfait ! De telles cavités rayonnantes existent en laboratoire et servent d'étalon pour la calibration des instruments de mesure tels que les caméras thermiques et les pyromètres.

Loi de Planck : La relation fondamentale (distribution) entre la luminance monochromatique d'un corps noir pour une température donnée en fonction de la longueur d'onde est donnée par la loi de Planck :

$$L_0(\lambda,T)=\frac{C_1\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)-1} \qquad [\text{W.m}^{-2}.\text{Sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}] \qquad (1.4)$$

(Avec $C_1 \approx 3{,}74.10^8$ W.µm^4.m^{-2} et $C_2 \approx 1{,}44.10^4$ µm.K)

L'intégration sur le demi-espace de cette expression donne l'émittance spectrale du corps noir $M_\lambda^0(T)$ pour différentes températures, voir Figure 15 :

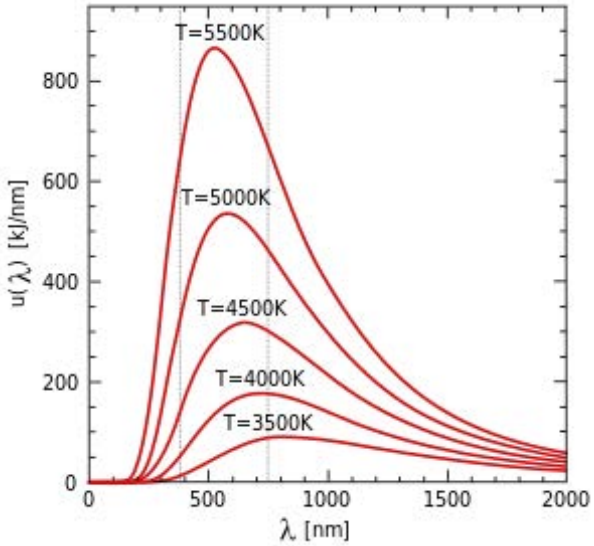


Figure 15 : Émittance spectrale du corps noir pour différentes températures

Sur la Figure 15 on peut remarquer les courbes ne se croisent jamais ; elles forment un faisceau de courbes qui augmentent en intensité et se décalent vers la gauche du spectre à mesure que la température T du corps noir augmente. On peut néanmoins observer que figure une courbe particulière notée « *lieu des maximas* » qui coupe le faisceau de courbes au sommet de chacune d'entre elles. Cette courbe permet de repérer la position sur le spectre de l'extrema d'émission λ_{max} pour chacune des températures. Cette relation a une expression très simple qui correspond à la première **Loi de Wien**, dite loi du déplacement : $\lambda_{max}T \approx 2898\mu m.K$. Cette relation nous permet d'écrire :

$$\lambda_{max} \approx \frac{2898}{T} \qquad (\text{Avec } \lambda_{max} \text{ en [µm] et T en [K]}) \qquad (1.5)$$

Cette relation permet de déterminer la longueur d'onde d'émission pour les objets que nous serons amenés à manipuler. Notre objectif étant de les chauffer le moins possible ; nous avons pour une température moyenne de 300 K, un pic d'émission autour de 10 µm ce qui correspond à la plage de sensibilité des caméras que nous utiliserons (entre 8 et 12 µm).

Loi de Stefan-Boltzmann : Cette loi exprime l'**émittance totale** du corps noir $M^0(T)$, l'expression (1.4) est intégrée sur le demi-espace et sur la totalité du spectre.

$$M^o(T)=\int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} L_0(\lambda,T).d\Omega.d\lambda=\sigma.T^4 \qquad [\text{W/m²}] \qquad (1.6)$$

(Avec **σ** la constante de **Stefan-Boltzmann**, **σ** ≈ 5,67.10^{-8} W m^{-2} K^{-4})

Cette émittance totale pour une température donnée est représentée par l'aire occupée par la courbe de Planck à cette température.

Émissivité : Les corps à une température donnée n'émettent qu'une fraction de l'énergie émise par un corps noir à la même température, l'émittance d'un corps est donc modulé par un facteur d'émission compris entre 0 et 1, noté ε et qu'on appelle l'émissivité, c'est une grandeur radiométrique sans dimension qui peut dépendre de la direction d'observation, de la longueur d'onde (auquel cas on parle d'émissivité spectrale directionnelle notée ε'_λ), mais aussi de la température, de l'aspect de la surface et bien entendu de la nature du corps. L'émissivité de référence du **corps noir** est normalisée à 1. Ainsi l'émittance d'un corps quelconque à la température T s'exprime par la relation suivante :

$$M = \varepsilon.\sigma.T^4 \qquad [W/m^2] \tag{1.7}$$

Il existe deux autres grandeurs radiométriques : la **transmissivité** τ et la **réflectivité** ρ, ces 2 grandeurs ont comme l'émissivité une dépendance spectrale et directionnelle, elles expriment la fraction du flux total transmis et réfléchi par un échantillon lorsque celui-ci frappe sa surface (voir Figure 16). La relation suivante qui découle de la conservation de l'énergie relie ces trois grandeurs radiométriques :

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \tag{1.8}$$

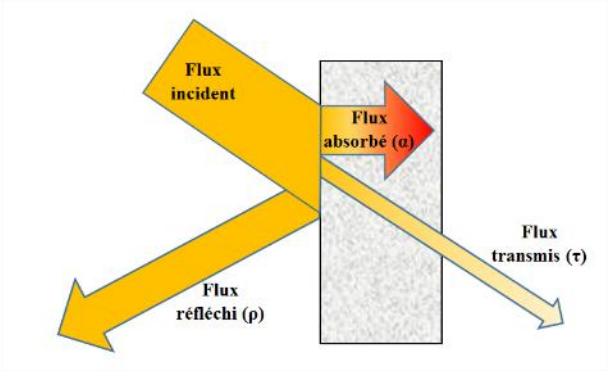


Figure 16 : Répartition de flux lors d'une interaction rayonnement/matière

L'**émissivité** d'un corps noir qu'elle soit spectrale directionnelle, spectrale, directionnelle ou totale est toujours égale à 1. La détermination de l'**émissivité** d'un matériau n'est pas toujours aisée, elle fait encore l'objet de nombreux travaux, on la détermine généralement par un rapport de flux consistant à comparer les luminances d'un corps noir et d'un matériau inconnu d'émittance M soumis à des températures identiques.

$$\varepsilon_{totale} = \frac{M(T)}{M^0(T)} \tag{1.9}$$

L'émissivité peut aussi se déduire de la réflectivité ρ d'un corps opaque (τ = 0) :

$$\varepsilon_{totale} = 1 - \rho_{totale} \tag{1.10}$$

Flux total d'un corps : Ces notions nous permettent d'écrire l'expression du flux total dans le demi-espace, d'une surface S, à la température T et d'émissivité ε vers un milieu à la température $T_{amb} < T$:

$$\Phi = \varepsilon_{totale}.S.\sigma.(T^4 - T_{amb}^4) \qquad [W] \tag{1.11}$$

La **loi de Kirchhoff** nous enseigne qu'à l'équilibre thermique l'émissivité spectrale directionnelle ε'_λ d'un corps est identique à son **absorptivité** spectrale directionnelle α'_λ, ce qui signifie qu'un corps pour être en équilibre thermique par rapport à son milieu doit absorber autant de celui-ci qu'il émet vers celui-ci dans une direction donnée et à une longueur d'onde donnée.
Ce point est particulièrement important et nous le verrons dans les prochains chapitres. Les variations d'émissivité et donc d'absorptivité influencent la quantité d'énergie absorbée et remise par le corps étudié. Lorsque ces variations sont trop importantes spatialement elles peuvent conduire à de grandes difficultés d'interprétation des résultats obtenus et mettre en cause la fiabilité des mesures effectuées par thermographie infrarouge. Il est donc important de ne pas négliger cet aspect et de veiller par différentes méthodes que nous décrirons à en limiter les effets.

3.1.3. La conduction thermique

La conduction thermique est le mode de transmission (de diffusion) de la chaleur au sein des matériaux opaques. Ce transport d'énergie a lieu lorsqu'il existe un gradient de température – voir **l'Équation de Fourier (1.12) –** au sein de ce milieu physique. L'énergie thermique fait vibrer les atomes constituant la matière et ces vibrations se propagent de proche en proche, sans déplacement de matière, dans le milieu matériel.

Ce mode de diffusion de la chaleur est régi par l'**Équation de la chaleur** – voir (1.14) ci-après**.** Lorsque nous chauffons un objet pour l'étudier, l'énergie rayonnante qui atteint sa surface peut être pour partie réfléchie, pour partie transmise dans le cas d'un corps semi-transparent et pour partie absorbée. Nous nous intéresserons dans ce travail de thèse au cas le plus fréquent d'un matériau opaque absorbant un flux radiatif à la suite d'une excitation. Cette énergie se transmet de la surface vers l'intérieur du corps par le phénomène de conduction, car la surface est plus chaude que l'intérieur du corps. Lorsque l'excitation cesse, le phénomène s'inverse : le corps est plus chaud à l'intérieur qu'à la surface et il se refroidit donc de l'intérieur vers la surface par conduction. Ensuite cette énergie est émise sous forme de rayonnement vers l'environnement et il est alors possible de la capter grâce à un dispositif de mesure pour en tirer de précieuses informations. Il est aussi possible d'étudier un objet en le refroidissant (moins fréquent, car problème de contrastes).

3.1.3.1. Rappels

Équation de Fourier : Cette équation gouverne toute la conduction, elle figure dans l'ouvrage *Théorie analytique de la chaleur* (1822) du physicien français **Joseph Fourier** (1768~1830) [29], elle met en relation le flux d'énergie transporté et le gradient de température entre deux sections de surface S dans le milieu. Ce flux est bien entendu proportionnel à la différence de température (gradient) entre les 2 sections. Il est proportionnel à la surface des sections que traverse perpendiculairement ce flux et il est dirigé de la section la plus chaude vers la section la plus froide, on le représente sous la forme vectorielle suivante :

$$\vec{\Phi} = -k.S.\overrightarrow{grad}(T) \qquad [\mathrm{W}] \qquad (1.12)$$

Avec k : **conductivité thermique** du matériau en [$W.m^{-1}.K^{-1}$] et S en [m^2].
Le signe (-) de l'expression (1.12) s'explique pour des raisons de convention : l'axe x de la Figure 17 qui indique la direction du transfert de chaleur et orienté en sens inverse de ce transfert (la chaleur va du chaud vers le froid alors que l'axe est dirigé vers les températures croissantes (de la section la plus froide (à T1) vers la section la plus chaude (T2)).

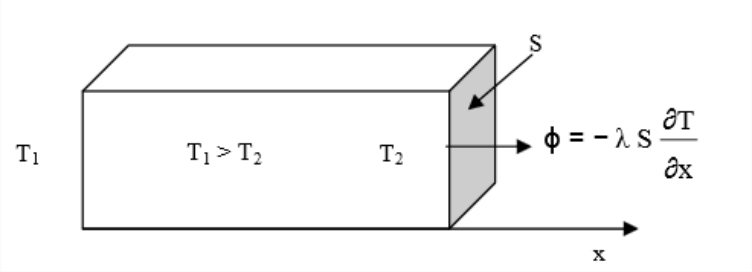


Figure 17 : Principe du transfert de chaleur conductif (source schéma Transferts thermiques, Jannot)

Équation de la chaleur : Pour calculer l'é hauffement d'un point au cours du temps en supposant le corps isotrope, il est nécessaire de proced r à un bilan d'én rgie à chaque instant au niveau d'un volume élémentaire entourant ce point, c'est-à-dire de prendre en compte toutes les contributions de flux provenant de toutes les directions (milieu environnant) et du point lui-même (source ou puits thermique) selon le principe suivant :

$$\Phi_{entrant} + \Phi_{crée} = \Phi_{émis} + \Phi_{stocké} \tag{1.13}$$

Pour ne pas alourdir inutilement ce bref récapitulatif, le lecteur est invité à prendre connaissance dans les ouvrages de référence tels que le ***Carslaw* et *Jaeger*** [30] ou l'***Ozisik*** [31], de la démonstration de l'éq ation de la chaleur :

$$\rho.C_p.\frac{\partial T}{\partial t} = k.\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^{\,2}} + q \tag{1.14}$$

Avec la masse volumique **ρ** [kg.m^{-3}] ; la conductivité thermique **k** [W.m^{-1}.K^{-1}] et la chaleur spécifique à pression constante $\mathbf{C_p}$ [J.kg^{-1}.K^{-1}] ; **n** : le nombre de dimensions spatiales et **q** : la puissance volumique interne de l'é é ent de volume en [W.m^{-3}] et **i** l'indice des i directions spatiales.

Cette équation se simplifie si on regroupe les termes k, ρ, C_p :

$$\Delta T - \frac{1}{a}\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{q}{\lambda} \tag{1.15}$$

ΔT repré ente l'opérateur *Laplacien*[3] du champ de température, le terme **a** désigne la diffusivité thermique $a = \dfrac{k}{\rho.C_p}$ [m²/s].

La solution aux problèmes de thermique que nous rencontrerons nous amènera à résoudre cette équ tion en tenant compte des conditions aux limites du problè e et de la gé mé rie de l'objet d'é ude.

La diffusivité thermique : Cette grandeur comme nous venons de le voir occupe une place très importante dans les é hanges par conduction, car elle intervient directement dans l'éq ation fondamentale de la conduction. La diffusivité thermique relie l'é olution spatiale du champ de

[3] **Laplacien** (se note ²ou Δ) : Il s'agit d'un opé ateur qui s'applique à des champs scalaires ou vectoriels. Se dé init comme la divergence du gradient d'une grandeur. Dans un repè e cartés en x,y,z lorsqu'il s'applique à un champ de température T(x,y,z) on a : $\Delta T = div(\overrightarrow{gradT}) = \dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, cette grandeur représente l'évolution spatiale du champ de tempé ature.

température représentée par le *Laplacien* de T à l'évolution temporelle de ce champ, elle établit ainsi la relation de causalité qui existe entre ces deux grandeurs. Elle est proportionnelle à la conductivité thermique **k** du matériau, c'est-à-dire de sa capacité à conduire la chaleur et inversement proportionnelle au produit $\boldsymbol{\rho.C_p}$ qui représente sa capacité à stocker la chaleur. Elle exprime la capacité d'un matériau à réagir à un changement de température, elle représente en quelque sorte la possibilité d'un corps à diffuser une perturbation thermique de manière plus ou moins efficace au cours du temps et dans l'espace. Nous verrons par la suite qu'il est essentiel de la mesurer correctement pour caractériser les matériaux que nous allons étudier, ainsi que leurs défauts.

L'effusivité thermique est une autre grandeur de la conduction que nous rencontrerons dans ce travail. Elle sera notée « b ». Cette grandeur thermophysique dépend des grandeurs de base suivantes : la conductivité thermique λ, la capacité thermique massique C_p et la masse volumique ρ du matériau et s'exprime par la relation suivante :

$$b = \sqrt{\lambda.\rho.C_p} \qquad [J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-½}] \tag{1.16}$$

Cette grandeur exprime l'aptitude d'un matériau à changer de température lorsqu'il est soumis à une perturbation thermique.

L'effusivité thermique est le paramètre qui rend compte de l'importance conjointe des deux phénomènes : la variation de température par stockage de chaleur et la variation de température par conduction, c'est cette grandeur qui détermine la capacité d'un corps à imposer sa température à un corps de température différente avec lequel il entre en contact, d'ailleurs cette température de contact ou température d'interface, dépend des effusivités thermiques respectives des deux matériaux (voir figure ci-dessous). La diffusion de la chaleur au sein du matériau dépendra de cette température de contact et de la diffusivité thermique du matériau. Ainsi l'effusivité thermique gouverne les premiers instants dans la mise en place d'un échange de chaleur transitoire entre deux matériaux ou milieux, nous verrons que ce point revêt son importance et l'intérêt que nous pouvons en tirer dans notre étude.

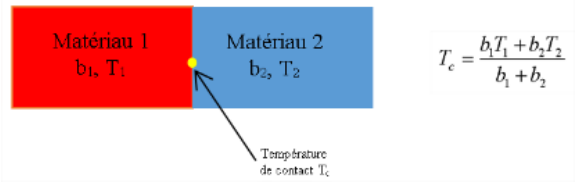


Figure 18 : Rôle de l'effusivité thermique lors d'un échange de chaleur

La diffusivité et l'effusivité thermique interviennent étroitement dans les problèmes de conduction. Leur relation apparait dans l'exemple de la résolution courante en conduction du **problème du mur plan soumis à une excitation flash** (voir annexe I, page 328). Ces relations seront régulièrement mentionnées dans cette thèse.

3.2. Aspects technologiques

Les caméras actuelles permettent de couvrir un large spectre de l'infrarouge moyen, certaines sont dites *Very Short wave* (VSW) elles sont sensible dans la plage 1 à 3 µm, d'autres appelées *Short wave* (SW) fonctionnent sur la plage 3 à 5,5 µm (appelée aussi bande II), la bande 8 à 12 µm – dite bande III – est quant à elle appelée *Long Wave* (LW). Ces choix ne découlent pas du hasard, ils s'expliquent par la nécessite de réduire l'influence de l'atmosphère qui comporte plusieurs bandes d'absorption dans l'infrarouge moyen (bande du CO_2, bande de la vapeur d'eau voir **Figure 13 : Spectre de transmission de l'atmosphère**, page 13). L'essentiel de nos manipulations a été effectué avec des caméras travaillant en bande III.

La caméra est dotée d'un détecteur sensible à la luminance (voir 3.1.2.1), c'est-à-dire à l'émission de photons d'origine thermique en provenance de la scène observé . Ces photons peuvent avoir des origines multiples :

◊ L'objet lui-même (émission propre) à la température T.

◊ L'environnement (à la tempé ature T_{env}) qui se reflète sur l'objet (y compris la camé a).

◊ La contribution atmosphérique sur le trajet optique (T_{atm}).

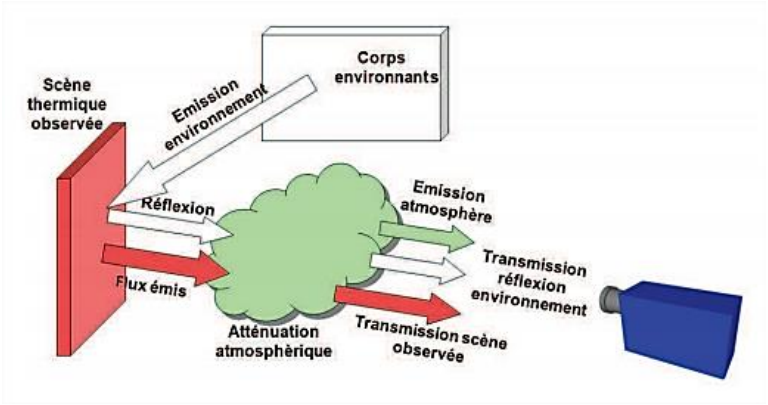


Figure 19 : Effets contributifs à une scène thermique (tiré de Monchau [32])

L'électronique de la camé a est conçu pour corriger l'influence de ces contributions parasites, mais il faut pour cela procéd r au ré lage de la camé a en donnant l'é issivité de l'objet analysé, la tempé ature de la piè e, l'humidité de l'air ambiant… Tous ces paramètres servent à résoudre l'**équation de la thermographie** et à déduire la carte des températures :

$$I_{mesuré}(T) = \tau.\varepsilon.I_0(T) + (1-\varepsilon).I_0(T_{env}) + (1-\tau).I_0(T_{atm}) \qquad (1.17)$$

Avec τ la transmissivité de l'atmosphère, ε l'é issivité de l'échantillon analysé et $I_0(T)$, $I_0(T_{env})$, $I_0(T_{atm})$ les thermo signaux respectifs de l'é hantillon, de l'environnement et de l'atmosphère.

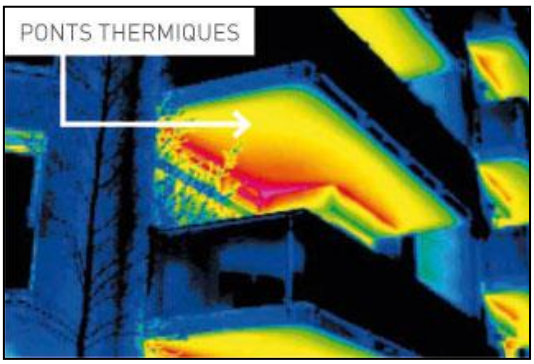


Figure 20 : Thermogramme mettant en évidence des ponts thermiques sur une façade d'immeuble (Source : http://www.spurgin.fr).

Les premiè es camé as étaient mono é é ent (capteur unique). L'image é ait formé grâce à un dispositif opto-mécanique de balayage composé d'un prisme tournant et d'un miroir oscillant formant les lignes et trames. Les camé as thermiques actuelles du commerce sont doté s d'un capteur (multi éléments) à lecture CCD ou CMOS. Il existe plusieurs technologies : les bolomètres, les capteurs pyroélectriques, les thermopiles, mais les plus répandus sont les bolomètres. Le deux types de détecteurs les plus répandus actuellement sont de type **bolométrique** ou à base de **jonctions** (détecteurs quantiques).

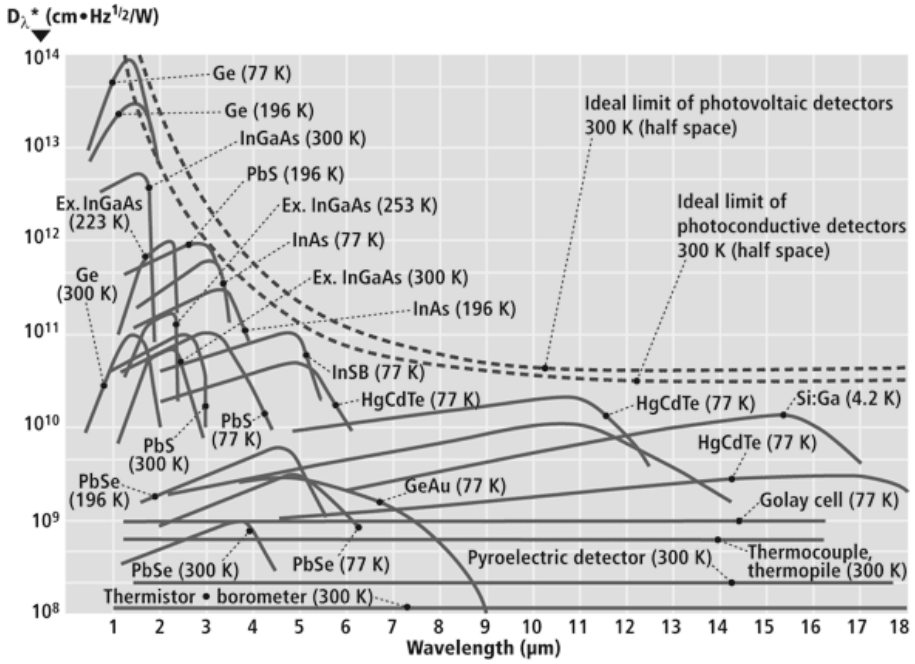


Figure 21 : Détectivité spectrale des différentes technologies de capteur (Source Hamamatsu)

3.2.1. Types de caméras thermiques

Les caméras à bolomètres non refroidies. Ces caméras sont équipées d'une matrice de détecteurs appelés « bolomètre » ; ce composant inventé au XIXe siècle par **Langley** à la propriété de s'échauffer lorsqu'il absorbe des radiations infrarouges ce qui a pour effet de modifier sa résistance électrique. Un dispositif électrique en association avec chaque détecteur permet de transformer cette variation de résistance en potentiel électrique. Les signaux électriques produits par les capteurs de la matrice sont ensuite traités par un circuit électronique qui générera une image. **Avantage** : le prix, la robustesse.
Inconvénient : temps de réponse plus lent, de l'ordre de la ms en raison de l'inertie thermique du capteur.

Les caméras refroidies ou à détecteur quantique : Ces caméras disposent d'un capteur refroidi (aux alentours de 77 K) par un moteur Stirling par exemple. L'absorption du rayonnement provoque des transitions électroniques de la bande de valence à la bande de conduction au sein du semi-conducteur composant le capteur, cette transition permet l'établissement d'un courant électrique. Il s'agit de la conversion photovoltaïque ou effet photo-électrique découvert par Einstein : lorsqu'un photon dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du semi-conducteur est absorbé, il crée une paire électron-trou (trou en bande de valence et électron en bande de conduction), l'énergie le photon a permis la « production » d'un électron libre susceptible de produire un courant électrique. Les photons d'énergie inférieure au gap optique ne sont pas absorbés, l'excédent d'énergie des photons plus énergétiques est perdu par désexcitation thermique. Le choix du semi-conducteur permet donc de déterminer le gap optique et donc de choisir la bande spectrale du capteur. **Avantage** : très grande sensibilité, temps de réponse très faible, de l'ordre de la nanoseconde.

Les caméras actuellement commercialisées à usage scientifique offrent toutes des résolutions thermiques (NETD[4]) inférieures à 100 mK voir à 50 mK, ces progrès en matière de sensibilité se heurtent à certaines limites technologiques comme la miniaturisation des capteurs qui améliore certes

[4] ***Noise Equivalent Température Différence (NETD)*** **:** Il s'agit de la plus petite différence de température détectable par le capteur, s'exprime en milliKelvin (mK).

la détectivité et la résolution spatiale (IFOV[5]), mais les rend plus sensibles au bruit thermique et aux effets dissipatifs (effet Joule) dans le cas des capteurs non refroidis.

Ces technologies présentent des avantages et des inconvénients dont la description dépasse le cadre de ce travail de thèse. Pour plus d'information, se reporter par exemple à l'article des Techniques de l'ingénieur *Thermographie - Technologies et applications* (**Pajani** & **Audaire**) [33] ou à l'article *Recent advances in the use of infrared thermography* de **Carosena Meola** and **Giovanni M. Carlomagno** [34] ou encore aux ouvrages suivants : *Infrared System Engineering* de **Richard D. Hudson** [35], Jr., *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* de **X. Maldague** [36]**.**

3.3. Principe du CND par thermographie infrarouge stimulée

Il existe deux types de thermographie IR, la **thermographie passive** et la **thermographie active ou stimulée**. La thermographie infrarouge stimulée consiste à exciter à l'aide d'un moyen de chauffage (lampe, laser…) l'objet à analyser afin de créer un transitoire qui améliore le contraste de détection (voir figures ci-dessous). Les cinétiques d'échauffement et de refroidissement diffèrent selon la nature des matériaux constituant l'objet ou en raison d'un défaut (fissure, lame d'air). Ces différences en montée de température et en refroidissement se traduisent par des points chauds aisément repérables sur les thermogrammes.

La **thermographie passive** est quant à elle est intéressante pour l'analyse d'objets qui émettent ou qui sont susceptibles d'émettre de la chaleur par exemple un réseau de canalisation d'eau chaude pour repérer des fuites, des cartes électroniques, des armoires électriques ou des bâtiments pour le repérage des puits thermiques (voir Figure 20).

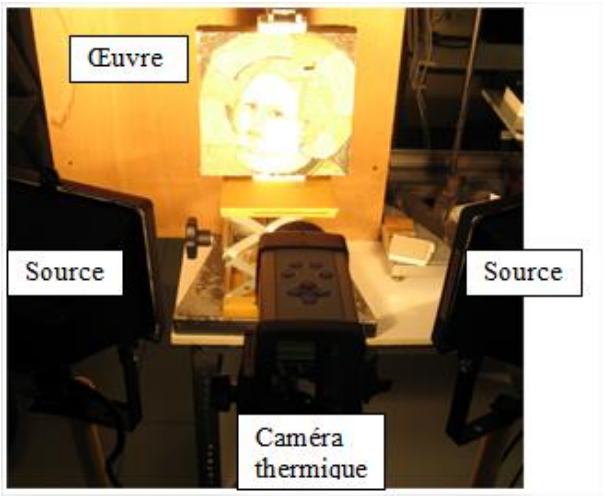


Figure 22 : Analyse d'une œuvre d'art au moyen de la thermographie infrarouge stimulée

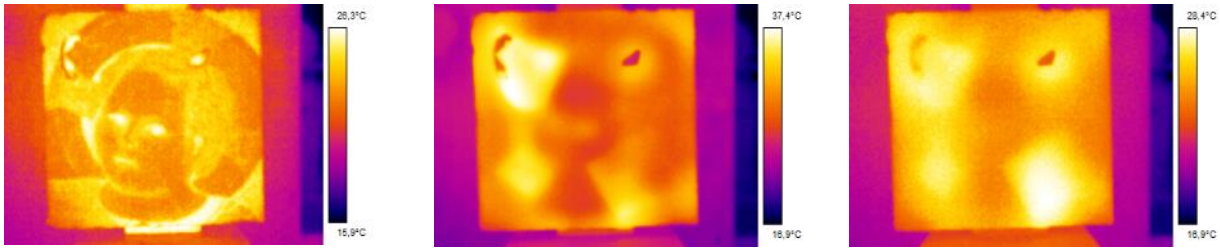


Figure 23 : Thermogrammes obtenus à différents instants avec mise en évidence de défauts

[5] ***Instantaneous Field Of View (IFOV)*** : Grandeur exprimée en milliradian (mrad) qui donne l'ouverture de champ observée par un pixel à une distance de référence.

4. Apports possibles de la thermographie IR stimulée à la conservation du patrimoine artistique.

Les peintures murales et plus largement les biens culturels sont exposés aux agressions de leur milieu. Avec le temps ces œuvres subissent les effets de cette exposition, ce qui se traduit par des altérations de natures diverses, visibles ou invisibles, qui peuvent évoluer dans le temps.

Les menaces qui pèsent sur le patrimoine peuvent avoir de nombreuses origines et devenir irréversibles si elles ne sont pas repérées et traitées à temps. Ces détériorations peuvent être d'origines mécaniques comme par exemple des **contraintes** ou des **vibrations** dans une structure de maçonnerie ou dans une charpente qui feront apparaitre des fissures et des décollements dans les peintures murales qu'elles supportent.

Les **variations de température** saisonnières ou alors des écarts de température trop importants liés au chauffage par exemple, peuvent menacer l'intégrité de peintures murales par des effets de dilatation différentielle.

La **lumière**, les **pollutions atmosphériques** dégradent les couches superficielles des œuvres et peuvent provoquer une atténuation des couleurs ou le recouvrement des pigments, on peut citer par exemple le travail de **S. Aze, J.M. Vallet et al** (2006) [37] sur la décoloration du pigment au rouge de plomb dans les fresques. Les auteurs ont mis en évidence le rôle des polluants atmosphériques tels que le SO_2 et le CO_2 conjugué à la condensation de l'eau.

L'humidité en elle-même est un problème qui peut donner lieu à des phénomènes conjugués de nature chimique ou biologique comme les infiltrations d'espèce dans le support de l'œuvre. On citera par exemple les infiltrations de **sels hygroscopiques** transportés en solution qui imprègneront la pierre. Ces sels vont s'accumuler et cristalliser dans la pierre ce qui aura pour effet d'engendrer des contraintes mécaniques qui déliteront le support et fragiliseront la couche picturale (phénomène d'écaillage et de pulvérulence en surface et de délamination des couches plus profondes). Voir par exemple la publication de **J. Desarnaud, O. Grauby et al** décrivant les effets de la croissance de cristaux de KCl dans la pierre [38] ou encore le travail de **J.M. Vallet, C. Gosselin et al** (2006) [39] sur l'origine des sels dans la *Cathédrale de Bourges* (France) par dosage isotopique du soufre et de l'oxygène . Pour en savoir plus sur les facteurs de dégradation de la pierre, on peut se référer aux travaux de **Dario Camuffo** [40]–[44].

Figure 24 : Effet des sels hygroscopiques sur la pierre

L'humidité est aussi un terrain idéal pour la prolifération d'agents biologiques comme les **moisissures** qui attaqueront la surface de l'œuvre par recouvrement et par acidification de la pierre ce qui est préjudiciable pour des peintures murales constituées à la base de matériaux alcalins (chaux

aérienne par exemple). Lorsque l'œuvre est constituée de matériaux comme le bois, le papier ou la toile, elle peut être attaquée par des **insectes xylophages,** etc. Les matériaux comme l'ivoire, le parchemin ou le bois sont très sensibles aux variations thermo-hygrométriques.

On le voit bien ces menaces rendent nécessaire la mise en place de protocoles de surveillance (monitoring), de détection et d'intervention.

Nous ferons dans ce sous-chapitre un état des lieux des travaux et des techniques les plus connues utilisant la thermographie infrarouge, sans négliger les approches originales ou récentes.
Pour un tour d'horizon plus large des méthodes de contrôle et d'œuvre d'art (Rayon X, fluorescence UV…) on peut se reporter à la publication de **D. Gavrilov et al** « *A review of imaging methods in analysis of works of art : Thermographic imaging method in art analysis* »[45].

4.1. Mise en œuvre de la thermographie à la détection d'altérations structurales

La **Charte de Venise**[6] (adoptée en 1965) stipule en son article 10 :

«*Lorsque les techniques traditionnelles se révèlent inadéquates, la consolidation d'un monument peut être assurée en faisant appel à toutes les techniques modernes de conservation et de construction dont l'efficacité aura été démontrée par des données scientifiques et garantie par l'expérience.* »

Nous nous intéressons dans cette section aux méthodes de détection par thermographie infrarouge des déplacages, fissures, délaminages, porosité. Jusqu'à très récemment, les restaurateurs et les spécialistes de la conservation auscultaient les œuvres par sondage acoustique, cette méthode ne nécessite aucun appareillage et repose exclusivement sur l'expérience et la perception de l'expert. La méthode consiste à analyser le son et les vibrations produites en tapotant délicatement la surface de l'œuvre, les poches d'air et les déplacages se manifestant par un son caractéristique. Cette méthode est fastidieuse, souvent imprécise. En plus de présenter un caractère subjectif, elle peut aussi détériorer des surfaces pulvérulentes ou fragilisées.

La thermographie infrarouge peut régler ce problème en proposant à un opérateur une solution opérationnelle reposant sur des principes scientifiques.

Le principe de la technique est simple (voir Figure 25) : une source de chaleur émet une perturbation thermique qui se propage dans le matériau étudié, la progression d'un front de chaleur dans le matériau peut être contrariée par la présence d'un défaut.

Prenons l'exemple d'une lame d'air : nous savons que c'est un matériau isolant comme tous les gaz. Cette interface opposera une résistance thermique à la diffusion de la chaleur ce qui aura pour effet de déformer le profil du front de chaleur au niveau du défaut. Il s'ensuivra une accumulation d'énergie en amont, cette accumulation se manifestera par un point chaud sur l'image thermique. Si le défaut avait été un matériau très conducteur comme un insert métallique par exemple, l'effet aurait été inverse, ce défaut aurait été vu en thermographie comme un puits thermique c'est-à-dire un point froid.

[6] **Charte de Venise** : La Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites, dite charte de Venise, est un traité qui fournit un cadre international pour la préservation et la restauration des bâtiments anciens. Elle a été approuvée par le IIe Congrès international des architectes et des techniciens des monuments historiques, réuni à Venise du 25 au 31 mai 1964 (Wikipédia).

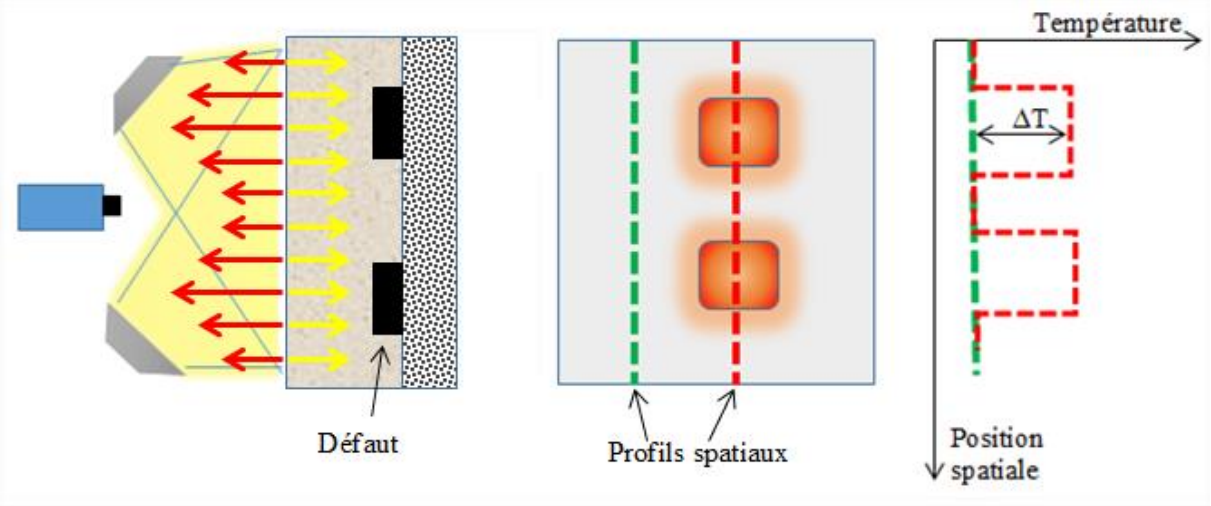


Figure 25 : Principe de la mise en évidence d'un défaut en thermographie IR stimulée

Les travaux les plus anciens dans le domaine remontent à la fin des années 70 avec les travaux de B. **F. Miller** (1977) [46]. **Miller** démontre qu'il est possible de repérer ce qu'il appelle des « vides » en chauffant ou en refroidissant lé è ement à l'aide d'un signal pulsé des panneaux de bois peint et en les observant à l'aide d'une caméra thermique.

C'est en Italie à partir de 1979 que des recherches plus ambitieuses ont été menées dans le cadre d'un programme de restauration lancé par le Ministère de la Culture italienne (*ministero per i beni e le attività culturali*). L'école italienne s'est particulièrement illustré avec les travaux de toute une génération de scientifiques qui se sont intéressés à cette thématique de recherche comme **Accardo** [47] en 1982, **Esposti, Levrero, Stella** et **Meroni** [48], [49] à partir de 1983, **P. Baratono, F. Cardellini et al** [50] en 1988, **Casazza, Giovannoni** [51] en 1991, **Grinzato, Bison, Marinetti** [11] en 1994, **Schirripa Spagnolo, Guattari et al** [52] en 1999 et d'autres depuis, qui ont vérifiablement permis de faire entrer cette technique d'analyse dans l'étude des œuvres d'art parfois prestigieuses, on citera par exemple l'étude des fresques de Giotto à la *Chapelle Scrovegni* (Padoue, Italie) par **Grinzato et al** [53].

Actuellement de nombreuses équipes dans le monde travaillent aux améliorations de la thermographie infrarouge et continuent d'explorer ses possibilités pour les besoins du patrimoine, nous décrirons quelques un de ces travaux.
En France on peut citer les travaux de **Bodnar et al** [12], [53]–[55] ainsi de ceux de **G. Szatanik** [57].

Avant d'aller plus avant, on peut distinguer deux approches : la **thermographie passive** et la **thermographie active ou stimulée**.

4.1.1. Détection passive

Elle consiste comme l'avons déjà expliqué à ne pas solliciter l'objet d'étude (pas de chauffage), voici des exemples d'utilisation de cette technique.

Dafni Sidiropoulou-Velidou et al [58] exploite par exemple le contraste jour/nuit pour étudier la façade sud-est de la Cathédrale de Valence en Espagne (Figure 26). Après un prétraitement des images thermiques et visibles, consistant en une séparation des canaux dans une base RGB des images visibles et infrarouges, les composantes RGB visibles et IR ont été superposées avant d'être fusionnés pour former une super image qui a ensuite été traitée par Analyse en Composantes Principales (ACP). Ce travail a permis de démontrer qu'il est possible d'identifier les différents matériaux composant le portique (pierre, bois), de les classifier et de repérer les altérations.

Figure 26 : Puerta de l'Almoina (Cathédrale de Valence)
Tiré de la publication.

La thermographie ne permet pas seulement de détecter les défauts, elle permet aussi le suivi des œuvres d'art, on peut citer par les travaux de **Camuffo et Sturaro** (2002) [43] en matière de monitoring. Ils se sont intéressés à l'influence que pouvaient avoir les moyens de chauffage utilisés en hiver dans une chapelle et l'influence des évolutions climatiques sur les œuvres d'art. Un suivi du microclimat au sein de la chapelle par **thermographie infrarouge** a été mis en place et a permis d'observer et de mieux comprendre les interactions thermiques, hygrométriques entre le milieu ambiant, l'influence néfaste pour les œuvres des gradients de température et d'humidité et leur variation rapide. Ce travail très intéressant a permis de mettre au point un certain nombre de recommandations sur les bonnes stratégies en matière de chauffage, d'éclairage, réunies dans un guide pratique (*Church heating and preservation of the cultural heritage: a practical guide to the pros and cons of various heating systems, Electa)*. La Figure 27 montre l'exemple d'un type de configuration problématique dans laquelle un éclairage direct par radiant et mal reparti spatialement sur la surface de l'œuvre peut donner lieu à des écarts de températures préjudiciables à l'intégrité de celle-ci. L'apparition de gradients de température importants peut favoriser la dégradation de la couche picturale par écaillage, des contraintes mécaniques à l'origine de déformations mécaniques, l'apparition de moisissures et même des départs d'incendie.

Figure 27 : Exemple de configuration problématique sur le plan de la conservation

Autre exemple intéressant de détection passive, **Ludwig, Rosina et al** (1997) [59] se sont intéressés au suivi dynamique par **thermographie** de l'humidité dans des murs. Le taux d'évaporation peut être lié d'après eux à la présence de sels dans la pierre. La thermographie a permis de déterminer précisément le taux d'évaporation. Les recherches ont été effectuées dans un premier temps en laboratoire, en chambre climatique instrumentée (sondes de température, sondes hydrométriques et

dispositif de thermovision) à la suite de quoi un modèle mathématique approximatif a été proposé pour décrire le bilan énergétique en surface, ce modèle a été testé in situ, sur une peinture murale du *Château de Malpaga* dans le nord de l'Italie, il a permis de vérifier la corrélation entre le taux d'évaporation et la température mesurée par thermographie. Ces recherches se sont poursuivies avec **Milazzo, M. Ludwig et al** (1999 et 2002) [60], [61] qui ont estimé quantitativement par mesure de la température le taux d'évaporation sur des échantillons à l'équilibre thermique, ce taux permet d'estimer la quantité d'eau contenue dans les 2 premiers cm du mur. La difficulté d'estimation de la quantité d'eau réside selon les auteurs à la difficulté de déterminer l'épaisseur de la couche de matériau impliqué dans le phénomène en sachant que cette épaisseur est déterminée en partie par les couches superficielles du matériau, voir aussi l'article de **Grinzato, Bison et al** (2002) [62] sur le sujet.

4.1.2. Détection active

La détection active sollicite thermiquement les matériaux analysés. Les modes de mise sous contrainte sont nombreux. Deux techniques dominent actuellement : la thermographie pulsée (PT) et la thermographie Lock-in ou thermographie modulée (MT) que nous détaillerons plus avant. D'autres techniques existent, comme l'aléatoire par exemple.

Un exemple des nombreuses applications de la détection active est contenu dans la publication de **Grinzato et al** (*Monitoring of ancient buildings by the thermal method,* 2002) [62]. **Grinzato** s'est intéressé à l'*Arsenal de Venise*. **Grinzato** décrit dans un premier temps les mécanismes physico-chimiques en jeu expliquant les défauts d'adhérence et les décollages entre l'enduit d'un mur et la maçonnerie, il note l'importance de l'humidité et des facteurs climatiques dans l'évolution d'une structure et l'apparition de défauts (nous nous intéresserons à cet aspect au chapitre IV). Ensuite il présente une modélisation de la configuration expérimentale permettant d'estimer les temps de chauffe et d'observation nécessaires à une bonne observation de ces défauts. Un certain nombre de recommandations sont faites par exemple un chauffage de 4 x 1 kW pendant 10 min pour des épaisseurs de plâtre de 2 cm ou l'utilisation de la méthode du contraste maximum pour caractériser les déplacages. **Grinzato** s'est ensuite intéressé à la possibilité de faire une cartographie de l'humidité des façades du bâtiment en approche qualitative (effectué en passif) et enfin une description est faite d'une méthode de caractérisation thermique (mesure de la diffusivité thermique) en face arrière par prélèvement d'un échantillon, le modèle mathématique utilisé prend en compte les pertes convectives à la différence du modèle de **Parker** [63] :

$$\frac{\Delta T.h}{Q} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2.Bi.\cos\left[\mu_n\left(1-\frac{z}{L}\right)\right].\sec\mu_n}{Bi.(Bi+1)+\mu_n^2}.e^{-\mu_n^2.Fo}\left(e^{\mu_n^2.Fo_h}-1\right)$$

(Avec ΔT augmentation de température due à l'absorption du flux Q, z : coordonnée, Fo et Fo_h **Nombre de Fourier**[7] et valeur à la fin de la phase d'échauffement Bi : nombre de Biot, μ_n : racine à l'ordre n de l'équation transcendante $\mu.\tan\mu = Bi$).

Grinzato propose de ne pas usiner les échantillons, mais d'appliquer le modèle en plusieurs points et de prendre la valeur moyenne. Les résultats obtenus sont en accord avec les valeurs théoriques et offrent une bonne répétabilité.

Plus récemment **Jo et Lee** (2014) [64] ont mis au point une méthode de cartographie des surfaces comportant des écaillages en utilisant la thermographie active. Le mode d'excitation choisi est un

[7] Le **nombre de Fourier (Fo)** est une grandeur adimensionnelle, intervenant en régime instationnaire, qui mesure le rapport de l'énergie traversant une surface par conduction à l'énergie stockée au sein du volume, ce qui peut s'écrire après simplifications : $Fo = \frac{a.t}{L^2}$

chauffage gradué (en intensité) par halogène (2000 W). Le chauffage gradué est intéressant pour ce type de détection, car il améliore la sensibilité du dispositif de mesure à ce type de défauts : les propriétés thermiques telles que la conductivité thermique et la densité diminuent lorsque l'intensité du chauffage augmente, ce qui a pour effet d'augmenter la température des défauts et de les rendre plus visibles. Les chercheurs ont testé ce procédé sur un échantillon et ils ont pu, après une série de seuillages et une vectorisation des images, obtenir une cartographie précise du délaminage, estimer la surface des défauts et les caractériser sur une échelle de détérioration (voir Figure 28).

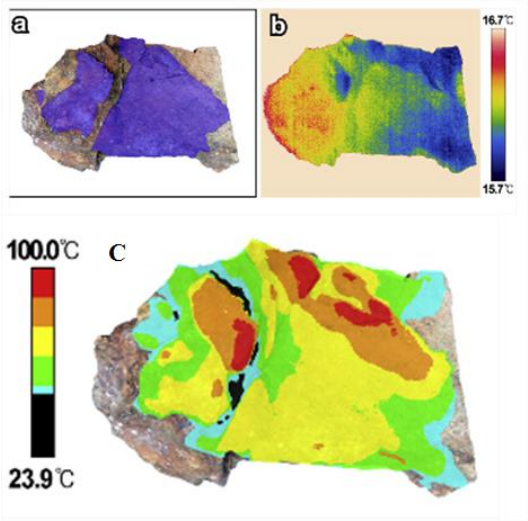


Figure 28 : Échantillon (source : publication)
a) Zone repérée par méthode acoustique b) En thermographie IR stimulée c) Avec la méthode

C. Daffara, L. Pezzati et al (2011) [65] se sont intéressés à l'étude des fresques par analyse multispectrale. Comme on a pu le voir en page 12 il existe plusieurs gammes dans le spectre de l'infrarouge : le proche infrarouge (NIR), l'infrarouge moyen (MIR) et l'infrarouge lointain (FIR). D'après ces chercheurs les bandes spectrales renseignent sur des parties caractéristiques de la fresque, ainsi d'après eux, le proche et moyen IR peuvent être utilisés en réflexion (bandes optiques) et donnent des informations sur la partie superficielle de la fresque alors que l'infrarouge moyen est une bande de réflexion et d'émission (thermique) qui renseigne sur les couches plus profondes (voir Figure 29). L'intégration de toutes ces données permet d'avoir une analyse multicouche et multispectrale de la fresque.

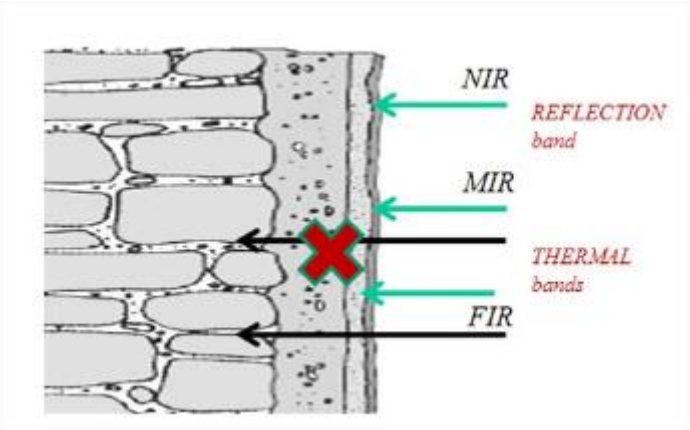


Figure 29 : Interaction entre les bandes spectrales et les couches constitutives d'une fresque (source : publication)

Différentes sources d'excitation et plusieurs systèmes de détection ont été utilisés à l'étude du chef-d'œuvre de Piero della Francesca "*La Résurrection*", *Museo Civico di Sansepolcro* (*Arezzo* Italie). L'étude a permis de mettre en évidence que le NIR permet d'analyse la couche épaisse de couleur

grâce au phénomène de réflectivité diffuse, cette bande permet d'étudier les dessins sous-jacents, les repentirs[8] et les repeints, le MIR quant à lui est particulièrement intéressant pour l'étude de la couche mince de couleur toujours par réflectivité diffuse, cette bande permet l'étude des matériaux de surface et de la technique utilisée, le FIR interagit avec les couches plus profondes et permet de mettre en évidence les défauts internes.

4.2. Utilisation de la thermographie infrarouge en matière de caractérisation

Nous distinguerons deux types de caractérisation, la **caractérisation thermophysique** à proprement parler qui consiste à déterminer les propriétés thermiques d'un matériau et la caractérisation des défauts.

Dans le présent exposé, nous nous intéresserons à des travaux portant sur l'estimation de la diffusivité thermique (a) et de l'effusivité thermique (b) à l'aide de la thermographie infrarouge dans le domaine des œuvres d'art. Cette étape de caractérisation thermophysique est nécessaire pour alimenter des modèles de comportement qui permettront à leur tour de caractériser des défauts. Mais cette caractérisation ne se limite pas à l'étude des défauts, elle peut permettre de faire un suivi de restauration comme nous allons le voir.

À titre d'exemple on peut citer le travail de **Meola et al** (2004) [66] portant sur la caractérisation par Lock-in (thermographie modulée voir 4.3.2) de matériaux par mesure de leur diffusivité thermique. Le principe consiste à soumettre l'échantillon à une excitation périodique (en puissance) et à déterminer le déphasage entre l'excitation et la réponse du matériau observé à l'aide d'une caméra thermique. Ce déphasage est lié à la diffusivité thermique **a**, se reporter aussi à cette autre publication de **Meola** [67]. **Meola** étudie dans un premier temps des échantillons de référence et établit des images de phase. À partir de ces images de phase, il parvient à caractériser ces matériaux. Il poursuit plus avant cette recherche en l'appliquant sur site à l'étude de l'abside de la basilique de *Duomo di Sarno.* Certaines images de phase présentaient plusieurs zones caractéristiques. Après discussion avec l'architecte impliqué dans la restauration du monument il s'est avéré que la zone repérée avait été restaurée. D'après l'auteur l'observation de la phase rend compte du vieillissement d'un matériau et permet d'établir une échelle de vieillissement des matériaux. L'étude de la *Tombe étrusque de Ruvo* a permis de tirer des enseignements intéressants concernant le bénéfice possible tiré de l'association de l'analyse pulsée (voir 4.3.1) et du Lock-in. Le pulsé permet de repérer les défauts, mais est très sensible aux effets optiques induits par les variations d'émissivité et au problème de dépôt d'énergie alors que le lock-in surmonte ces difficultés tout en étant sensible, via les images de phase, à la nature des matériaux, mais il n'est pas capable en revanche de différencier un défaut d'une inhomogénité dans la nature des matériaux. Le croisement des informations tirées de ces deux approches semble prometteur pour analyser de façon complète des œuvres d'art du patrimoine.

Comme autre exemple de caractérisation thermique sur des œuvres d'art on peut citer les travaux de **J.C. Candoré, J.L. Bodnar et al,** (*Proceeding of the QIRT 2008, Kracow, Poland*) [68]. **Candoré et Bodnar** déterminent la profondeur de défauts par analyse pulsée d'un échantillon comportant des défauts à profondeurs connues. Ils utilisent pour cela une caméra thermique qui permet de récupérer les réponses impulsionnelles point par point de l'échantillon. Ils extraient ensuite pour chaque point, les courbes de contraste[9] et tentent de relier certains paramètres caractéristiques de ces courbes de contraste à la profondeur. Les paramètres étudiés sont l'aire sous la réponse impulsionnelle, le temps de vol à 60% ou encore le temps d'apparition du contraste maximum et sa valeur. Des images de

[8] Un **repentir** est une correction d'une peinture faite par l'artiste lui-même. Les repentirs visibles dans les peintures sont parfois le résultat d'une modification (changement particulier de motif, la position d'une main par exemple), mais peuvent aussi être exécutés alors que le travail est bien avancé. Les repentirs laissent une trace fantôme et peuvent influencer le relief de la peinture ou son réseau de craquelures. Il s'oppose à la retouche qui consiste à modifier légèrement certains détails, et au repeint opéré par d'autres peintres, plusieurs années après (Sources EwaGloss et Wikipédia).

[9] **Contraste thermique** : Se détermine par la différence algébrique entre la réponse thermique d'un point comportant un défaut et la réponse thermique d'un point ne comportant pas de défaut et servant de référence.

paramètres ont été dessinées. Les résultats obtenus ont démontré une corrélation entre ces paramètres et la profondeur des défauts avec néanmoins une sensibilité de certains paramètres au dépôt d'énergie. Les auteurs recommandent l'utilisation de paramètres temporels non affectés par les conditions expérimentales tels que les temps de vol ou le temps d'apparition du contraste maximal.

Les deux auteurs vont plus loin dans une seconde publication [69] en estimant directement les propriétés thermophysiques de l'échantillon analysé, puis en déterminant à partir de ce calcul la profondeur des défauts. Ils procèdent en deux étapes :
- ils commencent par utiliser dans un premier temps un modèle mathématique 1D (ce modèle sera décrit dans le chapitre III) leur permettant d'estimer la diffusivité thermique d'un matériau par observation, en thermographie IR, de la diffusion latérale d'un front de chaleur ponctuel généré par un tir laser (voir Figure 30), en face avant.
- Ils procèdent dans un second temps au calcul de la profondeur de défauts contenus dans la réplique d'une œuvre d'art (profondeurs de défauts connues) par estimation de paramètre (ajustement théorie/expérience) en exploitant des observations du même échantillon exposé à une excitation flash surfacique. Le calcul a démontré la bonne estimation de la profondeur. Ce travail est particulièrement intéressant, car il permet d'entrevoir une possibilité d'utilisation in situ de méthode de caractérisation thermique.

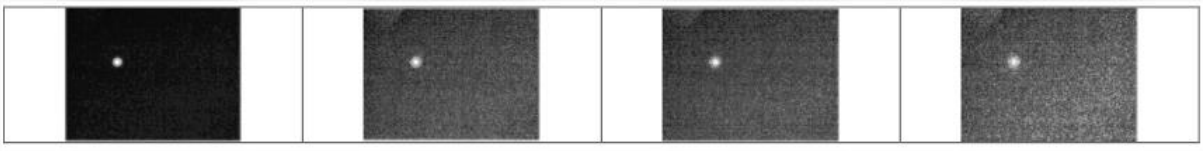


Figure 30 : Diffusion latérale d'un front de chaleur ponctuel (face avant)

4.3. Vue d'ensemble des techniques d'analyse classiquement utilisées en thermographie infrarouge stimulée

À ce stade il est possible de passer en revue les différents modes d'analyse offerts par la thermographie infrarouge stimulée. Ces méthodes découlent du choix de la mise sous contrainte (type de signal appliqué). Ces modes d'analyse peuvent se décliner ensuite à travers différents post-traitements associés ou faire l'objet d'une exploitation directe :

Tableau 3 : Vue d'ensemble de techniques d'analyse en THIR

Mode de mise sous contrainte	Post-traitements associés
Flash ➔ Analyse pulsée	• TSR • PPT
Périodique ➔ Lock-in	• Détection synchrone
PRBS ➔ Analyse aléatoire	• Reconstruction paramétrique ARMA • Analyse corrélatoire
Signaux divers (créneau, etc)	• PCT, SVD • HOST • PLS…

4.3.1. L'analyse pulsée (PT)

L'analyse pulsée consiste à soumettre un échantillon à une impulsion très brève (de quelques ms à plusieurs secondes selon la nature des matériaux étudiés) assimilable à un δt de Dirac et à capter sa réponse thermique à l'aide d'une caméra thermique. C'est de toutes les méthodes probablement la plus ancienne. Ses avantages sont nombreux : l'excitation flash est multi fréquentielle c'est-à-dire qu'elle regroupe un grand nombre de fréquences du spectre lorsqu'elle se rapproche d'un δt de Dirac. Il est donc pertinent de solliciter un matériau avec ce type d'excitation très riche sur le plan fréquentiel. Le

thermosignal obtenu est très riche en information et simple à exploiter. L'inconvén ent ré ide dans la puissance dé osée et la brusque monté en tempé ature de l'é hantillon qui peut l'endommager. Ce type d'analyse est utilisé aussi bien en détection de dé auts (par excitation é endue ou surfacique), qu'en caracté isation thermo physique (méthode « flash » ou au moyen d'une excitation locale, voir Chap. III).

La solution 1D de l'*Équation de la chaleur* pour un solide isotrope, adiabatique, semi-infini en x,y dont la surface est soumise à un δt e Dirac [30] est:

$$T(z,t) = T_{init} + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \tag{1.18}$$

Voir démonstration en page 328. Avec T_{init} : la tempé ature à l'instant initial, Q : l'énergie absorbée en [J/m²], z : la coordonnée de profondeur [m], b : l'effusivité thermique du maté iau [$JK^{-1}m^{-2}s^{-1/2}$] et a : la diffusivité thermique du matériau [m²/s].

En surface (z=0) nous avons :

$$T(z,t) = T_{init} + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \tag{1.19}$$

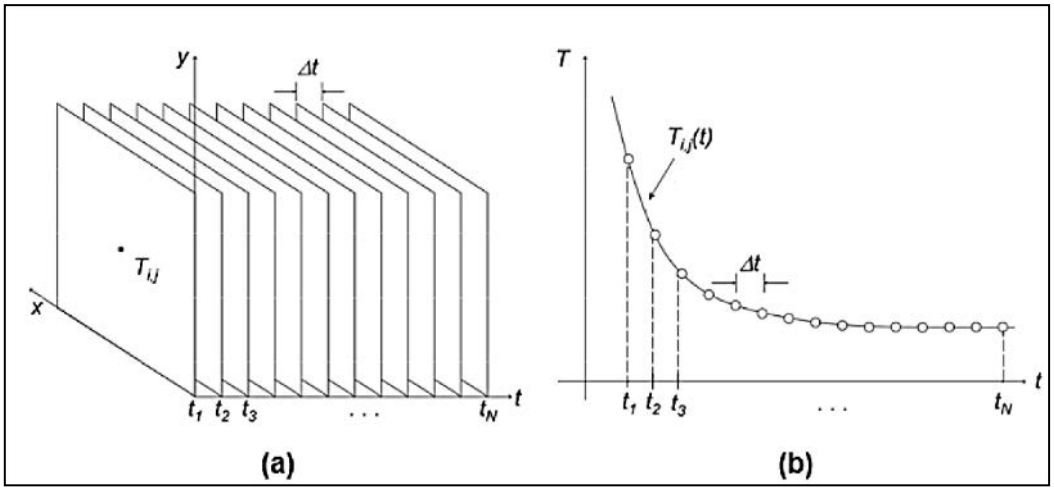


Figure 31 : a) Cube de température (matrice 3D dans le domaine temporel), b) Réponse en température en fonction du temps au point de coordonnées (i,j)

L'analyse pulsée s'est largement diffusé à partir du débu des anné s 60 avec les travaux de **Parker** [63] sur l'estimation des proprié é thermophysiques par la **méthode flash** (voir Chapitre III), mais de nombreux développements ont permis à cette méthode de couvrir un large spectre d'utilisations, plus particuliè ement en matiè e de **détection** et de **caractérisation** de défauts par thermographie infrarouge.

Milne et Reynolds (1985) [70] utilisent l'analyse pulsé pour mettre en é idence les défauts dans des matériaux composites, **Reynolds** poursuit ces recherches avec la parution de son article de 1986, *Thermographic methods applied to industrial materials* [71] et celui de 1988, *Inspection of laminates and adhesive bonds by pulse-video thermography* [72] dans lesquels il s'inté esse plus particulièrement à la détection de défauts dans des structures collées, enduites ou laminées. **Cowell et al** (1989) [73] a modé isé le comportement d'un panneau de graphite époxy avec dé auts soumis à des impulsions flash délivrées par des lampes au xénon.

Si on s'inté esse plus particuliè ement à l'application de l'analyse pulsé appliquée aux œuvres du patrimoine on peut citer la publication de **K. Blessley, C. Young et al** (2010) [74] sur la faisabilité de la thermographie flash pour l'analyse des œuvres d'art. Les auteurs soulignent que cette mé hode a

permis d'identifier des dé auts là où d'autres techniques telles que la radiographie X, la ré lectographie IR et l'examen aux UV n'ont pas permis d'identification. Les auteurs pré isent qu'il est possible de repérer des délaminations au niveau de la couche picturale sur des peintures, des proble es d'adhé ion de toile, des filigranes, le tissage d'une toile et le grain du bois d'un panneau et d'effectuer un suivi de restauration par cartographie du degré d'adhérence. La règle empirique selon laquelle un défaut pour être vu en thermographie doit être au moins une à deux fois plus large que profond, voir **Vavilov, Taylor** 1982 [75], est vé ifié (dans le cas d'un maté iau homogè isotrope). Les limitations de la méthode sont rappelées, la détection dépend :

- ◊ des propriétés ermiques des maté iaux et des dé auts en incluant l'émissivité
- ◊ du degré d'uniformité des couches constituant l'œuvre,
- ◊ de la transparence et de la réflectivité de la couche picturale dans le proche et moyen IR
- ◊ de la topographie de la surface
- ◊ inhomogénéité du dé ôt d'é ergie

E. Grinzato, P.G. Bison et al (1998) [76] proposent une solution originale pour palier au proble e d'homogé ité du dépô d'é rgie : ils suggèrent de scanner les peintures murales avec une source mobile placée sur un rail. Cette mé hode qu'ils ont baptisé « *lateral heating* » s'inspire du *Flying spot* utilisé pour détecter les fissures (voir par exemple travaux de **J.L. Bodnar, M. Egée et al** (1994) [77] sur le sujet). **Grinzato et al** ont mis au point un modèle adapté à cette configuration expérimentale. Des essais ont été effectué en laboratoire et sur site. D'après les auteurs les résultats sont en accord avec ce que le modèle prévoyait, mais des améliorations sont encore nécessaires. **Carlomagno et Meola** (2002) [78] ont étudié la meilleure configuration entre la distance D échantillon/lampe, la vitesse V de déplacement de la lampe et le nombre de passages Np de la lampe devant l'é hantillon, afin d'obtenir le meilleur contraste thermique ΔT :

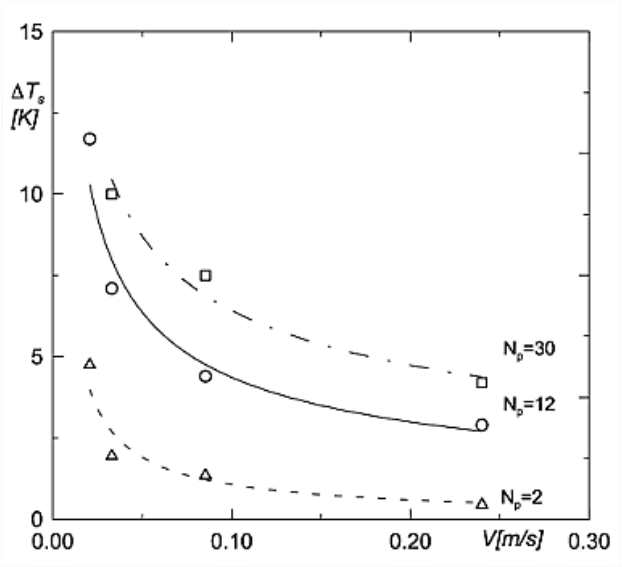


Figure 32 : Distribution du contraste par rapport à la vitesse V pour une distance D=50 mm (tiré de Carlomagno et Meola [78])

En matière de caractérisation de défaut (mesure de la profondeur) par PT on peut citer deux grandes méthodes de traitement : les **méthodes inverses** et les méthodes basées sur le **contraste thermique**.

La première méthode utilise les **méthodes inverses** introduites en 1991 par **Krapez et P. Cielo** [79] en configuration 1D puis en 2D [80]. Le principe est d'utiliser un mode e thé rique de comportement se prêtant à la configuration expérimentale et d'estimer des parame res tels que la profondeur en faisant un ajustement thé rie/expérience par ité ations successives à l'aide d'une méthode de moindres carrés (algorithme de *Levenberg Marquardt* par exemple, pour plus d'information se reporter aux publications suivantes : [81]–[83]). Ce type d'approche se prête bien à

l'analyse pulsée, car la réponse du matériau à un flash est une courbe strictement décroissante assez simple à modéliser. À mis chemin entre les **méthodes inverses** et l'étude du **contraste** on peut citer l'approche originale de **C. Maierhofer et al** (2005) [84] qui utilisent cette approche pour déterminer la profondeur de défauts dans une structure en ciment, leur méthode exploite l'inversion d'un modèle d'apparition du contraste thermique calculé de façon numérique (éléments finis).

L'étude du **contraste thermique absolu** ou **relatif** permet de faire de la caractérisation en comparant le contraste thermique d'une zone repérée comme saine et d'une zone avec défaut. Le contraste absolu s'obtient très facilement en soustrayant les deux thermo signaux correspondant aux deux zones (voir Figure 33 et description chapitre II page 85) :

$$\Delta T(t) = C(t) = T_{défaut}(t) - T_{sain}(t) \tag{1.20}$$

La profondeur du défaut s'obtient à partir du temps d'apparition du contraste maximum τ :

$$p \approx \sqrt{a.\tau} \tag{1.21}$$

Avec p : La profondeur en [m], a : La diffusivité thermique [m²/s], τ : Le temps d'apparition du contraste maximum [s].

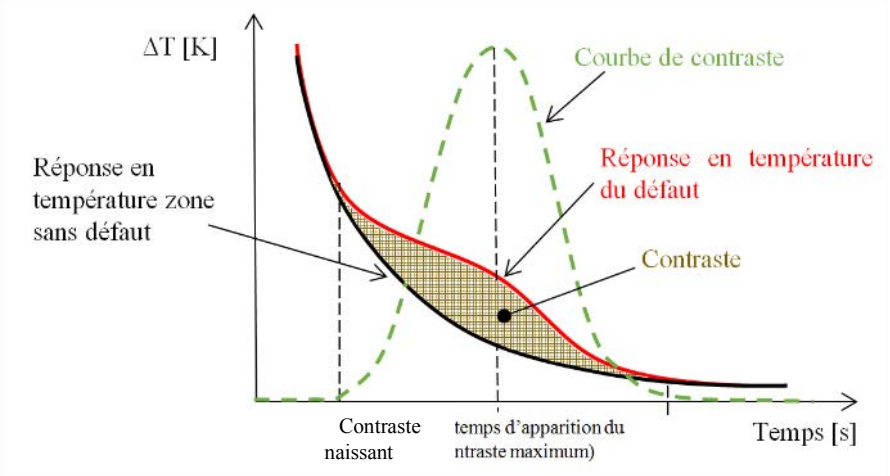


Figure 33 : Principe de la méthode du contraste

C'est pourquoi il est admis de se baser sur le temps d'apparition du contraste maximum τ pour estimer ensuite la profondeur connaissant les propriétés thermiques du matériau. C'est le cas de **Martin et al** [85] qui a comparé la méthode reposant sur le temps de contraste maximum avec deux autres méthodes pour déterminer la profondeur des défauts dans un panneau composite, c'est aussi le cas de **J.C. Candoré, J.L. Bodnar et al** [86] pour des défauts dans une réplique d'œuvre d'art. Mais cette approche est remise en cause : d'après **Krapez** et **Balageas** [87] ce temps de contraste maximal met beaucoup trop de temps à se manifester et s'accompagne de ce fait de l'apparition d'effets 3D pénalisant, car les modèles 1D utilisés ne prennent pas en compte ces effets, la précision des calculs en est affectée. C'est pourquoi ils recommandent tous deux de s'appuyer plutôt sur le temps d'apparition du contraste naissant. **Krapez** (1994) [88] compare les résultats obtenus par cette approche sur une cale comportant des défauts à des profondeurs connues avec l'approche précédente et démontre la pertinence de l'estimation de la profondeur à partir du contraste naissant.

Ces méthodes de contraste nécessitent un point de référence et un éclairage uniforme. Plusieurs publications ont introduit au début des années 2000 le *Differential Absolute Contrast* (DAC) qui élimine cette contrainte. Cette nouvelle approche a été présentée par **M. Pilla, M. Klein et al** [89] (2002) puis par **D. Gonzales, C. Ibarra-Castanedo et al** [90]**.** Le contraste DAC au point de coordonnée (i, j) est obtenu à partir de l'expression suivante :

$$C_{DAC}(i,j,t) = \Delta T(i,j,t) - \sqrt{\frac{t'}{t}}\Delta T(i,j,t') \quad (1.22)$$

Avec t' : plage temporelle du temps de référence au temps où le premier défaut devient visible t_{def} (voir figure ci-dessous).

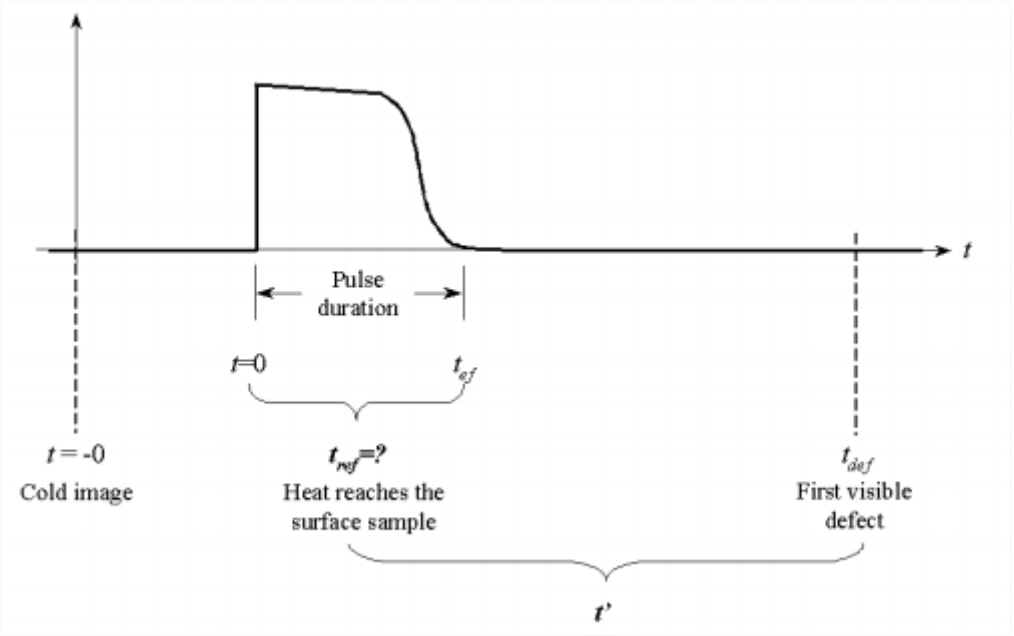


Figure 34 : Principe du DAC (tiré de [91])

34

H.D. Benítez, C. Ibarra-Castanedo et al [92] **(2007)** proposent une amélioration du DAC tenant compte de l'épaisseur de l'échantillon à l'aide d'un modèle basé sur les quadripôles thermiques. Ils démontrent l'intérêt de leur approche sur des échantillons de composites, plexiglas et aluminium.

La connaissance à priori des zones avec défaut et sans défaut, indispensable pour localiser la zone saine de référence pour le calcul du contraste est une faiblesse que le DAC a résolue, **Delpech et al** (1992) [93] propose une autre approche, la **méthode de l'effusivité** basée la mesure de la variation d'effusivité apparente induite par un défaut. Cette méthode est présentée dans le chapitre II, page 86.

Un autre procédé alternatif basé sur une autre méthode de calcul du contraste a été proposée par **M. Omar, M.I. Hassan et al** (2005) [94], le principe, inspiré des travaux de **Shepard et Ducar** (2000) [95]**,** consiste à ne pas prendre comme référence une zone réputée à priori sans défaut, mais l'entourage immédiat du pixel en appliquant cette formule :

$$C(i,j,t) = T_{pix}(i,j,t) - T_{env(i,j)}(t) \quad (1.23)$$

Où $C(i,j,t)$ est le contraste du pixel en (i,j) et à l'instant t , $T_{pix}(i,j,t)$ la température du pixel en (i,j) et à l'instant t, $T_{env(i,j)}(t)$ est la température moyenne des pixels du voisinage à l'instant t.

D'après les auteurs cette méthode permet de s'affranchir des problèmes de variation d'effusivité et de dépôt d'énergie, évite la connaissance à priori de l'échantillon pour identifier une zone saine de référence. Ce découpage du thermogramme en petit morceau servant chacun de référence locale permet selon eux d'uniformiser la distribution de l'énergie sur l'échantillon et d'avoir de meilleurs résultats en termes de détection tout en permettant une automatisation du processus de détection. **Omar** et **Hassan** précisent que les dimensions de la zone de voisinage à prendre en compte dépendent de la taille des défauts recherchés : le défaut doit être nécessairement plus petit que l'environnement

moyen pris en compte dans le calcul de ce contraste modifié. Ils relèvent qu'il est possible avec cette méthode d'ausculter l'échantillon en profondeur (tomographie).

Comme nous venons de le voir, l'analyse pulsée est un vaste champ d'étude et de recherche. Les reproches les plus communément faits à cette méthode d'analyse sont d'une part le recours à de fortes puissances d'excitation pour obtenir un rapport signal sur bruit satisfaisant, ce point est particulièrement gênant s'agissant des œuvres d'art, et d'autre part, la forte dépendance aux effets optiques (absorptivité) ainsi qu'à la qualité du support d'énergie.
De récents développements ont amélioré l'analyse pulsée afin de la rendre moins dépendante aux conditions expérimentales et pour augmenter le rapport signal sur bruit, il s'agit de la méthode TSR (*Thermo-Signal reconstruction*) et du PPT (*Pulse Phase thermography*).

4.3.1.1. La méthode TSR (Thermo-Signal reconstruction)

Cette méthode issue de l'analyse pulsée a été introduite par **Shepard** [96]–[99], voir aussi **Martin**, **Gyekenyesi et al** (2003) [85]. Elle repose sur un ajustement polynomial logarithmique du thermogramme impulsionnel, une description de la méthode est disponible au chapitre II page 89.

Le TSR donne lieu à une littérature abondante, son utilisation s'est très largement répandue, voir par exemple **Balageas** (2010) [100] sur la détection de défaut dans un composite instrumenté par TSR. **J.M. Roche, F.H. Leroy et al** [101] comparent les performances du TSR dans la détection de défauts dans une plaque carbone/époxy avec s'autres méthodes de post-traitement. **Balageas** (2010) [102], encore, introduit une méthode quantitative cette fois, de détermination de l'épaisseur et de la diffusivité thermique d'une plaque à partir du TSR. Dans le domaine des œuvres d'art, on peut citer les travaux de **Sfarra** et de **Theodorakeas** [103]–[105] sur l'analyse d'œuvres d'art à l'aide de plusieurs méthodes, dont le TSR.

4.3.1.2. La méthode PPT (Pulse Phase thermography)

X. Maldague et **S. Marinetti** à proposent dans leur article *Pulse phase infrared thermography* (1996) [106] une nouvelle approche reposant sur le traitement par transformée de Fourier des thermogrammes. Alors qu'en Lock-in une seule fréquence ou un nombre limité d'entre elles est étudié en **régime stationnaire**, en PPT c'est la totalité d'entre elles qui peuvent être exploités simultanément en **régime transitoire**…L'intérêt consiste à pouvoir extraire comme en analyse modulée la phase qui est moins affectée par les propriétés optiques de la surface (absorptivité). Ainsi d'après **Maldague**, il est possible par ce biais de tirer avantage de l'apport du **Lock-in** tout en profitant des avantages de l'analyse pulsée. De plus la résolution en profondeur est améliorée. Une description de cette méthode est disponible au chapitre II, page 86.

L'intérêt du PPT ne se limite pas à la détection, **Maldague et Marinetti** observent une corrélation entre la profondeur des défauts et la phase. Une équation est proposée dans laquelle ils introduisent une grandeur f_b qu'ils appellent *blind frequency* (fréquence aveugle). Cette fréquence limite est liée à la profondeur de pénétration on la retrouve en Lock-in :

$$z = C_1 \sqrt{\frac{a}{\pi f_b}} \tag{1.24}$$

Avec z : la profondeur [m], C_1 une constante et a : la diffusivité thermique du matériau [m²/s].

Malheureusement cette fréquence aveugle f_b est souvent difficile à déterminer précisément, **Ibarra-Castanedo (2005)** [107, p. 77] propose de corriger la relation (1.24) en prenant on compte une fréquence aveugle apparente $f_b^{'}$ et sa phase $\phi_{\min}$ associées au seuil de détection.

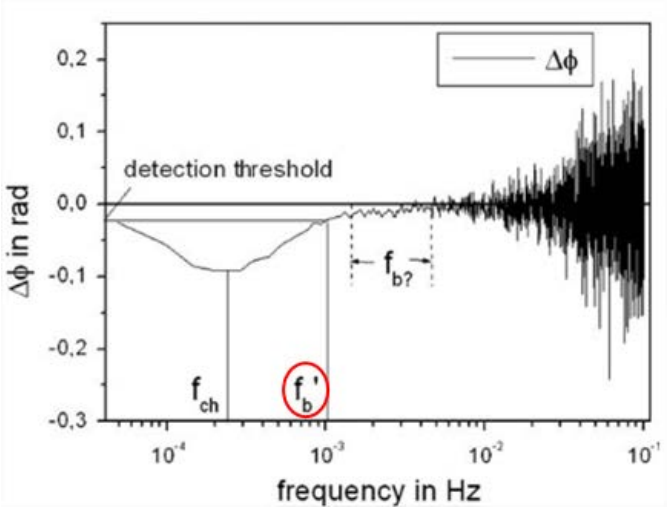


Figure 35 : Évolution de la phase avec la fréquence et détermination de la « fréquence aveugle » f_b apparente (tiré de [107]).

Ibarra-Castanedo propose l'expression suivante :

$$z = C_1^{'}.\phi_{\min}.\sqrt{\frac{a}{\pi.f_b^{'}}} \tag{1.25}$$

Le PPT donne lieu à une abondante littérature et il continue d'être amélioré. Ainsi **R. Arndt** inspiré par les travaux de **V. Vavilov, T. Kauppinen et al** (1997) [108] sur le « *Long Square Pulse and Slow Thermal Wave Techniques* » propose (2010) [109] d'utiliser une variation du PPT le *Square Pulse Thermography* (SPT) pour étudier des ouvrages d'art (génie civil) et des monuments historiques. Le principe consiste à remplacer le signal pulsé par un créneau, plus adapté à la nature des objets étudiés. **R. Arndt** s'est d'abord intéressé à la détection de défauts dans des éprouvettes comportant des défauts à des profondeurs connues et ensuite sur site, sur des colonnes du Musée *Altes* de Berlin tout d'abord puis sur les remparts du Château de Wartburg (figure ci-dessous) :

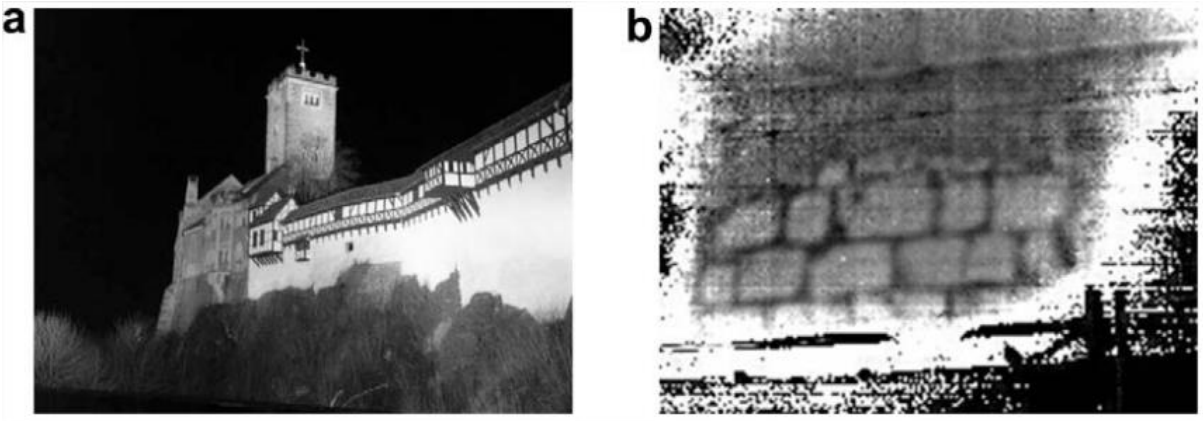


Figure 36 : Structure de la façade du Château de Wartburg in Eisenach, (Allemagne) en image de phase. (Tiré de la publication)

Arndt parvient à caractériser de façon très correcte les défauts repérés, il conclut en notant que cette méthode est parfaitement adaptée à l'étude des ouvrages d'art et des œuvres d'art du patrimoine tant en détection qu'en caractérisation de défauts.

P. Cotič , Z. Jagličić et al (2014) [110] ont utilisé le PPT pour détecter des délaminages dans des structures de maçonnerie soumises à des sollicitations sismiques et observer la propagation des fissures en leur sein. Ils ont pour cela comparé les performances de la thermographie IR et celle d'un géo radar. D'après les auteurs le géo radar permet d'analyser la structure profonde de l'ouvrage, mais

ne permet pas de détecter des défauts inférieurs à 8 mm en taille alors le PPT permet de repérer des altérations de 2 mm. Ces résultats démontrent l'inté ê de cette mé hode d'analyse pour l'é ude des œuvres du patrimoine.

4.3.2. Le Lock-in ou Modulated Infrared Thermography (MT)

Nous avons vu que l'un des défauts de l'analyse pulsée réside dans la charge thermique instantanée (élévation de température) parfois importante qu'elle impose. Cette limitation proble atique pour les applications patrimoine et dans d'autres domaines a encourage dans les anne s 70 le de eloppement d'alternatives telles que le Lock-in. Le Lock-in appelé aussi *Thermographie IR dynamique* ou *Modulated Thermography* (MT) consiste à moduler le signal d'excitation. Le principe est d'observer la répo se d'un mate iau en re ime stationnaire en le soumettant à une excitation périodique. Les bases du Lock-in ont été posées par **G. Carlomagno, P.G. Berardi** en 1976 [111], de nombreux développements ont pris la suite (**G. Busse** [112]–[114], ceux de **J. Beaudoin** [115] ou encore **P.K. Kuo, Z.J. Feng et al** [116]**).**

Nous savons que la solution 1D de l'éq ation de la chaleur pour un matériau isotrope, semi-infini en x,y, soumis à une excitation périodique en z=0, est donne p r l'expression :

$$T(z,t) = T_{init} \exp\left(-\frac{z}{l}\right)\cos\left(\omega.t - \frac{2\pi.z}{\lambda}\right) \tag{1.26}$$

$$\begin{cases} \omega = 2\pi.f \\ l = \sqrt{\dfrac{2a}{\omega}} = \sqrt{\dfrac{a}{\pi.f}} \end{cases}$$

Avec T_{init} : la tempe ature à l'instant initial, z : la coordonnée de profondeur [m], λ : la longueur d'onde du signal d'excitation [m], l : longueur de diffusion thermique [m], ω : la pulsation du signal d'excitation [rad/s], f : la fréqu nce d'excitation en [Hz], t : le temps [s] et a : la diffusivité thermique du matériau [m²/s].

L'équation (1.26) peut encore s'é rire :

$$T(z,t) = T(z).\cos\left(\omega.t - \phi(z)\right) \tag{1.27}$$

Le terme T(z) repre ente l'atte nu tion de l'amplitude du thermo signal avec la profondeur z, ϕ(z) représente quant à lui le déphasage en fonction de z du thermo signal par rapport au signal d'excitation. Les défauts se manifestent sur les images de phase et d'amplitude avec un net avantage pour la phase qui est moins sensible aux propri é de surface comme l'absorptivité

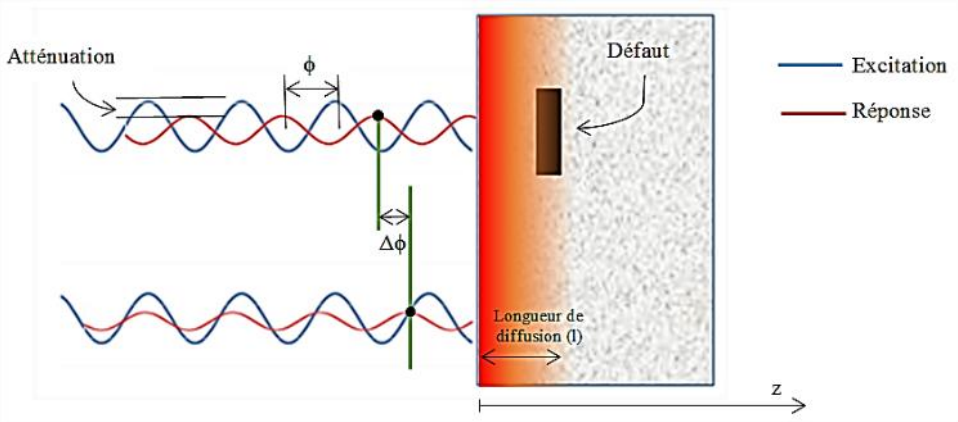


Figure 37 : Principe de la thermographie IR modulée (Lock-in)

La technique du lock-in a de très nombreuses applications, initialement ces travaux s'intéressaient aux composites et aciers : voir **D. Wu, G. Busse** (1998) [114] pour la détection des décollements, délaminages, inclusions et dommages, voir aussi **Meola et al** [67] et **N.P. Avdelidis, D.P. Almond et al** [117], voir aussi **T. Sakagami, S. Kubo** ainsi que **M. Choi, K. Kang et al** [118], [119]. Dans le domaine du patrimoine on peut citer **D. Wu** qui s'est intéressé à la détection de défauts dans les placages en bois [120]**, Grinzato, Bison et al** se sont intéressés à la détection de détachement et de fissures dans les fresques au moyen de cette technique [11], [76]**,** de même que **G.M. Carlomagno, C. Meola** [78].

La quantification d'une anomalie se fait par comparaison du signal d'excitation avec celui qui provient d'une zone préalablement identifié comme une anomalie. Pour cela il est possible de rapprocher la profondeur du défaut à un écart d'amplitude entre les deux signaux, mais généralement on s'intéresse à l'écart de phase. La méthode la plus couramment employé est la *méthode des 4 points* [36], [114], [119], [121], le principe est relativement simple (voir Figure 38). Il consiste à relever les valeurs de 4 points (S_1, S_2, S_3 et S_4) sur une période du signal du pixel comportant l'anomalie (voir Fig. suivante). L'amplitude et la phase découlent des expressions suivantes :

$$\text{Amplitude :} \quad A(x_1) = \sqrt{\left[S_1(x_1) - S_3(x_1)\right]^2 + \left[S_2(x_1) - S_4(x_1)\right]^2}$$
$$\text{Phase :} \quad \varphi(x_1) = \arctan\left(\frac{S_1(x_1) - S_3(x_1)}{S_2(x_1) - S_4(x_1)}\right) \tag{1.28}$$

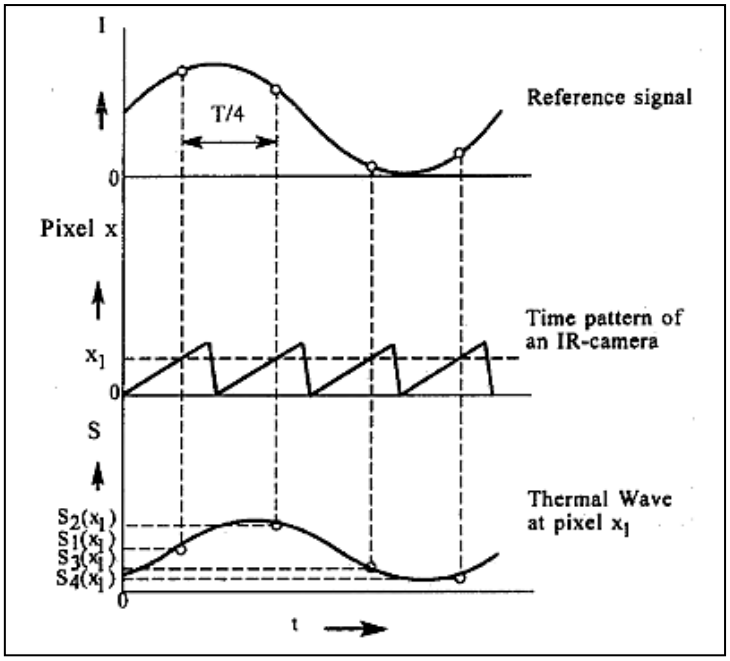


Figure 38 : Principe de la méthode des 4 points (tiré de D. Wu [114]).

NB : Il faut cependant noter que cette méthode est très sensible au bruit.

En matière de caractérisation de défauts, **Busse** (1979) [112] définit la profondeur maximale p qui peut être inspectée. Celle-ci est égale à 1,8 fois la longueur de diffusion thermique l, qui dépend elle-même de la fréquence d'excitation (à approcher de la relation (1.25) obtenue pour le PPT) :

$$p = 1.8\sqrt{\frac{a}{\pi . f}} \tag{1.29}$$

La profondeur qu'on souhaite sonder impose la gamme des fréquences de travail afin d'éviter le phénomène de fréquence aveugle : fréquences élevées pour les couches superficielles et fréquences intermédiaires pour les couches intermédiaires et faibles fréquences pour les couches profondes afin d'avoir un balayage de toute l'épaisseur. Cette expression est intéressante, car elle permet d'entrevoir les possibilités de caractérisation des défauts à travers la détermination de leur profondeur ; elle permet aussi la mesure d'épaisseur et enfin elle permet d'estimer la diffusivité thermique sur des échantillons minces avec une bonne précision. **Meola et Carlomagno** [67] décrivent le moyen d'y parvenir : l'épaisseur e de l'échantillon est mesuré précisément, un anneau métallique est fixé sur la face opposée de l'échantillon, l'opérateur procède ensuite à un balayage en fréquence afin de déterminer la fréquence limite f_l permettant d'accéder à toute l'épaisseur de l'échantillon, il suffit pour cela d'augmenter la fréquence d'excitation jusqu'à visualisation du disque métallique en face arrière. La diffusivité thermique se déduit alors de l'expression (1.29) :

$$a = \pi f_l \left(\frac{e}{1.8} \right)^2 \tag{1.30}$$

4.3.3. L'analyse aléatoire

Nous venons de voir que le Lock-in consistait à moduler l'excitation avec un signal périodique de type sinus. Dans le même ordre d'idée, des recherches ont proposé de moduler l'excitation avec un **bruit blanc** (voir définition chapitre II, page 93) approché avec des signaux aléatoires de type **PRBS** (*Pseudo Random Binary Sequence*) par exemple. Cette stratégie vise essentiellement à éviter le recours à l'analyse pulsée pour la même raison que celle invoquée pour le Lock-in, à savoir l'échauffement important des échantillons. Le traitement du signal nous enseigne qu'il est possible de calculer la réponse impulsionnelle ou harmonique d'un système en procédant à une **analyse paramétrique** ou **corrélatoire** de la réponse en température d'un échantillon excité aléatoirement. **K. Hakem** [122] explorait déjà cette possibilité en 1994 en radiométrie photothermique, par la suite d'autres travaux tels que ceux de **C. Delebecq, J. L. Bodnar** ou **S. Oblin, J. L. Bodnar** en 1999 et 2000 [123], [124] ont permis de creuser cette approche. Avant d'aller plus avant, précisons quelques termes et notions :

Autocorrélation : c'est un procédé issu du traitement du signal qui mesure la similitude d'un signal avec lui-même, cette opération permet de repérer des séquences caractéristiques dans un signal bruité. Dans le cas d'un bruit blanc, le résultat de cette autocorrélation est un δ(t) de Dirac à sa variance près. Dans le cas de deux signaux distincts, on parle d'**intercorrélation**.

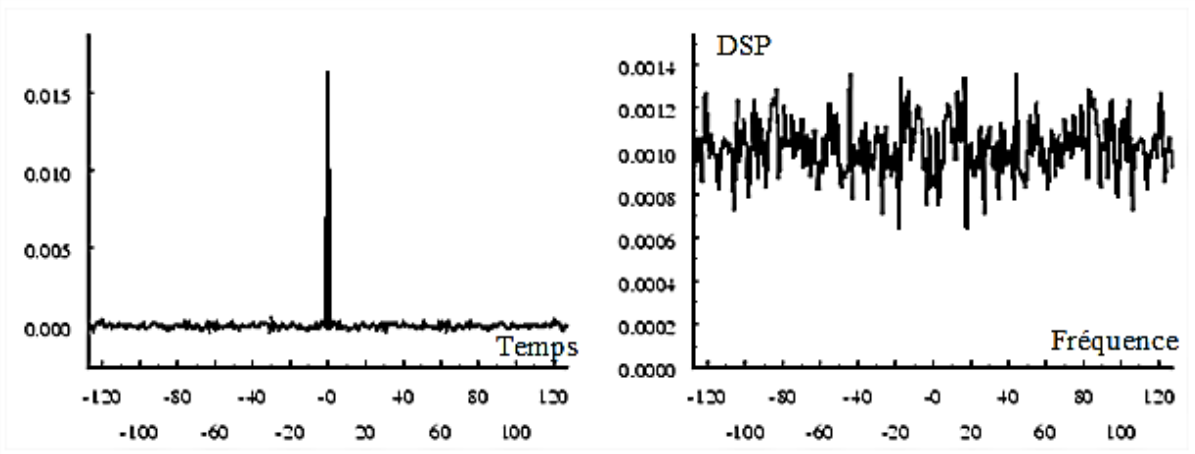


Figure 39 : Fonction d'autocorrélation et densité spectrale estimées d'un bruit blanc approché

Analyse corrélatoire simple : On parle d'analyse corrélatoire simple par opposition à l'analyse corrélatoire complexe qui élimine l'influence de la durée limitée de l'excitation. Il s'agit d'un mode d'analyse statistique qui consiste à identifier la **réponse impulsionnelle** RI(t) (à la variance du bruit

prè σ² (t)) d'un systè e ou d'un maté iau étudié, à partir du produit d'intercorré ation (©) calculé entre la répo se de ce systè e s(t) et la séqu nce d'excitation e(t) à laquelle il a été soumis voir équation (1.34). Le produit d'intercorré ation a pour ré ultat une fonction d'intercorré ation $R(\tau)$ qui repré ente l'é olution du produit de deux fonctions décalées l'une par rapport à l'autre par rapport au temps et se parcourant en sens contraire l'une et l'autre (voir figure ci-dessous) :

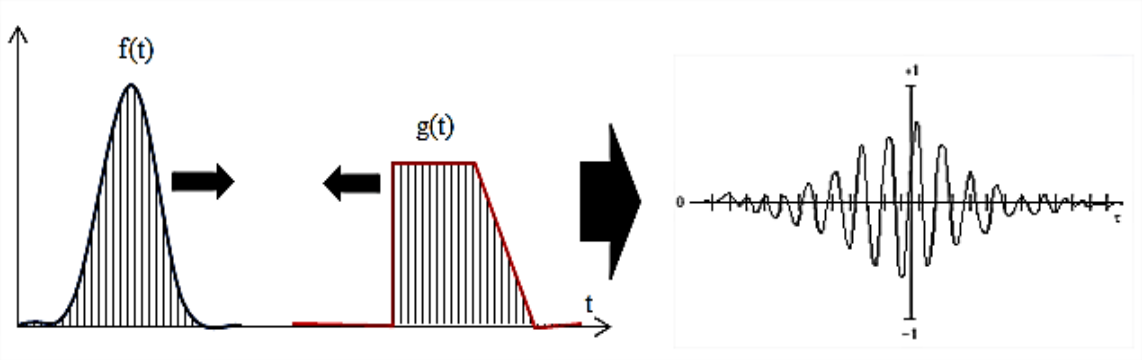


Figure 40 : Principe de l'intercorrélation : fonctions f(t) et g(t) et fonction d'intercorrélation.

Ce produit d'intercorré ation se calcule de la manière suivante pour deux fonctions f(t) et g(t) :

$$R(\tau) = f(t) © g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).g(t+\tau)\,dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t-\tau).g(t)\,dt \qquad (1.31)$$

La **réponse harmonique** RH(f) est obtenue dans un second temps à partir du résultat de l'intercorré ation des deux signaux par **transformée de Fourier** (TF) de la réponse impulsionnelle (1.35).

On rappelle que le **produit de convolution** noté $\otimes$ représente pour deux fonctions f et g sur un même domaine infini l'opération qui fait correspondre une autre fonction $f \otimes g$ sur ce domaine, qui en tout point de celui-ci est égale à l'intégrale sur l'entièreté du domaine (ou la somme si celui-ci est discret) d'une des deux fonctions autour de ce point, pondérée par l'autre fonction autour de l'origine - les deux fonctions étant parcourues en sens contraire l'une de l'autre (nécessaire pour garantir la commutativité), ce qui en toute rigueur s'é rit :

$$(f \otimes g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-t).g(t).dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).g(x-t).dt \qquad (1.32)$$

Par souci d'é iter les lourdeurs d'é riture, on se contentera d'utiliser les expressions symboliques des produits de convolution et de corrélation.

Ainsi nous avons : Sortie = Entrée convoluée par la réponse impulsionnelle :

$$s(t) = RI(t) \otimes e(t) \qquad (1.33)$$

Et on démontre que pour un bruit blanc de variance unité :

$$s(t) © e(t) = RI(t) \qquad (1.34)$$

$$RH(f) = TF\langle RI(t)\rangle \qquad (1.35)$$

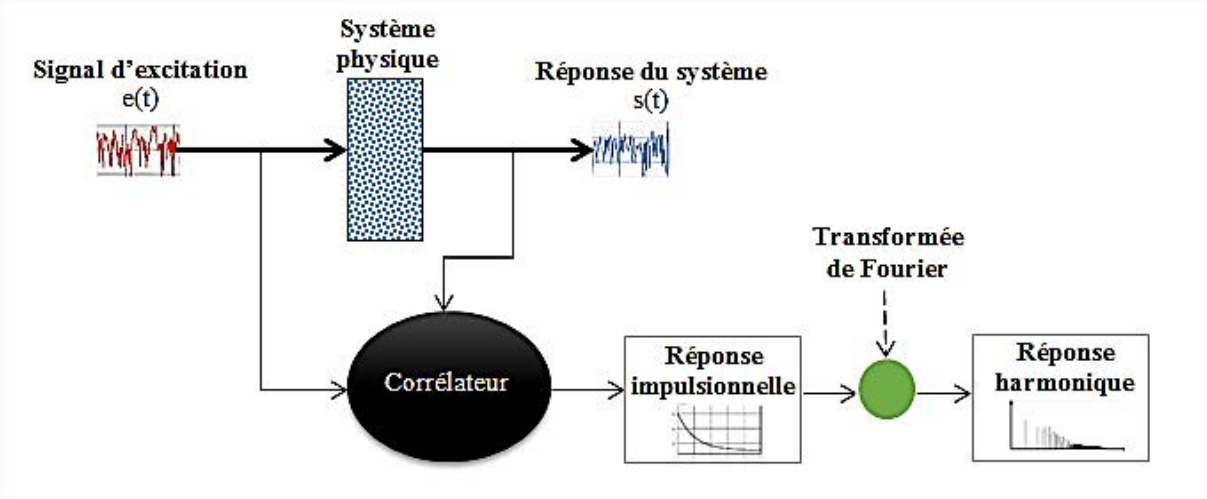


Figure 41 : Principe de l'analyse corrélatoire

Analyse paramétrique :

Le principe de cette méthode d'analyse est décrit au chapitre II page 93.

La possibilité de récupérer par l'**analyse corrélatoire** ou **paramétrique** les réponses impulsionnelles et harmoniques à partir d'une excitation aléatoire ouvre de larges perspectives en matière de détection et de caractérisation par thermographie IR. Se reporter aux travaux de **J.L. Bodnar, Durville et al (**1996) puis **Oblin, Bodnar et al** (1999) en matière d'exploration des possibilités de l'analyse corrélatoire et paramétrique en radiométrie photothermique [124]–[126] puis en matière de caractérisation thermo physique à partir des recherches menées par **Delebecq et Bodnar (**2000) [123]**.** Les auteurs découvrent qu'il est possible d'estimer la diffusivité thermique d'un échantillon de bakélite par analyse du signal radiométrique en face arrière et reconstruction de sa réponse impulsionnelle. Ces recherches se poursuivent avec **B. Djelloul, P. Grossel et al** [127]**, Bodnar et al** (2012) [128]**.** À partir de 2012 ces techniques commencent à être appliquées à la thermographie infrarouge stimulée, voir **Bodnar et al** [129], les auteurs imaginent une application originale : la détection de déplacages dans les peintures murales, à cet effet une fresque a été analysée avec deux techniques, l'analyse pulsée et l'analyse aléatoire. Ce type d'analyse est prometteur dans de nombreux domaines : voir par exemple **R. Gatto** qui propose une méthode de mesure par thermographie IR de la fréquence cardiaque par reconstruction à partir d'un modèle ARMA [130] (2009).

4.3.4. Autres méthodes de traitement

Nous venons de passer en revue les principales méthodes d'analyse ainsi que les traitements qui leur étaient associé, mais d'autres méthodes d'analyse voient les jours afin de traiter les images issues de la thermographie IR.

4.3.4.1. Analyse en composantes principales et Décomposition en valeurs singulières

Comme on a pu le voir, l'analyse et l'interprétation des thermogrammes sont souvent rendues difficiles par la présence de nombreux signaux indésirables (bruit, non-uniformité du chauffage, variation d'absorptivité, etc.) qui compliquent l'accès à l'information utile et alourdissent le traitement. L'analyse en composantes principales (**ACP**) est une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle permettant d'éliminer le poids de ces contributions parasites en projetant le signal dans une base orthogonale adapté maximisant l'inertie[10] (variances multiples) ce qui revient en pratique à améliorer le contraste thermique.

[10] En statistique, l'**inertie** généralise la notion de variance en dimension quelconque.

Il est possible d'interpréter cela comme une projection de chaque signal associé à un point de mesure dans un espace à N_t dimensions dans laquelle chaque dimension représente un instant t du thermogramme. Dans un tel espace, chaque réponse en température peut être représentée par un point à N_t coordonnées. Les points correspondant aux zones sans défaut, similaires thermiquement, auront des réponses proches et se regrouperont dans cet espace multidimensionnel en « grappes » distinctes des « grappes » de points correspondant aux zones avec défaut. En tournant le repère de cet espace de façon approprié par identification des directions principales du nuage de points, il est possible d'avoir une représentation de ces « grappes » qui permette par projection sur les plans orthogonaux de cet espace de les différencier de façon efficace (décorrélation) tout en atténuant les effets indésirables (bruit).

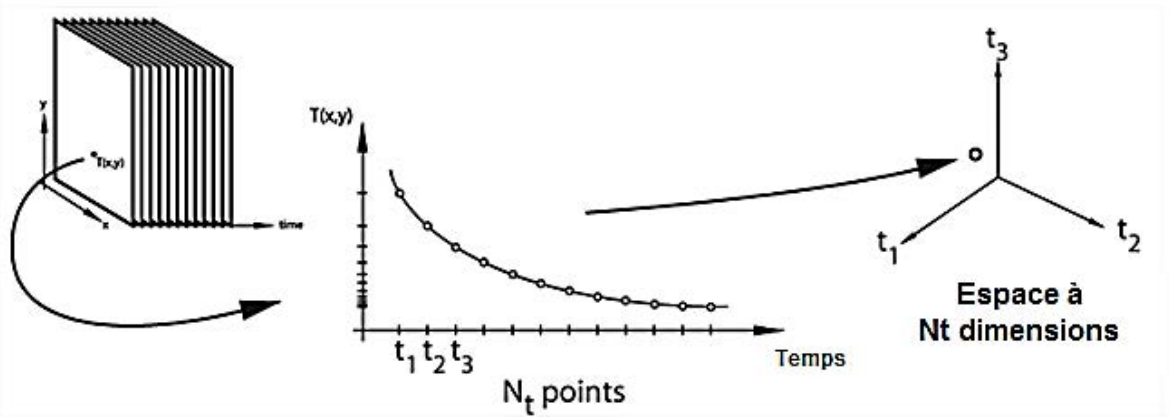


Figure 42 : Interprétation de l'ACP

Cette méthode trouve son origine dans les travaux du statisticien **K. Pearson** (1901), la méthode a été développée dans les années 30 par **H. Hotelling** [131] et se base sur la théorie des statistiques du deuxième ordre. À l'origine utilisé dans des domaines tels que la reconnaissance faciale, la télédétection, la géophysique ou encore la compression de données, elle a fait son entrée dans le domaine du contrôle non destructif (détection de fissures débouchantes par excitation thermique, voir **S. Hermosilla-Lara, P.Y. Joubert et al** QIRT 2002 [132]**.** Depuis les travaux de **N. Rajic** (2002) [133] qui a proposé cette technique pour caractériser la profondeur de défauts on considère cette méthode d'analyse comme une méthode de traitement à part entière du CND par thermographie IR. Cette technique est appelée **PCT** pour *Principal Component Thermography***.** Le **PCT** exige beaucoup de calculs c'est pourquoi les spécialistes du CND lui préfèrent la **décomposition en valeur singulière** (**SVD**, *Single Value Decomposition*) qui est une variante beaucoup plus adaptée au contrôle non destructif, car elle prend en compte l'aspect temporel du signal.

Pour plus de précision sur le principe du SVD se reporter au chapitre II page 88.

Dans le domaine du CND appliqué au patrimoine l'intérêt de la méthode est évident comme le démontre **S. Sfarra et al** (2011) [134] lorsqu'il compare un certain nombre de méthodes telles que le **PPT**, **la réflectographie proche infrarouge** et l'**holographie** au **PCT** pour l'étude d'une pièce en bois de peuplier à la géométrie complexe comportant de nombreux défauts à différentes profondeurs et sous diverses couches. Le PPT et le PCT ont été les seules techniques ayant permis la détection de 14 défauts sur les 15 présents. Voir aussi l'étude détaillée des possibilité du **PCT** par **S. Marinetti, E. Grinzato et al** (2004) [135]**.**

4.3.4.2. La méthode PLS (Partial least square)

Cette méthode provient des travaux du statisticien et économiste suédois **Herman Wold** et de son fils **Svante Wold** [136] qui l'a développée à partir de 1983. Le principe est décrit de façon succincte au chapitre II page 92. Pour plus de précision se reporter aux articles de **F. López, V. Nicolau et al** (2013 et 2014) [137], [138] qui ont introduit cette méthode d'analyse en thermographie infrarouge

F. López a étudié au moyen du PLS un polymère à base de fibres de carbone avec des défauts placés à différentes profondeurs, il a constaté une bonne détection des défauts avec une réjection très importante du bruit ainsi qu'une réd ction des effets découlant de la non-uniformité du dépôt d'én rgie (voir Figure 43). Cette technique se rapproche donc de l'analyse en composantes principales et de la décomposition en valeurs singulières. Pour plus de précision dans le domaine des applications aux œuvres d'art et plus précisément à 'analyse de fresque par PLS voir la publication de **P. Bison, A. Bartolin et al** (QIRT 2014) [139].

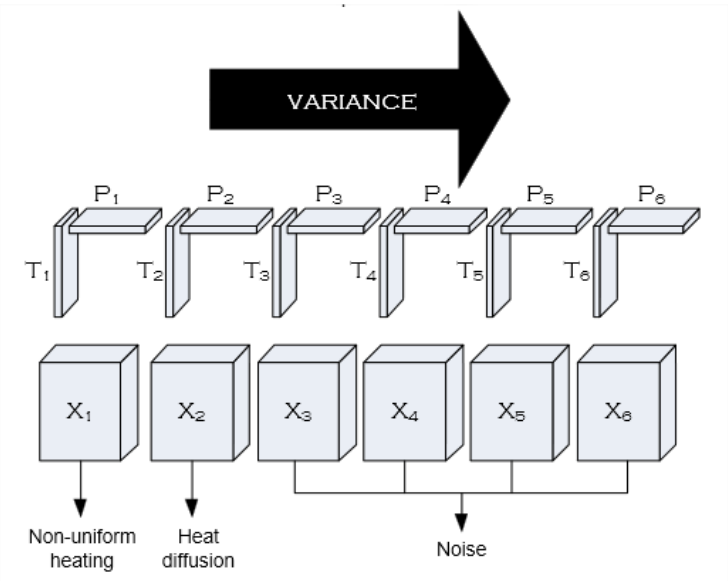


Figure 43 : Réduction des effets par le PLS

4.3.4.3.Statistiques d'ordre supérieur (HOST)

Nous avons vu que le **PCT** é ait une mé hode statistique reposant sur l'utilisation de statistiques d'ordre 2 or de ré ents dé eloppements dé ontrent qu'il est possible d'utiliser des statistiques d'ordre 3 et 4 telles que le **skewness** et le **kurtosis (paramètres de forme d'une distribution** voir Figure 45**)** pour étudier des images thermographiques**.** Cette technique appelée *Higher Order Statistics Thermography* (HOST) permet d'analyser le signal comme une distribution statistique et de le caracté iser à l'aide de quantificateurs statistiques. Pour ce faire on considère chaque pixel de la scène thermique étudiée comme une variable aléatoire suivant une **loi normale** et on caractérise la distribution de tempé ature de chaque pixel à l'aide de ces statistiques. L'observation dé ontre qu'il est possible d'amé iorer la dé ection en produisant des images de skewness et kurtosis. Cette mé hode a été introduite dans le domaine de la thermographie par **F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo et al** en 2008 au congrès QIRT [140] puis en 2009 et 2010 avec les publications suivantes [141], [142], les auteurs ont utilisé le traitement par skewness associé à une analyse pulsée, ils démontrent que la détection de défauts dans 3 plaques en matériau composite à base de fibres de carbone (CFRP) pré entant des géo é ries diffé entes est grandement amé iorée en terme de contraste et qu'elle n'est pas affectée par les conditions expérimentales (uniformité spatiale du dép t d'é ergie) et la géo é rie de l'é hantillon, que le skewness augmente avec la profondeur des dé auts, de plus cette technique présente un intérêt en matière de volume de données à traiter, elle permet d'obtenir des images compressées.

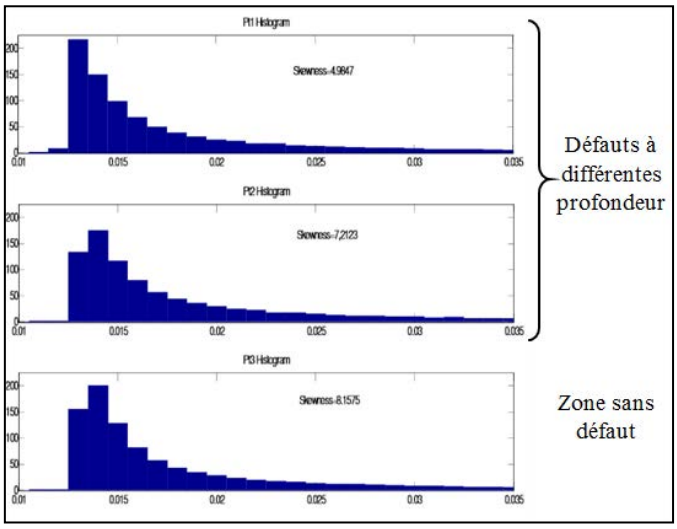


Figure 44 : Distributions de température sur 3 pixels, influence sur le skewness (tiré de Madruga [140])

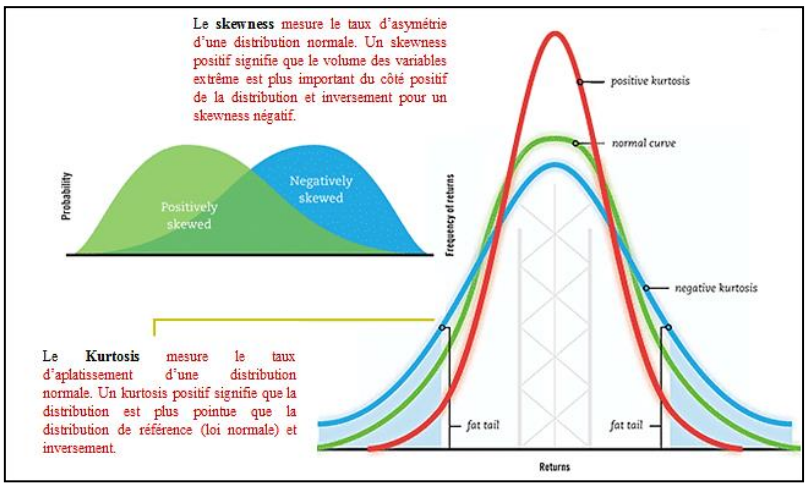


Figure 45 : Interprétation visuelle du skewness et du kurtosis.

Depuis de nombreuses publications ont confirmé la pertinence de cette approche, dans le domaine des œuvres d'art on peut citer le travail de **V.Vrabi, E. Perrin et al** (2012) [143] qui utilise le **skewness** et le **kurtosis** en association avec une excitation aléatoire et une décomposition **SVD** en détection de défauts dans une reproduction d'une œuvre d'art. Le **SVD** servant dans un premier temps à filtrer les contributions parasites, **V. Vrabi** applique ensuite des statistiques d'ordre supérieur à ce premier résultat. Il relève la précision de la détection des défauts et note que la profondeur des défauts est mise en évidence par cette méthode. Cette méthodologie a été reprise par **J.L. Bodnar et al** dans l'étude sur site d'une peinture murale [144].

5. Conclusion du chapitre I et perspectives

Dans ce tour d'horizon, nous avons essayé de dresser un état des lieux des techniques de thermographie infrarouge et des traitements appliqués à l'évaluation de l'état des œuvres d'art et à la détection et à la caractérisation des défauts en leur sein.

La thermographie infrarouge est en plein développement en raison de la démocratisation des caméras thermiques. La quantité de travaux sur le sujet est impressionnante et nous n'avons évoqué que les méthodes établies. Nous aurions pu évoquer en matière de traitement d'autres pistes récentes telles que les **ondelettes** [145], les **réseaux de neurones** [146]–[148] ou encore les recherches dans le domaine de la **tomographie infrarouge** [149], [150]**.** Sur le plan des techniques expérimentales, nous aurions pu nous attarder sur les possibilités de l'**infrarouge lointain** et les **Térahertz** [14]–[16] etc. Mais ce n'est pas l'objet de ce travail de thèse que d'entrer dans le détail de toutes ces techniques et méthodes d'analyse. D'autant plus que ces méthodes semblent loin d'avoir épuisé tous leurs potentiels en matière d'analyse comme nous le verrons dans les prochains chapitres.

Dans ce travail de thèse nous reprendrons certaines des techniques d'analyse décrites, et nous les mettrons à profit pour détecter de nouveaux types de défauts tels que les infiltrations de sels hygroscopiques ou les peintures sous badigeon, nous utiliserons des modes d'excitations variés et surtout nous mettrons en avant de nouveaux modes de caractérisation.

Chapitre 2

6. Introduction du chapitre II

L'étude bibliographique qui vient d'être faite a permis de dresser un plan d'ensemble des diffé entes techniques d'analyse, avec leurs avantages et leurs inconvén ents concernant l'analyse des œuvres d'art. Les approches et les choix auxquels l'expert a recours dans son travail sont nombreux, ils dép ndent des œuvres d'art en elles même, par exemple une peinture sur chevalet ne s'analysera pas né essairement avec les mêmes mé hodes d'analyse qu'une peinture murale ou qu'une cé amique. La nature des matériaux, la variété des formes et la multiplicité des défauts déterminent le choix de la technique d'analyse, mais il ne faut pas oublier l'importance de la prise en compte des contraintes de terrain et l'aspect économique sur ces choix. L'accès aux œuvres d'art est souvent limité et s'opère dans un contexte contraignant en termes de temps, de sécurité, etc. L'utilisateur ne peut pas né liger ces aspects dans le choix de sa méthode de travail.

L'objet de ma thè e est d'analyser principalement des peintures murales, nous étudions ces œuvres sur site. À partir de là le choix du laboratoire s'est porté comme nous l'avons vu sur le choix de la thermographie infrarouge stimulé . Notre outil d'analyse sera dé rit, nous verrons en quoi il est pertinent, un certain nombre de points concernant ses limitations seront soulevés et nous aborderons les possibilités et moyens techniques de les dép sser afin d'amé iorer la qualité e la détection.

Un volet portant sur le moyen d'amé iorer la dé ection à l'aide de post-traitements sera évoqué, nous verrons là encore qu'il existe de nombreuses possibilité en matiè e de calcul pour é endre les possibilités du dispositif.

Nous nous interrogerons enfin sur la possibilité de combiner une approche purement expérimentale avec des méthodes calculatoires, nous verrons si le gain de cette approche combinée est intéressant ou pas en terme de détection.

7. Le dispositif de détection SAMMTHIR

Le laboratoire a mis au point un outil permettant de stimuler de façon contrôlée les échantillons étudié, le Système d'Analyse des Matériaux Minces par THermographie InfraRouge (**SAMMTHIR**). Celui-ci découle de l'adaptation en thermographie d'un dispositif plus ancien, le système **SAMMIR** (Système d'Analyse des Matériaux Minces par InfraRouge) mis au point au sein de notre laboratoire, le GRESPI, cet équipement effectuait des analyses par radiométrie infrarouge (monopoint) d'échantillons minces. L'arrivée de caméras thermiques performantes et bon marché dans les années 90 et 2000 a bouleversé l'environnement de recherche et rendu nécessaire cette évolution vers la thermographie.

SAMMTHIR se compose d'un système d'excitation, d'une optique de détection instrumentée en lien avec une électronique de pilotage et un système d'analyse (voir Figure 46). Détaillons ce dispositif : concernant **l'excitation,** ce système permet d'utiliser un large choix de sources étendant sur des gammes spectrales variées allant du visible au proche infrarouge et nous envisageons même de l'étendre sous peu à l'infrarouge lointain. Les sources utilisées peuvent opérer en ponctuel (laser) et en étendu (flash, halogène, radiant…). La **génération des signaux** en séquence et en intensité s'effectue par une saisie dans un fichier texte de la séquence, cette séquence est ensuite convertie en analogique et est envoyée vers un relais statique qui commande les sources. L'opérateur dispose aussi d'un large choix de signaux d'excitation de base (impulsion de Dirac, créneau, rapport cyclique, PRBS…) préenregistré, qu'il peut modifier simplement et adapter aux besoins de la configuration expérimentale. La **détection** s'effectue au moyen d'une caméra thermique *Flir* de type A20 ou SC645 pilotée en mode maitre/esclave et synchronisée aux sources grâce à une carte d'interfaçage *National instrument*. L'interface de pilotage et de synchronisation de l'aété développé sous *Labview*.

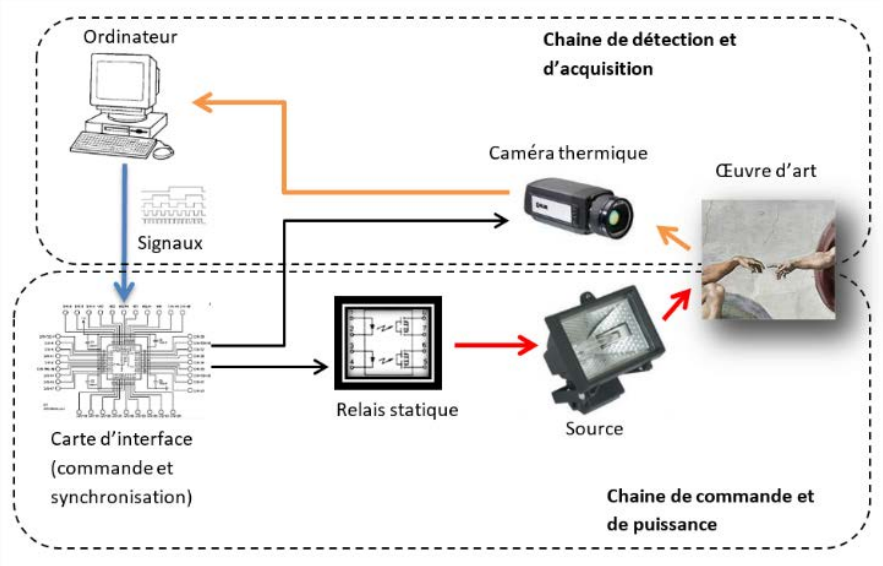


Figure 46 : Le dispositif SAMMTHIR

Figure 47 : Source flash

Figure 48 : Carte d'interface

Figure 49 : Relais statique

7.1. Pertinence du dispositif

7.1.1. Type de défauts recherchés

La thèse de **Jean-Charles Candoré** [151] (2010) a exploré les possibilités de SAMMTHIR en matiè e de détection de défauts dans diffé ents types d'œuvre d'art telle que les fresques, peintures murales, mais aussi sur des marqueteries, vitraux et céramiques.

Nous nous intéresserons principalement dans ce travail à l'amé ioration de la dé ection de **déplacages** et décollement, nous n'aborderons pas dans ce chapitre la question des infiltrations de sels hygroscopiques dans les géo matériaux, nous étudierons en détail cette question dans le chapitre IV.

Les déplacages et décollements sont des altérations de la couche picturale qui se manifestent par une rupture d'adhé ivité d'un plan par rapport à un autre pour des matériaux présentant une stratification comme les peintures murales. Ces dommages ont des consé uences d'autant plus né astes pour la cohé ion structurelle du support de l'œuvre d'art qu'ils sont souvent totalement invisibles en surface, ils se manifestent par l'apparition de microcavité à l'inté ieur des enduits ou à l'interface entre l'enduis et le mur. Les causes d'apparition sont varié s, elles peuvent trouver leur origine dans des chocs, dans les vibrations, les cycles saisonniers de dilatation (thermique ou autre) du maté iau ou l'humidité. Des inhomogé ités telles que des inclusions peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut par la création de zones ou de points de contraintes mécaniques. Une mauvaise pose de l'enduit ou un dé aut dans la pré ration (mauvais dosage, pollution chimique) peut aussi à terme provoquer l'apparition de ce type d'alté ations.

Actuellement l'une des mé hodes utilisé s par les restaurateurs et les spécialistes de la pierre est le sondage acoustique, ce type de méthode empirique consiste à solliciter la surface du matériau par des tapotements successifs pouvant mettre en évidence le défaut par un écho caractéristique identifiable par un expert. Cette méthode dépend bien entendu de la capacité de perception de l'opérateur, de son expérience en plus d'êtres sujette à la subjectivité. Le contact physique avec la surface et les tapotements successifs peuvent se ré é er préjudiciables à l'œuvre d'art, cette mé hode doit donc être utilisée avec parcimonie et prudence, l'intérêt des mé hodes photothermiques telles que la thermographie infrarouge stimulé s'impose comme une é idence pour les avantages qu'elle fournit en terme de sensibilité et de précision et sur le plan des garanties qu'elle apporte au respect de l'inté rité d s œuvres d'art.
C'est la raison d'être de notre instrument : le dispositif **SAMMTHIR**.

7.1.2. Mise en œuvre de SAMMTHIR

Le dispositif SAMMTHIR est un dispositif modulable et mobile qui permet de faire de la dé ection de défauts dans de nombreux types d'œuvres d'art. Nous nous sommes essentiellement intéressés pour le volet détection aux peintures murales et fresques, mais ce dispositif nous a permis d'é udier de nombreux type d'œuvres d'art telles que des marqueteries, des poteries, des vitraux ou encore de peinture sur chevalet. Dans le chapitre III nous décrirons les possibilités de SAMMTHIR sur le plan de la caractérisation.

7.1.3. Exemples de détection de défauts sur des éprouvettes de laboratoire

Nous allons présenter deux exemples d'analyse qui permettront d'illustrer les possibilité de SAMMTHIR, mais aussi ses limites.

a) Cas n°1 : Repérage de lacune dans une mosaïque recouverte d'un enduit de plâtre

Cet é hantillon acadé ique est constitué 'une plaque de contre-plaqué d'une largeur de 314 mm, d'une longueur de 314 mm, cette plaque a ensuite é é recouverte d'un enduit sur lequel ont été disposés des é é ents en céramique de façon à reproduire les caracté istiques d'une mosaïque, l'ensemble a ensuite é é recouvert d'une couche de plâtre d'un peu plus d'un centimè re d'é aisseur. L'ensemble forme une plaque d'épaisseur 25 mm. Les cailloux de cé amique n'ont pas é é disposés de

façon uniforme sur toute la surface de la plaque ce qui se traduit par des lacunes se trouvant en certains endroits. Nous allons les détecter à l'aide de SAMMTHIR. On note un é é ent important : la surface de l'é hantillon a été ecouverte de façon **uniforme** d'une peinture thermoré istante de couleur noire afin d'homogén iser l'absorption d'énergie.

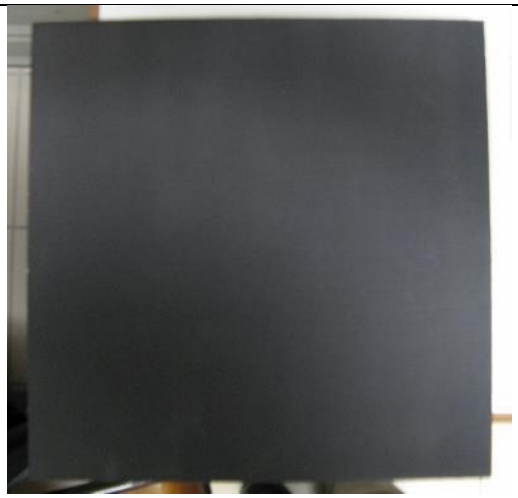


Figure 50 : vue de face avant

Figure 51 : Vue de face arrière

Figure 52 : Montage vue avant

Figure 53 : Montage vue arrière

Les sources halogènes sont placées de façon symétrique à environ 30 cm de part et d'autre de la camé a, la distance entre la camé a et l'é hantillon est de 50 cm. Le type d'excitation retenu est le PRBS sous une tension de 1V (100 Watts) et une durée d'excitation de 256 s, duré de l'analyse 300 s.

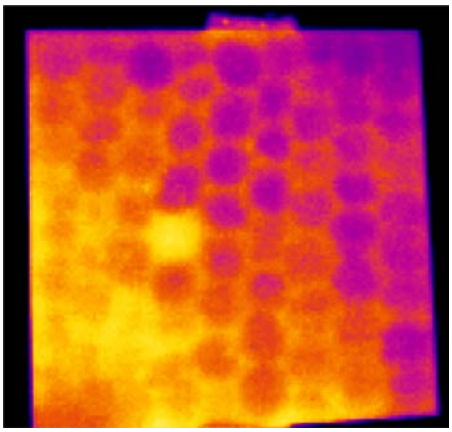


Figure 54 : Image thermique brute

L'image thermique permet de mettre en évidence sans difficulté la présence d'une lacune dans la répartition interne des éléments de céramique. Observons maintenant un échantillon recouvert d'un motif bariolé.

b) Cas n°2 : Détection de défauts dans une éprouvette bariolée (Saint Christophe)

Cette éprouvette a déjà été étudiée et a été présentée dans le mémoire de thèse de **Jean-Charles Candoré** [151], nous ne reviendrons pas dessus, nous voulons juste souligner certaines limites en matière de détection du dispositif SAMMTHIR et mener une réflexion sur les pistes envisageables pour y remédier. Contrairement au cas précédent, la surface de l'éprouvette n'est pas peinte uniformément. Sa surface est recouverte d'un motif. L'éprouvette est une réplique du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre, elle a été réalisée par des restaurateurs professionnels selon la technique des primitifs italiens.
L'éprouvette comprend 5 inclusions de plastazote[11] de différentes formes et disposées à différentes profondeurs.

L'échantillon a été soumis à une excitation de type crénau, d'une durée de 1 min, la durée totale d'observation est de 5 min.

Figure 55 : Montage

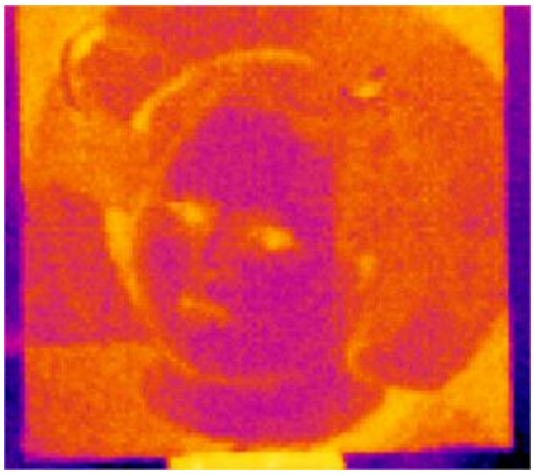


Figure 56 : Image thermique (début d'échauffement)

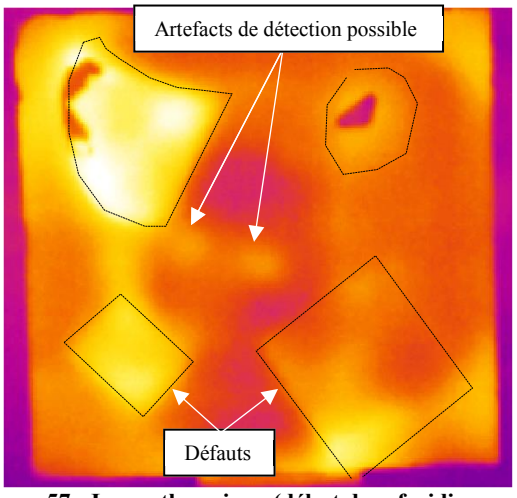


Figure 57 : Image thermique (début de refroidissement)

Sur les cinq défauts présents nous en repérons quatre (voir Figure 57), néanmoins cette détection présente une difficulté : le motif est apparent et il peut être à l'origine d'artefact de détection, exemple au niveau des yeux du personnage, ces zones correspondent aux zones peintes dans des teintes sombres, elles se manifestent thermographie comme des points chauds, car elles s'échauffent plus en

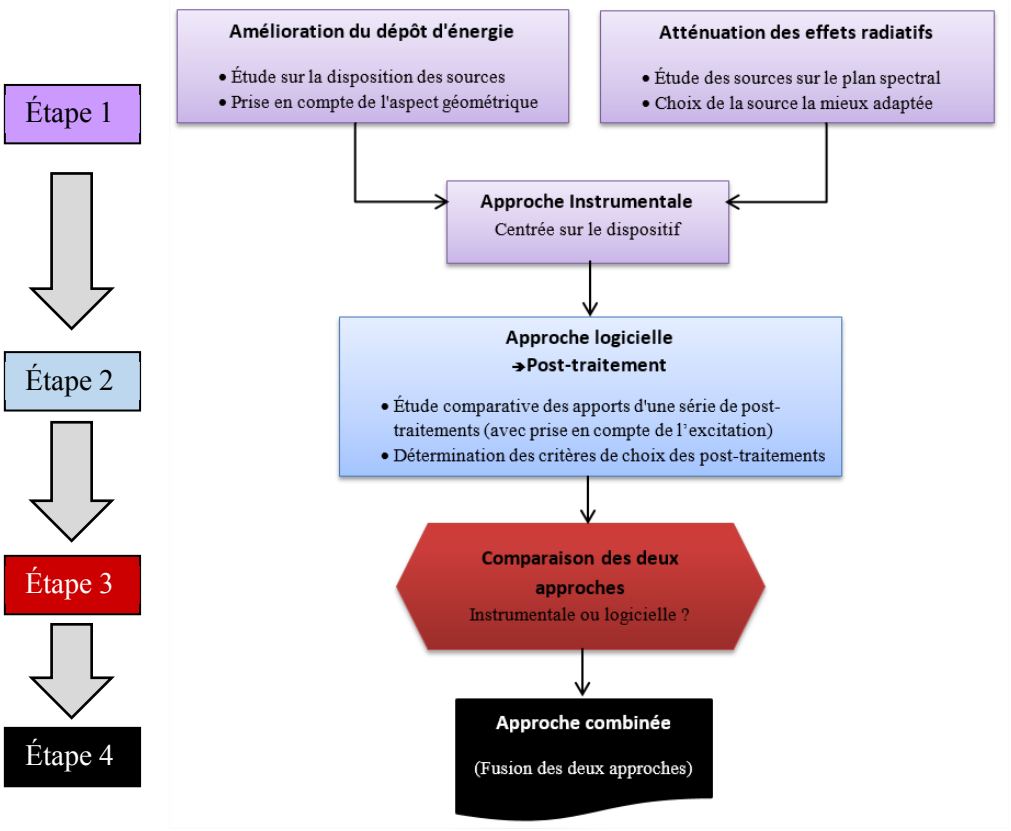
[11] "**Plastazote** est la marque commerciale déposée d'une mousse réticulée à cellules fermées faite de polyéthylène. Nommée aussi mousse de polyéthylène ou de polyoléfine ou émalène." *Source: Plastazote - https://fr.wikipedia.org*

raison de leur absorptivité plus importante. La différentiation avec les zones comportant un défaut peut se ré é er fastidieuse, elle s'effectue en analysant la ciné ique d'échauffement et de refroidissement de ces zones, l'apparition des dé auts sous-jacents se manifeste par un déphasage par rapport aux motifs de la couche picturale, en cas de doute la comparaison avec l'image visible du motif est parfois nécessaire.

7.1.4. Problématique et axes de recherche

Pour ré oudre ce problè e, deux pistes s'offrent à notre ré lexion, la premiè e s'intéresse au dispositif en lui-même : comment améliorer ou optimiser SAMMTHIR afin de rendre la détection plus fiable ? Cette approche aborde le problè e en amont et s'inté esse essentiellement aux aspects expérimentaux et fonctionnels, la seconde piste de ré lexion que nous avons menée s'inté esse au ré ultat de l'analyse et à son exploitation à l'aide de traitements mathé atiques. Est-il possible de réd ire ou d'atténu r par le calcul les contributions ou effets parasites à l'aide de post-traitement par exemple ?

Notre dé arche s'intéressera dans un premier temps aux aspects géo é riques de la configuration expérimentale, car ces aspects interviennent dans le dépôt d'én rgie, ensuite nous nous intéresserons à l'étude des sources d'excitation et à leur influence sur la détection. Dans la seconde partie du chapitre, nous é udierons la façon d'atté uer les artefacts de dé ection au moyen de post-traitement, nous comparerons leur performance selon des critères objectifs. Enfin nous comparerons les deux approches et nous essayerons de fusionner ces approches.



8. Approche instrumentale : amélioration du dispositif, étude sur les sources

Comme nous avons pu le faire remarquer dans le premier chapitre, l'une des difficultés rencontrés fréquemment en CND par thermographie résulte de problèmes de dépôt d'énergie. Ces difficultés peuvent avoir plusieurs causes. Un problème d'homogénéité dans la répartition du flux sur la surface analysée qui s'explique par des défalages de positionnement des sources respectives et par des considérations géométriques lorsque la surface étudiée est importante relativement à la taille des sources (Figure 58 & Figure 59). Lorsqu'on travaille avec plusieurs sources, on peut aussi observer des disparités de puissance entre les sources liées à leur vieillissement, ce problème se règle aisément par le remplacement à neuf des sources. L'autre cause régulièrement observée lorsqu'on étudie des surfaces peintes provient des variations de propriétés radiatives provoquées par la présence de pigments en surface (Figure 61). Ces pigments ne réagissent pas de la même manière lorsqu'ils sont soumis à un flux d'énergie ce qui a pour effet de rendre l'interprétation des thermogrammes complexe et peut biaiser la détection.

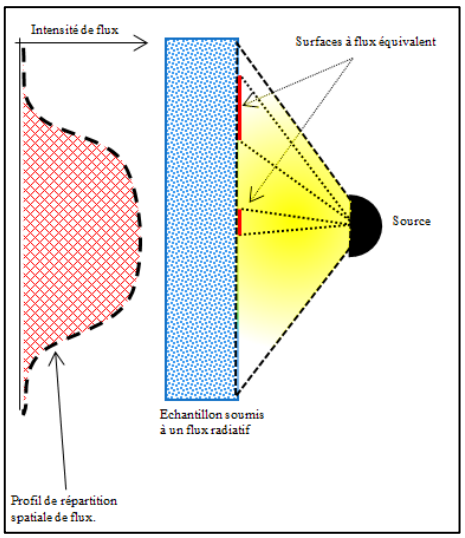


Figure 58 : Configuration inhomogène (ratio taille source/taille zone insuffisant)

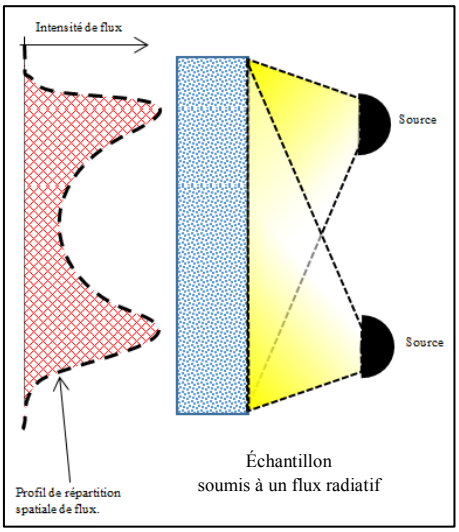


Figure 59 : Configuration inhomogène (mauvais positionnement des sources)

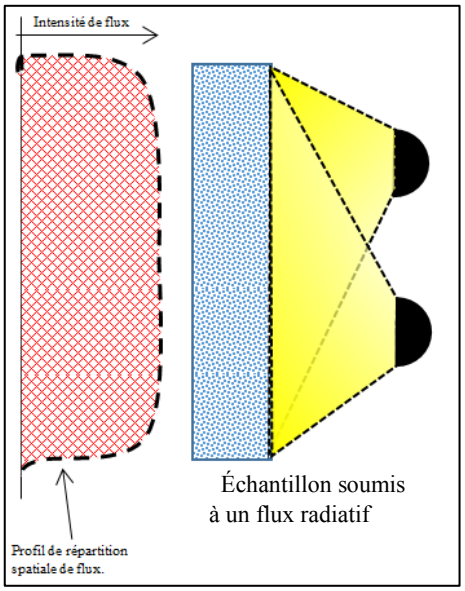


Figure 60 : Dépôt d'énergie uniforme sur la zone étudiée

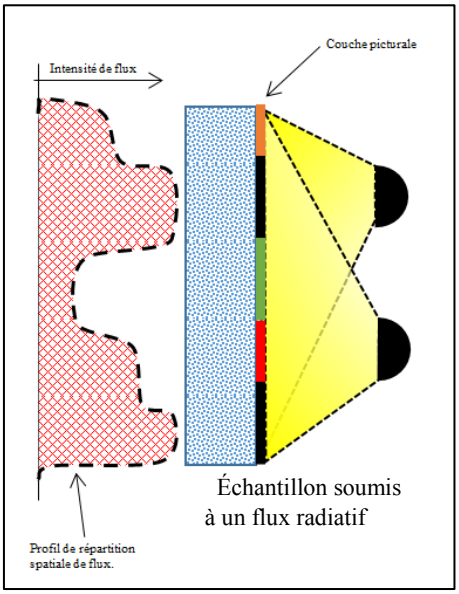


Figure 61 : Dépôt d'énergie inhomogène en raison de la couche picturale

Ce problème d'uniformité du dépôt peut se traiter sur plusieurs plans distincts : par une approche opérationnelle s'intéressant aux aspects géométriques de la configuration expérimentale (positionnement des sources). Cette approche permet d'optimiser la répartition du flux radiatif sur la surface étudiée, mais ne règle pas la question des effets optiques découlant des variations locales d'absorptivité induites par l'état de surface ou par la présence de pigments. Ce problème nécessite une approche physique s'intéressant à la nature des sources et à leurs caractéristiques spectrales, que nous traiterons aussi, il est aussi possible d'avoir recours à des post-traitements compensant par le calcul l'influence de ces effets. Ces différentes approches seront l'objet de ce chapitre.

8.1. Amélioration de la configuration expérimentale, aspects géométriques.

Dans le cadre de cette première partie consacrée aux sources d'excitation nous nous intéressons à la meilleure configuration spatiale des lampes permettant d'obtenir la zone d'excitation la plus vaste et la plus homogène possible en termes de dépôt d'énergie. Cette zone est définie comme l'étendue recevant un flux d'au moins 90 % du pic d'émission.

8.1.1. Dispositif

Ce travail a été réalisé à l'aide d'un dispositif comprenant :

- ◊ Un écran avec un tracé de repérage permettant un pointage précis.
- ◊ Un fluxmètre IR+ visible composé d'une thermopile de marque Captec (2.88 µV/(W/m²).
- ◊ Un système de positionnement du fluxmètre
- ◊ Un multimètre

Ce dispositif permet de relever point par point l'intensité du flux radiatif et d'estimer ainsi la surface homogène sur le plan du dépôt d'énergie.

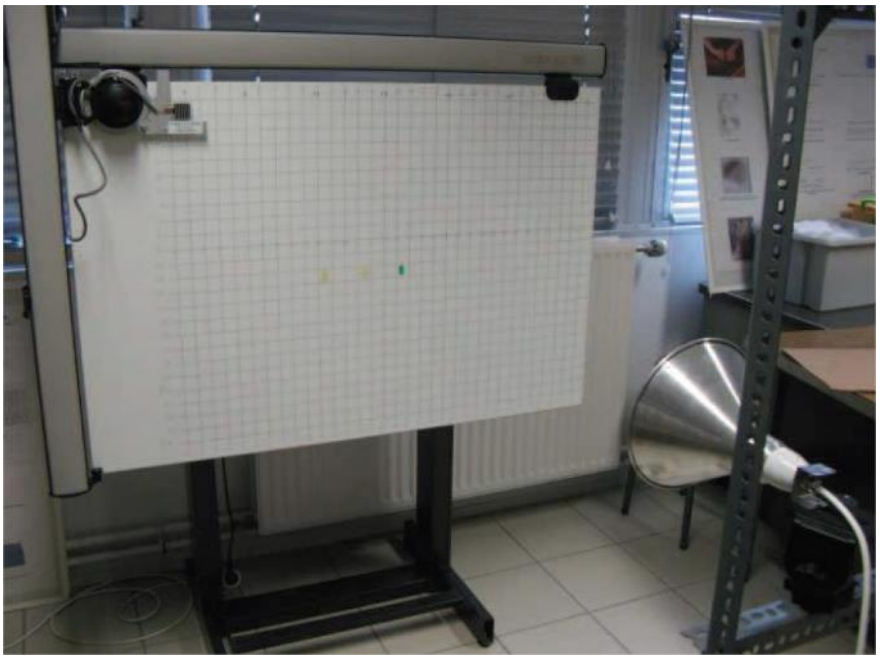


Figure 62 : Le dispositif

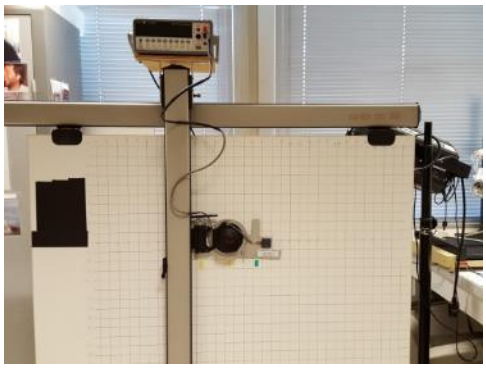


Figure 63 : Gros plan de la table de mesure et du dispositif de mesure

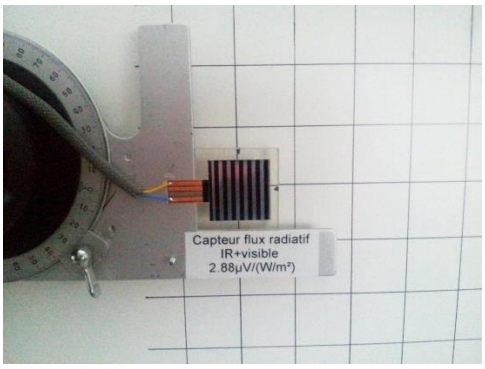


Figure 64 : Fluxmetre

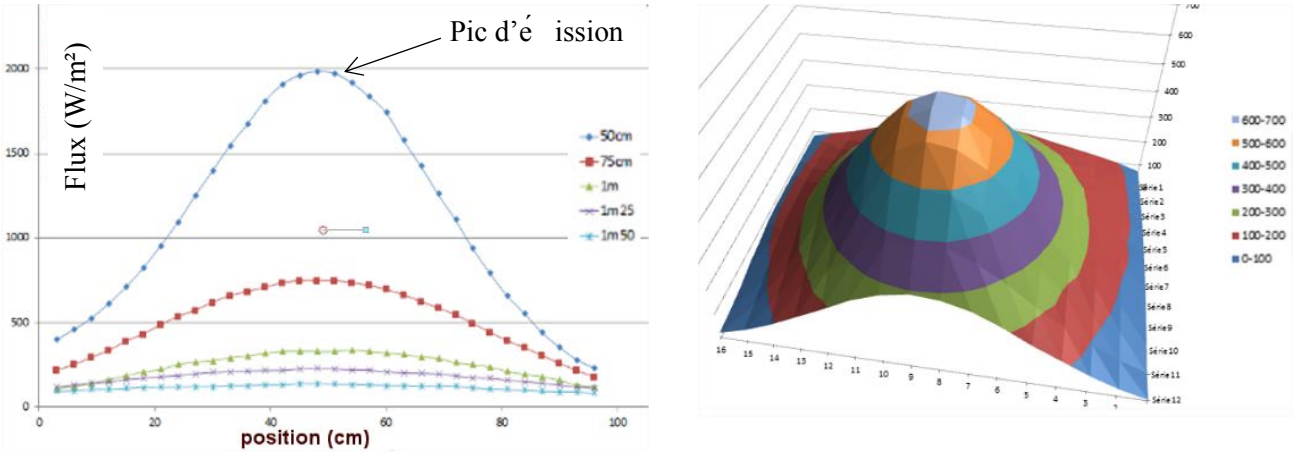


Figure 65 : Relevé pour une source unique placée à l'aplomb (Profils à différentes distance et représentation 3 D)

La Figure 65 donne un exemple de relevé pour une mono-source. On peut observer une répartition spatiale du flux parabolique. Nous allons étudier plusieurs paramètres pouvant impacter la quantité de flux déposé par un ensemble de sources tels que la distance ou la direction des sources (angle d'incidence). Le nombre de sources sera aussi étudié nous commencerons par deux sources, puis des dispositions à trois et enfin quatre sources.

8.1.2. Influence de la distance

Nous nous intéressons dans cette partie à l'influence de la distance de deux sources infrarouges (nous verrons plus avant les raisons de ce choix), d'une puissance de 250 W placée symétriquement de part et d'autre d'un axe moyen et normal à la surface de la table de mesure.
Nous avons étudié 2 configurations, une à 0,75 m de l'écran et l'autre à 1,5 m. Nous avons fait varier l'écart entre les deux sources de 15 à 45 cm – l'écartement est mesuré à partir des bords des lampes. La surface utile a été mesurée en comptabilisant les zones recevant un flux au moins égal à 90 % de la valeur maximale du flux frappant le centre de la surface. Nous désignerons ce type de configuration *Type I*.

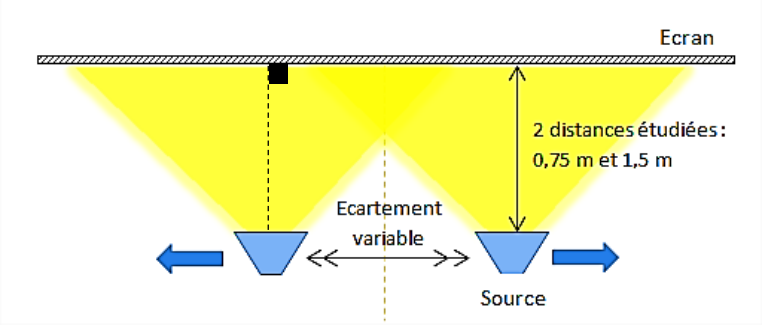


Figure 66 : Configuration de type I

a) Cas n° 1 : Distance à 0,75 m de l'écran

Les figures suivantes représentent deux profils de la répartition énergétique selon un axe horizontal (axe x) et vertical (axe y). Ces profils sont de type parabolique. La zone utile a été représentée, sa surface est celle d'un rectangle ayant pour longueur la longueur de cette zone selon x et pour largeur la longueur de cette zone selon y.

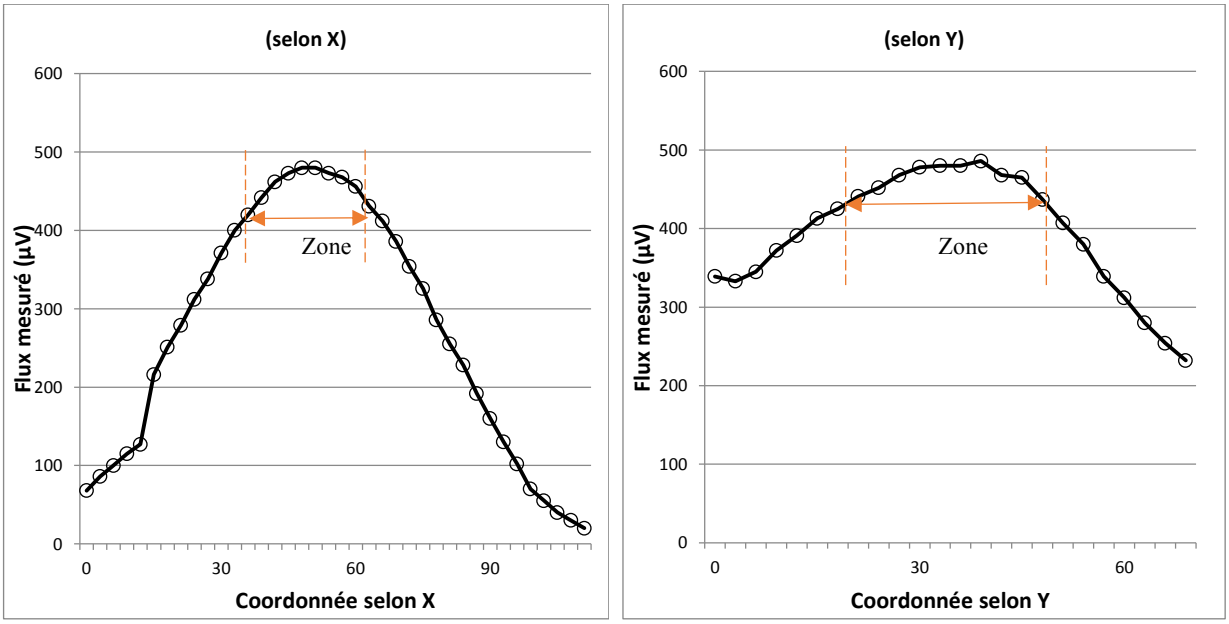


Figure 67 : Exemples de profils transversaux et longitudinaux (écartement des sources = 15 cm)

Tableau 4 : Étude de positionnement des sources, éloignement 0,75 m

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	**Flux moyen (W/m²)**
15	**792**	155,7
21	**756**	149,7
30	**693**	139,6
39	**864**	122,6
45	**972**	112,8

b) Cas n° 2 : Distance à 1,5 m de l'écran

Tableau 5 : Étude de positionnement des sources, éloignement 1,5 m

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	Flux moyen (W/m²)
15	**972**	88,7
21	**1404**	84,4
30	**1188**	82,1
39	**1350**	76,0
45	**1287**	74,0

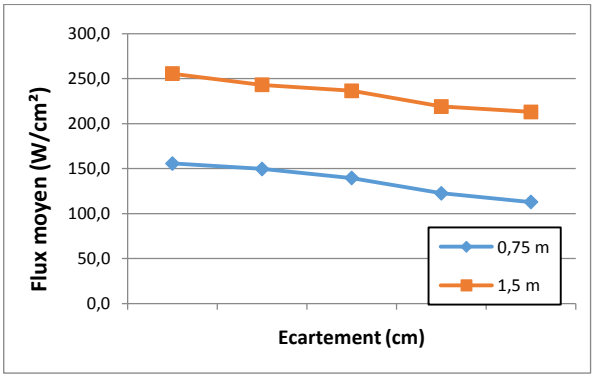


Figure 68 : Dépôt d'énergie moyen

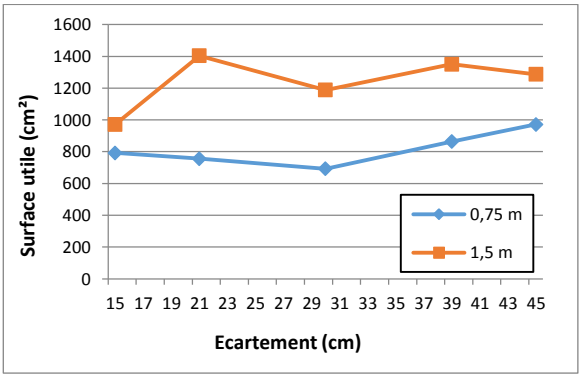


Figure 69 : Surface utile

L'observation de la Figure 68 montre que le dépôt d'énergie est maximal lorsque les sources sont proches l'une de l'autre et qu'il diminue lorsque l'écartement augmente (dans les deux configurations, 0,75 m et 1,5 m). La surface utile présente une évolution plus complexe, elle peut présenter des maximums ou des minimums locaux en fonction de l'écartement des sources.

La Figure 70 regroupe de façon synthétique les données des tableauxTableau 4 etTableau 5. En abscisse nous avons reporté les surfaces utiles des dix configurations étudiées et nous avons reporté en ordonnés les flux moyens mesurés sur les surfaces utiles. Cette représentation permet d'avoir une vue synthétique des configurations que nous avons testées. 0 ce stade nous pouvons nous interroger sur la configuration la plus performante en terme de dépôt d'énergie et de surface. Bien entendu la meilleure configuration est celle qui offre la surface utile la plus importante pour l'énergie la plus importante.

Pour avoir un indicateur permettant de comparer la configuration, il nous est apparu pertinent de définir ainsi un indice de performance P permettant d'évaluer l'apport d'une configuration ou d'un réglage sur une base plus objective que la simple observation. Nous proposons de définir cet indice comme le produit du dépôt d'énergie par la surface utile, le tout divisé par la puissance totale délivrée par les sources. Cet indicateur peut se représenter à un facteur près comme la surface d'un rectangle ayant pour longueur la surface utile et pour largeur le flux déposé pour 1W. Le rectangle vert de la Figure 70 représente cet indicateur.

$$P = \frac{\text{Dépôt d'énergie} \times \text{Surface utile}}{\text{Puissance totale}}$$

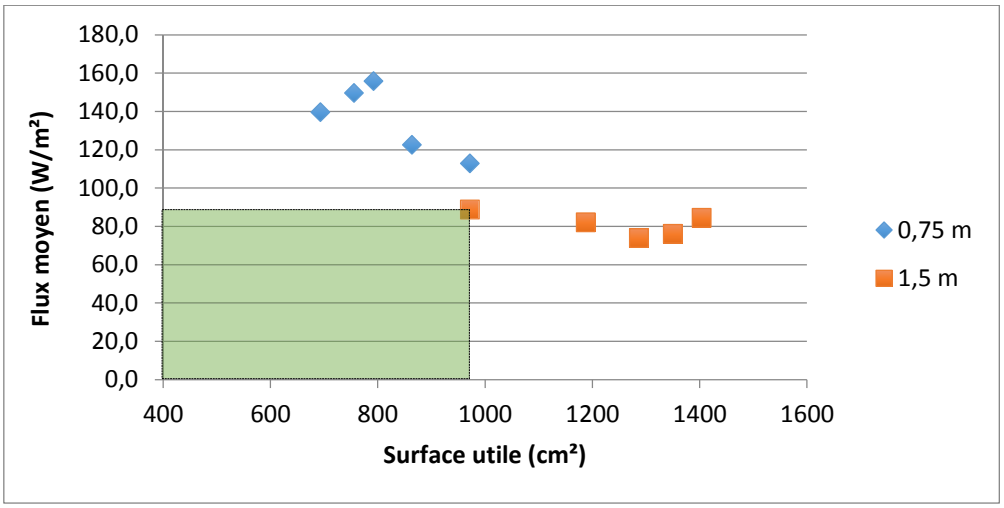


Figure 70 : Représentation synthétique

La Figure 70 met en évidence des comportements distincts pour les deux éloignements testés, ceux-ci forment deux nuages clairement identifiables. La figure ci-dessus permet de tirer une conclusion : pour augmenter la surface utile, il est nécessaire d'augmenter l'éloignement, mais cela se fait au détriment du dép t d'én rgie et donc du contraste thermique. Il est donc né essaire de trouver un compromis entre l'é ergie déposée et la surface utile.

Tableau 6 : Comparaison des configurations de type I (par ordre croissant de performance)

Éloignement	Écartement (cm)	Surface (cm²)	E moyen (W/m²)	Indice performance P
1,5m	15	972	89	172
1,5m	45	1287	74	190
0,75m	30	693	140	193
1,5m	30	1188	82	195
1,5m	39	1350	76	205
0,75m	39	864	123	212
0,75m	45	972	113	219
0,75m	21	756	150	226
1,5m	21	1404	84	237
0,75m	15	792	156	247

Nous avons reporté dans le Tableau 6 les différentes configurations avec leurs indices de performance. On remarque que lorsque l'éloignement des sources est à 0,75 m nous avons un dépôt d'én rgie plus important donc un contraste amé ioré, mais la surface d'analyse est réd ite, l'inverse se vérifie pour la configuration à 1,5 m. La configuration proche (0,75 m) donne globalement de meilleurs résultats. Le choix de la configuration à 1,5 m est à choisir seulement dans les cas où on souhaite étudier une surface importante. En pratique nous pouvons retenir les deux points suivants :

- ◊ Surface utile privilégiée : se placer à 1,5 m de la surface avec un écartement des sources d'environ 20 cm (surface utile 1404 cm²)
- ◊ Contraste de l'image privilé ié : se placer à 0,75 m de la surface étudiée avec un é artement des sources d'environ 15 cm.

8.1.3. Influence de l'angle de visée des sources

Cette seconde étude s'intéresse à l'influence de l'angle que font les sources par rapport à la normale à l'écran. Les sources sont placées à une distance au plan fixé à 1 m. Elles sont inclinés par rapport à la normale et positionnées de façon symétrique. Cette configuration est désignée *Type II*.

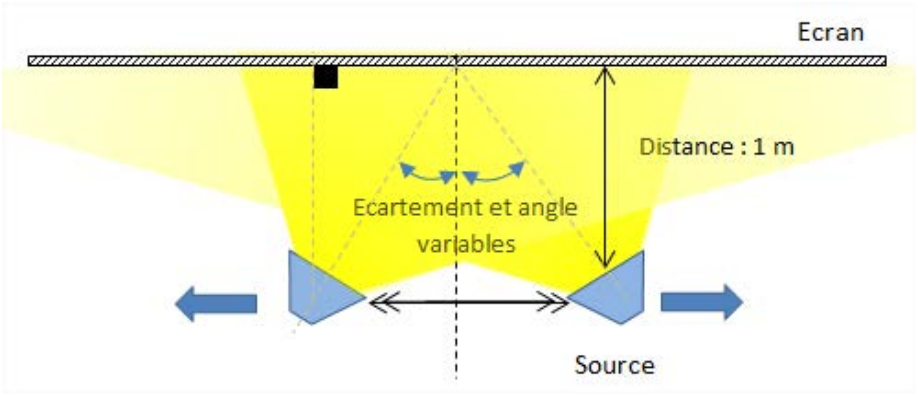


Figure 71 : Configuration de type II

Observons l'influence de cette inclinaison pour deux angles : 30 et 45°. Comme précédemment on fait varier l'écartement des sources et on procédera de même pour l'exploitation des données.

a) Cas n° 1 : Angle de 30 °

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	**Flux moyen (W/m²)**
6	**2754**	359,4
15	**2772**	338,5
21	**4104**	310,6
30	**3060**	298,1
45	**2916**	254,7

b) Cas n° 2 : Angle de 45 °

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	**Flux moyen (W/m²)**
6	**3168**	335,1
15	**4446**	304,0
21	**3744**	296,2
30	**2430**	251,0
45	**1053**	193,9

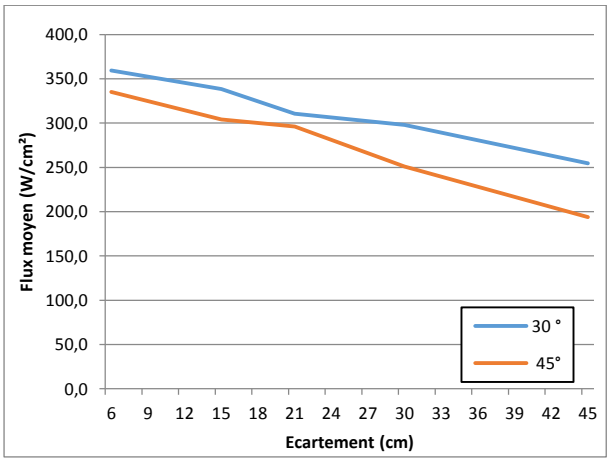


Figure 72 : Dépôt d'énergie moyen

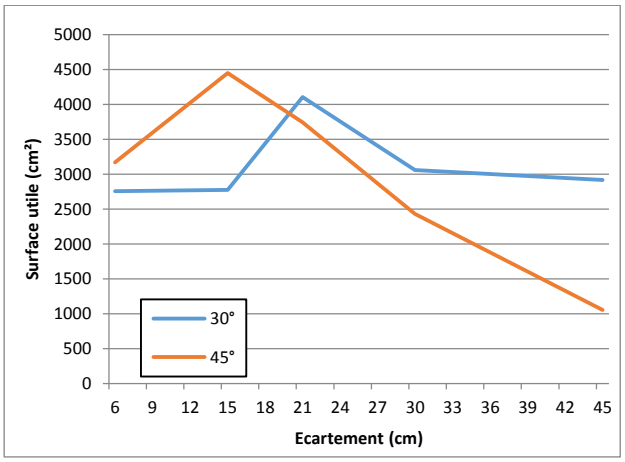


Figure 73 : Surface utile

Les comportements observés sont similaires aux observations faites pour la configuration I, le dépôt d'énergie décroit continument avec l'écartement des sources (Figure 72). Les surfaces utiles sont plus importantes avec ce type de configuration, leur évolution avec l'écartement des sources présente comme précédemment un maximum avant de décroitre. Nous avons reporté les résultats des deux tableaux dans un graphe suivant. La configuration à 45° est plus dispersée, car plus sensible à l'écartement des sources.

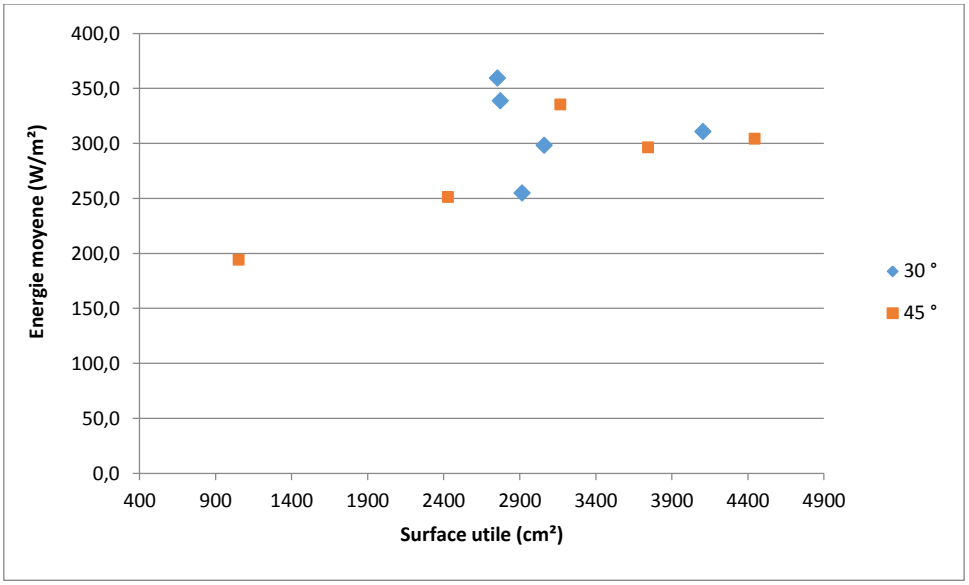


Figure 74 : Représentation synthétique

Tableau 7 : Comparaison des configurations de type II (par ordre croissant de performance)

Réglage	Écartement (cm)	Surface (cm²)	Énergie moyenne (W/m²)	Indice performance P
30°	6	2754	359,4	140
30°	45	2916	254,7	157
30°	15	2772	338,5	183
30°	30	3060	298,1	184
45°	45	1053	193,9	204
30°	21	4104	310,6	295
45°	30	2430	251,0	610
45°	6	3168	335,1	1062
45°	21	3744	296,2	1109
45°	15	4446	304,0	1352

Le Tableau 7 permet d'observer que le positionnement à 45 ° des sources donne de meilleurs ré ultats qu'un positionnement à 30 °, ceci s'explique par l'aspect plus rasant des flux lumineux, l'intersection des deux flux donne des surfaces de croisement plus importantes. Le classement par indice met en avant la configuration à 45 ° avec des écartements de 15 et 21 cm. Une comparaison rigoureuse avec la configuration I reste toutefois difficile, car la distance des sources à l'écran est différente, ici 1 m alors que précédemment elle était de 0,75 m et 1,5 m, on peut toutefois conclure à un avantage pour la configuration II sur la configuration I (sources à l'aplomb) compte tenu des ordres de grandeur de l'indice de performance.

8.1.4. Influence de la distance à angle fixe

Reprenons la configuration à 45° qui donne des résultats satisfaisants et faisons varier la distance à l'écran. Le type et la puissance des lampes ne changent pas.

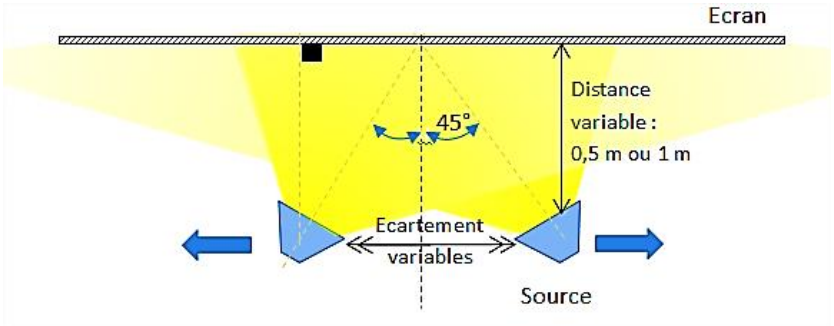


Figure 75 : Configuration II bis

a) Cas n° 1 : Distance 0,5 m

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	Flux moyen (W/m²)
0	**594**	1234
3	**882**	1166
9	**2601**	1109
15	**360**	955
21	**315**	820

b) Cas n°2 : Distance 1 m

Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	**Flux moyen (W/m²)**
0	1836	356
3	3456	338
9	4284	323
15	4212	304
21	3744	251

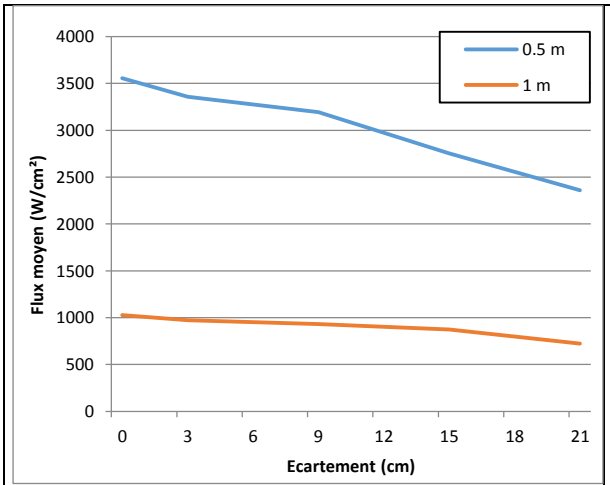


Figure 76 : Dépôt d'énergie moyen

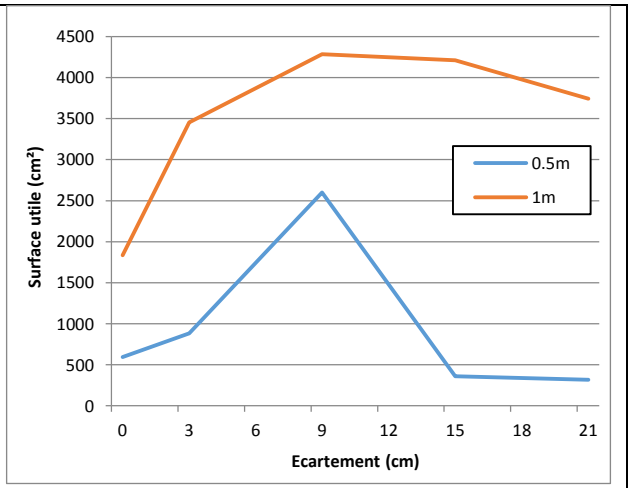


Figure 77 : Surface utile

Le graphe de la Figure 76 montre comme on pouvait l'attendre une diminution continue du flux avec l'écartement des sources et avec leur éloignement. La Figure 77 est plus complexe à interpréter, elle met en évidence dans les deux cas une évolution en forme de cloche avec un maximum observé lorsque les sources sont écartées de 9 cm. Le graphe ci-dessous regroupe les données, les deux types de configuration sont clairement identifiables. La configuration à 0,5 m apporte plus d'énergie au détriment de la surface utile alors que le contraire est observé pour la configuration à 1 m (dispersion essentiellement sur la surface utile).

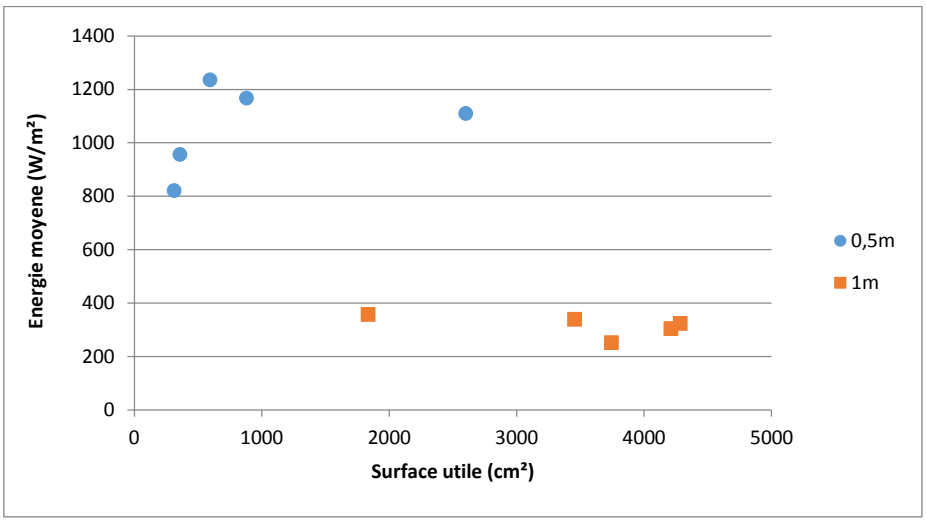


Figure 78 : Représentation synthétique

À présent, reportons tous ces résultats dans le tableau suivant afin de comparer et classer ces différentes configurations expérimentales :

Tableau 8 : Comparaison des configurations de type II bis (par ordre croissant de performance)

Réglage	Écartement (cm)	Surface (cm²)	Énergie moyenne (W/m²)	Indice performance P
0,5 m	21	315	820	258
0,5 m	15	360	955	344
1 m	0	1836	356	654
0,5 m	0	594	1234	733
1 m	21	3744	251	940
0,5 m	3	882	1166	1028
1 m	3	3456	338	1169
1 m	15	4212	304	1280
1 m	9	4284	323	1385
0,5 m	9	2601	1109	2885

Le Tableau 8 met en évidence la supériorité de certains réglages : L'écartement des sources à 9 cm semble offrir les meilleures conditions : réglages à 0,5 m et 1 m à 45°. La configuration à 0,5 m

8.1.5. Ajout de sources supplémentaires

a) Cas n° 1 : Configuration à 3 sources

Nous avons ensuite estimé l'apport d'une lampe supplémentaire, intercalée au milieu des deux autres sources, nous reprenons pour cela le type de configuration étudiée en 8.1.2 (page 56). Appelons cette configuration *Type III*.

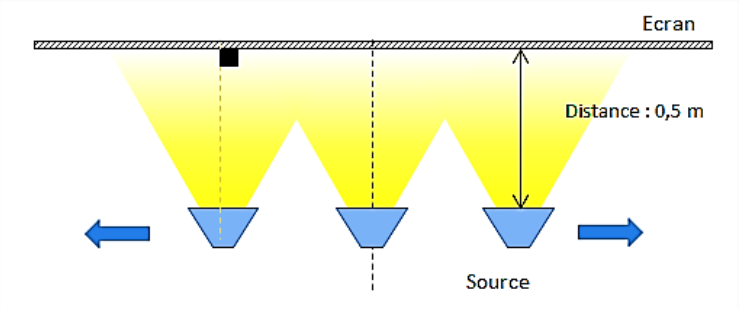


Figure 79 : Configuration de type III

Nous comparons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus avec 2 sources et 3 sources, ces résultats ont ensuite été reportés dans le graphe ci-dessous (voir Figure 80). On constate de façon évidente que le flux mesuré est plus important avec trois sources, mais la surface utile est plus importante avec deux sources.

Tableau 9 : Résultat 3 sources

Type de configuration	Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	Flux moyen (W/m²)
2 lampes	30	504	1347
2 lampes	42	1080	1053
2 lampes	60	1134	765
3 lampes	30	630	2108
3 lampes	42	576	1880
3 lampes	60	810	1575

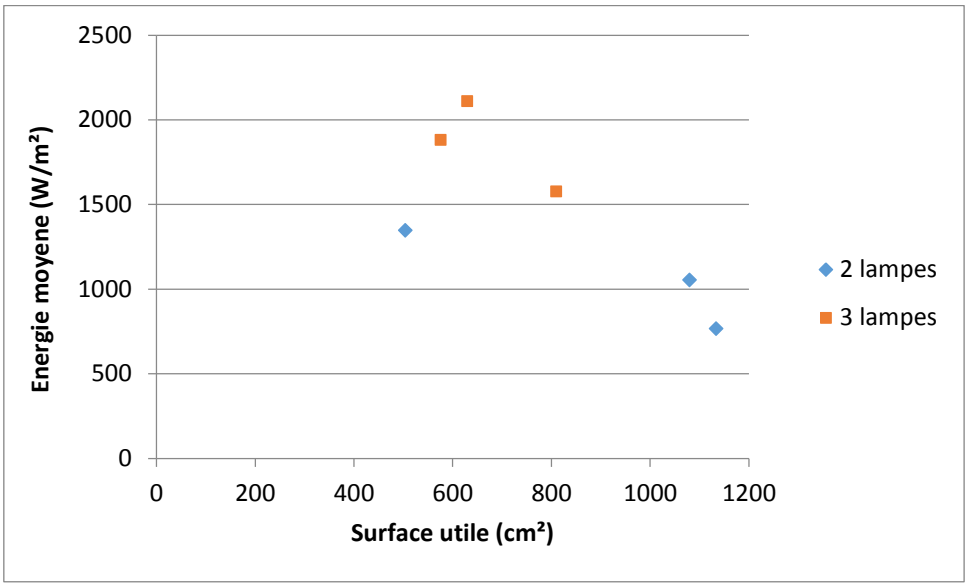


Figure 80 : Représentation synthétique

Comparons les bénéfices en terme de performances de ces deux types de configuration :

Tableau 10 : Comparaison des configurations de type II et III (par ordre croissant de performance)

Réglage	Écartement (cm)	Surface (cm²)	Énergie moyenne (W/m²)	Indice performance P
2 lampes	30	504	1347	679
3 lampes	42	576	1880	722
3 lampes	60	810	1575	851
2 lampes	60	1134	765	868
3 lampes	30	630	2108	885
2 lampes	42	1080	1053	1137

Le meilleur réglage utilise deux sources et il n'y a pas de différences significatives entre les autres réglages, quel que soit le nombre de sources. Le nombre de sources semble ne pas un critère déterminant. Voyons s'il est possible de faire le même type de conclusion avec quatre sources.

b) Cas n° 2 : Configuration à 4 sources

Les quatre sources sont disposées en carré nous avons fait varier l'écartement entre les sources adjacentes de 30 à 60 cm. La distance entre l'écran et les sources reste fixe, à 0,5 m.

Étudions l'apport de cette configuration et comparons-la comme précédemment à une configuration à deux sources. Nous désignons cette configuration *Type IV*.

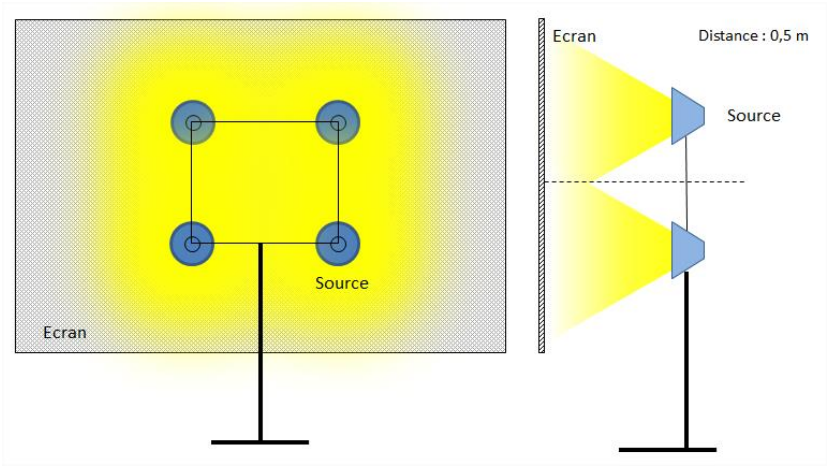


Figure 81: Configuration de type IV

Sans surprise le flux mesuré est plus important avec quatre sources, le graphe de la Figure 82 ne permet pas de conclure.

Tableau 11 : Résultats 4 sources

Type de configuration	Écartement des sources (cm)	Surface utile (cm²)	Flux moyen (W/m²)
2 lampes	30	504	1347
2 lampes	42	1080	1053
2 lampes	60	1134	765
4 lampes	30	693	1953
4 lampes	42	990	1493
4 lampes	60	2808	815

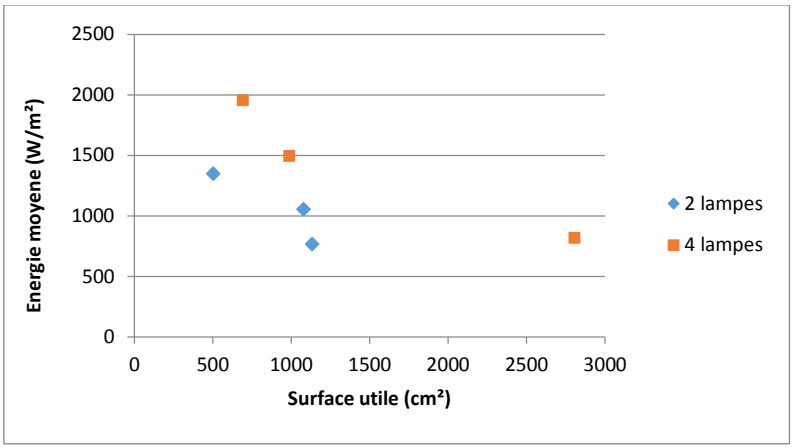


Figure 82 : Représentation synthétique

Lorsque nous classons les différentes configurations en fonction de leur indice de performance nous n'observons pas d'amé ioration notable avec 4 sources. Les deux meilleures configurations à 2 et 4 sources sont similaires sur le plan des performances.

Tableau 12 : Comparaison des configurations de type II et IV (par ordre croissant de performance)

Réglage	Écartement (cm)	Surface (cm²)	Énergie moyenne (W/m²)	Indice performance P
4 lampes	30	693	1953	677
2 lampes	30	504	1347	679
4 lampes	42	990	1493	739
2 lampes	60	1134	765	868
2 lampes	42	1080	1053	1137
4 lampes	60	2808	815	1144

8.1.6. Conclusion

Nous venons d'étudier différent type de configuration spatiales à deux sources, nous avons fait varier la distance tout en faisant varier l'é artement de ces sources, puis nous avons fixé la distance et fait varier l'angle de visée tout en jouant sur l'écartement des sources et enfin nous avons fixé cet angle à 45° et nous avons fait varier la distance et l'é artement. Ensuite nous avons introduit des configurations à 3 puis à 4 sources… Nous avons souhaité caracté iser chacun de ces ré lages par une grandeur que nous avons dé inie comme l'indice de performance. Nous avons regroupé dans le Tableau 13 l'ensemble de ces donné s expérimentales, é udions ce tableau. Toutes les configurations étudiées ont été classées en fonction de leurs indices de performance.

Tableau 13 : Récapitulatif des configurations par ordre croissant de performance

Type	Configuration	Écartement (cm)	Surface (cm²)	E moyen (W/m²)	Indice performance P
Type II	30°	6	2754	359,4	140,5
Type II	30°	45	2916	254,7	157,5
Type I	1,5m	15	972	88,7	172,5
Type II	30°	15	2772	338,5	183,0
Type II	30°	30	3060	298,1	183,6
Type I	1,5m	45	1287	74,0	190,4
Type I	0,75m	30	693	139,6	193,5
Type I	1,5m	30	1188	82,1	195,1
Type II	45°	45	1053	193,9	204,2
Type I	1,5m	39	1350	76,0	205,3
Type I	0,75m	39	864	122,6	211,8
Type I	0,75m	45	972	112,8	219,4
Type I	0,75m	21	756	149,7	226,3
Type I	1,5m	21	1404	84,4	236,9
Type I	0,75m	15	792	155,7	246,7
Type II bis	0,5 m	21	315	819,8	258,2
Type II	30°	21	4104	310,6	295,5
Type II bis	0,5 m	15	360	955,4	343,9
Type II	45°	30	2430	251,0	610,0
Type II bis	1 m	0	1836	356,4	654,4
Type IV	4 lampes	30	693	1952,6	676,6
Type III	3 lampes	42	576	1879,9	721,9

Type II bis	0,5 m	0	594	1234,4	733,2
Type IV	4 lampes	42	990	1493,1	739,1
Type III	3 lampes	60	810	1575,3	850,7
Type III	3 lampes	30	630	2108,0	885,4
Type II bis	1m	21	3744	251,0	939,9
Type II bis	0,5 m	3	882	1166,0	1028,4
Type II	45°	6	3168	335,1	1061,5
Type II	45°	21	3744	296,2	1108,9
Type IV	4 lampes	60	2808	814,8	1143,9
Type II bis	1 m	3	3456	338,4	1169,4
Type II bis	2 m	15	4212	304,0	1280,4
Type II	45°	15	4446	304,0	1351,6
Type II bis	1 m	9	4284	323,3	1384,9
Type II bis	0,5 m	9	2601	1109,2	2885,0

Comme on peut le remarquer en observant le tableau ci-dessus, on constate que les configurations les moins performantes sont celles de type I et II (à 30°) ; rappelons que ces dispositions comprennent deux sources éclairant soit à l'aplomb ou faiblement inclinés, la surface étudié. Ce type de réglages offre des possibilités médocres qui sont nettement améliorées lorsque l'angle d'incidence des sources est relevé à 45°.Ainsi la configuration Type II à 45° avec un espacement de 15 cm est l'une des plus performantes de ce comparatif. Lorsque nous reprenons cette configuration et que nous adaptons la distance à l'écran – configuration Type II bis –, nous gagnons encore en performance d'éclairage. Ce sont ces configurations qui se rèvent les plus performantes de cette étude. L'observation et l'analyse de ces configurations permettent d'écarter comme possibilité d'amélioration les configurations à trois ou quatre sources, celle-ci n'apportant aucun avantage significatif par rapport aux meilleures dispositions à deux sources.

8.2. Analyse des sources, étude spectrale

Nous venons de voir qu'il est possible d'arranger la disposition des sources de façon à avoir une surface d'analyse étendue tout en ayant un bon contraste. Est-il possible d'améliorer les conditions de l'expérimentation de façon à éliminer les artefacts de détection provenant de la couche picturale ? Dans cette étude nous nous intéressons aux propriétés spectrales de différents types de sources. L'objectif comme nous l'avons déjà expliqué est de savoir s'il est possible de réduire les effets optiques en utilisant des sources émettant dans des gammes spectrales différentes de celles habituellement utilisées : les sources halogènes émettent dans le visible et proche infrarouge.

Pour ce faire nous avons dans un premier temps soumis plusieurs éprouvettes de laboratoire peintes et comportant des défauts internes ou des lacunes aux flux successifs d'un large choix de sources d'excitation. Notre objectif est d'estimer les possibilités qu'offrent ces sources en termes de détection de défauts et d'atténuation des effets optiques.

8.2.1. Étude d'échantillons académiques à l'aide de différentes sources d'excitation

8.2.1.1. Protocole expérimental et dispositif

On observe l'échauffement et le refroidissement des éprouvettes soumises tour à tour au flux radiatif de chaque type de source au moyen d'une caméra thermique (*Flir A20*). L'excitation est de type créneaux : 1 min d'excitation suivie d'un refroidissement de 4 min. La tension d'alimentation des sources a été fixée à 3 V (Figure 83). La puissance d'émission peut varier d'une source à l'autre, mais cet aspect n'est pas essentiel dans le cadre d'une étude se limitant aux aspects qualitatifs de la détection.

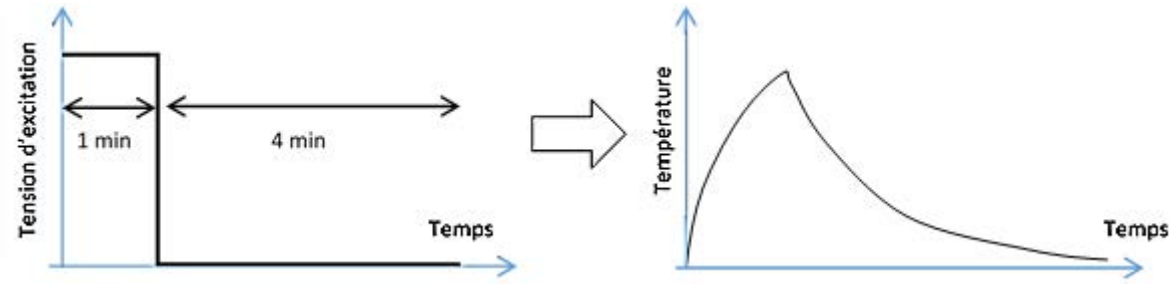


Figure 83 : Signal d'excitation et réponse en température

L'acquisition s'effectue à l'aide du logiciel *Thermacam researcher*. Pour l'étude on s'intéressera aux thermogrammes des échantillons à quatre instants différents (en début d'excitation à t = 5s, en fin d'excitation à t = 55s, en début refroidissement à t = 65 s et en fin refroidissement à t = 200 s, voir Figure 84) et nous comparerons les images thermiques obtenues avec différent mode d'excitation, pour chaque échantillon, à chaque instant. Notre attention se portera sur l'atténuation des effets optiques et la détection des défauts.

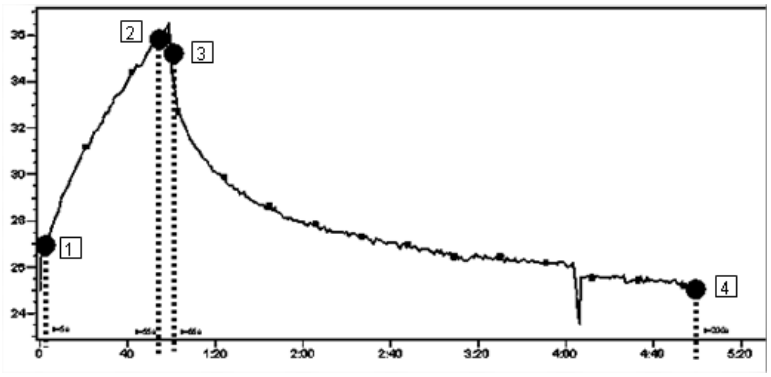


Figure 84 : Réponse en température et points d'intérêts

8.2.1.2.Sources utilisées

Le choix de sources est vaste, nous nous sommes limités à sept types de sources émettant sur des plages spectrales allant du visible (halogène) à l'infrarouge moyen (source céramique), voir tableau suivant :

Lampes halogènes Domaine spectral : visible, proche IR		Résistances céramiques Domaine spectral : IR moyen, long	
Lampes infrarouges Domaine spectral : visible, proche IR		**Flux d'air chaud** (sèche-cheveux) Domaine spectral : IR moyen	

Radian Domaine spectral : visible, proche IR	
Ventirad (ventilateur chauffant) Domaine spectral : IR moyen	

Fer à repasser peint Domaine spectral : IR long	

8.2.1.3.Éprouvettes étudiées

a) Échantillon 1

Dimensions : Longueur 9cm, largeur 4.8cm, épaisseur 1.8cm.

Cet échantillon en calcaire comporte 3 inclusions de mousse en forme de bâtonnet traversant de part en part l'échantillon sur sa largeur.

Figure 85 : Échantillon n°1 vue de face

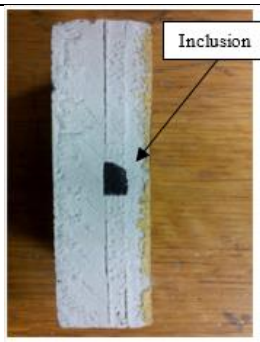


Figure 86 : Échantillon n°1 profil

Figure 87 : Échantillon n°1 vue d'ensemble

b) Échantillon 2

Dimensions : Longueur 10cm, largeur 7.5cm, épaisseur 1.2cm.

Cet échantillon de pierre calcaire comporte 3 lacunes de sections rectangulaires variables, traversant de part en part l'é hantillon sur toute sa longueur.

L'échantillon est recouvert sur toute sa surface de bandes horizontales de différents pigments.

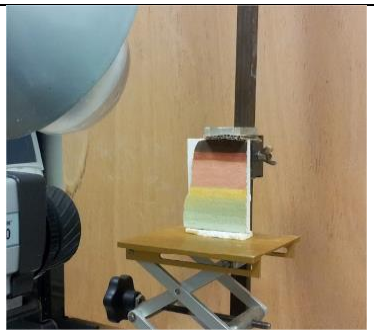


Figure 88 : Échantillon n°2 vue d'ensemble

Figure 90 : Échantillon n°2 profil

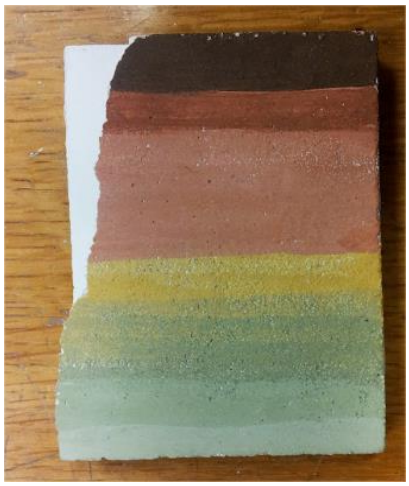


Figure 89 : Échantillon n°2 vue de face

c) Échantillon 3

Dimensions : Longueur 10cm, largeur 7.7cm, épaisseur 1.3cm.

Cet échantillon de pierre calcaire comporte 1 lacune de section rectangulaire (6x23mm), traversant de part en part l'échantillon sur toute sa longueur.

L'échantillon est recouvert sur toute sa surface de bandes de différents pigments traversant l'échantillon de part en part sur toute sa largeur.

Figure 91 : Échantillon n° 3 vue d'ensemble

Figure 92 : Échantillon n° 3 Profil

Figure 93 : Échantillon n° 3 Vue de face

d) Échantillon 4

Dimensions : Longueur 9 cm, largeur 4.8 cm, épaisseur 1.8 cm.

Cet échantillon en calcaire comporte 3 lacunes de sections rectangulaires variables, traversant de part en part l'échantillon sur toute sa largeur.

L'échantillon est recouvert sur la longueur, sur toute sa surface de 3 bandes de différents pigments.

Figure 94 : Échantillon n°4 vue d'ensemble

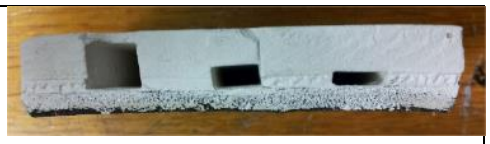


Figure 95 : Échantillon n°4 profil

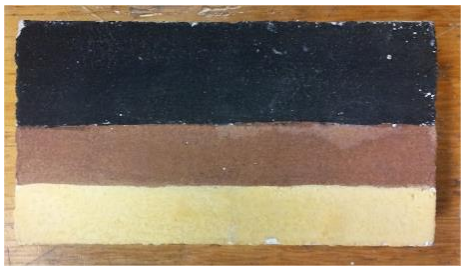


Figure 96 : Échantillon n°4 face avant

e) Saint-Christophe (échantillon 5)

Cet échantillon académique est une reproduction d'un élément de fresque représentant St Christophe portant l'Enfant Jésus sur ses épaules.
Cette éprouvette de 20 x 20 cm et d'épaisseur 3.5 cm comporte plusieurs défauts typiques.
Le St Christophe est une mini fresque réalisée selon la technique des primitifs italiens dans un mélange de chaux et de plâtre. Cette mini fresque comporte 4 défauts : 3 poches d'air et un défaut avec de la matière pulvérulente (défaut B de la Figure 98).

Figure 97 : St-Christophe face avant

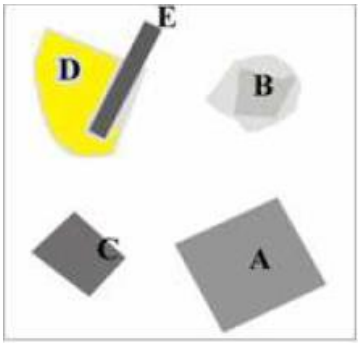
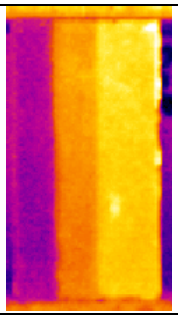
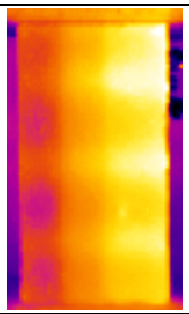
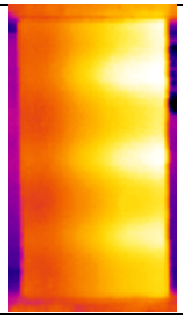
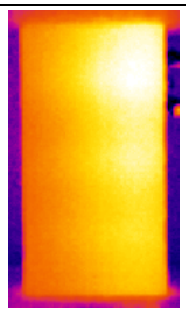


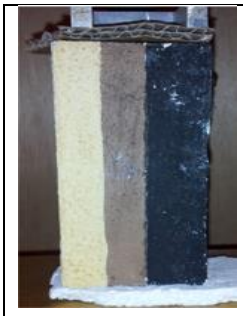
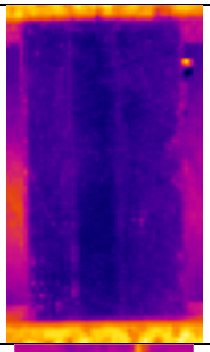
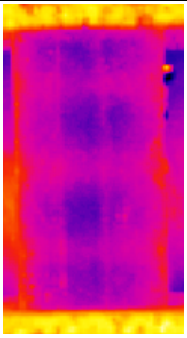
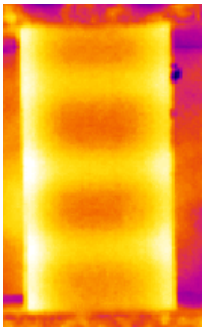
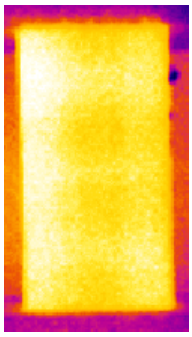
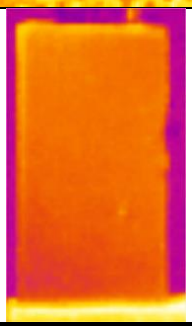
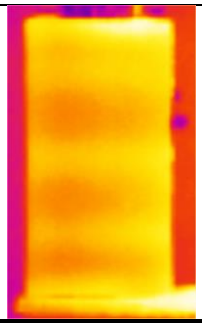
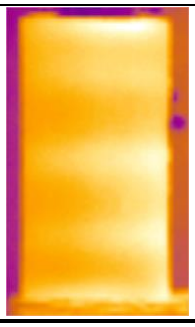
Figure 98 : St-Christophe Emplacement des défauts

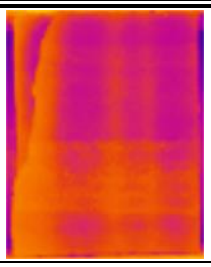
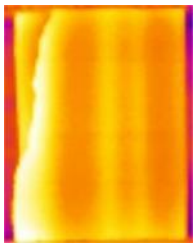
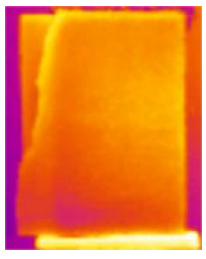
Figure 99 : St-Christophe vue d'ensemble

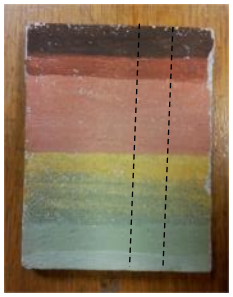
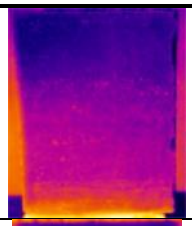
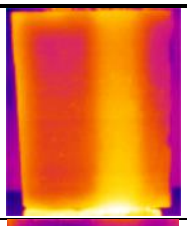
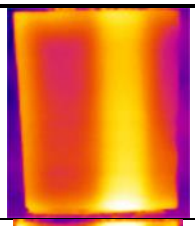
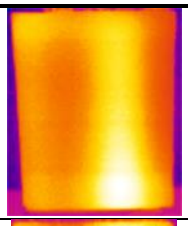
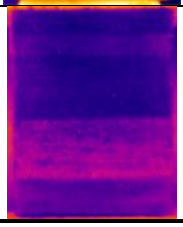
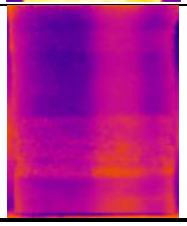
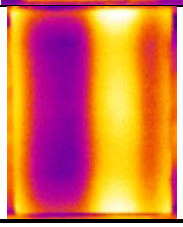
8.2.1.4. Résultats

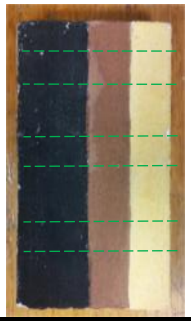
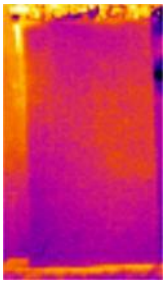
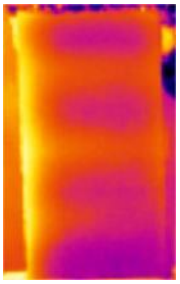
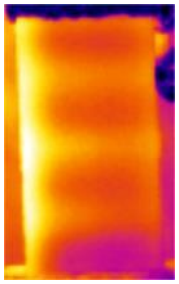
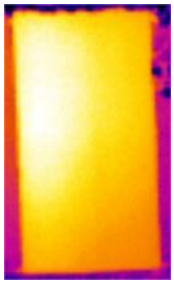
Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les meilleurs résultats obtenus pour chaque échantillon :

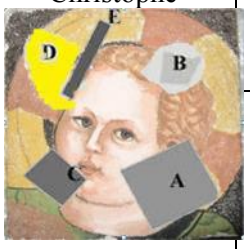
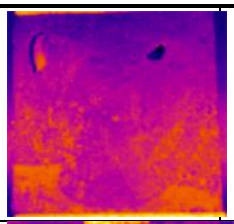
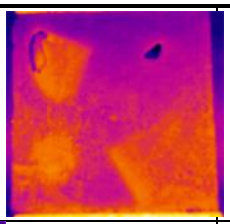
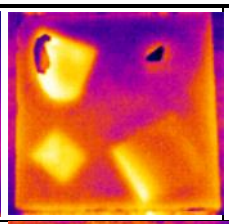
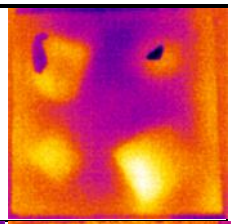
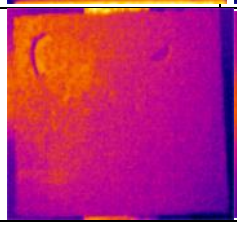
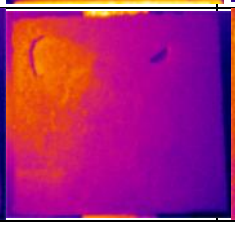
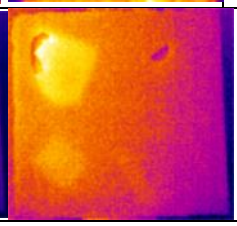
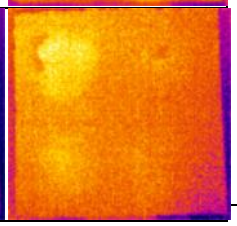
Échantillons	Type de source	t = 5 s	t = 55 s	t = 65 s	t = 200 s
Échantillon n°1	Halogène (référence)				

	Lampes céramiques				
	Flux d'air chaud				

Échantillon n° 2	Lampes céramiques (2 x 250 W)				
	Flux d'air chaud				

Échantillon n° 3 	Flux d'air chaud				
	Lampe céramique				

Échantillon n°4 	Flux d'air chaud				

Échantillon St Christophe 	Lampe céramique				
	Fer à repasser				

Approche qualitative

On peut noter à la vue de ces résultats que certaines sources offrent une meilleure détection des défauts tout en assurant une bonne atténuation de la couche picturale. Ces sources sont les suivantes :

- ◊ Lampes céramiques
- ◊ Flux d'air chaud
- ◊ Fer à repasser.

Nous déduisons de ces expérimentations que les sources à base de résistance céramiques et le flux d'air chaud permettent de réduire significativement l'influence de la couche picturale dans au moins 4 cas sur 5. Ces sources émettent exclusivement dans l'infrarouge moyen – au-delà de 3µm. On remarque que les meilleurs résultats sont observé généralement en fin d'excitation et au début de refroidissement. Une amélioration par rapport à l'excitation en halogène est observé.

8.2.2. Conclusion

À ce stade nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : les différents pigments de la couche picturale n'impactent pas la détection lorsqu'ils sont excité dans l'infrarouge moyen. Nous savons que les propriétés radiatives (absorptivité, réflectivité, etc.) d'un matériau a une dépendance directionnelle, mais aussi spectrale, ces grandeurs varient avec la longueur d'onde du flux incident. On peut supposer que les propriétés radiatives des différents pigments utilisés dans les éprouvettes testées tendent vers une valeur commune à partir de l'infrarouge moyen qui pourrait expliquer ce phénomène de « neutralité radiative ». Nous allons vérifier cette hypothèse.

8.2.3. Possibilité de réduction des effets optiques ; approfondissements.

Nous allons procéder pour la suite en deux temps. Dans un premier temps nous allons caractériser nos sources sur le plan spectral à l'aide d'un radio spectromètre à large bande, nous nous intéresserons aux sources céramiques qui ont donné les résultats les plus significatifs en termes d'atténu tion des effets optiques. Dans un second temps nous étudierons les propriétés radiatives des pigments habituellement utilisés afin de vérifier comme nous l'avons supposé, une convergence de leurs propriété dans la gamme spectrale d'émission de la source céramique.

8.2.3.1. Dispositif expérimental

Figure 100 : Spectroradiometre à large bande

Les deux études que nous présentons ont été effectués à l'aide d'un spectroradiometre à large bande œuvrant dans l'infrarouge. Cet appareil nous a été gracieusement mis à disposition par *Arcelormittal Maizières Research SA* de Maizières-Lès-Metz.

Le dispositif est capable d'analyse "spectralement" des flux d'énergie selon deux protocoles : **Le premier protocole** est destiné à l'origine à la mesure de l'émissivité des aciers dans des conditions de traitement thermique industriel dans la gamme spectrale allant de 1,3 à 14,5 µm. Ce procédé permettant l'analyse de l'émission infrarouge est constitué du couplage d'un comparateur de luminance et d'un simulateur de recuit continu. La mesure de luminance s'effectue en pointant tout d'abord une référence radiométrique constitué d'un corps noir thermo régulé puis l'échantillon étudié. Le spectroradiomètre permet ainsi par comparaison de flux d'analyser l'énergie radiative émise par l'échantillon d'acier soumis à un cycle contrôlé de chauffe (voir Figure 101). Dans notre étude nous avons remplacé le simulateur de recuit continu par les sources que nous souhaitions étudier.

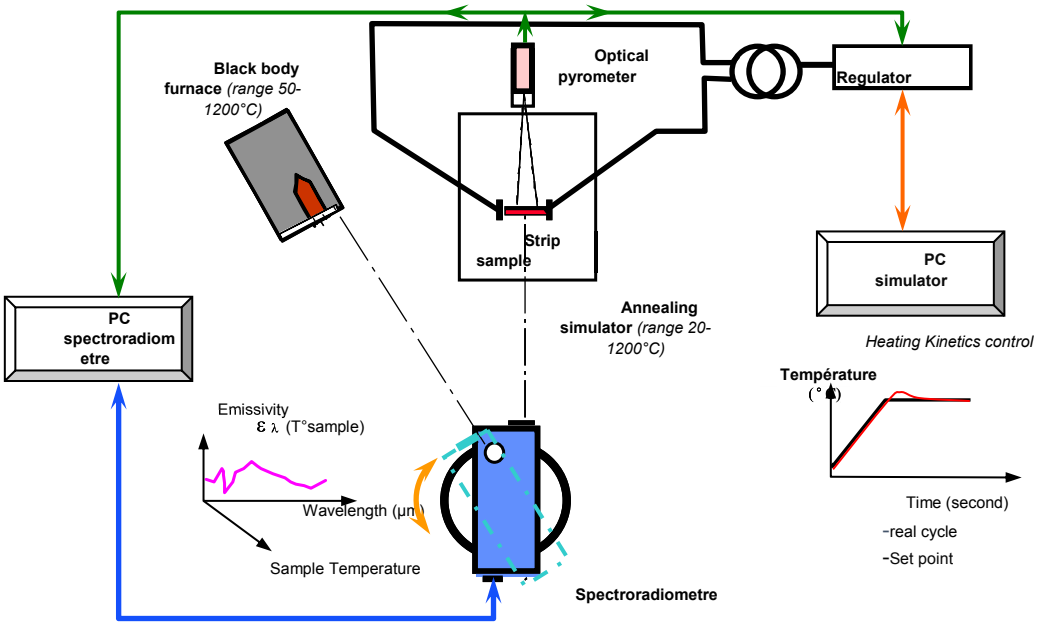


Figure 101 : Caractérisation de sources, protocole n°1 (Source Arcelor Mittal SA)

Le second protocole que nous avons utilisé pour l'analyse des pigments utilise le couplage d'un spectroradiometre (comparateur de luminance) et deux sphères intégrantes. Le spectroradiometre permet d'analyser l'énergie radiative réfléchie par l'échantillon dans une direction donnée dans la gamme spectrale 0,4 à 14,5 µm, il est composé d'un dé ecteur refroidi InSb/MCT. Des échantillons de *Spectralon*, *Infragold* et un miroir d'or aux réflectivités hémisphériques directionnelles connues, servent de références radiatives (voir Figure 102). L'association de ces deux appareils nous a permis de mesurer l'émissivité directionnelle spectrale de nos échantillons avec pigments.

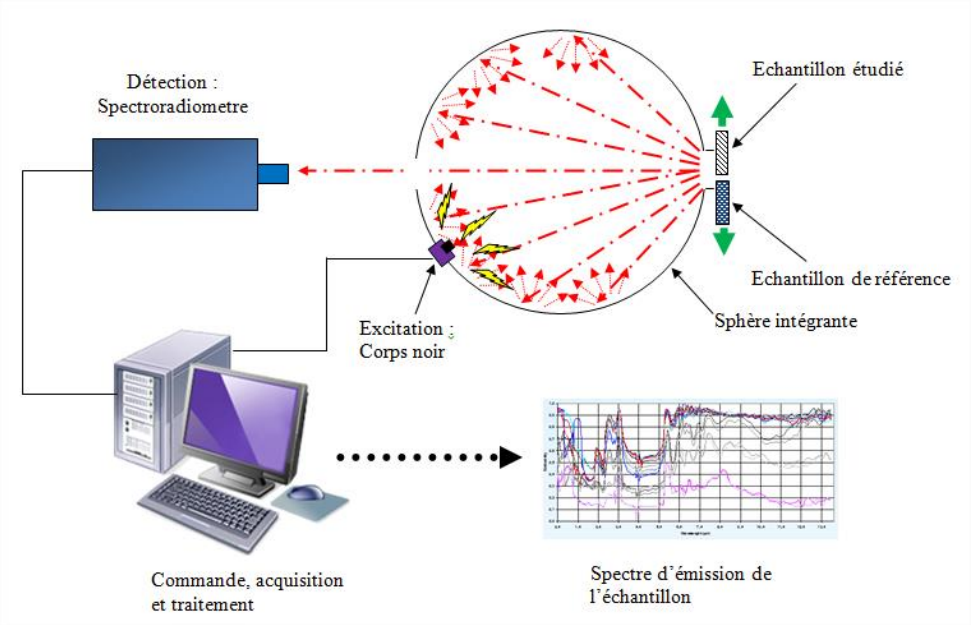


Figure 102 : Mesure de propriétés radiatives (protocole n°2)

8.2.3.2.Caractérisation spectrale des sources infrarouge

Les figures suivantes représentent le montage expérimental. Nous avons analysé une source à différents niveaux de puissance.

Figure 103 : Dispositif

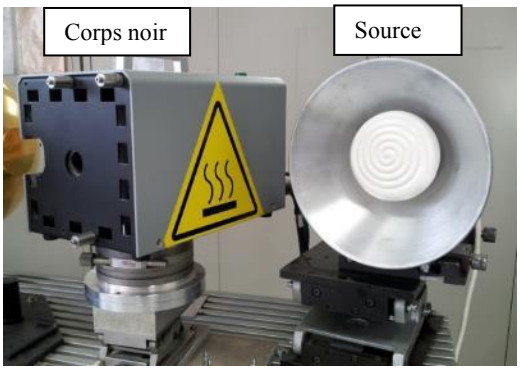


Figure 104 : Source céramique sur le banc d'essai

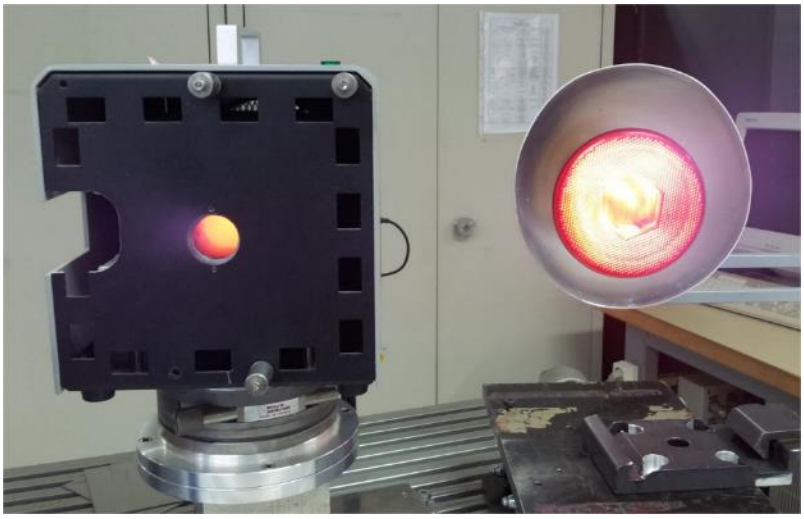


Figure 105 : Source en test

La Figure 106 représente les résultats obtenus en observant une source céramique de 250 W en puissance nominale modulée en puissance à l'aide d'un rhéo tat. Nous avons observé e comportement spectral de cette source de 40 % de sa puissance à sa pleine puissance (100%).

On observe le comportement typique d'une source radiative avec le dé alage de la répon e spectrale vers les courtes longueurs d'onde au fur et à mesure de la monté en puissance de la lampe, le dé alage est d'environ 1,6 µm. Ces sources cé amiques é ettent dans l'infrarouge moyen avec un pic d'é ission autour de 5 µm.

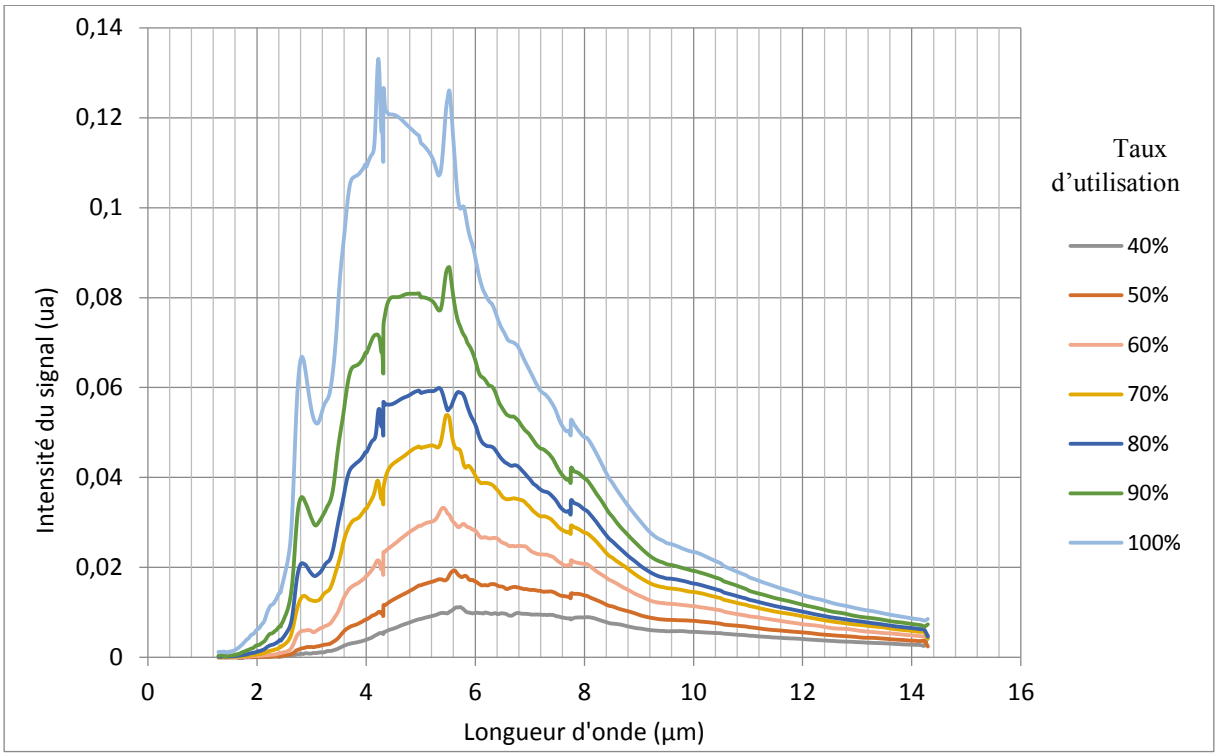


Figure 106 : Luminance spectrale des sources céramiques à différentes intensités

8.2.3.3. Mise en œuvre dans l'étude des propriétés radiatives des pigments

Nous avons ensuite mis en œuvre le protocole n°2 sur des éprouvettes en pierre calcaire peintes avec différents pigments. Une douzaine de pigments différents ont été testés. Les pigments analysés sont des pigments usuels et utilisés de façon courante dans les peintures murales.

Figure 107 : Exemple d'échantillon analysé

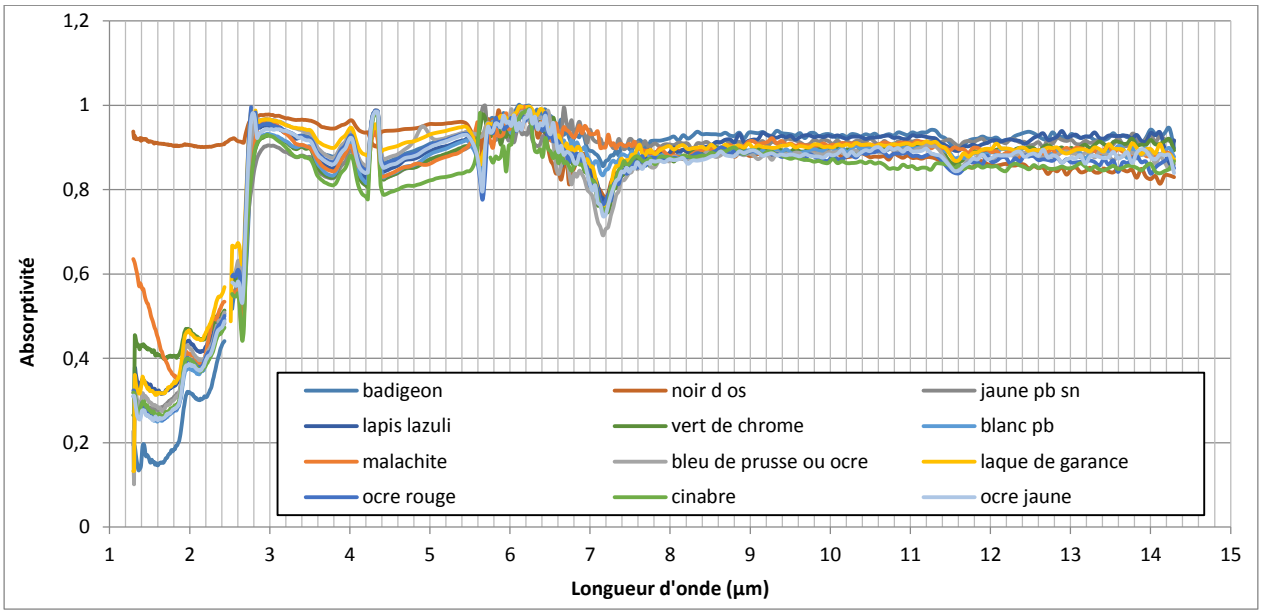


Figure 108 : Absorptivité hémisphérique directionnelle spectrale de différents pigments

Les mesures effectuées à l'aide du spectroradiometre à large bande sur une quinzaine d'échantillons peints avec différents pigments et selon différentes techniques de dépôt (à la fresque, à la colle, etc.) ont permis d'obtenir les spectres d'absorptivité des pigments dans l'infrarouge proche et moyen.
La Figure 108 représente l'évolution de l'absorptivité hémisphérique directionnelle spectrale des pigments. Cette grandeur se calcule à partir de l'expression suivante :

$$\alpha_\lambda^{\cap'} = 1 - \rho_\lambda^{\cap'} = 1 - \frac{L_{ech}(\lambda,T) - L_{bruit}(\lambda,T)}{L_{ref}(\lambda,T) - L_{bruit}(\lambda,T)} \cdot \rho_{ref,\lambda} \qquad (2.1)$$

Avec :

$\rho_\lambda^{\cap'}$: Reflectivité hémisphérique directionnelle spectrale de l'echantillon

L_{ech}, L_{ref} et L_{bruit} : Luminances mesurées de l'echantillon, de l'echantillon de référence et bruit de mesure

$\rho_{ref,\lambda}$: Reflectivité spectrale de l'echantillon de reférence

L'observation des spectres permet de mettre en évidence une propriété intéressante : les absorptivités des pigments se stabilisent comme attendu autour d'un niveau moyen avoisinant 0,9 à partir de 3 µm et au-delà.
Cette observation est importante, car elle permet d'envisager des développements intéressants sur le plan de la détection et de la réduction des effets optiques. Nous pouvons envisager à priori l'emploi de sources d'excitation émettant au-delà de 5 µm afin de s'affranchir de cette limitation, ce point sera vérifié sur des échantillons (voir plus avant). Notre choix se porte fort logiquement sur les sources infrarouges céramiques, c'est avec ces sources que nous testerons notre hypothèse de travail.

8.2.4. Étude d'un échantillon académique à l'aide d'une source adaptée

Étudions l'analyse d'un échantillon académique à l'aide de sources adaptées. Nous venons d'observer que les sources céramiques pouvaient convenir, car elles présentent un pic d'émission aux alentours de 5 µm.

a) Cas n°1 : Étude d'une plaque de plâtre colorée

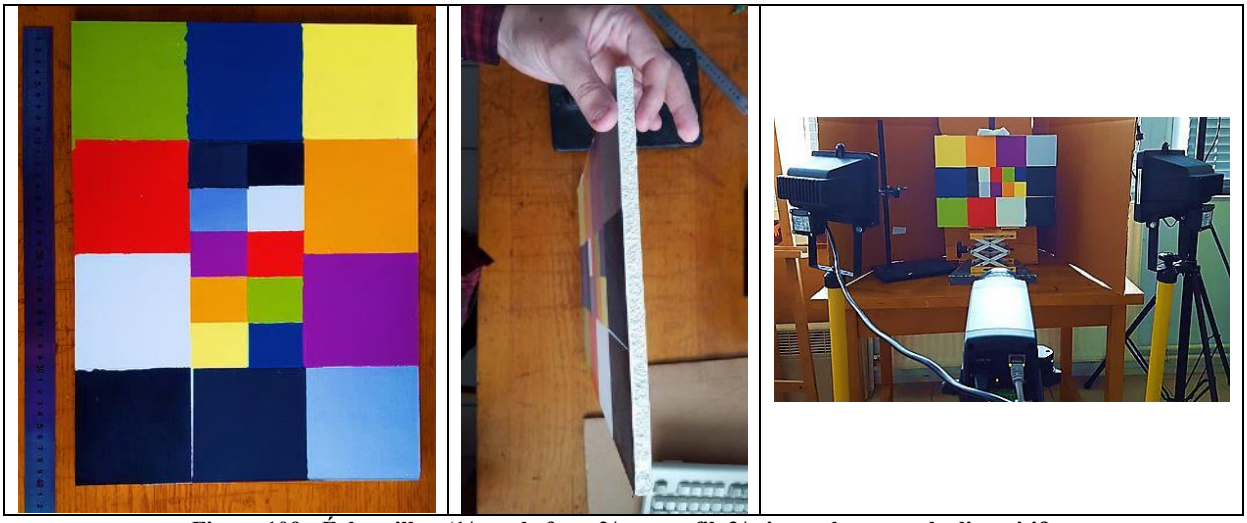


Figure 109 : Échantillon (1/vue de face, 2/vue profil, 3/mis en place avec le dispositif)

Pour commencer, nous nous sommes limité à un cas très simple, celui d'une plaque de plâtre peinte. La surface de cette plaque a été recouverte d'un motif de type « damier » à l'aide de bombes de peinture de différentes couleurs. Cette plaque sera soumise à une excitation de type créneau, successivement avec des sources halogènes puis à l'aide de sources infrarouges. Nous comparerons ensuite les résultats.

Les dimensions de cette plaque sont les suivantes : 40 cm x 30 cm et de 15 mm d'épaisseur. Difficulté : Comment comparer de façon pertinente la réponse de cet échantillon excité successivement avec des sources de puissances différentes (2x500 W en halogène et 2x250W en infrarouge) et des configurations d'éclairage pouvant varier ? Pour contourner cette difficulté, nous avons opté pour des élévations de température identiques en fin d'excitation (T_{max}) pour les deux excitations. Cet échantillon a été soumis une première fois à une excitation crénau, à l'aide de sources halogènes (2 × 500 W) pendant 1 min puis au même type d'excitation avec des sources thermiques de type céramique (2 × 250 W) pendant 6'30". L'enregistrement a été effectué à l'aide d'une caméra de marque ***Flir*** (modèle SC645). La fréquence d'acquisition a été fixée à 1 Hz. Nous avons extrait les thermogrammes à des paliers de progression identiques afin de les comparer : Condition initiale, 25 % du T_{max}, 50 %, 75 % ; 100 % (voir figure ci-dessous).

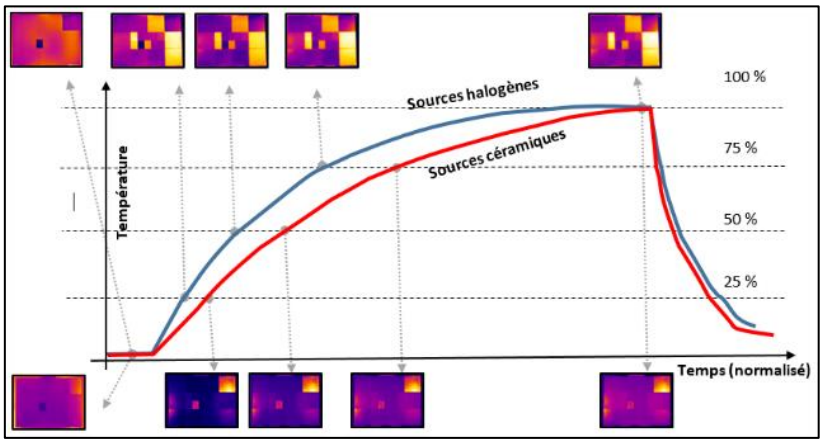
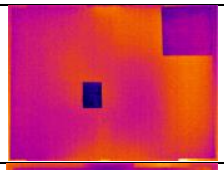
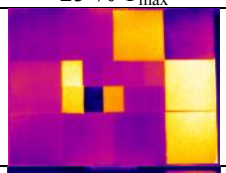
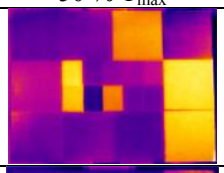
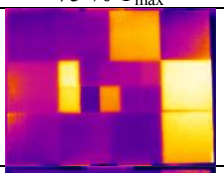
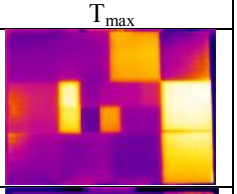
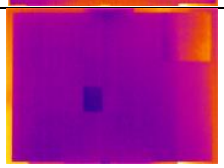
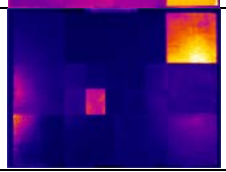
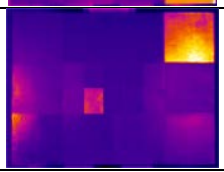
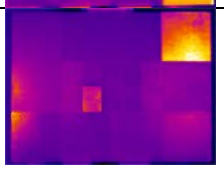
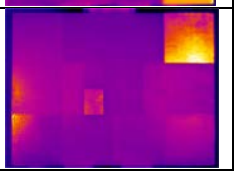


Figure 110 : Montée en représentation normalisée (temps)

Résultats

Nous avons regroupé nos résultats dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Comparaison atténuation effets optiques sur plaque colorée

	État initial	25 % T_{max}	50 % T_{max}	75 % T_{max}	T_{max}
Sources halogénes					
Sources céramiques					

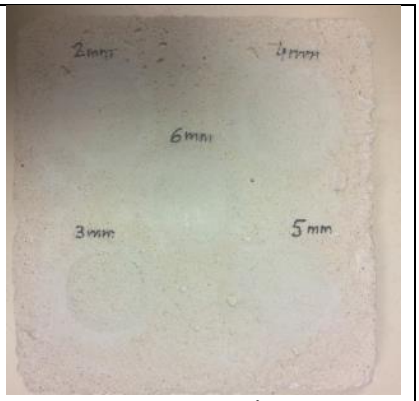
Comme attendu on observe une atténuation des effets optiques. L'atténuation devient significative en fin d'excitation, on note toutefois que les zones peintes avec le pigment couleur argent restent repérables en raison de la forte réflectivité de ce pigment. Voyons si nous observons un résultat similaire avec une réplique de fresque.

b) Cas n°2 : Réplique d'un élément de fresque de la Cathédrale d'Angers

Intéressons à la reproduction selon la technique des primitifs italiens d'un détail d'une fresque de la cathédrale d'Angers appelé ci-après « Saint-Savin ». Cette fresque comporte 5 défauts, à différentes profondeurs (2, 3, 4, 5 et 6mm) – voir figures suivantes. Cet échantillon académique a été soumis pendant 1 min à une excitation créneau, la durée d'observation a été de 4 min. Le début de la phase de refroidissement a aussi été observé.

Face avant

Positions des défauts



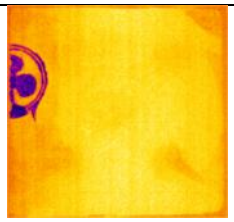
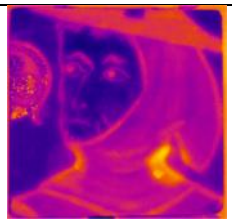
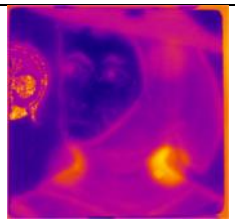
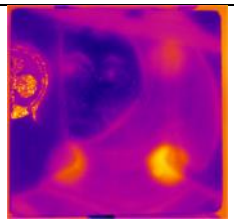
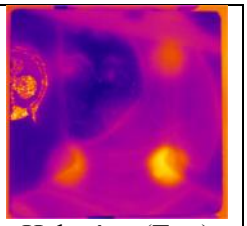
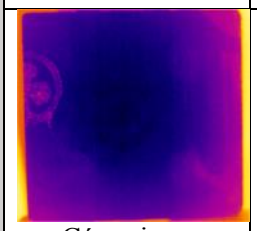
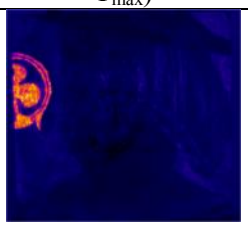
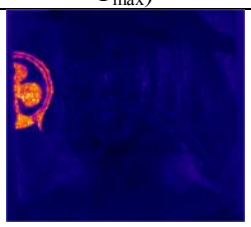
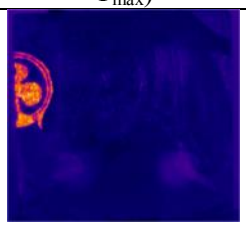
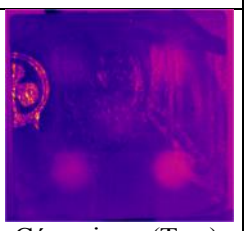
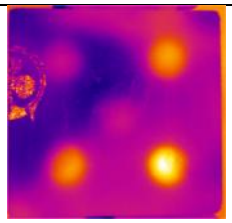
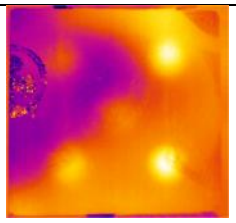
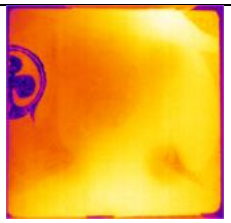
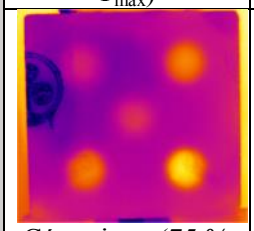
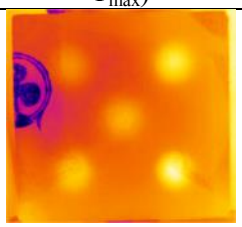
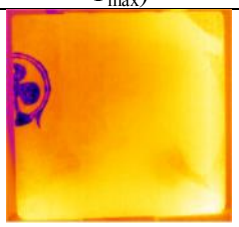
Face arrière

Figure 111 : Échantillon n° 6

Résultats

Les résultats ont été regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Étude comparative de l'atténuation des effets optiques sur une éprouvette (St Savin)

Échauffement	 Halogène (initial)	 Halogène (25 % T_{max})	 Halogène (50 % T_{max})	 Halogène (75 % T_{max})	 Halogène (T_{max})
	 Céramique (initial)	 Céramique (25 % T_{max})	 Céramique (50 % T_{max})	 Céramique (75 % T_{max})	 Céramique (T_{max})
Refroidissement	 Halogène (75 % T_{max})	 Halogène (50 % T_{max})	 Halogène (25 % T_{max})		
	 Céramique (75 % T_{max})	 Céramique (50 % T_{max})	 Céramique (25 % T_{max})		

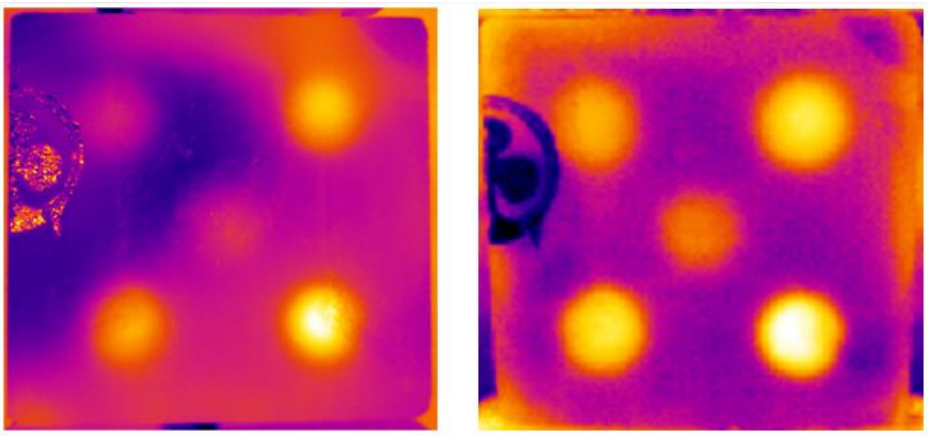


Figure 112 : meilleures images halogènes & céramiques

Le Tableau 15 compare l'évolution des réponses thermiques de l'échantillon au cours de l'échauffement et du refroidissement avec les deux types de sources d'excitation. La comparaison s'effectue à température identiques. La comparaison des thermogrammes permet d'observer que la détection des défauts se fait plus rapidement avec les sources halogènes, mais que les sources céramiques (infrarouge) permettent d'atténuer efficacement les effets radiatifs induits par la couche picturale (voir Figure 112). Notons toutefois le comportement atypique du pigment doré (côté gauche) en raison de sa forte réflectivité.

8.2.4.1. Conclusion

Les résultats d'observations effectués sur les deux échantillons sont satisfaisants. Nous avons observé une réduction significative des effets optiques et une amélioration du contraste des thermogrammes. Les artefacts de détection sont partiellement éliminés à l'exception des pigments à base d'oxydes métalliques. Ces points valident les observations effectués au paragraphe 8.2.3.

Nous observons de plus que les défauts connus sont tous détectés avec un gain en termes de précision et de finesse dans la détection. La géométrie des défauts est correctement mise en évidence de même que leur profondeur puisque les signatures thermiques sont correctement classées.

Tous ces enseignements nous permettent de conclure que ces sources à base de filaments sous céramiques étant dans l'infrarouge moyen (aux alentours de 4.5 µm) constituent une réelle amélioration en termes de détection.

9. Approche logicielle : amélioration du dispositif par l'utilisation de post-traitements

L'exploitation de post-traitements afin d'améliorer les possibilités de détection du dispositif SAMMTHIR est une autre piste de recherche que nous allons explorer et exploiter. Le principe des post-traitements consiste à soumettre un thermogramme à une série de traitements et d'opérations mathématiques afin d'améliorer la détection d'un certain type d'information par exemple la signature thermique de défaut sous-jacent. Ce type d'approche peut se rapprocher de l'utilisation de filtres, mais les possibilités offertes par les post-traitements vont au-delà de simples opérations de filtrages passifs.

Ce type de développement algorithmique a été rendu possible grâce aux importantes capacités de calcul des ordinateurs actuels. Ces post-traitements issus pour la plupart de l'analyse pulsé, mais aussi aléatoire peuvent être regroupés en trois grandes catégories:

- ◊ Les traitements exploitant le contraste thermique, ex : *Contraste absolue*, *Differential Absolute Contrast* (DAC)
- ◊ Les traitements utilisant des transformations comme le *Pulsed Phase Thermography* (PPT), le *Principal component thermography* (PCT et son dérivé, le SVD) ou les *ondelettes*
- ◊ Les traitements exploitant des méthodes statistiques comme le *Thermal signal Reconstruction* (TSR), les *Higher order statistics* (HOS), le *Partial least squares thermography* (PLST) ou encore l'*analyse aléatoire*.

À cela s'ajoutent des méthodes hybrides telles que le *Phase Absolute Contrast* (PhAC), nous n'aborderons pas ces techniques dans cette thèse. Pour plus d'information, concernant les différents post-traitements voir [87], [135]–[137], [139], [146], [152]–[159].

Nous avons implémenté un certain nombre de post-traitements dans la partie logicielle de SAMMTHIR. Une interface a été développée sous *Labview* permettant d'appliquer un jeu de post-traitements sur des films issus de caméras thermiques (voir Figure 113). Si on observe l'interface de

l'outil on remarque qu'il se divise en trois zones : un cadre A qui permet de définir le traitement – une quinzaine à ce jour –, un cadre B qui permet de visualiser le thermogramme avant traitement et le résultat après traitement et de délimiter spatialement la zone d'inté êt et enfin un cadre C qui permet de visualiser la ré onse en tempé ature au cours du temps à l'endroit du curseur (positionné en B) et de délimiter temporellement l'entendu à l'aide de deux curseurs permettant ainsi de borner le domaine temporel sur lequel s'appliquera le post-traitement. Il est ainsi possible d'exploiter une partie du thermogramme et d'é iminer les parties bruitées et inexploitables de l'enregistrement. Le souci que nous pouvons rencontrer réside dans la forte dépendance du résultat de certains traitements à la position de ces curseurs temporels, pour régler cette difficulté nous exploiterons – sauf indication contraire – l'entendue temporelle correspondant à l'apparition des défauts.

Nous ne nous intéresserons pas dans ce travail à tous les traitements implémentés dans notre outil, nous nous limiterons essentiellement aux traitements exploitant des transformations intégrales et ceux à base de traitement statistique.

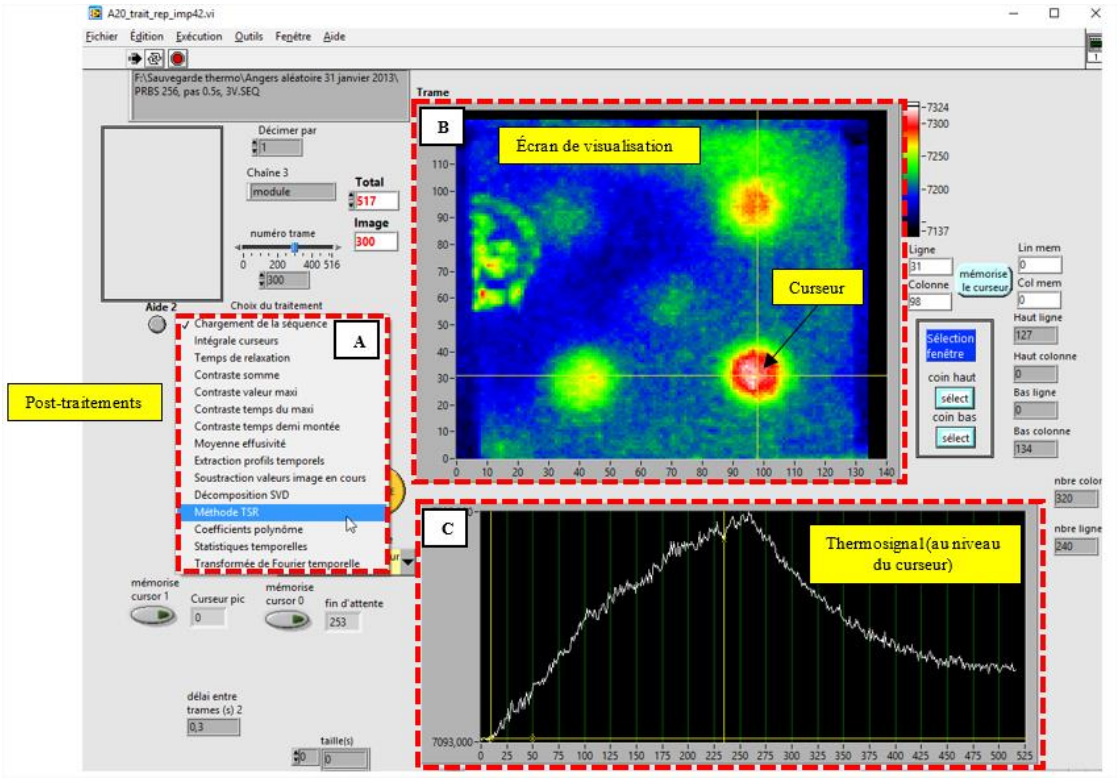


Figure 113 : Interface de l'outil de post-traitement

9.1. Aspects théoriques et présentation de quelques post-traitements

9.1.1. Filtres

9.1.1.1. Filtre « passe-bas »

L'un des filtres les plus simples à mettre en œuvre consiste simplement à intégrer entre deux limites temporelles le thermosignal pour chaque pixel. L'inté ê de ce filtre est d'augmenter le rapport signal sur bruit. Ce filtre a é é l'un des premiers à ê re imple enté d ns SAMMTHIR.

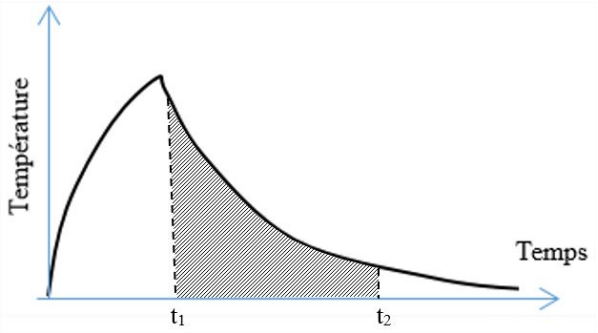


Figure 114 : Intégration entre 2 bornes de la réponse thermique d'un pixel

9.1.2. Traitement exploitant le principe du contraste thermique

9.1.2.1. Contraste thermique absolu

Les techniques qui dé oulent de l'exploitation du contraste thermique sont nombreuses, la plus simple est celle du **contraste thermique absolu** – évoquée dans le chapitre I, page 33. Le contraste entre une zone repé é comme saine et une zone avec dé aut s'obtient très facilement en soustrayant à la ré onse thermique de chaque pixel de l'image, la ré onse thermique d'un pixel de ré érence attachée au défaut (voir Figure 115). Le contraste thermique absolu se définit ainsi :

$$C(t)_{abs} = T(t)_{défaut} - T(t)_{i,j} \tag{2.2}$$

Avec $C(t)_{abs}$: Évolution temporelle du contraste absolu $T(t)_{défaut}$: Réponse en température du défaut et $T(t)_{i,j}$: Réponse en température d'un point quelconque de coordonnée *i,j*.

Cette mé hode simple permet en outre d'estimer la profondeur de ce défaut par la mesure du temps de manifestation du contraste maximum qui est corrélé à la profondeur du défaut :

$$p \approx \sqrt{a.\tau} \tag{2.3}$$

Avec p : La profondeur en [m], a : La diffusivité thermique [m²/s], τ : Le temps d'apparition du contraste maximum [s].

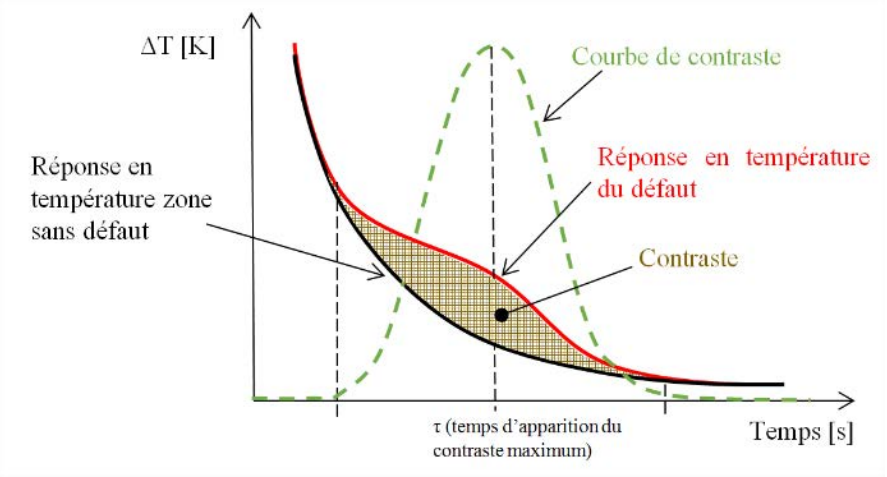


Figure 115 : Principe de la méthode du contraste

Nous présenterons des résultats issus de deux modes de dépouillement du contraste thermique :

- ◊ **Contraste somme** : Ce traitement consiste simplement à intégrer sous la courbe de contraste, c'est un traitement de même type que le filtre passe pas dé ris précédemment, mais appliqué à la courbe de contraste.
- ◊ **Contraste temps du maximum** : Ce traitement s'inté esse au temps d'apparition du contraste maximum pour chaque pixel de l'image. Une image est construite point par point à partir de ces mesures. Ce type de traitement est supposé être moins sensible à la couche picturale et aux variations d'absorptivité car il s'intéresse à l'aspect temporel et non énergétique de la courbe de contraste, nous vérifierons ce point.

9.1.2.2. La moyenne effusivité

La méthode du contraste présente un inconvénient : elle requière une connaissance à priori des zones avec défaut et sans défaut, indispensable pour localiser la zone saine de référence pour le calcul du contraste. D'autres mé hodes existent qui contournent ce proble e comme la **méthode de l'effusivité** proposée par **Delpech et al** (1992) [93]. Cette approche exploite la variation d'effusivité apparente induite par un défaut. La présence du défaut va introduire des effets 3D qui auront pour consé uence de modifier localement le refroidissement. La répo se en tempé ature à l'endroit du dé aut, va s'é arter de la valeur attendue par le mode e ré issant la tempé ature d'un échantillon plan d'ép isseur z, soumis à un Dirac que dé rit l'éq ation suivante :

$$T(z,t) = T_{init} + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \tag{2.4}$$

Cette mé hode est en quelque sorte un moyen de mettre en é idence la présence d'un défaut par le contraste d'effusivité q 'il provoque.

9.1.3. Post-traitements exploitant des transformations

En mathématique les transformations intégrales utilisent un opérateur intégral et sont de la forme générale suivante :

$$S(f)(t) = \int_A f(x).K(x,t).d\mu(x) \tag{2.5}$$

Dans laquelle la fonction K est appelé le noyau de l'opé ateur. Ce noyau caractérise la transformation appliquée à la fonction $f(x)$ et permet par l'application de cet opérateur d'obtenir une fonction $S(f)(t)$, image de $f(x)$ dans un espace fonctionnel spécifique. Cela peut être interprété comme une projection d'une fonction dans un espace de fonctions.
Les transformations intégrales sont nombreuses, elles facilitent entre autres la résolution de systèmes diffé entiels dans lesquels figurent des éq ations aux dé ivé s partielles par élimination d'une variable d'espace ou de temps. Les plus connues sont la *Transformée de Fourier* et la *Transformée de Laplace*. La *convolution* est elle aussi une transformation intégrale.

Dans cet exposé nous nous intéresserons à la *Transformée de Fourier* et à la *Décomposition en valeurs singulières* (SVD).

9.1.3.1. Pulse Phase thermography (PPT)

Le **PPT** est né de la volonté de cumuler les avantages de l'analyse pulsé (PT) tout en ayant ceux de l'**analyse modulée (MT)** ou **Lock-in** (voir Chapitre I, page 37). Comme nous avons pu le voir l'un de ses avantages est d'ê re multifréq entielle, en effet le maté iau est sollicité à l'aide d'un δ(t) de

Dirac qui contient toutes les fréquences, sa **transformée de Fourier** est égale à 1 sur la totalité du spectre (2.6) :

$$TF\left(\delta(x)\right) = F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x).e^{-2\pi j\nu x} dx = 1 \qquad (2.6)$$

Ce constat simple a amené **X. Maldague** et **S. Marinetti** à proposer dans leur article *Pulse phase infrared thermography* (1996) [106] une nouvelle approche reposant sur le traitement par transformée de Fourier des thermogrammes. Alors qu'en Lock-in une seule fréquence est étudiée en **régime stationnaire**, en PPT c'est la totalité d'entre elles qui peuvent être exploitées simultanément en **régime transitoire**…l'intérêt consiste à pouvoir extraire comme en analyse modulée la phase qui n'est pas affectée par les propriétés optiques de la surface (absorptivité). Ainsi d'après **Maldague et Marinetti**, il est possible par ce biais de tirer avantage de l'apport du **Lock-in** tout en profitant des qualités de l'analyse pulsée, de plus – d'après les auteurs – la résolution en profondeur est améliorée. Il précise toutefois que du fait de l'amortissement évoqué des harmoniques l'analyse se limite aux couches superficielles du matériau, en outre le temps d'acquisition est plus élevé qu'en analyse pulsée.

La **transformée de Fourier discrète** 1D d'une fonction f(x) est une discrétisation de la transformée de Fourier classique appliquée à un signal échantillonné. Cette opération permet de décomposer ce signal en une somme de signaux périodiques élémentaires de fréquence ν appelés fondamental et harmoniques, nous obtenons ainsi la réponse harmonique du matériau (spectre).

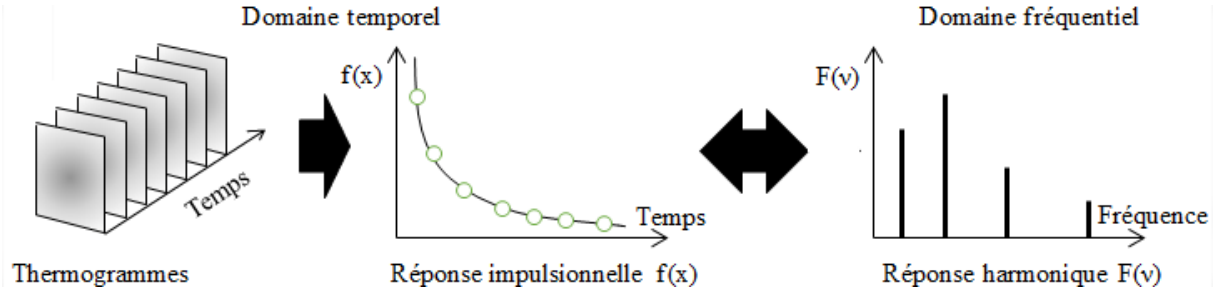


Figure 116 : Principe du PPT

Chaque fréquence ν est caractérisée par une amplitude et une phase ϕ [rad], il est donc possible de représenter cette composante par un nombre complexe comportant une partie réelle $\mathrm{Re}(\nu)$ et une partie imaginaire $i\,\mathrm{Im}(\nu)$:

$$F(\nu) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} f(x).e^{\frac{-i2\pi\nu x}{N}} = \mathrm{Re}(\nu) + i\,\mathrm{Im}(\nu) \qquad (2.7)$$

L'amplitude A et la phase ϕ de chaque harmonique s'obtiennent à l'aide des expressions suivantes :

$$A(\nu) = \sqrt{R(\nu)^2 + I(\nu)^2} \qquad \phi(\nu) = \tan^{-1}\left(\frac{I(\nu)}{R(\nu)}\right) \qquad (2.8)$$

Ainsi l'analyse en phase consistera à calculer le déphasage c'est-à-dire la variation de ϕ entre l'excitation et la réponse en température du matériau pour chacune des harmoniques composant ce signal et répété à chacun des pixels composant le thermogramme, ce qui permet d'obtenir des images de phase.

Le PPT donne lieu à une abondante littérature et il continue d'être amélioré (voir chapitre I, page 35).

9.1.3.2. Analyse en composantes principales (PCT) et Décomposition en valeurs singulières (SVD)

Évoquons un prolongement de l'analyse en composantes principale (PCT) mentionnée au chapitre I, page 41, il s'agit de la *décomposition en valeurs singulières* (SVD).Cette méthode issue de travaux de statisticiens permet d'éliminer le poids des contributions parasites telles que le bruit en projetant le signal dans une base orthogonale adaptée maximisant le contraste thermique.

Principe du SVD :

La procédure consiste dans un premier temps à passer d'un cube de donné (film) à une matrice 2D dans laquelle chaque colonne correspond à l'é olution temporelle d'un pixel (x,y). Chaque colonne représente ainsi un vecteur de N_t composantes.
Dans un second temps on élimine la tendance. Cette information n'est en aucun cas pertinente, car elle est la même pour tous les pixels : pour ce faire on calcule une colonne moyenne et on soustrait cette colonne à toutes les colonnes de la matrice. Dè lors l'information spatiale est obtenue en parcourant la matrice suivant ses lignes et l'information temporelle, suivant les colonnes.
La décomposition en valeurs singulières à proprement parler est ensuite effectuée. L'algèb e liné ire (théorème spectral[12]) nous enseigne qu'une matrice **A** de taille $M \times N$ (avec M > N) peut s'é rire comme le produit de 3 matrices (voir Figure 117) :

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{U}\Sigma\boldsymbol{V}^T \tag{2.9}$$

Avec **U** matrice orthogonale de taille $M \times N$, Σ matrice diagonale de taille $N \times N$ (valeur singulière de **A** sur la diagonale) et $\boldsymbol{V}^T$ transposé d'une matrice orthogonale de taille $N \times N$.

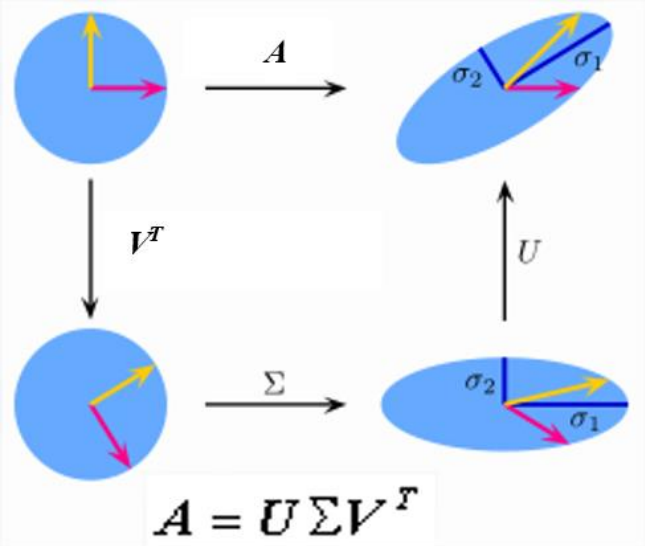


Figure 117 : Équivalence matricielle (tiré de Wikipédia)

Les colonnes de **U** représentent les modes statistiques orthogonaux (appelés aussi **fonctions empiriques orthogonales,** EOF) qui permettent de traduire les variations spatiales de données, les lignes de $\boldsymbol{V}^T$ représentent les composantes principales qui décrivent quant à elles les variations temporelles. La décomposition en valeurs singulières permet finalement de présenter la matrice **A** qui dépend de coordonnées spatio-temporelles en un produit de matrices dissociant le temps et l'espace. La première EOF représente les variations spatiales de signal les plus significatives, il est donc possible en sélectionnant certaines EOF d'éliminer les contributions préjudiciables à la détection telles

[12] **Le théorème spectral** énonce qu'une matrice normale peut être diagonalisée par une base orthonormée de vecteurs propres.

que les problèmes d'uniformité de chauffage ou les problèmes de réflexion. Les EOF lointaines représentent quant à elle le bruit, elles peuvent donc être elles aussi éliminées.

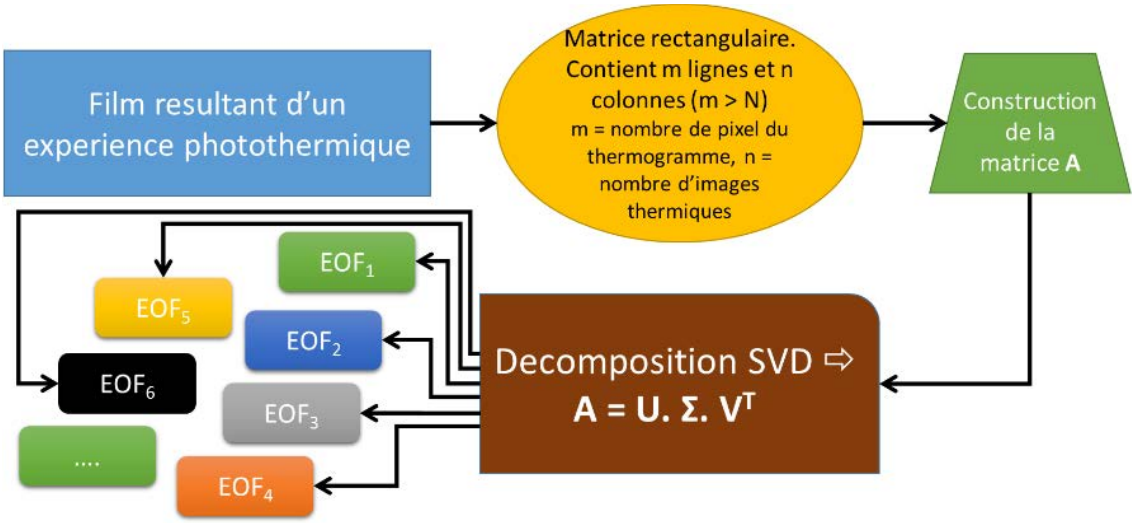


Figure 118 : Étapes de la décomposition SVD

Figure 119 : Exemple de détection de défaut sur une œuvre d'art au moyen du PCT (Tiré de Gavrilov [45])

Cette méthode proposée par **Rajic** en 2002 présente de nombreuses qualités en termes d'amélioration des images thermiques, en matière de détection, mais cette méthode ne s'appuie pas sur un modèle physique et il est parfois difficile de relier les résultats à une réalité physique concrète, ce qui semble limiter cette méthode à l'amélioration de la détection, cependant ce qui peut apparaitre comme une faiblesse sur le plan théorique est une force sur le plan pratique, car elle est totalement détachée du contexte physique dont les autres méthodes semblent pâtir (géométrie, couche picturale, dépôt d'énergie, etc.).

S. Sfarra et al (2011) [134] détaille l'intérêt de cette méthode au CND appliqué au patrimoine.

9.1.4. Post-traitements exploitant des méthodes statistiques

9.1.4.1. La méthode TSR (Thermo-Signal reconstruction)

Cette méthode issue de l'analyse pulsée a été introduite par **Shepard** [96]–[99]. Elle repose sur une réduction polynomiale logarithmique du thermogramme impulsionnel. En d'autres termes, cela

consiste à « approcher » la réponse en température d'un point de la scène thermique par un polynôme à base de logarithmes. Il est en effet aisé de passer en représentation logarithmique pour représenter l'évolution de la température en surface d'un échantillon plan, semi-infini, soumis à une impulsion δt de Dirac. Nous savons que la solution 1D (quand l'énergie va dans une seule direction), en face avant (z=0), de cette configuration expérimentale obéit à l'équation suivante :

$$T(z,t) = T_{init} + \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \tag{2.10}$$

Si nous calculons le logarithme de cette expression, nous obtenons :

$$\ln(\Delta T) = \ln\left(\frac{Q}{b\sqrt{\pi t}}\right) = \ln\left(\frac{Q}{b}\right) - \frac{1}{2}\ln(\pi t) \tag{2.11}$$

Cela se traduit en représentation Log-Log par une droite de pente -1/2 rencontrant l'axe des ordonnées en un point dépendant du rapport Q/b.

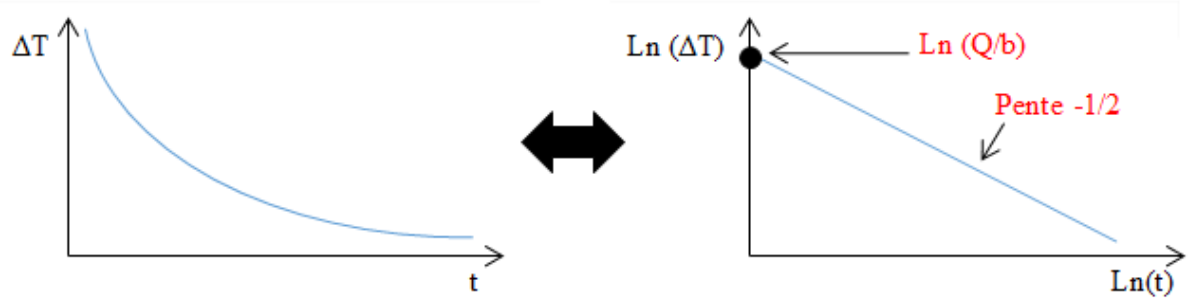


Figure 120 : Réponse impulsionnelle 1D d'un mur semi-infini, équivalence en log-log

Lorsque l'échantillon est un **bicouche** (cas de deux milieux b_1 et b_2) cela se traduit par une pente -1/2 aux temps courts suivi d'une inflexion de cette pente repréentant la transition entre le milieu b_1 et le milieu b_2 et à nouveau une pente -1/2 représentant la diffusion dans le second milieu (supposé semi-infini) voir Figure 121 :

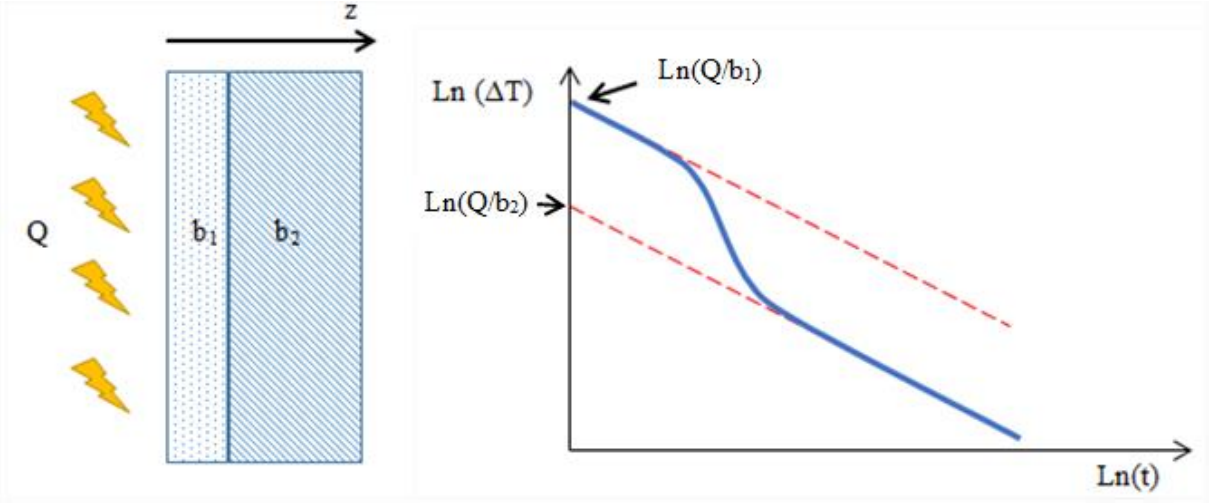


Figure 121 : Réponse impulsionnelle 1D d'un bicouche en log-log

L'observation de la réponse 1D du bicouche permet de déduire l'influence que peut avoir un défaut sur la réponse impulsionnelle en log-log, celui-ci se manifestera par une inflexion de la réponse par rapport à la pente de référence en -1/2.

Ces considérations ont amené **Shepard** à l'idée de modéliser les thermosignaux sous la forme d'une série polynomiale logarithmique :

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln^2(t) + ... + a_n \ln^n(t) = \sum_{n=0}^{n} a_n \ln^n(t) \qquad (2.12)$$

Cette approche s'est révélée fructueuse, que ce soit en matière de réjection du bruit (filtrage-lissage) que sur le plan des volumes de données à traiter (compression). De plus l'utilisation des dérivées logarithmiques première et seconde du polynôme logarithmique $\frac{d\ln(\Delta T)}{d\ln(t)}$ et $\frac{d^2\ln(\Delta T)}{d\ln(t)^2}$ apportent une information sans avoir à pâtir du bruit, ces dérivées successives permettent aussi une normalisation automatique des thermogrammes par élimination de la composante continue tout en étant particulièrement sensibles aux inflexions des réponses thermiques indicatrices de défauts ou d'inhomogénéité dans le matériau (meilleure détectivité que la **PT**), voir figure ci-dessous, de plus le **TSR** est moins affecté par les variations d'absorptivité en surface.

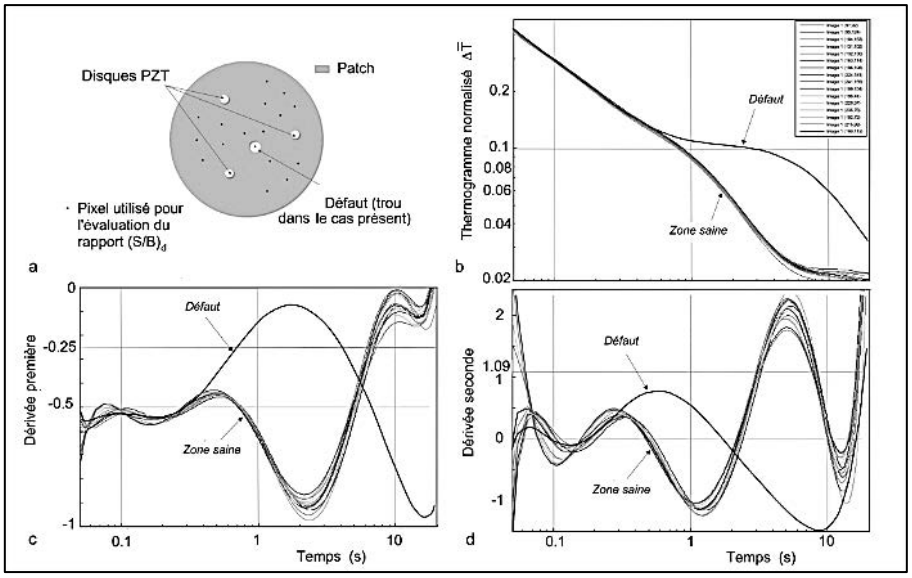


Figure 122 : Identification de défauts sur un patch à l'aide du TSR et de ses dérivées successives (Source Balageas [157])

La réponse thermique de chaque point de l'image peut donc être modélisée par un polynôme et il est donc possible d'extraire pour chaque point de l'image un jeu de coefficient et d'établir ainsi des images ou cartes de ces coefficients successifs afin de visualiser les défauts.

9.1.4.2. Statistiques d'ordre supérieur (HOS)

En page 43 du chapitre I, nous avons évoqué l'utilisation des statistiques d'ordre supérieures pour étudier des images thermographiques**.** Pour ce faire on peut considérer les valeurs de l'évolution temporelle de chaque pixel de la scène thermique étudiée comme les évolutions d'une variable aléatoire issue d'une distribution. Il est donc possible de caractériser cette distribution de température, point par point, à l'aide de paramètres statistiques. Des travaux ont démontré qu'il est possible d'améliorer la détection en produisant des images de *skewness* et *kurtosis*. Voir page 44 (chapitre I) pour plus de précisions.

Dans cette étude on s'intéressera aussi à d'autres paramètres statistiques d'ordres inférieurs tels que :

- ◊ la variance et l'écart type (ordre 2)
- ◊ la moyenne

- ◊ la moyenne
- ◊ le mode
- ◊ la moyenne quadratique (RMS ou *Root Mean Square,* ordre 2)

9.1.4.3.La méthode PLS (Partial least square)

Cette technique récemment introduite en analyse d'image thermique provient de travaux de statisticiens. Elle repose sur l'analyse de la régression PLS qui maximise la variance des prédicteurs (X_i) = X tout en maximisant la corrélation entre X et la variable à expliquer Y. Cet algorithme s'inspire à la fois de l'analyse en composante principale (ACP) et de la régression (source Wikipédia).

L'intérêt de cette technique est de pouvoir analyser simultanément deux matrices X et Y en tenant compte de la relation l'une à l'autre. L'une de ces matrices comporte nécessairement des données, l'autre peut être un vecteur temps ou une autre matrice. Sans entrer dans le détail de la théorie, mathématiquement la décomposition PLS peut s'écrire ainsi :

$$X = T.P^T + E$$
$$Y = T.Q^T + F$$

P et Q désignent les chargements, T est une matrice orthonormale de score, E et F sont des termes d'erreur ou résidus et X une matrice n × m de prédicteurs, Y une matrice n × p de variable réponse. La régression PLS s'effectue avec différents algorithmes par exemple de SIMPLS. La matrice des données peut-être indifféremment la matrice X ou la matrice Y, suivant la nature de ces matrices on peut avoir une approche de type PLS ou une approche de type PLSRT (*Partial Least Squares Regression Thermography*) lorsque les deux matrices dépendent l'une de l'autre suivant cette expression :

$$Y = X.B + E$$

Avec B une matrice coefficient.

Pour plus de précision se reporter aux articles de **F. López, V. Nicolau et al** (2013 et 2014) [137], [138] qui ont introduit cette méthode d'analyse en thermographie infrarouge

Les résultats en matière de PLS présentés dans ce mémoire de thèse l'ont été en collaboration avec l'équipe du **Dr. Paolo Bison** du *Consiglio Nazionale delle Ricerche* de Padoue (Italie), nous leur adressons nos remerciements pour cette collaboration.

9.1.4.4.L'analyse aléatoire

L'utilisation de signaux aléatoire permet d'éviter l'échauffement important des échantillons observé lors d'une excitation flash.

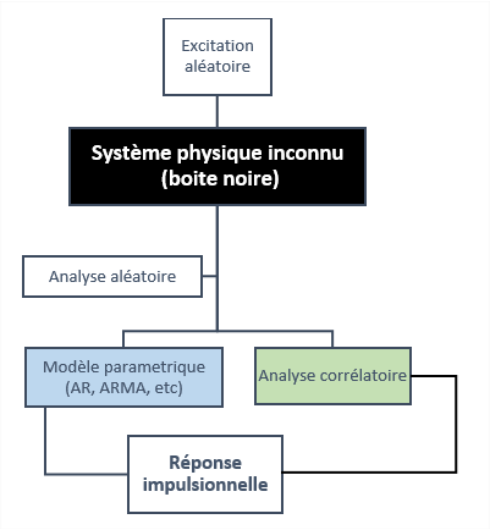


Figure 123 : Principe de l'analyse aléatoire

L'analyse aléatoire est une branche du traitement du signal qui analyse et exploite les signaux émis par un matériau lorsque celui-ci est excité par un signal aléatoire. De même qu'il est possible de moduler une excitation avec un signal périodique de type sinus (Lock-in) il est possible de le faire avec un signal aléatoire qu'on appelle un **bruit blanc,** ce type de signal théorique peut être approché avec une séquence de signaux aléatoires appelés **PRBS** (*Pseudo Random Binary Sequence*). Ces signaux sont générés par un registre de bascules à décalages à base de bascule D (voir Figure 124).

Comme nous l'avons expliqué au chapitre I page 39, il est possible de recalculer la réponse impulsionnelle ou harmonique d'un système en procédant par exemple à une **analyse paramétrique** de la réponse en température d'un échantillon excité aléatoirement (voir définition plus bas). On peut ainsi obtenir un modèle de comportement du système physique étudié. Précisons quelques termes :

Bruit blanc : Le bruit blanc est un signal de moyenne nulle qui comporte la totalité des fréquences avec la même intensité, ce qui revient à dire que la densité spectrale de puissance (DSP) d'un tel signal est constante sur la totalité du domaine fréquentiel. La création d'un bruit blanc théorique n'est pas aisée, l'une des méthodes consiste à recueillir les signaux générés par un dispositif électronique composé de bascules D.

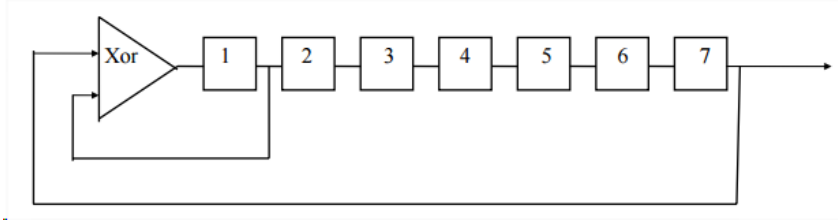


Figure 124 : Câblage d'un générateur de PRBS de degrés 7
(tiré de la thèse Salim Brahim Djelloul [160, p. 34])

Analyse paramétrique : Cette technique d'identification que nous utiliserons ici consiste originellement à reconstruire les réponses impulsionnelles et harmoniques à partir d'un **modèle de comportement** paramétrique (AR ou ARMA[13]) du système étudié. Ce modèle se construit par ajustement paramétrique en prenant en compte l'analyse de la réponse photothermique du système lorsqu'il est soumis à un **bruit blanc** afin que la réponse physique soit la plus proche possible de la réponse issue du modèle. Ensuite dans un second temps on applique à ce modèle une impulsion de

[13] **ARMA** : AutoRegressive–Moving-Average (Modèle autorégressif à moyenne ajustée).

Dirac afin d'obtenir la réponse impulsionnelle. Il est possible d'appliquer à elle-ci une transformée de Fourier afin d'obtenir la réponse harmonique du système (voir Figure 125 et Figure 126) :

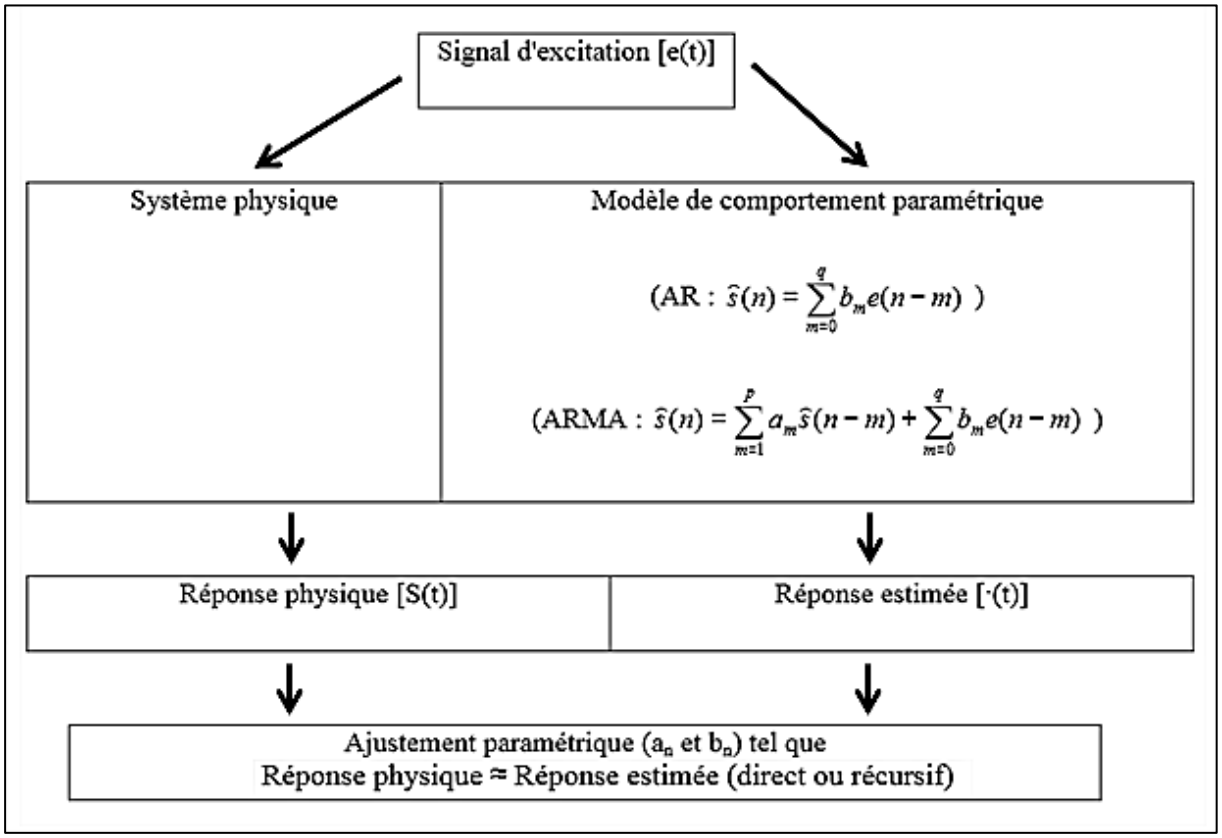


Figure 125 : Principe de construction d'un modèle paramétrique (Source J.L. Bodnar [161])

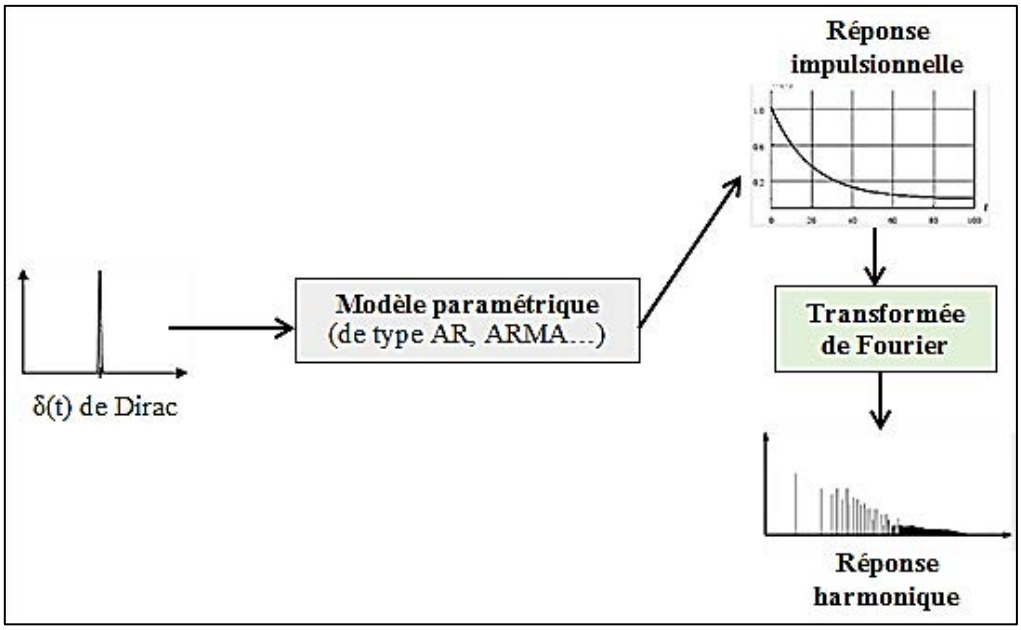


Figure 126 : Construction des réponses impulsionnelle et harmonique à l'aide d'un modèle paramétrique

Nous avons intégré ce type de traitement dans notre outil **SAMMTHIR,** plus précisément la décomposition ARMA :

$$\text{ARMA} : \hat{s}(n) = \sum_{m=1}^{p} a_m \hat{s}(n-m) + \sum_{m=0}^{q} b_m e(n-m) \qquad (2.13)$$

Les réponses impulsionnelles sont calculées pixel par pixel à partir d'un modèle comportant m paramètres, voir équation (2.13). Le résultat obtenu est une simulation d'un comportement obtenu lors d'une excitation flash (film impulsionnel). Cette approche est plus complète qu'un modèle convolutif, car elle prend en comptes les caractéristiques intrinsèques du filtre et les états antérieurs du système (effet mémoire) représenté par les deux termes de l'expression (2.13).

Cette modélisation du comportement thermique nous permettra de vérifier s'il est possible de mettre en évidence des effets intéressants sur le plan de l'atténuation des effets radiatifs. Nous nous intéresserons aussi aux images de paramètres a_m et b_m obtenues à partir de (2.13). La construction de ces images de paramètres provient de l'extraction pour chaque pixel du film thermique du jeu de paramètres associés, ces paramètres permettent ensuite de générer des images pouvant être porteuses d'information.

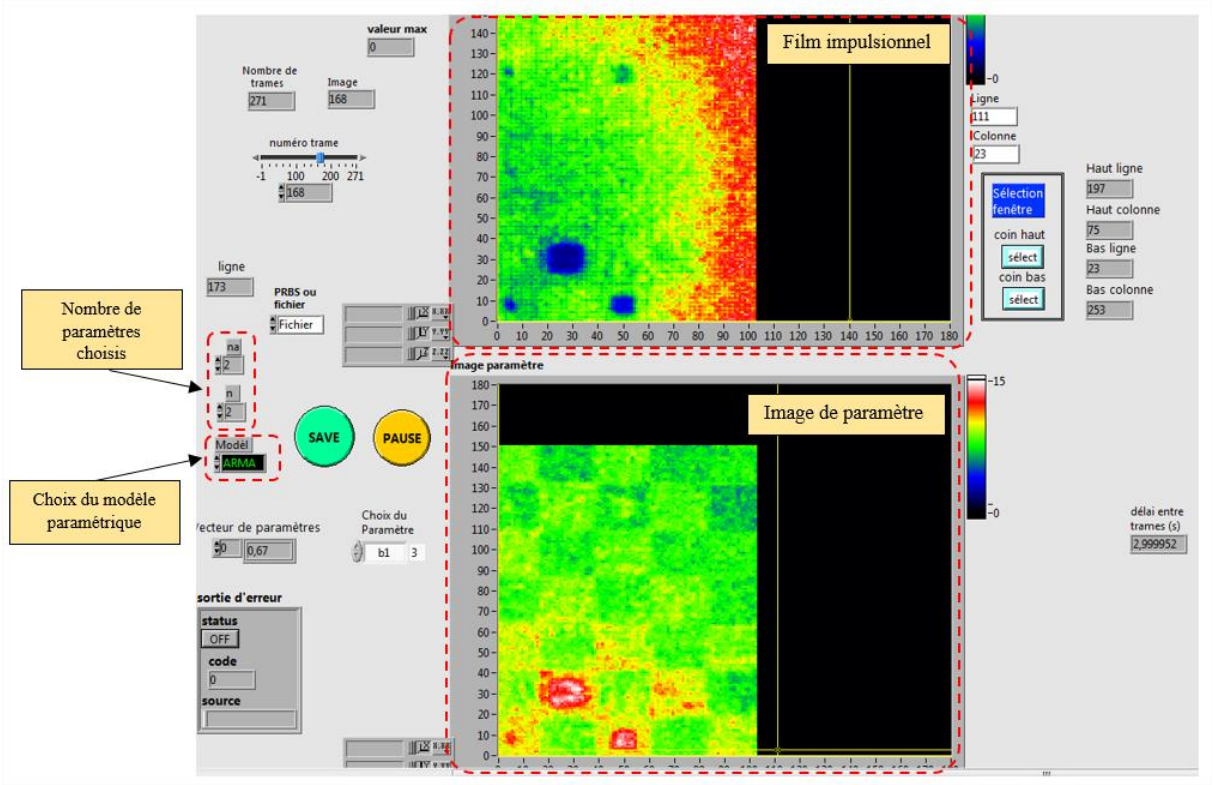


Figure 127 : Interface de l'outil développé pour la reconstruction paramétrique

9.2. Simulation

Nous venons de décrire les post-traitements qui seront utilisés. Dans cette section nous vérifierons à l'aide d'une simulation numérique la validité de notre approche. Est-il possible d'améliorer la détection au moyen de post-traitement ? Différents post-traitements seront appliqués à la simulation d'un bloc de plâtres soumis à deux types de signaux d'excitation: le créneau et le PRBS.

9.2.1. Analyse d'un résultat de simulation sous excitation créneau à l'aide de post-traitements

Nous testerons pour commencer, des post-traitements sur un bloc soumis à une excitation de type créneau. L'intérêt de cette simulation est de permettre la maitrise des paramètres expérimentaux de

l'expé ience photothermique (parfois difficilement maitrisables) et de vérifier des hypothèses de travail.

9.2.1.1. Conditions de simulation

Nous avons pour cela simulé à l'aide d'un logiciel de calcul par é é ents finis, un bloc de plâtre ayant des propriétés thermophysiques proches des matériaux composant les peintures murales, les caractéristiques retenues figurent dans le tableau suivant :

Tableau 16 : Parametres de simulation

Longueur (m)	Largeur (m)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m^3)	Capacité calorifique (J/kg.K)
0,16	0,12	0,02	1100	830

Afin de simuler la présence de délaminations, nous avons inclus dans le volume du bloc six inclusions d'air de forme paralléléipédiques (20 mm x 20 mm x 4 mm) et d'une profondeur variant de 2 à 12 mm par étapes de 2 mm (Figure 128 et Figure 129).

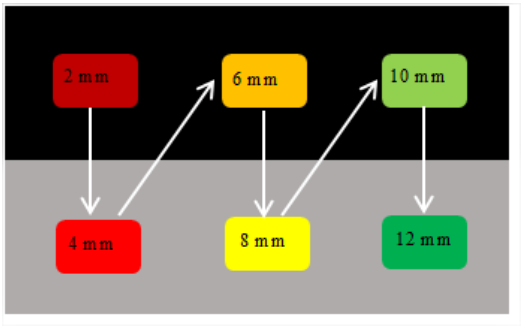


Figure 128 : Carte des défauts

Afin de simuler les effets optiques (radiatifs) d'une surface peinte, nous avons divisé la surface du bloc en deux zones identiques et nous avons appliqué sur l'une de ces zones un flux 1,5 fois supé ieur au flux de la zone contiguë. L'excitation choisie est un crén au d'une duré de 2 s, la durée d'observation a é é ixé à 200 s et la fréq ence d'acquisition à 1 Hz.

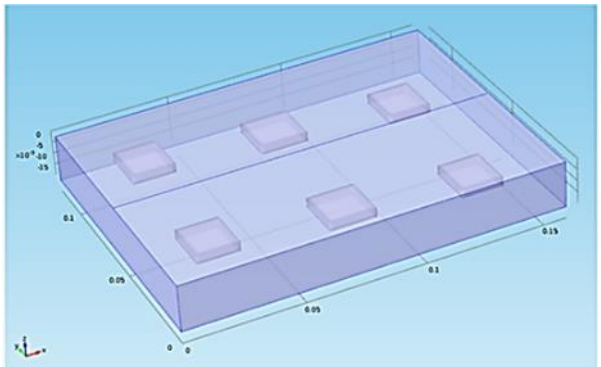


Figure 1 : plan xy

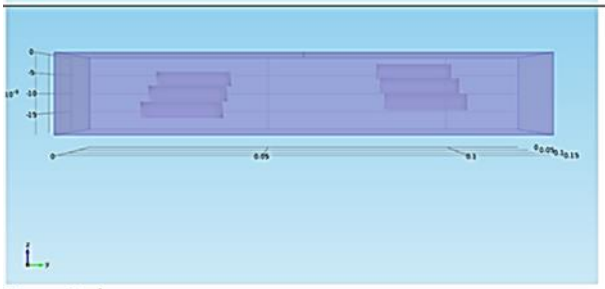


Figure 2: plan yz

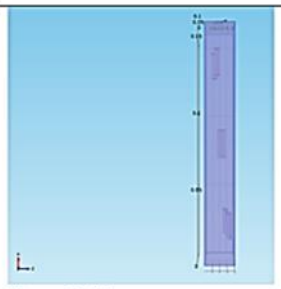


Figure 3 : Plan zx

Figure 129 : Échantillon modélisé

9.2.1.2. Protocole d'analyse

Chaque résultat est évalué selon deux critères : la qualité de la détection (nombre de défauts repérés) et l'atténuation des effets radiatifs. Nous avons défini la grille d'évaluation suivante :

Tableau 17 : Grille d'évaluation des post-traitements

Détection	Tous les défauts détectés	+++
	Détection partielle	+
	Pas de détection	---
	Formes des défauts et positions respectées	+
Atténuation des effets optiques	Oui	+++
	Non	---
	Partiellement	+

Chaque post-traitement sera évalué sur chacun de ces critères. La note globale sera estimée en comptabilisant le total des croix et de signe moins, chaque + annule un – et réciproquement.

9.2.1.3. Résultats

La figure suivante représente la réponse en température en surface, à différents instants. On observe bien l'apparition progressive des six défauts et la séparation de la surface en deux zones au contraste différencié qui figurent les deux zones d'absorptivité différentes, cette répartition du contraste ne permet pas d'observer avec la même intensité des défauts situés à des profondeurs proches. Nous allons appliquer différents traitements afin de vérifier s'il est possible de réduire cet effet et d'améliorer cette détection.

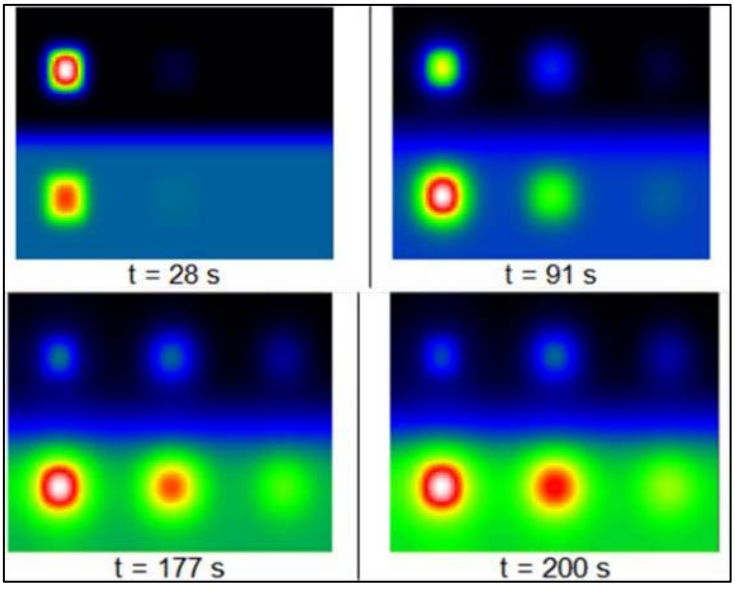
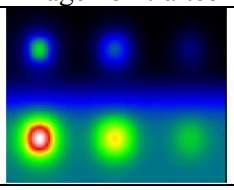
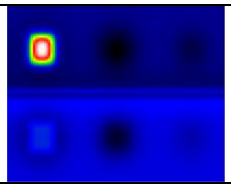
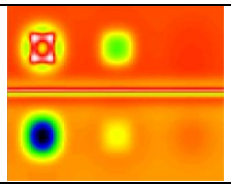
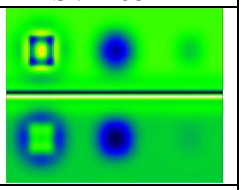


Figure 130 : Thermogrammes théoriques obtenus à différents instants

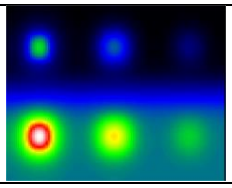
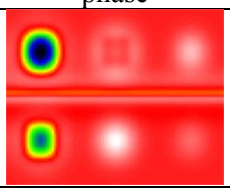
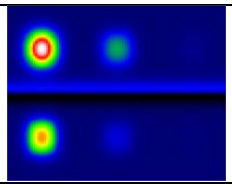
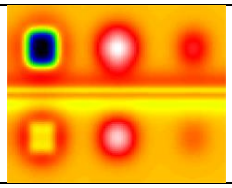
Afin de ne pas surcharger le document d'une grande quantité de figures et améliorer la lisibilité, tous les résultats ont été regroupés en annexe (voir page 331), nous ne présentons dans les trois tableaux suivants que les résultats les plus significatifs.

Tableau 18 : Résultats d'analyse sur une simulation, excitation créneau, traitement SVD

Post-traitement	Image non traitée	SVD eof 2	SVD eof 3	SVD eof 4
Résultats				
Détection des défauts	+++	++++	+	+++
Atténuation des effets radiatifs	---	+++	+++	+++
Conclusion	/	+++ +++ +	+++ +	+++ +++

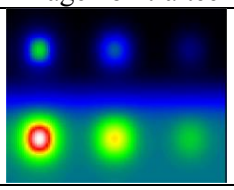
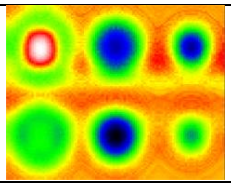
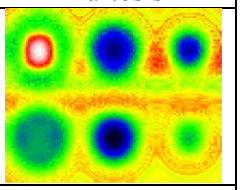
Bonne atténuation des effets optique à partir de l'EOF 2. Bon repérage des défauts, mais artefacts liés au maillage.

Tableau 19 : Résultats d'analyse sur une simulation, excitation créneau, traitement PPT et TSR

Post-traitement	Image non traitée	PPT analyse en phase	TSR coef 1, ordre 2	TSR coef 2, ordre 2
Résultats				
Détection des défauts	+++	+++	++	+++
Atténuation des effets radiatifs	---	+++	+++	+++
Conclusion	/	+++ +++	+++ ++	+++ +++

Le PPT en phase et le TSR à l'ordre 2 permettent d'atténuer les effets radiatifs et offre une bonne détection des défauts. On note que les défauts sont classés selon leurs profondeurs. La localisation des défauts est bonne ainsi que leur délimitation (pour les défauts les moins profonds).

Tableau 20 : Résultats d'analyse sur une simulation, excitation créneau, traitement statistique

Post-traitement	Image non traitée	Skewness	Kurtosis
Résultats			
Détection des défauts	+++	+++	+++
Atténuation des effets radiatifs	---	+++	+++
Conclusion	/	+++ +++	+++ +++

Les images de *kurtosis* et de *skewness* montrent un bon repérage des défauts et une bonne atténuation des effets optiques. On note que la délimitation géométrique des défauts est hasardeuse.

9.2.1.4.Conclusion

Cette étude a permis de dégager un certain nombre d'observations intéressantes. Tout d'abord les méthodes testées permettent de mettre correctement en évidence les défauts, les résultats sont variables quant à la précision de cette détection en terme de forme et de taille, mauvais pour les HOS. L'atténuation des effets radiatifs ne donne pas de bons résultats avec le filtre « passe-bas » et les méthodes de contraste, les résultats sont satisfaisants en ce qui concerne le SVD ou le PPT (phase), les méthodes telles que le TSR et les HOS donnent aussi des résultats encourageants. Le tableau suivant regroupe tous les résultats obtenus.

Tableau 21 : Récapitulatif simulation

	Filtre	**Contraste**			**Transformation**			**Méthodes statistiques**		
Post-traitement	« passe-bas »	Contraste somme	Temps du contraste maximum	Contraste d'effusivité	SVD	PPT		TSR	HOS	PLS
						Module	Phase			
Repérage des défauts	+	+	+	+	+++	+	+++	+++	+++	
Précision de la géométrie du défaut	+	-	+	+	+	+	+	+	-	
Atténuation des effets radiatifs	- - -	- - -	- - -	- - -	+++	---	+++	+++	+++	
Note globale	-	- - -	-	-	+++ +++ +	-	+++ +++ +	+++ +++ +	+++ ++	

Ce travail d'exploration nous a permis de nous faire une idée plus précise sur les différentes possibilités offertes par un certain nombre de traitements. Dans la suite nous nous intéresserons au même échantillon en utilisant cette fois une excitation aléatoire (PRBS) avec traitement du thermogramme en l'état et après reconstruction paramétrique.

9.2.2.Analyse d'un résultat de simulation sous excitation PRBS à l'aide de post-traitements

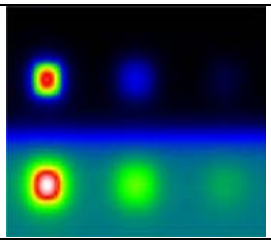
9.2.2.1.Conditions de simulation

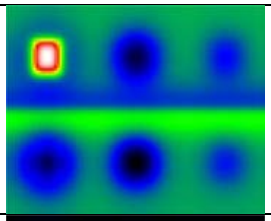
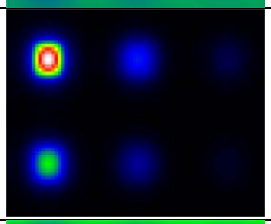
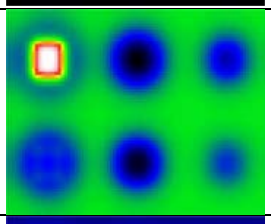
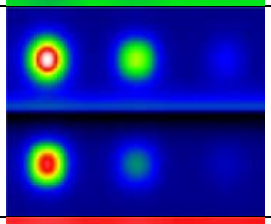
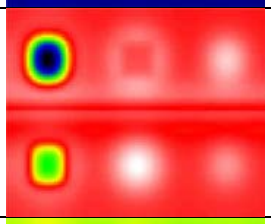
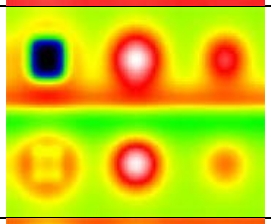
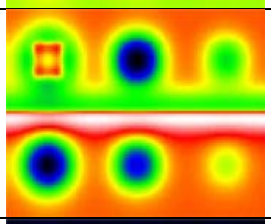
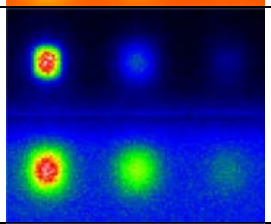
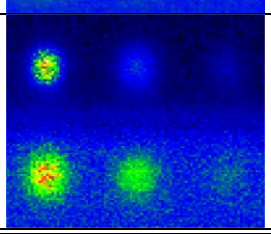
Seul le type d'excitation a été modifié dans cette simulation, nous avons appliqué une séquence aléatoire de signaux de type PRBS, à 256 termes. Nous avons ensuite exécuté tous les post-traitements précédemment décrits.

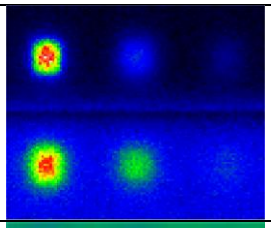
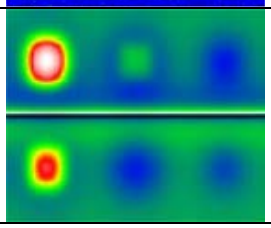
9.2.2.2.Résultats

Nous avons appliqué la même grille d'évaluation et les mêmes critères qu'en 9.2.1.2 (page 97). Les résultats ont été regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Résultats d'analyse d'une simulation avec des post-traitements (Excitation PRBS)

Post-traitement	Résultats	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Conclusion
Image non traitée		+++ +	---	/

SVD eof3		+++	+++	+++ +++
PPT module		++	+++	+++ ++
PPT phase		+++	+++	+++ +++
TSR ordre 1, coeff 1		+	+++	+++ +
TSR ordre 3, coeff 3		+++ +	+++	+++ +++ +
Skewness		+++ +	+	+++ ++
Kurtosis		+++	+	+++ +
ARMA 6 6		+++ +	+++	+++ +++ +
ARMA 8 8 (paramètre b3)		+++	+++	+++ +++

ARMA 6 6 (paramètre b2)		+++ +	+++	+++ +++ +
ARMA 4 4 (paramètre a0)		+++ +	+++	+++ +++ +

9.2.2.3. Conclusion

Le tableau suivant reprend nos principaux résultats, nous retrouvons les résultats observés précédemment avec la modélisation créneau à savoir que les PPT phase, le TSR, le SVD et les HOS permettent de s'affranchir efficacement de la couche picturale tout en assurant une bonne détection des défauts. Le PPT en module donne des résultats surprenants, qui diffèrent de ce que nous avons observé dans l'étude précédente, ce résultat est étonnant, car le module est en principe sensible aux aspects énergétiques contrairement à la phase. Ce résultat devra être étudié plus finement par la suite.

L'intérêt de cette étude réside dans l'étude des possibilités de la reconstruction ARMA : les résultats obtenus tant du point de vue de l'atténuation des effets radiatifs que de la détection sont bons que ce soit au niveau des résultats tirés de la reconstruction paramétrique ou ceux tirés des images de paramètres. Ce travail permet d'envisager des possibilités très intéressantes en matière d'analyse d'échantillons réels soumis à des signaux aléatoires, ce que nous verrons dans la suite de cet exposé

Tableau 23 : Tableau récapitulatif des résultats d'analyse par post traitements d'une simulation avec PRBS

	Filtre	**Contraste**		**Transformation**			**Méthodes statistiques**			
Post-traitement	« passe-bas »	Contraste somme	Temps du contraste maximum	SVD	PPT		TSR	HOS	ARMA Réponse impulsionnelle	ARMA paramètres
					Module	Phase				
Repérage des défauts	+	+	+	+++	+	+++	+++	+++	+++	+++
Précision de la géométrie du défaut	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Atténuation des effets radiatifs	---	---	---	+	+++	+++	+++	+	+++	+++
Score	-	-	-	+++ ++	+++ ++	+++ ++	+++ +++ +	+++ ++	+++ +++ +	+++ +++ +

Voyons maintenant s'il est possible d'obtenir des résultats du même type sur des échantillons réels.

9.3. Évaluation de l'apport des post-traitements sur des échantillons de laboratoire

Cette étude sur des échantillons réels porte sur deux éprouvettes de laboratoire comportant des défauts.

9.3.1. Étude de l'éprouvette de laboratoire, « Le Picasso »

Cette éprouvette a été préparé par notre laboratoire. Elle est constituée d'un carreau de plâtre du commerce de dimension 68 x 50 x 5 cm. Cette plaque a été recouverte d'un motif bariolé peint à la bombe avec différentes couleurs. L'éprouvette a été perforé en différent endroit afin d'y introduire 32 inserts composés de pastilles de mousse et disposés régulièrement. Les trous de perforation ont ensuite été rebouchés à l'aide d'un enduit.

Figure 131 : Éprouvette face avant

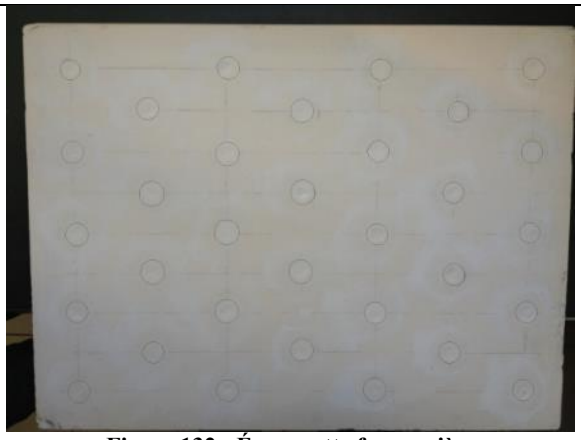


Figure 132 : Éprouvette face arrière

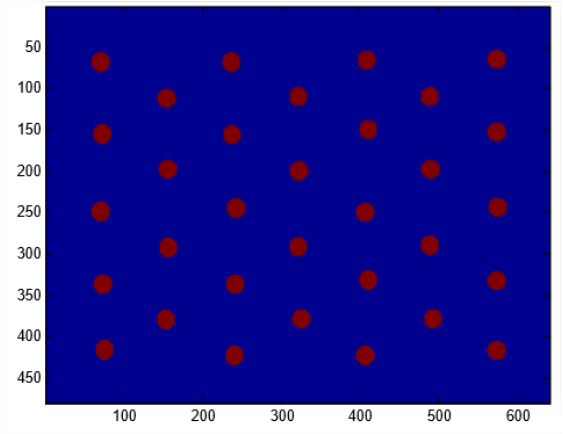


Figure 133 : Carte de défauts

9.3.1.1. Mode opératoire

L'éprouvette a été disposée à 154 cm de deux sources halogènes d'une puissance de 500 W chacune. Puissance totale émise : 1000 W. La fréquence d'acquisition a été fixé à 1 Hz Le type d'excitation utilisé dans un premier temps est de type créneau : on éclaire 1 min et on observe pendant 2mn. Nous avons par la suite soumis l'éprouvette à une excitation aléatoire PRBS (256 termes), voir résultats en page 345.

Image brute de référence

Le thermogramme ci-dessous représente la meilleure image obtenue avec nos sources habituelles de type halogène. La plupart des défauts sont détecté, mais ils n'apparaissent pas tous avec la même intensité alors qu'ils sont situé à la même profondeur dans un bloc de plâtres homogène. Le contraste de détection varie selon l'absorptivité des différents aplats. Les teintes sombres absorbent une part plus importante du flux d'excitation, elles s'échauffent plus, ce qui a pour effet d'augmenter le

contraste au niveau des dé auts. Voyons s'il est possible d'atténu r ces effets et d'amé iorer cette détection.

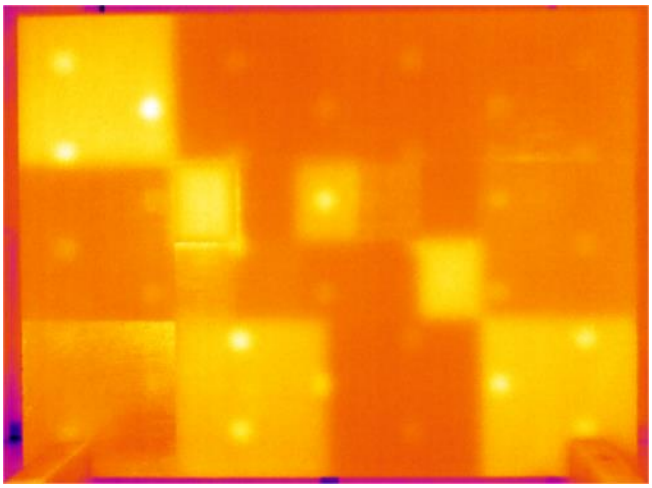


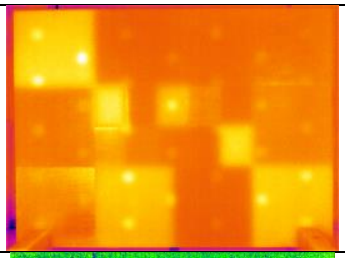
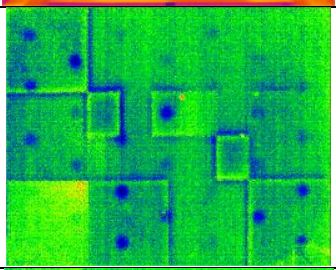
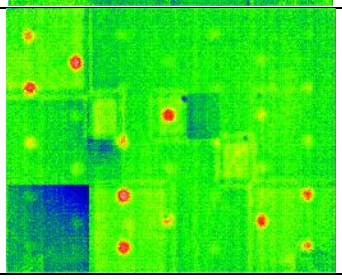
Figure 134 : Image thermique brute de l'échantillon

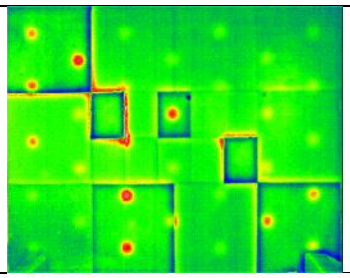
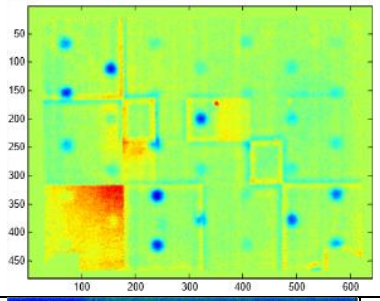
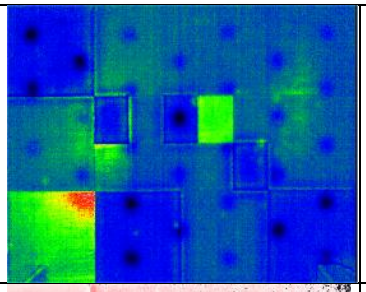
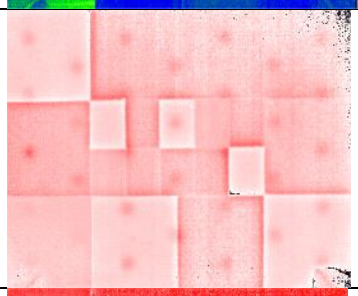
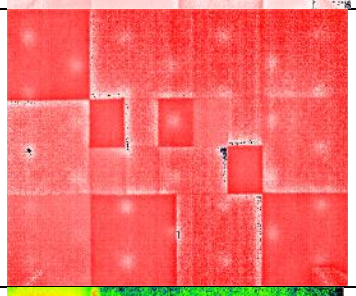
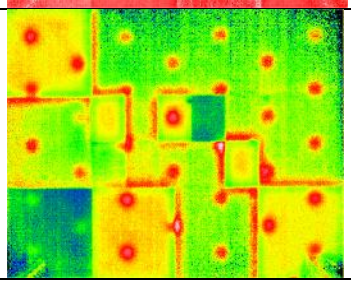
9.3.1.2.Résultats

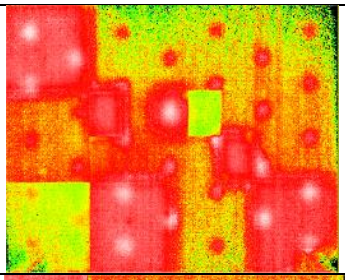
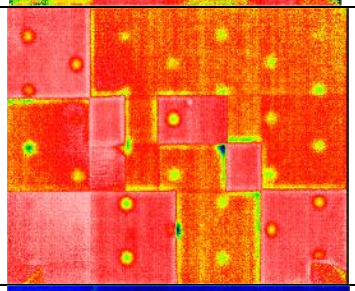
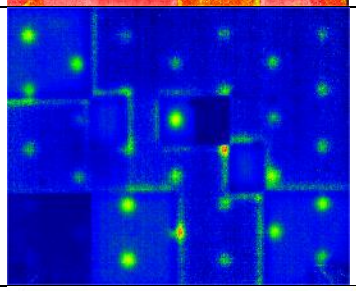
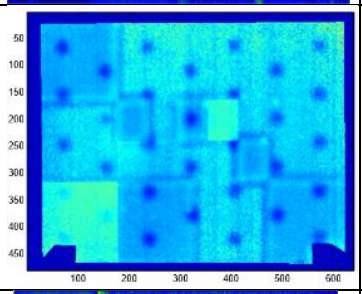
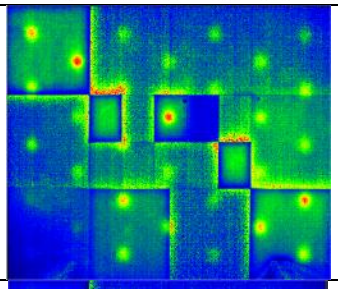
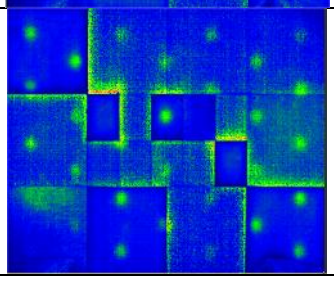
La totalité des résultats figurent en annexe 29.4, page 340.

Comme pré éd mment on applique la grille d'évaluation décrite en page 97. Le tableau suivant regroupe les résultats les plus significatifs :

Tableau 24 : Tableau récapitulatif post-traitement « *Picasso* »

Post-traitement	Résultat	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Conclusion
Image brute de référence. Meilleur contraste (image 135/254)		++	---	-
SVD echauffement (EOF3)		++	+	+++
SVD refroidissement (EOF2)		++	+	+++

SVD Echauffement + refroidissement (EOF2)		++	+++	+++ ++
PLS sur éprouvette "Picasso", 2nde composante, Xloadings		++	+	+++
SVD Echauffement + refroidissement (EOF3)		++	+	+++
PPT Phase		++	+++	+++ ++
PPT Phase		++	+++	+++ ++
TSR ordre 1 Composante 1		+++ +	+	+++ ++

TSR ordre 2 Composante 2		+++ +	-	+++ +
Skewness (Échauffement + refroidissement)		++	+	+++
Kurtosis (Échauffement + refroidissement)		++	+++	+++ ++
PLSRT sur éprouvette "Picasso", 3ème composante, Yloadings		++	+++	+++ ++
Reconstruction paramétrique 4 4		++	+++	+++ ++
Reconstruction paramétrique 2 2		++	+++	+++ ++

9.3.1.3.Conclusion

Le travail effectué sur cette éprouvette permet de tirer un certain nombre de conclusions intéressantes. On peut déjà noter qu'à l'exception des post-traitements exploitant un filtrage ou le contraste, tous les autres types ont permis d'obtenir des résultats en terme d'atténu tion des effets

optiques et sur le plan de la détection. Certains traitements sont légèrement en retrait sur le plan de la dé ection comme les HOS, mais permettent d'obtenir de très bons ré ultats en atténuation, l'inverse se vérifié aussi par exemple avec le TSR qui a permis de repérer des défauts détectés par aucun autre traitement (3 défauts repérés sous une couche de peinture particulièrement réfléchissante sur le coin bas à gauche, voir Tableau 24). On peut aussi observer que la plupart des remarques qui ont été faites dans la partie modélisation se trouvent confortées. Nous allons poursuivre et confirmer ces observations avec l'étude d'un autre échantillon.

Tableau 25 : Tableau récapitulatif de l'analyse du "Picasso"

	Filtre	**Contraste**	**Transformation**		
Post-traitement	« passe-bas »	Contraste d'effusivité	SVD	PPT	
				Module	Phase
Repérage des défauts	+	+	+	+	+
Précision de la géométrie du défaut	+	+	+	+	+
Atténuation des effets radiatifs	---	---	+++	---	+++
Score global	-	-	+++ ++	-	+++ ++

	Méthodes statistiques				
Post-traitement	TSR	HOS	PLS	ARMA Réponse impulsionnelle	ARMA paramètres
Repérage des défauts	+++	+	+	+	---
Précision de la géométrie du défaut	+	+	+	+	-
Atténuation des effets radiatifs	+	+++	+++	+++	+++
Score global	+++ ++	+++ ++	+++ ++	+++ ++	-

9.3.2. Étude de l'éprouvette dite « St Savin »

Figure 135 : Éprouvette St Savin

Cette éprouvette de laboratoire a été présentée en page 81, comme nous l'avons déjà dit il s'agit d'une reproduction comportant 5 dé auts à diffé entes profondeurs. Sur la partie gauche, nous pouvons remarquer la pré ence d'un motif floral, repré entant sans doute une fleur de lys, exécuté à partir d'un

pigment mé allique trè ré lé hissant. C'est le seul motif qui n'a pas été atté é lors de notre é ude avec les lampes infrarouges, nous vé ifierons s'il est possible d'obtenir de meilleurs résultats avec les post-traitements.

9.3.2.1. Mode opératoire

Comme précédemment nous avons soumis dans un premier temps cette éprouvette à une excitation de type crén au à l'aide de deux lampes halogè n s de 500 W chacune, la duré d'excitation a été de 1 min, la duré d'observation a été de 6 min, puis dans un second temps l'é rouvette a été soumise à u e sé uence d'excitation aléatoire de type PRBS 256.

9.3.2.2. Résultats

La figure ci-dessous repré ente l'image brute de l'é hantillon à diffé ents instants, on peut remarquer que le motif, contour du visage, yeux, gênent le repérage correct des défauts par exemple à l'endroit de la flèche ou l'œil droit du personnage masque partiellement un dé aut.

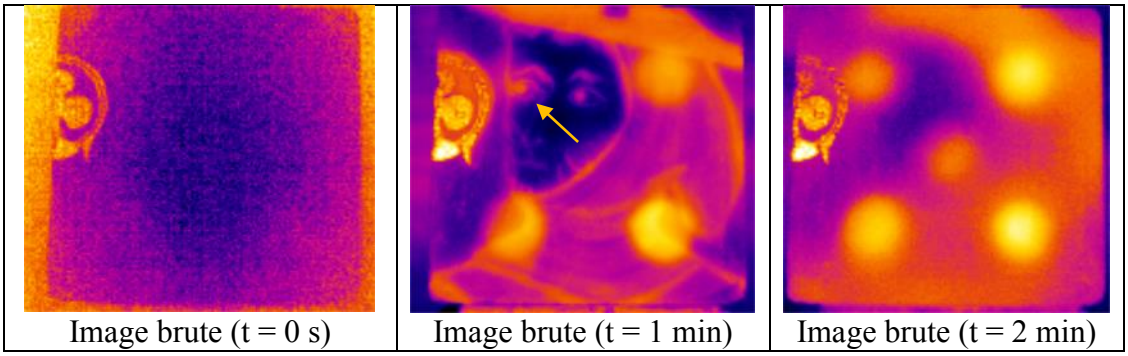
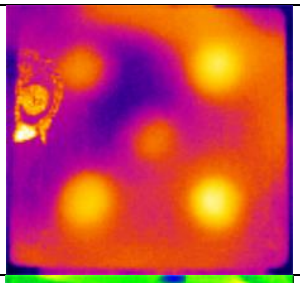
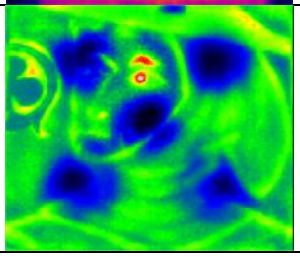
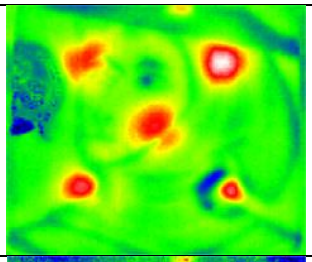
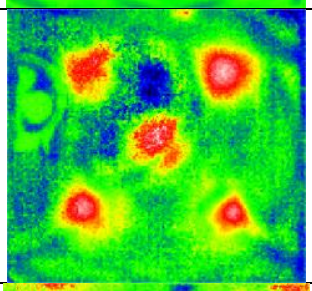
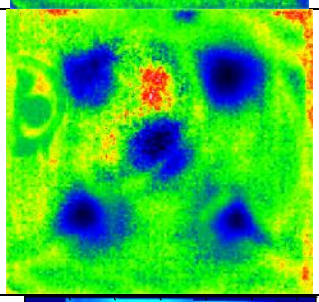
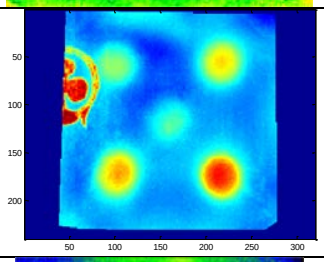
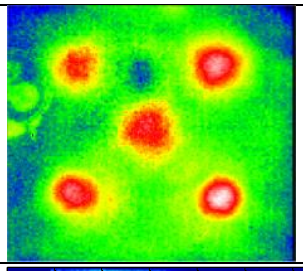
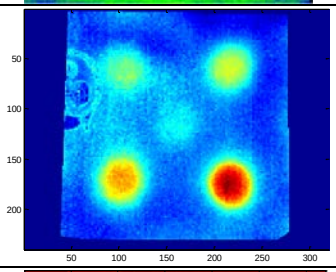
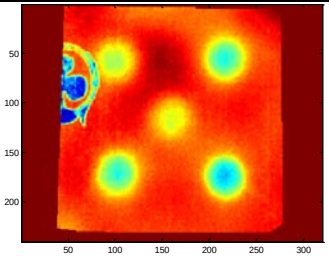


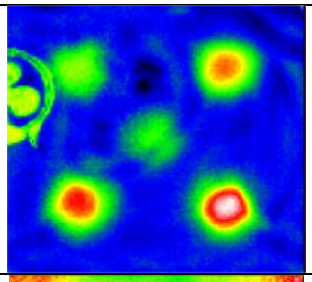
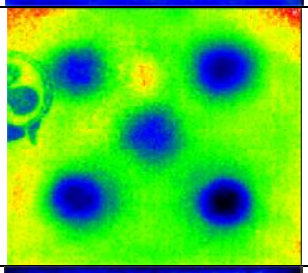
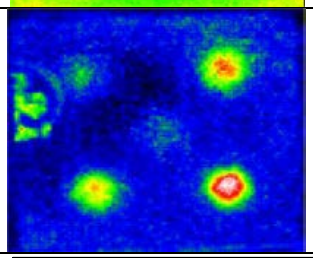
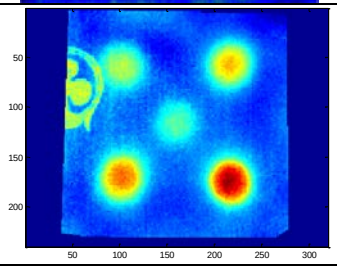
Figure 136 : Images brutes à différents instants

Les résultats les plus significatifs figurent dans le tableau suivant. Pour les autres résultats voir en Annexe 29.4, page 347.

Tableau 26 : Tableau récapitulatif post-traitements « *Saint-Savin* »

Post-traitement	Résultat	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Conclusion
Image brute de référence.		+	-	/
Skewness		+	+	++

SVD refroidissement (EOF2)		+	+	++
PPT (analyse en phase)		+	+	++
PPT (analyse en phase)		+	++	+++
Yloadings PLSRT 1st component		+++	+	+++ +
TSR ordre 3 coefficient 2		++	+++	+++ ++
Beta PLSRT 4th component		+++	++	+++ ++
Beta PLSRT 3rd component		+++	+++	+++ +++

TSR ordre 2 coefficient 1		+++	+++	+++ +++
TSR ordre 3 coefficient 3		+++	+++	+++ +++
ARMA 8 8		+++	+++	+++ +++
Yloadings PLSRT 3rd component		+++	++++	+++ +++ +

9.3.2.3.Conclusion

Les résultats obtenus confirment les observations faites auparavant. Le SVD, le PPT (y compris en module), le TSR, Le PLS et les HOS donnent des résultats satisfaisants. La reconstruction ARMA permet aussi d'obtenir de trè bons résultats, ce qui démontre l'intérêt de l'alé toire tant sur le plan de l'échauffement limité qu'il provoque, qu'en terme de rédu tion des effets optiques et sur le plan de la détection.

Tableau 27 : Tableau récapitulatif de l'analyse du St-Savin (1)

	Filtre	**Contraste**			**Transformations**		
Post-traitement	« passe-bas »	Contraste somme	Contraste valeur max	Contraste temps du max	SVD	PPT	
						Module	Phase
Repérage des défauts	+	+	---	---	+++	+++	+++
Précision de la géométrie du défaut	-	-	-	-	-	+++	-
Atténuation des effets radiatifs	-	---	---	---	+++	+++	+++
Score global	-	---	--- --- --	--- --- --	+++ ++	+++ +++ +++	+++ ++

Tableau 28 : Tableau récapitulatif de l'analyse du St-Savin (2)

	Méthodes statistiques				
Post-traitement	TSR	HOS	PLS	ARMA Réponse impulsionnelle	ARMA paramètres
Repérage des défauts	+++	+++	+++	+	-
Précision de la géométrie du défaut	+	-	+	+	-
Atténuation des effets radiatifs	+++	+++	+++	+++	---
Score global	+++ +++ +	+++ ++	+++ +++ +	+++ ++	--- --

Nous venons d'étudier le bénéfice qu'il est possible de tirer en matière de détection de défauts à l'aide de post-traitement. Ce travail de simulation tout d'abord puis sur des échantillons réels a permis d'écarter un certain nombre de traitements et d'en mettre d'autres en avant.

Nous pouvons exclure les traitements de type filtre « passe-bas » ou ceux exploitant le contraste absolu : les résultats obtenus n'apportent aucune amélioration par rapport à une analyse directe. En revanche des traitements tels que le SVD (à partir des eof 2 ou 3), le PPT (en phase), le TSR, le PLS ou encore les HOS (*skewness* et *kurtosis*) ont montré tout leur intérêt en matière d'élimination des contributions parasites de la couche picturale ou en matière de repérage des défauts. On note que le SVD et les HOS sont un peu moins performants sur le plan de la délimitation des défauts alors que le TSR et le PLS donnent de bons résultats dans la précision géométrique du repérage de ces défauts. On a aussi noté que certains post-traitements tel que le PLS et le TSR ne dégraduaient pas l'information liée à la profondeur du défaut (défauts classés) ce qui est notable.

Nous avons aussi testé l'aléatoire, car ce mode d'excitation présente l'avantage de limiter l'échauffement de l'objet analysé. Nous avons appliqué une reconstruction ARMA après avoir soumis nos deux échantillons à un PRBS. La reconstruction ARMA a donné de bon résultats en ce qui concerne la réduction des effets radiatifs, le repérage des défauts est aussi satisfaisant. Les images de paramètres se sont quant à elles révélées décevantes, probablement en raison d'un mauvais rapport signal sur bruit.

9.4. Comparaison des bénéfices obtenus selon le mode d'excitation

Nous avons observé dans les quatre cas étudiés précédemment que l'aléatoire est susceptible d'apporter des bénéfices par rapport à une excitation créneau sur le plan de l'échauffement.
Nous allons observer si ces gains en termes de détection et de réduction des effets optiques sont suffisamment significatifs pour privilégier un type de mise sous contrainte (excitation) plutôt qu'un autre. Nous veillerons à travailler à épaisseur d'énergie équivalent, quel que soit le mode d'excitation.

9.4.1. Protocole

L'objectif de cette étude est d'identifier le protocole d'analyse le plus efficace combinant la mise sous contrainte (créneau ou aléatoire) et le post-traitement. Nous allons travailler à partir de plusieurs scénarios : Le scénario 1 comprend les analyses effectuées sur les échantillons soumis à une excitation créneau, ces résultats existent déjà. Les scénarios 2 et 3 s'appliquent à l'excitation aléatoire : Le scénario 2 comprendra la mise en œuvre de post traitement sur les échantillons soumis à une excitation aléatoire sans reconstruction paramétrique préalable, ce travail n'a pas encore été fait, et enfin le scénario 3 comprendra les mêmes analyses, mais précédés d'une reconstruction paramétrique (pas encore fait, car nous nous sommes limités à la reconstruction paramétrique). Voir figure ci-dessous :

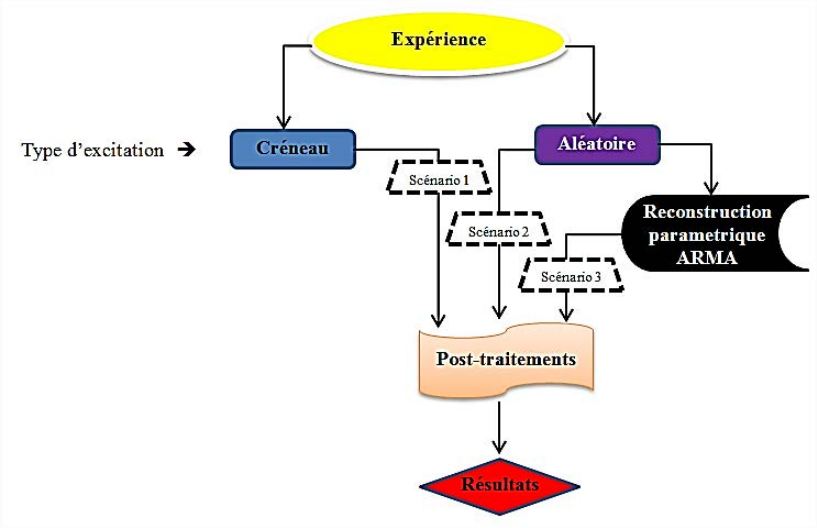


Figure 137 : Démarche expérimentale

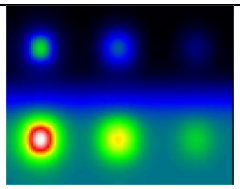
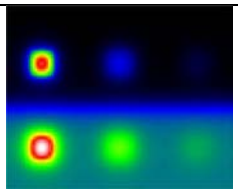
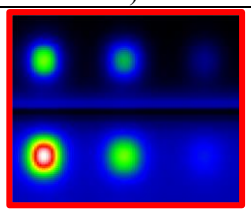
Nous aurons donc à comparer 3 scénarios pour chaque post-traitement et à estimer lequel des trois apporte le plus d'avantages sur le plan de la détection au sens large (repérage des défauts et réduction des effets optiques).

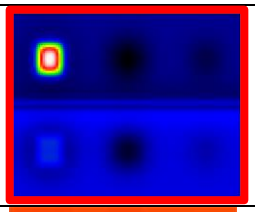
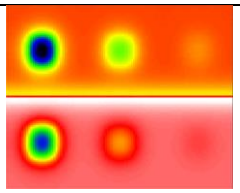
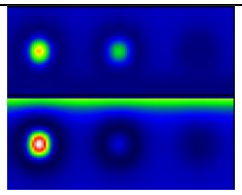
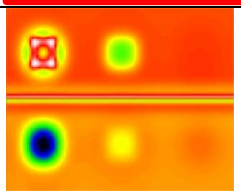
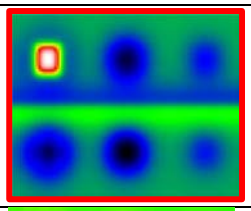
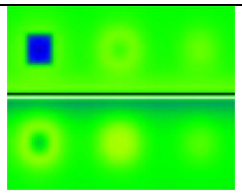
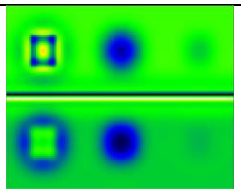
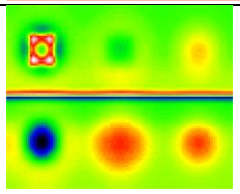
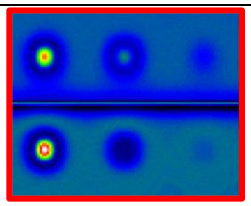
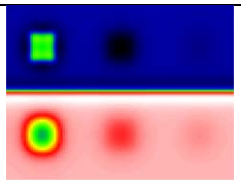
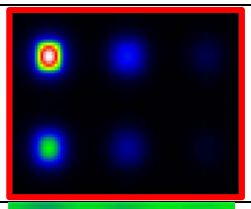
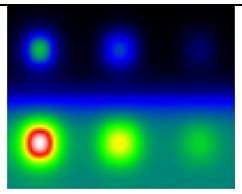
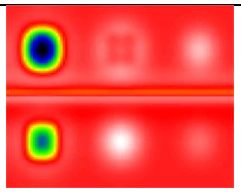
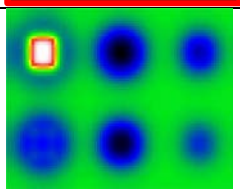
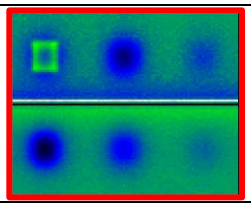
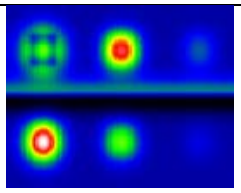
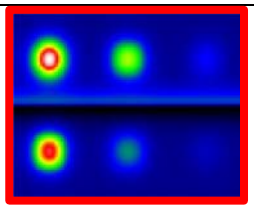
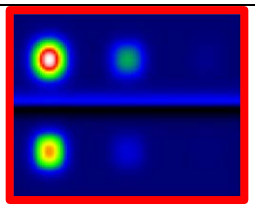
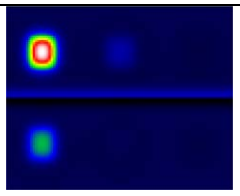
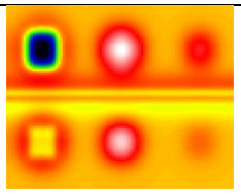
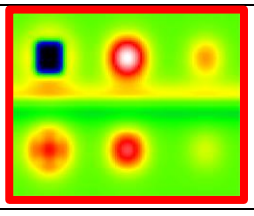
Nous nous limiterons à l'étude du résultat de simulation et à l'échantillon St-Savin.

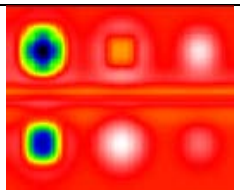
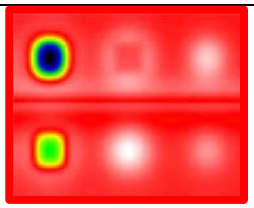
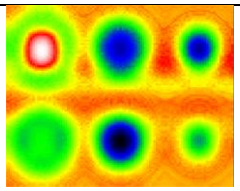
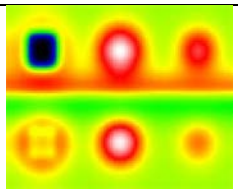
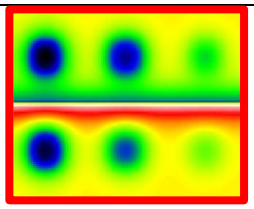
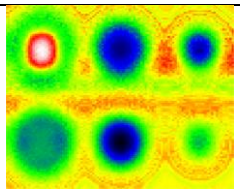
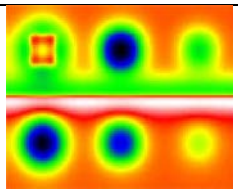
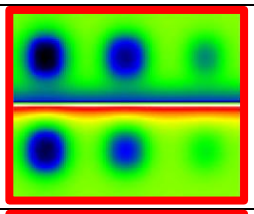
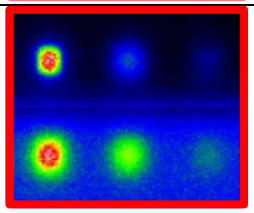
a) Cas n°1 : la simulation

Nous reprenons certains des résultats consignés en 9.2.1.3 et 9.2.2.2, nous avons appliqué les post-traitements au résultat de simulation d'un bloc de plâtre comportant 6 défauts, soumis à une excitation créneau de 2 s puis à un PRBS 256, comparons les résultats des différents traitements :

Tableau 29 : Comparaison des post traitements selon le mode d'excitation

Post-traitement	Résultats d'analyse obtenus après créneau + post-traitement (scénario 1)	Résultats d'analyse après PRBS + post-traitement (scénario 2)	Résultats d'analyse obtenus après PRBS + reconstruction (ARMA 1 1) + post-traitements (scénario 3)	Remarques
Image non traitée				Le contour des formes est mieux détecté en aléatoire reconstruit. Les défauts sont correctement classés.

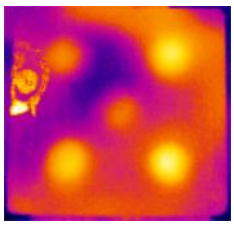
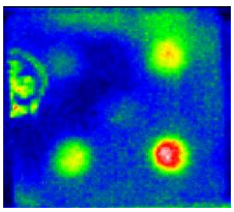
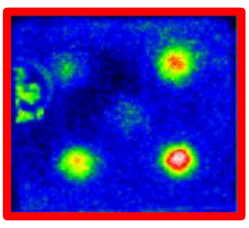
SVD EOF 2				Meilleure détection et atténuation en créneau.
SVD EOF 3				Meilleure détection en aléatoire.
SVD EOF 4				La détection et l'atténu tion sont meilleures en aléatoire reconstruit.
PPT module				Très bonne atténuation en aléatoire. Défauts classés.
PPT analyse en phase				Meilleure atténuation en aléatoire reconstruit.
TSR ordre 1, coeff 1				Meilleure atténuation en aléatoire, pas d'artefact de détection. Bon classement des défauts.
TSR coef 1, ordre 2				Plus de défauts détectés en créneau, mais meilleure atténuation et meilleure détection des défauts en aléatoire
TSR coef 2, ordre 2				Meilleurs contours et atténuation en aléatoire. Défauts classés.

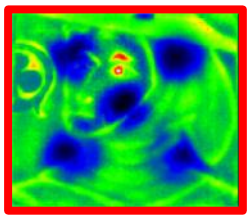
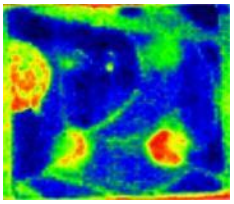
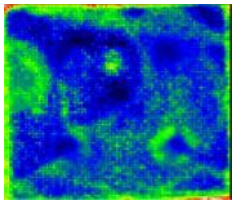
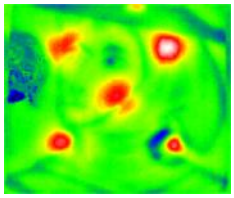
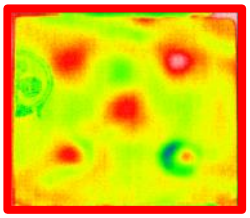
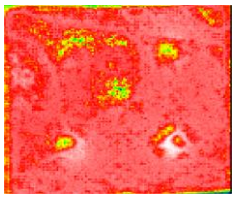
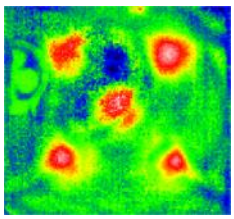
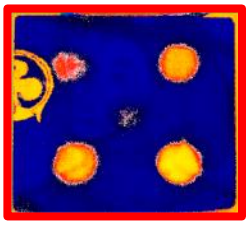
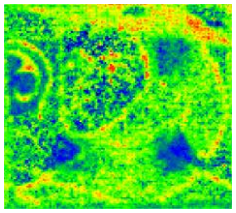
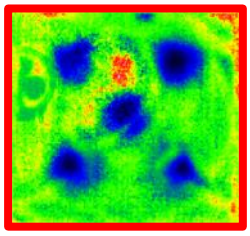
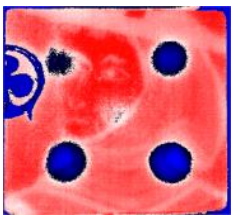
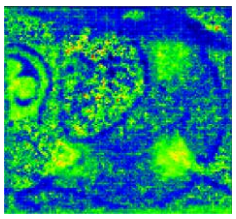
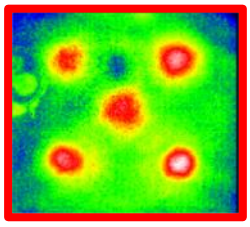
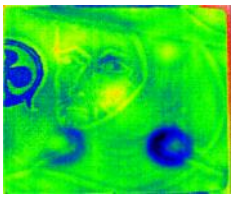
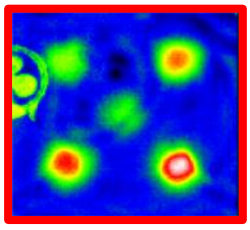
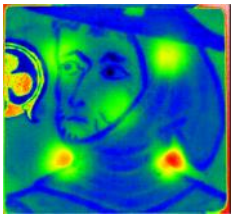
TSR ordre 3, coeff 3				Meilleurs contours et atténuation en aléatoire. Défauts classés.
Skewness				Meilleurs contours et atténuation en aléatoire reconstruit, défauts classés.
Kurtosis				Meilleurs contours en aléatoire reconstruit, défauts classés.
Réponse impulsionnelle (ARMA 6 6)				Comparaison non pertinente, mais bonne détection et atténuation en aléatoire.

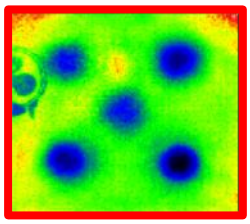
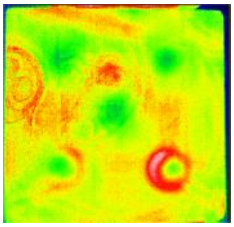
Sur douze comparaisons, dix donnent de meilleurs résultats en aléatoire dont cinq après reconstruction. Il semble que l'alé toire offre une meilleure détection des dé auts avec plus de précision sur les contours et les formes de ceux-ci, de plus les défauts sont correctement classés par rapport à leurs profondeurs. L'analyse en aléatoire après reconstruction semble aussi moins sensible aux artefacts de simulation, voir par exemple le SVD eof 4.

b) Cas n°2 : Le Saint-Savin

Proce ons à la me e é ude sur l'é hantillon de St-Savin. Le tableau suivant regroupe les résultats les plus significatifs :

Post-traitement	Ré ultats d'analyse obtenus avec une excitation créneau (scénario 1)	Ré ultats d'analyse obtenus avec une excitation PRBS (scénario 2)	Ré ultats d'analyse obtenus avec une excitation PRBS (scénario 3 sur ARMA 8 8)	Remarques
Image brute de référence.				Meilleure détection avec l'alé toire reconstruit.Class ement des défauts et bonne précision au niveau des contours.

Skewness				Le créneau permet de repérer tous les défauts, mais pas de classement et géométrie des défauts incertaine.
SVD refroidissement (EOF2)				L'aléatoire permet d'observer tous les défauts, pas de classement et géométrie incertaine. Atténuation moyenne.
PPT (analyse en phase)				L'aléatoire permet d'observer tous les défauts avec classement, la géométrie est respectée. Bonne atténuation.
PPT (analyse en phase)				Le créneau permet de repérer tous les défauts, mais pas de classement et géométrie des défauts incertaine.
TSR ordre 3 coefficient 2				Bonne détection de tous les défauts, mais précision moyenne en créneau et bonne atténuation.
TSR ordre 2 coefficient 1				Bonne détection de tous les défauts, mais précision moyenne en créneau et bonne atténuation.Classement perceptible.

TSR ordre 3 coefficient 3				Bonne détection de tous les défauts, bonne précision au niveau des contours en créneau et bonne atténuation.

L'aléatoire se démarque d'une analyse crénau dans trois comparaisons sur huit. Ce résultat est un peu décevant par rapport aux résultats obtenus avec la simulation. Nous avons aussi observé à plusieurs reprises d'excellents résultats en matière de détection des défauts et d'atténuation des effets radiatifs sur certains échantillons, il semble donc qu'il soit difficile de se prononcer en l'état sur l'apport réel de l'aléatoire faute d'une étude plus poussé.

9.5. Conclusion

En conclusion générale nous pouvons affirmer que notre approche visant à atténuer les effets optiques à l'aide de post-traitement est fondée et efficace. Celle-ci permet d'obtenir des résultats satisfaisants en matière de détection. Le graphe suivant classe les post-traitements en fonction du type d'excitation et en fonction du type d'échantillon. L'observation de la Figure 138 permet de constater que les bénéfices obtenus diffèrent d'un post-traitement à l'autre, mais une tendance générale se retrouve sur les quatre exemples étudiés : le filtre passe-bas utilisé ne donne aucun résultat sur le plan de l'atténuation, de même que les traitements se basant sur le contraste, les bons résultats s'obtiennent à l'aide des traitements exploitant des transformations (PPT et SVD), ainsi que ceux utilisant une approche statistique (TSR, PLS, ARMA et HOS). On peut faire remarquer que concernant le PPT (*Pulse phase thermography*), l'analyse en phase donne systématiquement de bons résultats alors que l'analyse en module est inégale selon les échantillons étudiés.

L'autre observation intéressante réside dans l'utilisation de signaux d'excitation aléatoires, ces signaux semblent apporter un bénéfice quel que soit le type de traitement utilisé en simulation, on peut le constater en comparant les résultats de la modélisation avec créneau aux résultats obtenus sur cette modélisation à l'aide de signaux PRBS. Hélas cette observation n'a pas été confirmée sur un véritable échantillon.

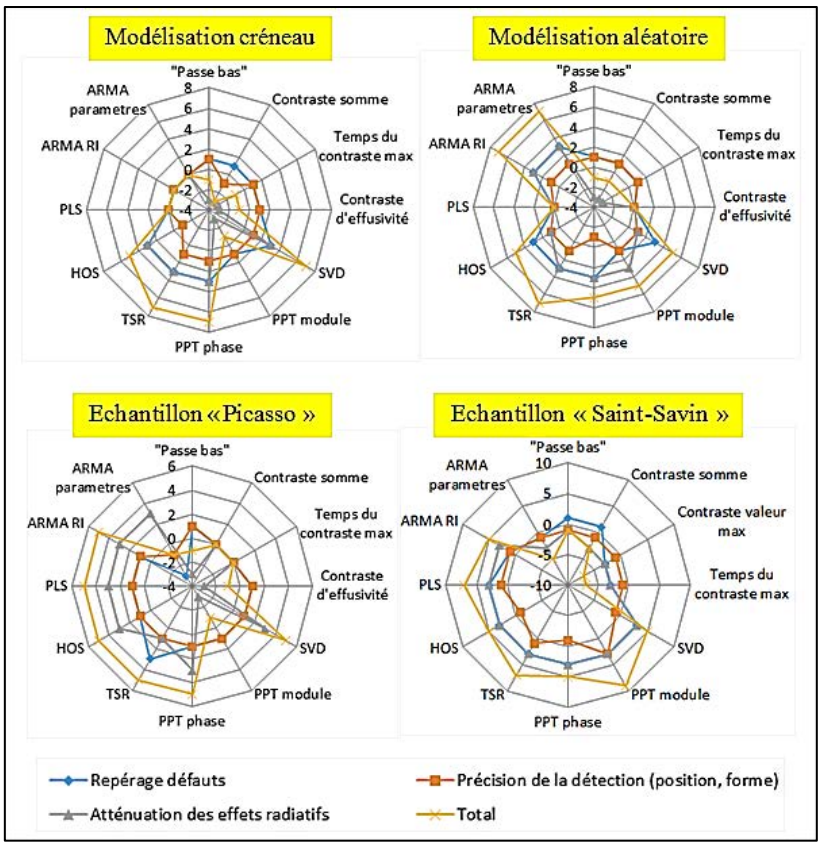


Figure 138 : Représentation synthétique des possibilités offertes par des post-traitements

10. Comparaison des bénéfices obtenus selon l'approche instrumentale et logicielle

Nous venons d'étudier les possibilités offertes par les différents types de post-traitement, nous avons comparé l'apport de l'aléatoire par rapport à une excitation créneau lorsqu'un post-traitement est appliqué. Intéressons-nous maintenant à la comparaison des deux approches – instrumentale et logicielle – que nous avons étudiées au cours de ce chapitre. Nous allons comparer quelques résultats déjà présentés et tenterons d'en déterminer les forces et les faiblesses. Nous avons déjà observé que l'utilisation de sources infrarouges de type résistance céramique permettait d'atténuer de façon significative les effets radiatifs préjudiciables à une bonne détection, nous avons aussi observé que plusieurs post-traitements réduisaient ces mêmes effets ; étudions cela de plus près sur les échantillons présentés auparavant.

a) Cas du Saint-Savin

Reprenons les résultats obtenus sur l'éprouvette du St-Savin puisqu'elle a été étudié avec les deux approches, voir en pages 81 et 106.

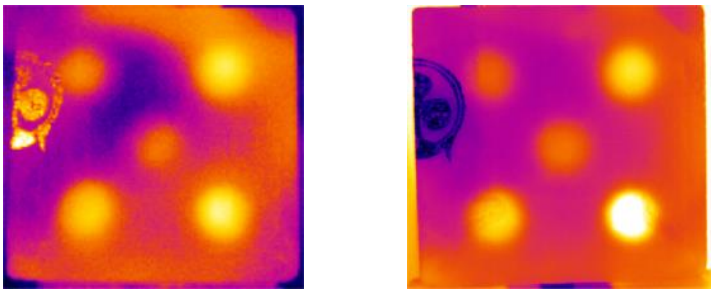
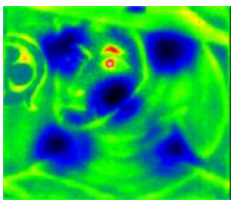
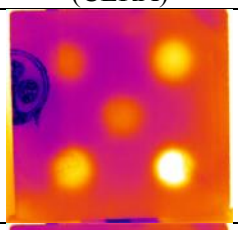
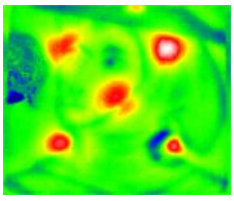
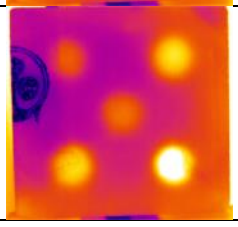
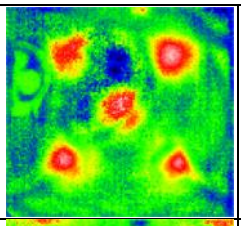
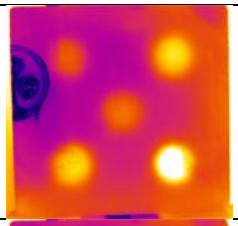
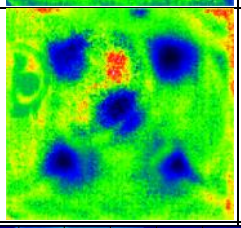
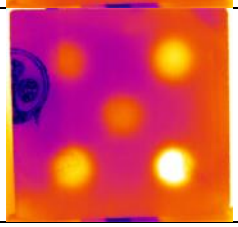
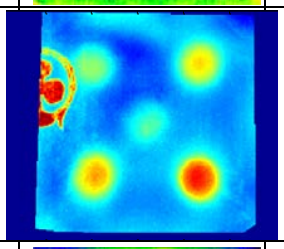
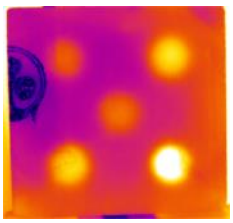
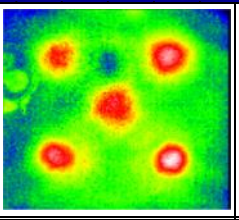
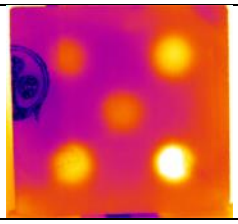
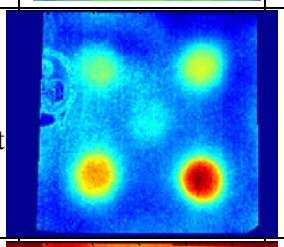
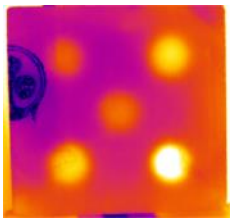
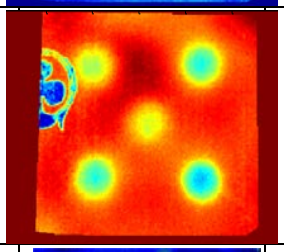
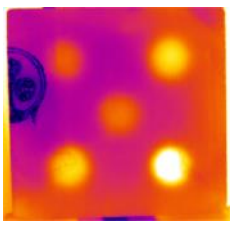
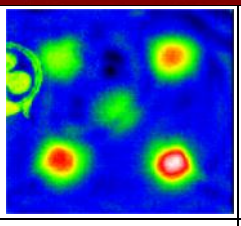
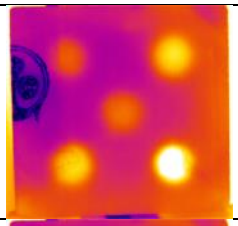
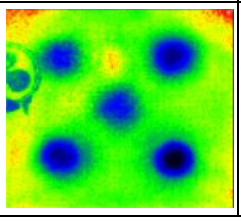
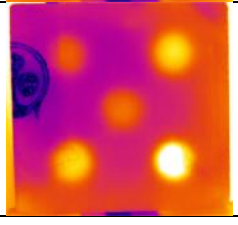


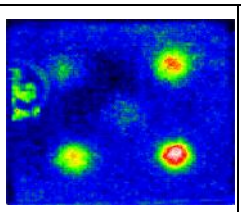
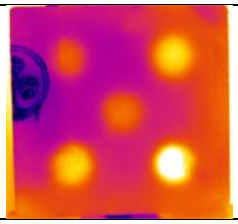
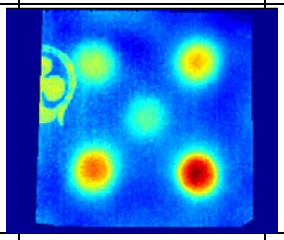
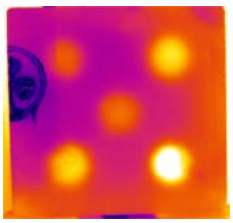
Figure 139 : Comparaison image brute halogène et céramique

Le tableau suivant reprend les résultats. On rappelle que l'échantillon étudié à l'aide des post-traitements (PT) a été soumis à une excitation de créneau au moyen de deux sources halogènes d'une puissance de 500 W. On reprendra le système d'évaluation décrit en page 97 afin d'estimer l'apport de l'une ou l'autre approche.

Tableau 30 : Comparaison approche instrumentale et logicielle

	Résultats de post-traitement (PT) avec excitation halogène	Meilleure image obtenue avec des sources céramiques (CERA)	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Score
Skewness			PT : 2 CERA :2	PT : 1 CERA :2	PT : 3 CERA :4
SVD refroidissement (EOF2)			PT : 2 CERA :2	PT : 1 CERA :2	PT : 3 CERA :4

PPT (analyse en phase)			PT : 2 CERA :2	PT : 1 CERA :2	PT : 3 CERA :4
PPT (analyse en phase)			PT : 2 CERA :2	PT : 1 CERA :2	PT : 3 CERA :4
Yloadings PLSRT 1st component			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
TSR ordre 3 coefficient 2			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
Beta PLSRT 4th component			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
Beta PLSRT 3rd component			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
TSR ordre 2 coefficient 1			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
TSR ordre 3 coefficient 3			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4

ARMA 8 8			PT : 1 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 3 CERA :4
Yloadings PLSRT 3rd component			PT : 2 CERA :2	PT : 2 CERA :2	PT : 4 CERA :4
		Score	PT : 23 CERA : 24	PT : 20 CERA : 24	PT : 43 CERA : 48

10.1. Conclusion

On observe que l'approche instrumentale à base de lampes céramiques est légèrement supérieure à l'approche logicielle reposant sur l'utilisation de post-traitements. On note toutefois que certains post-traitements parviennent à rivaliser avec les sources céramiques, c'est le cas par exemple du PLS ou du TSR. Il convient donc de privilégier l'approche instrumentale à chaque fois que cela sera possible. La difficulté observée avec ces sources réside principalement dans la difficulté de les moduler correctement en raison de leur constante de temps élevée (plusieurs minutes) ; ce qui a pour effet de réduire considérablement le spectre de signaux d'excitation utilisable (créneau). Serait-il possible de combiner les avantages de ces sources pilotées avec des signaux pertinents et ceux des meilleurs post-traitements ? C'est à cette question que nous allons tenter de répondre. Pour cela nous avons mis au point un système de volets commandés permettant de moduler ces sources et d'exploiter les bénéfices conjugués des deux approches (voir ci-après).

11. Approche combinée : sources infrarouges et post-traitement

L'objectif de cette étude est de comparer les possibilités d'une approche combinée regroupant les avantages des sources infrarouges modulées et les post-traitements. Nous avons pour cela équipé nos sources céramiques d'un dispositif d'obturation à clapet – commandé et actionné par des électroaimants – permettant leur modulation (voir Figure 140). Ce dispositif constitue un perfectionnement qui permet d'enrichir notre palette de signaux utilisables, voir la description de ce travail en annexe 29.6 (Perfectionnement des sources infrarouges, page 353).

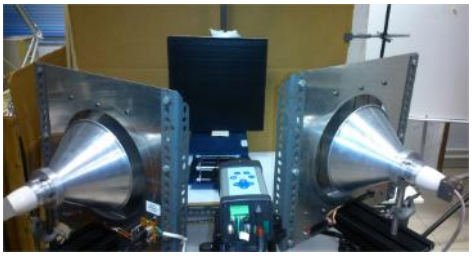


Figure 140 : Amélioration permettant la modulation des sources de type céramique

11.1. Protocole et dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comprend 2 sources céramiques modulées de 250 W chacune disposées symétriquement de part et d'autre de l'échantillon.
La détection se fera avec une caméra A 20 de marque *Flir*.
Les signaux utilisés sont les suivants : dans un premier temps nous appliquerons une excitation créneau de durée 1 min, une observation de 5 mn et un pas de temps de 0,5 s, puis ensuite une excitation aléatoire (PRBS 256) avec un pas de temps de 0,5 s. Les sources sont utilisées à pleine puissance.

Nous reprenons l'échantillon déjà étudié précédemment : l'échantillon « Saint-Savin »

Pour évaluer le gain de détection, on se référera comme nous l'avons déjà fait à la grille d'évaluation définie en 9.2.1.2 (page 97).

a) Étude du Saint-Savin

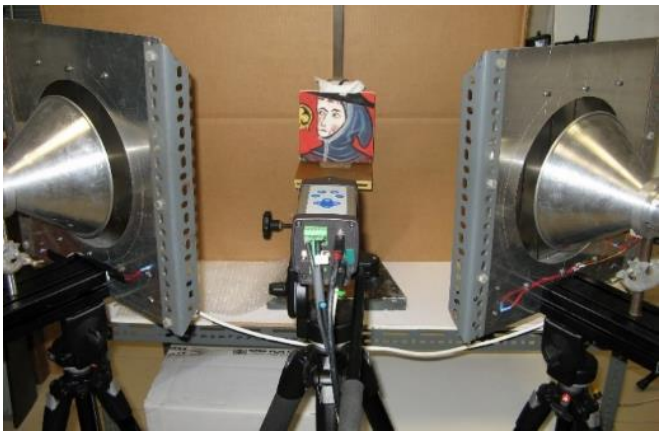
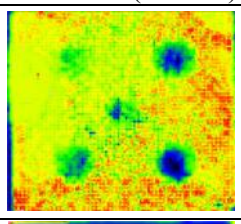
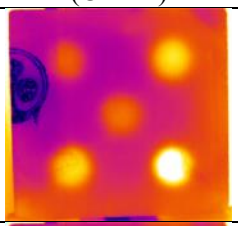
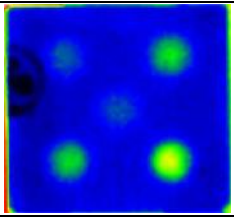
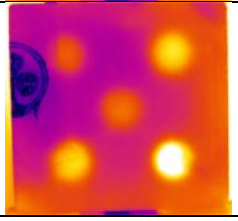
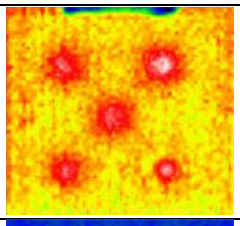
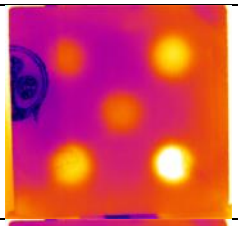
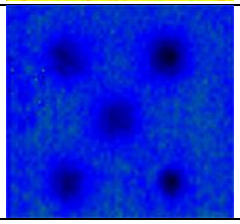
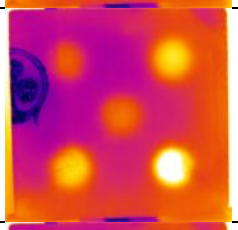
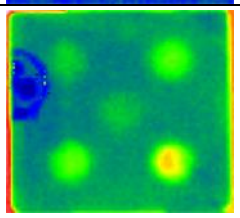
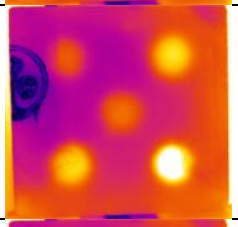
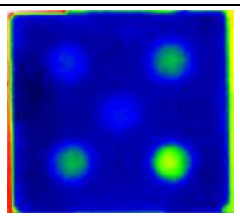
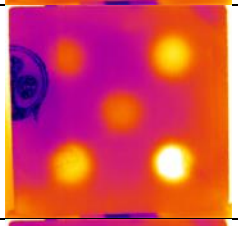
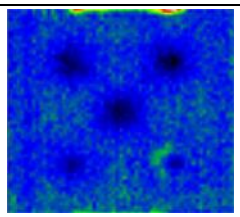
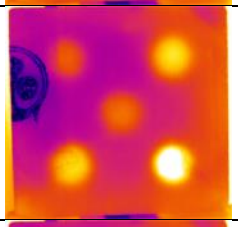
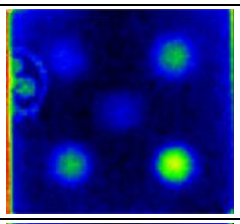
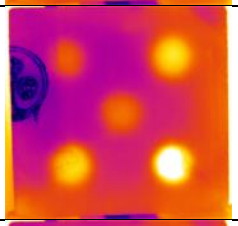
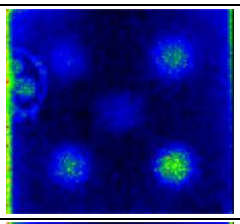
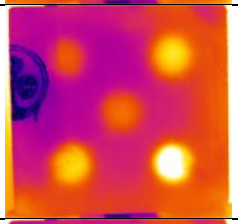
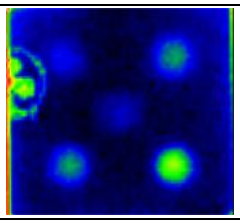
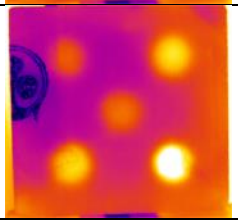


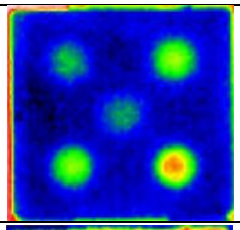
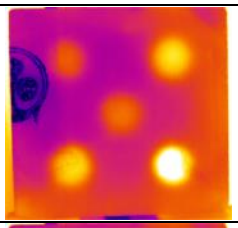
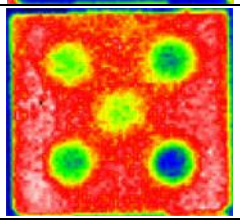
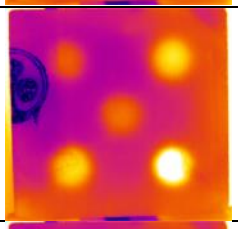
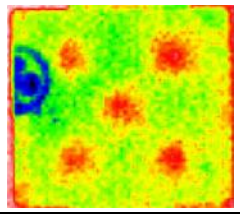
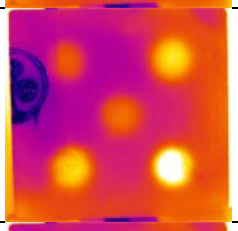
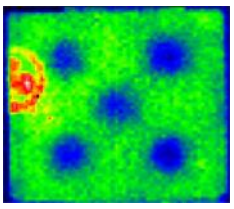
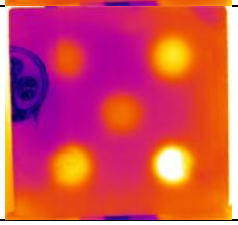
Figure 141 : Dispositif avec échantillon

Présentons d'abord dans le tableau suivant quelques résultats obtenus au moyen d'une excitation créneau :

Tableau 31 : Possibilités de l'approche combinée sur le Saint-Savin (excitation créneau)

	Approche combinée Céramique et post-traitement (COMB)	Meilleure image obtenue avec des sources céramiques (CERA)	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Conclusion
Skewness			COMB : 1 CERA : 2	COMB : 2 CERA :1	COMB : 3 CERA : 4
SVD refroidissement (EOF2)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3

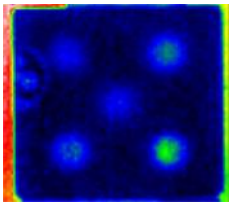
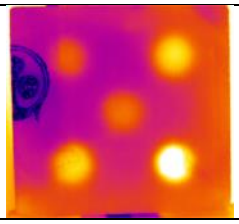
SVD refroidissement (EOF3)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
SVD échauffement et refroidissement (EOF3)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
SVD echauffement (EOF1)			COMB : 2 CERA :2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
SVD échauffement + refroidissement (EOF2)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
SVD refroidissement (EOF4)			COMB : 1 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
Moyenne (refroidissement)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
Mode (refroidissement)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
Moyenne (refroidissement)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3

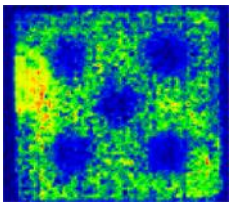
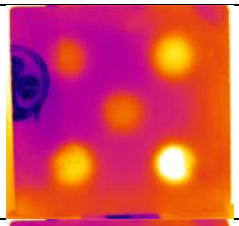
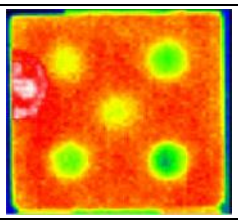
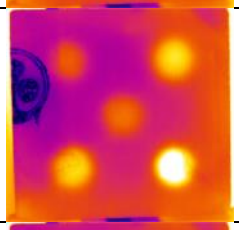
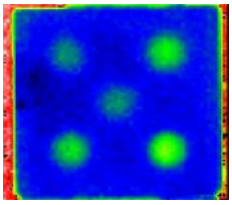
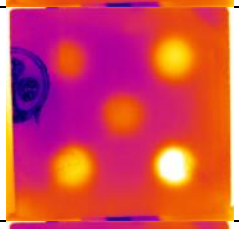
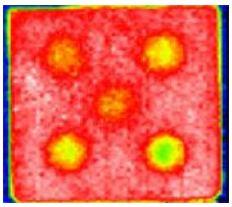
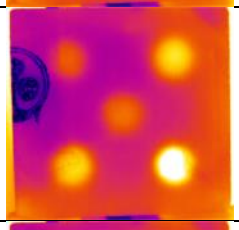
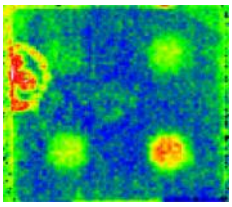
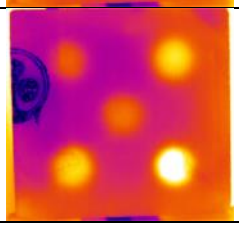
TSR ordre 1 coeff 0			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
TSR ordre 1 coeff 1			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
TSR ordre 2 coeff 1			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
TSR ordre 2 coeff 2			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
		TOTAL	COMB : 26 CERA : 28	COMB : 21 CERA : 14	COMB : 47 CERA : 42

L'approche combiné n'apporte pas d'amélioration sur le plan de la détection des défauts, mais elle apporte un gain évident sur le plan de l'atténuation des effets optiques : certains traitements atténuent totalement les variations d'absorptivité y compris au niveau du pigment métallique situé sur la gauche de l'échantillon.

Voyons à présent ce qu'apporte l'aléatoire (aléatoire de type PRBS 256) :

Tableau 32 : Possibilité de l'approche combinée sur le Saint-Savin (excitation aléatoire)

	Approche combinée Céramique + post-traitement (COMB)	Meilleure image obtenue avec des sources céramiques (CERA)	Détection des défauts	Atténuation des effets radiatifs	Conclusion
Fourier (module) 1/515			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA :1	COMB : 3 CERA : 3

Fourier (phase) 2/515			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
SVD (EOF2)			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
TSR ordre 1 coeff 0			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
TSR ordre 1 coeff 1			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 2 CERA : 1	COMB : 4 CERA : 3
TSR ordre 2 coeff 0			COMB : 2 CERA : 2	COMB : 1 CERA : 1	COMB : 3 CERA : 3
		TOTAL	COMB : 12 CERA : 12	COMB : 8 CERA : 6	COMB : 20 CERA : 18

Comme précédemment on ne note pas de gain en matière de détection, mais c'est sur l'atténuation des effets radiatifs que les améliorations sont observés. L'aléatoire n'apporte pas de bénéfices spécifiques par rapport à une excitation de type créneau.

11.2. Conclusion

Pour conclure nous avons soumis l'échantillon à deux types de régimes d'excitation – créneau et aléatoire – les deux thermogrammes ont ensuite été traités avec différents post-traitements, les tableaux ci-dessus recensent quelques résultats intéressants. Tous d'abord nous constatons que l'approche combinée donne de meilleurs résultats que l'approche utilisant simplement des sources céramiques – quel que soit le type de mise sous contrainte. On peut remarquer que le bénéfice de cette approche combinée réside surtout dans l'atténuation des effets optiques. Point remarquable, nous parvenons avec certains traitements (TSR et SVD) à atténuer toutes les contributions, y compris le reflet brillant représentant une fleur de lys sur la gauche, chose qui n'avait jamais été observé jusque-là. Ce résultat est important, nous pouvons donc considérer cette approche comme ayant un grand intérêt pour les développements futurs de SAMMTHIR.

12. Conclusion du chapitre II

Nous avons au cours de ce chapitre fait un tour d'horizon des possibilité de SAMMTHIR, nous avons décrit ses possibilités et ses insuffisances, ce qui nous a permis d'imaginer un certain nombre de possibilité permettant de dép sser la limitation de notre instrument. L'une d'entre elles est la sensibilité de SAMMTHIR aux effets radiatifs, c'est-à-dire aux variations de propriétés telles que l'absorptivité. Les œuvres d'art sont constitué s d'une couche picturale qui peut se manifester fortement lors de l'expé ience photothermique. Ce point constituait un obstacle d'autant plus dommageable que nous travaillons sur des peintures murales, mais avant ça il nous a fallu réfléchir à un autre proble e, celui du dépô d'énergie, et d'imaginer des configurations optimales en terme de disposition des sources afin d'avoir la meilleure ré artition de flux sur la zone é udié . Nous avons comparé des dispositions et nous avons été en mesure de les classer,

Notre travail a permis de dé ontrer qu'il é ait possible de contourner cette difficulté selon deux approches. La premi e piste a é é de comprendre que cette dép ndance est de nature spectrale et qu'il suffit de dé aler spectralement le domaine d'excitation de nos sources pour s'affranchir de cette difficulté. C'est ce que nous avons appelé l'approche instrumentale. Pour mettre en œuvre cette approche, nous avons pour cela analysé et mesuré les propriétés radiatives d'un grand nombre de pigments et nous avons aussi testé de nombreux types de sources. Ce travail nous a permis d'identifier un type de source particulièrement performant que sont les sources infrarouges à base de résistance thermique sous céramique. Nous avons par la suite démontré les possibilités de ces éclairages tout d'abord sur des simulations numé iques puis sur plusieurs échantillons.

L'autre piste consistait à imaginer qu'il était possible d'atté er cet effet parasite par l'emploi de post-traitements. Cette voie – logicielle – avait déjà été esquissée dans la thèse de **Jean-Charles Candoré** [151], mais cette question n'avait pas é é suffisamment approfondie. Là encore, nous avons dé ontré l'inté êt de cette mé hodologie. Nous avons é é aidés en cela par l'implémentation dans notre outil de plusieurs post-traitements performants tels que le TSR ou le SVD. Ces traitements ont permis d'obtenir des ré ultats bons, parfois excellents, mais lé è ement en deçà de ce qu'on pouvait observer avec notre approche instrumentale.

Nous avons ensuite imaginé la possibilité de combiner les deux approches. Nous avons pour cela adapté notre dispositif aux nouvelles sources en soignant certains points comme la modulation. Ce travail a permis d'obtenir une mise sous contrainte performante de nos é hantillons. Après traitement des thermogrammes, nous avons constaté des résultats surpassant les résultats précédemment obtenus. Il a é é possible d'éliminer totalement toutes les contributions superflues de la couche picturale, y compris les zones comportant des pigments à base d'oxyde mé allique – particulièrement réfléchissants – ce qui n'avait jamais é é possible jusque-là.

Actuellement notre travail porte sur la prise en compte de ce travail dans l'amé ioration de notre dispositif SAMMTHIR. Comme nous l'avons montré, nous mettons en place des collaborations avec différents partenaires, tels que la SATT Nord et des industriels afin de mettre au point un dé onstrateur qui donnera lieu à la mise au point d'un prototype industriel. C'est un travail passionnant qui permet d'imaginer de possibilités très intéressantes en matie e de contrôle non destructif par thermographie infrarouge stimulée.

Chapitre 3

13. Introduction du chapitre III

Le dispositif **SAMMTHIR** nous a permis de mettre en évidence des défauts situés dans des œuvres d'art par thermographie infrarouge stimulée, nous avons montré ses possibilités et les améliorations possibles en matière de détection. Nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux possibilités offertes par notre instrument de mesure en matière de caractérisation thermique. Nous allons pré enter des mé hodes permettant d'estimer les proprié é thermiques de maté iaux telles que la **diffusivité thermique** (notée a) ou **l'effusivité thermique** (notée b) et voir en quoi il est utile de connaitre ces grandeurs avec pré ision dans l'é ude des dé auts pouvant affecter les œuvres d'art du patrimoine. Au cours de ce travail de thèse, nous avons mis au point des méthodes nouvelles d'estimation de ces grandeurs par thermographie infrarouge stimulée, nous les décrirons une à une et nous nous interrogerons sur les limites de faisabilité de ces approches. Nous présenterons des résultats de simulation démontrant leur intérêt et nous validerons expérimentalement ces résultats, enfin nous intéresserons à des échantillons comportant des défauts que nous caractériserons dimensionnellement. Ce chapitre comportera deux grandes parties, l'une consacré à la détermination de la diffusivité thermique et l'autre consacrée à l'effusivité thermique, ces parties seront découpées en sections dé rivant une technique particulière, la structuration des sections se fera selon l'ordre suivant : après quelques rappels préalables, nous présenterons théoriquement le principe de la technique, nous

validerons ensuite l'approche par des ré ultats tirée d'une simulation théorique et enfin nous présenterons le dispositif et les résultats expérimentaux que nous commenterons. Ce travail vise principalement à démontrer la faisabilité de ces méthodes nouvelles de caracté isation, nous n'avons pas effectué une étude approfondie des aspects métrologiques qui dépasserait le cadre de cette thèse. Mais avant cela, présentons la caractérisation thermique et ses finalités.

14. Méthodes et finalités de la caractérisation thermique, problématique

La caracté isation thermique consiste à estimer les propriété thermophysiques d'un maté iau en observant sa réponse à une perturbation thermique (ou autre). Cette perturbation peut prendre la forme par exemple d'un flux de chaleur ou d'une tempé ature imposée sur ses parois. La sollicitation thermique du maté iau s'effectue gén ralement à l'aide de lampe (halogè n s, flash), mais il est possible d'imaginer d'autre type de mise sous contrainte comme l'induction ou l'excitation à l'aide d'un laser. L'observation s'effectue à l'aide d'une camé a thermique – notre choix s'est porté sur les caméras de marque FLIR , modèles A20 ou SC655. L'estimation des propriété se fait par identification à un modèle physique permettant de relier les grandeurs mesurées expérimentalement aux propriétés recherchées par inversion du modèle. Les approches expérimentales, les modèles thé riques et les mé hodes d'analyses sont nombreux. Sans entrer dans le détail de la mé rologie thermique, nous pouvons classer les approches selon différents critères (régime, type de perturbation, zone d'excitation, type de géo é rie, type d'analyse, etc.) :

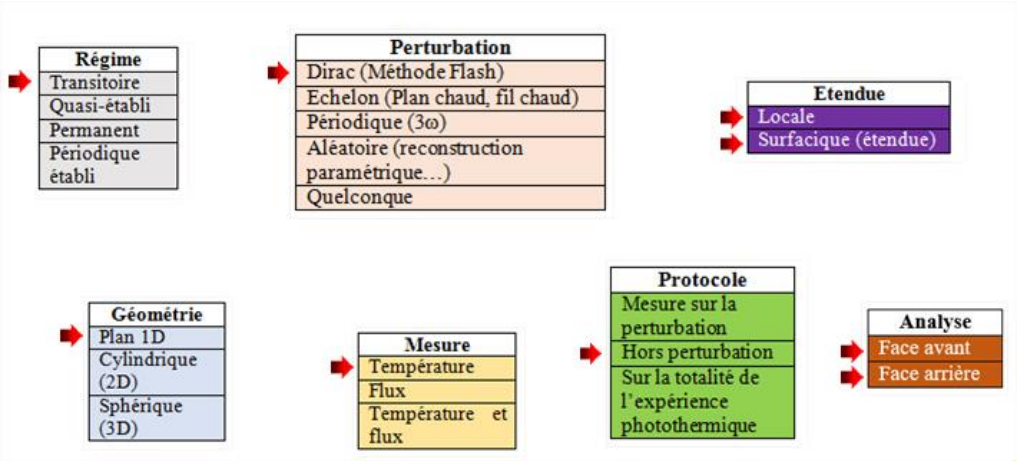


Figure 142 : Déclinaisons des méthodes thermiques

Les mé hodes que nous pré enterons reposent toutes sur l'analyse de la ré nse en tempé ature d'un échantillon plan soumis à un transitoire thermique localisé ou surfacique, l'analyse s'effectuera en phase de relaxation de l'é hantillon.

14.1. Objectif de la caractérisation thermique

Le chapitre II de ce travail de thèse a pré enté l'é at de notre recherche en matière de mise en évidence de défauts structurels pouvant affecter des œuvres d'art tels que les délaminages par exemple. Nous avons fourni de grands efforts dans l'amé ioration du repérage pré oce de ces altérations, le chapitre IV sera consacré lui aussi à la mise en évidence de défaut, de nature chimique cette fois-ci. Notre dé arche aurait pu s'arrê er là, à un stade purement descriptif, mais les attentes vont au-delà d une simple détection amé ioré des défauts. La conservation du patrimoine explore tous les domaines des connaissances afin de cartographier, monitorer et restaurer les œuvres du patrimoine. Cette démarche active, proactive, nécessite des capacités en matière de caractérisation, car elle répond à un besoin du monde de la conservation. Cette né essité s'inscrit bien entendu dans une démarche contingentée par plusieurs contraintes, celle du contrôle non destructif et celle du terrain.

Être capable de repé er et ensuite de caracté iser sans abimer, c'est-à-dire mesurer par exemple la profondeur d'un défaut, suivre sa progression dans le temps, identifier un matériau ou encore repérer une technique picturale, in situ, de façon simple et rapide, telle est l'objectif que nous nous sommes fixé dans ce travail et c'est ce que nous allons tenter de pré enter.

14.2. Problématique

Les techniques de caractérisation thermique sont nombreuses (voir Figure 143). La plupart né essitent un pré è ement de matiè e ou l'insertion d'une sonde ou d'un é ément chauffant dans l'échantillon à tudier (technique du fil chaud ou du plan chaud), certaines méthodes ne permettent pas d'effectuer une cartographie de l'é hantillon : problè e d'échelle (analyse ponctuelle) ou nécessite un contact physique avec l'objet d'é ude ce qui est toujours proble atique lorsqu'il s'agit d'œuvre d'art…

L'autre type de contrainte à laquelle nous sommes confrontés est celle du terrain. Les méthodes d'analyse les plus connues sont des mé hodes de laboratoire, non pertinentes sur le terrain. Prenons l'exemple de la *méthode de Parker* qui permet d'estimer la diffusivité thermique – que nous allons décrire plus avant – cette méthode né essite de travailler sur des maté iaux minces, d'é p isseurs connues, or nous pouvons être amenés à étudier des fresques et des peintures murales posées sur des murs d'é lise pouvant faire des dizaines de centimè res d'é aisseur, parfois situé s en hauteur (échafaudages) et en environnement difficile (poussière, humidité, etc.). Une telle mé hode n'est pas applicable à l'é idence dans un tel contexte. Ces contraintes nous ont poussés à imaginer des mé hodes d'analyse robuste, facilement déployables in-situ. C'est avec ces contraintes techniques et pratiques, à l'esprit, que nous avons dé eloppé les mé hodes de caractérisation que vont ê re présentées dans ce chapitre de thèse.

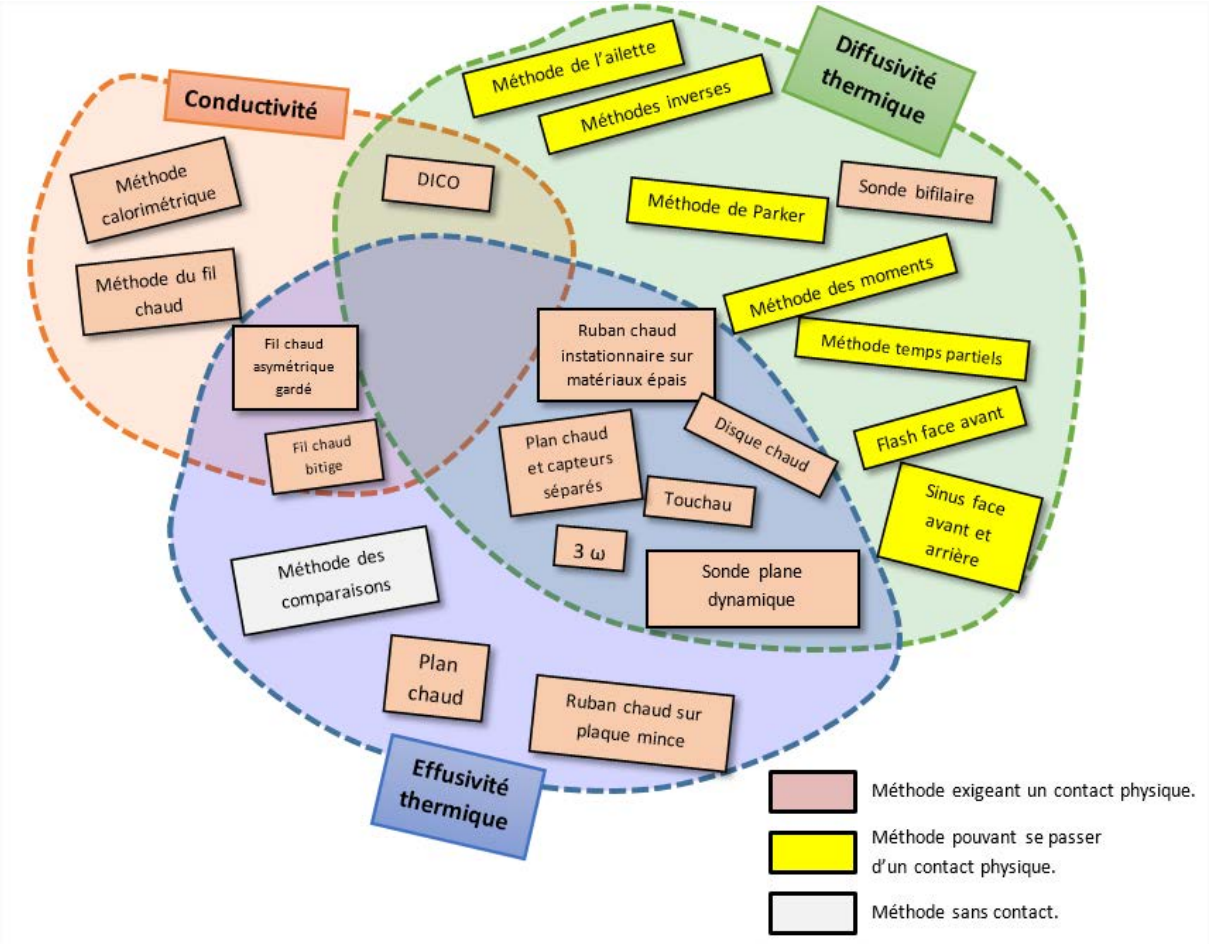


Figure 143 : Champ d'action des différentes méthodes de caractérisation thermique

15. Détermination de la diffusivité thermique

15.1. Rappel sur les méthodes de caractérisation thermique classiquement utilisées

15.1.1. La Méthode de Parker et ses dérivés

15.1.1.1. La méthode de Parker

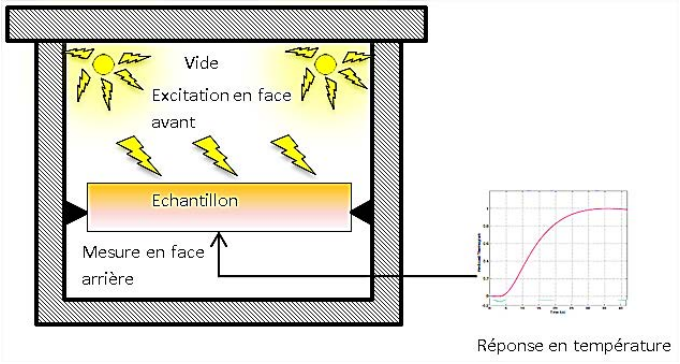


Figure 144 : Principe de la Méthode flash

La mé hode de Parker est l'une des mé hodes de caracté isation thermique les plus anciennes et les plus connues, elle a été présentée en 1961 par **Parker W.J. et al** dans l'article *Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity* [63], le principe de cette méthode est relativement simple, il consiste à soumettre un échantillon plan correctement usiné (épaisseur constante) – placé dans une enceinte à vide – à une impulsion flash en face avant et à mesurer l'é é ation de tempé ature en face arrière à l'aide d'un dispositif de mesure constitué d'un thermocouple par exemple (voir Figure ci-dessus).

En considérant le cas où le flux est uniforme en x et y et les pertes nulles (condition adiabatique) nous obtenons par la méthode de la séparation des variables ou les fonctions de Green (voir exemple en page 328) l'expression de la tempé ature en fonction de la profondeur z et du temps :

$$T(z,t) = \frac{Q}{\rho C_p e}\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}\cos\left(\frac{n\pi}{e}z\right)\exp\left(-\frac{n^2\pi^2 at}{e^2}\right)\right] \qquad (3.1)$$

Avec

a : diffusivité thermique (m²/s)
e : épaisseur (m)
Q : énergie d'excitation (J/m²)
ρ : masse volumique (kg/m^3)
C_p : capacité thermique à pression constante (J/kg.K)
t : temps (s)
T : température (K)

On peut remarquer que le terme en facteur $\frac{Q}{\rho C_p e}$ représente la température limite lorsque $t \to \infty$

En face arrie e (z = e) nous obtenons l'expression suivante :

$$\frac{T(t)}{T_{\lim}} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \exp\left(-n^2\pi^2 Fo\right) \qquad (3.2)$$

Avec $Fo = \frac{at}{e^2}$, nombre de Fourier (voir définition page 27) .

Le mode e théo ique dé eloppé p r Parker permet d'estimer la diffusivité thermique a. À partir du calcul de la série de l'expression (3.2), on obtient la valeur du nombre de Fourier à la demie-montée ce qui permet d'écrire :

$$a = 0{,}139\frac{e^2}{t_{1/2}} \tag{3.3}$$

Avec e l'épaisseur de l'echantillon en [m], $t_{1/2}$ le temps de demi-montée en [s] et a la diffusvité thermique en [m²/s]

Ce résultat repose sur le constat que le temps de demi-montée de la courbe de température en face arrière (courbe 1 de la Figure 145) correspond à un nombre de Fourier égal à 0,139, à partir de là on retrouve aisément l'expression (3.3).

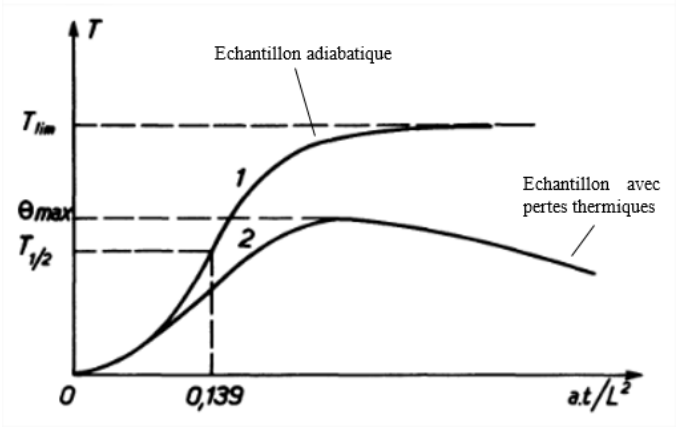


Figure 145 : Réponses en température face arrière (Tiré de Balagéas)

131

Il est intéressant d'exploiter le temps de demi-monté , car c'est en $t_{1/2}$ que l'é olution de la réponse en température T (t) par rapport à la diffusivité thermique présente le maximum de sensibilité. Cette méthode est couramment employée en laboratoire, les diffusivimetre flash qui permet de mettre en œuvre cette mé hode, fonctionnent selon ce principe.

NB : La détermination de a est aussi possible grâce à une variante de la méthode de Parker. L'exploitation de la rép nse en tempé ature en face avant de l'é hantillon (voir explications page 330) permet de repérer temporellement la transition temps court/temps long et d'estimer la diffusivité thermique.

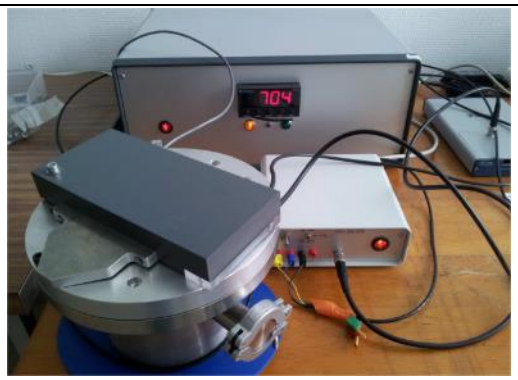


Figure 146 : Diffusivimetre flash

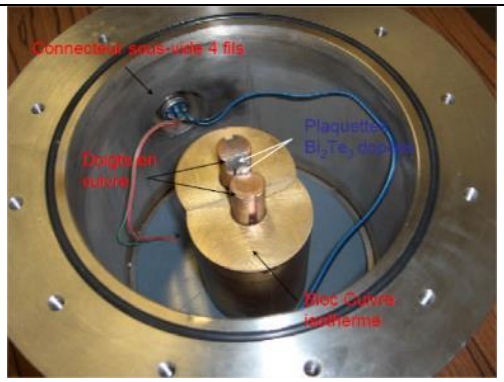


Figure 147 : Enceinte de mesure

Problème : le modèle de Parker est un modèle qui ne prend pas en compte les pertes thermiques ce qui a pour effet de surestimer la valeur de la diffusivité mesurée. Des modèles plus évolués ont corrigé cette faiblesse.

15.1.1.2. La méthode des temps partiels

La méthode des temps partiels prend en compte les pertes thermiques (cas de la courbe 2 de la Figure 145). On estime la diffusivité en mesurant 3 instants (à $t_{1/3}$, $t_{2/3}$, $t_{5/5}$) correspondant à 3 stades de la monté en tempé ature (1/3 de la tempé ature d'é hauffement maximale, 2/3, etc.), voir Figure 148. À partir de ces valeurs il est possible d'obtenir une valeur moyenne de la diffusivité thermique du matériau à partir des expressions suivantes :

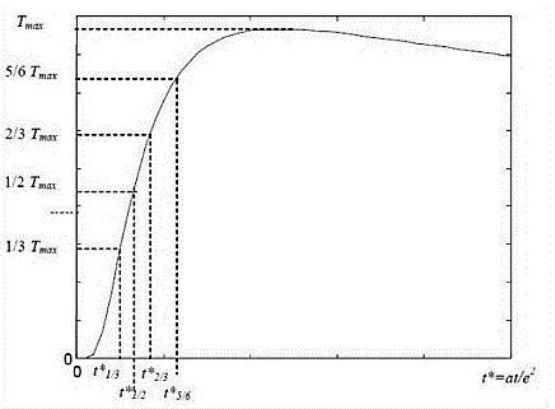


Figure 148 : Temps partiels (Tiré de la thèse de Vigen Ayvazyan 2012)

$$\begin{cases} a = \dfrac{e^2}{t_{5/6}}\left[0.818 - 1.708\left(\dfrac{t_{\frac{1}{3}}}{t_{\frac{5}{6}}}\right) + 0.885\left(\dfrac{t_{\frac{1}{3}}}{t_{\frac{5}{6}}}\right)^2\right] \\ a = \dfrac{e^2}{t_{5/6}}\left[0.954 - 1.581\left(\dfrac{t_{\frac{1}{2}}}{t_{\frac{5}{6}}}\right) + 0.558\left(\dfrac{t_{\frac{1}{2}}}{t_{\frac{5}{6}}}\right)^2\right] \\ a = \dfrac{e^2}{t_{5/6}}\left[1.131 - 1.222\left(\dfrac{t_{\frac{2}{3}}}{t_{\frac{5}{6}}}\right)\right] \end{cases}$$

15.1.1.3. Méthode des moments partiels

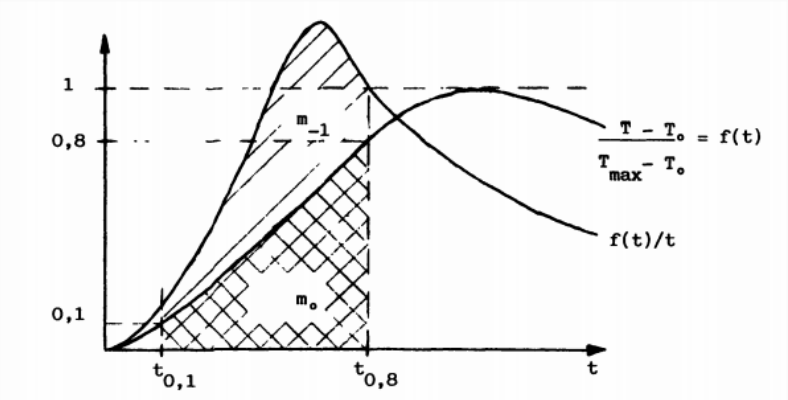


Figure 149 : D'après Degiovanni « Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode " flash " », 1986.

Cette méthode consiste à déterminer la diffusivité à partir des moments d'ordre 0 et -1. On dé init les moments d'ordre 0 et -1 ainsi :

$$M_0 = \int_{0.1}^{0.8} \frac{T(t)}{T_{lim}} dt \tag{3.4}$$

$$M_{-1} = \int_{0.1}^{0.8} \frac{1}{t} \frac{T(t)}{T_{lim}} dt \tag{3.5}$$

On obtient la diffusivité thermique a à partir de la relation suivante :

$$a = e^2 \frac{F(M_{-1})}{M_0} \tag{3.6}$$

Avec

$$F(M_{-1}) = 0.08548 - 0.314(0.5486 - M_{-1}) + 0.500(.5486 - M_{-1})^{2.63} \quad pour\, M_{-1} > 0.27$$

$$F(M_{-1}) = -0.08519 - 0.305(M_{-1}) \quad pour\, M_{-1} > 0.44$$

Cette méthode permet une très bonne réjection du bruit, elle revient à prendre en compte un grand nombre de points puisqu'on inté re, la faiblesse de cette mé hode comme celle des moments partiels et celle de Parker, est de faire reposer totalement la pré ision de l'estimation des valeurs interméd aires sur un seul et unique point : la valeur de la température maximale T_{max}. L'incertitude sur cette valeur affectera de façon automatique les incertitudes sur les temps partiels. Cette faiblesse a encouragé l'adoption d'autres mé hodes telle que l'estimation de paramè res.

15.1.1.4. Méthodes inverses, estimation de paramètres

Cette approche consiste à estimer la valeur de a par un ajustement théorie (modèle)/expérience à l'aide d'une méthode de moindres carrés associée à un algorithme comme celui de *Levenberg-Marquard*[14]. Le principe repose sur une méthode à base de moindres carrés minimisant les écarts quadratiques en un modè e et des valeurs expérimentales par variation d'un ou plusieurs paramètres, le lecteur peut se reporter aux publications suivantes : [81]–[83]. La précision de cette méthode dépend grandement du modèle utilisé, des conditions expérimentales et de la précision dans la connaissance des grandeurs servant à alimenter le modèle (Épaisseur échantillon, dép t d'én rgie, coefficient d'é hange h, etc..).

15.1.2. Limites des méthodes de caractérisation classiques

Ces méthodes en dépits de leurs qualités et de leur intérêt ne peuvent répondre aux besoins de notre thé atique de travail (l'étude des œuvres d'art par CND[15]) comme expliqué dans la partie introductive. Les raisons sont les suivantes :

- ◊ Ces mét odes né essitent l'usinage d'un é hantillon afin de le disposer dans une enceinte de mesure, ce sont donc des méthodes destructrices.
- ◊ Ces méthodes de permettent pas d'ét dier des échantillons é ais comme des peintures murales par exemple.
- ◊ Ces méthodes ne sont pas adaptées au terrain, ce sont comme des méthodes de laboratoire.

Ces limitations nous ont poussé à ettre au point des mé hodes d'analyse adaptées. Ces méthodes doivent répondre à un certain nombre de critères simples :

[14] L'algorithme de **Levenberg-Marquardt**, ou algorithme LM, permet d'obtenir une solution numérique au problème de minimisation d'une fonction, souvent non linéaire et dépendant de plusieurs variables. L'algorithme interpole l'algorithme de Gauss-Newton et l'algorithme du gradient. Plus stable que celui de Gauss-Newton, il trouve une solution même s'il est démarré très loin d'un minimum. Son application principale est la régression au travers de la méthode des moindres carrés.(Source **Wikipédia**).

[15] **CND** : Acronyme de *Contrôle Non Destructif*.

- ◊ Nous travaillons sur des œuvres d'art il est donc indispensable d'utiliser des mé hodes entrant dans le cadre du CND, respectueuses et non destructrices, ce sont dons des mé hodes d'analyse à distance (sans contacts avec l'œuvre d'art).
- ◊ Ces méthodes de caractérisation doivent permettre de caractériser des matériaux épais comme des murs par exemple.
- ◊ Les mesures en face arriè e ne prése tant d'inté êt que pour des échantillons minces et les contraintes de terrain imposent que l'analyse se fasse en face avant.
- ◊ L'analyse doit être rapide.

Dans la thèse de **Jean-Charles Candoré** [151] a été présentée une méthode mise au point en collaboration avec la LEMTA de Nancy permettant de déterminer les diffusivités thermiques longitudinales a_x, a_y par thermographie infrarouge stimulée. Ce travail a montré qu'il é ait possible de caractériser in situ le matériau constituant une peinture murale en respectant les conditions que nous venons de citer. Cette technique parfaitement adaptée aux contraintes de terrain nécessite une source d'excitation constitué d'un laser associé au dispositif **SAMMTHIR**. C'est une mé hode flash, locale, de mesure de la diffusivité longitudinale exploitant une transformée de Fourier spatiale du thermogramme, appelons-la, *Méthode de Fourier*. Par souci de clarté nous ne décrirons pas le principe théorique de la méthode, nous invitons pour cela le lecteur à se reporter aux pages 87 à 90 de la thèse de **Jean-Charles Candoré** – voir aussi **Candoré et al** [3] – retenons simplement qu'aprè calculs on démontre que :

$$Ln\left(\frac{\theta(\alpha_n,\beta_m,z=0,t)}{\theta(0,0,z=0,t)}\right)=Ln\left(\frac{F(\alpha_n,\beta_m)}{F(0,0)}\right)-\left(a_x\alpha_n^2+a_y\beta_m^2\right).t \qquad (3.7)$$

Le premier membre de cette équation représente le logarithme du rapport des transformées de Fourier des températures aux ordres n et 0, le second membre représente une droite dépendant du temps avec pour ordonné à 'origine le logarithme du rapport des coefficients de Fourier d'ordre n par rapport à l'ordre 0 et de pente $-\left(a_x\alpha_n^2+a_y\beta_m^2\right)$. Cette constante dépend des diffusivités longitudinales a_x, a_y, si le matériau est isotrope nous avons bien entendu $a_x = a_y$. Ainsi il est possible de déterminer la diffusivité thermique du maté iau en mesurant la pente d'une simple droite (voir Figure 150).

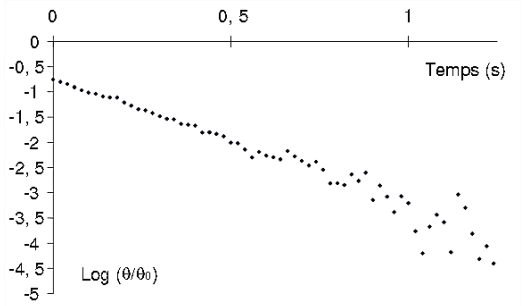


Figure 150 : Évolution par rapport au temps du rapport des coefficients de Fourier calculés (ici l'ordre 2)

Les diffusivités longitudinales a_x et a_y peuvent être déduites simplement de la pente de la courbe à partir de l'expression suivante :

$$a=\frac{\text{Pente de la courbe . Dimension de la zone analysée}^2}{\text{Ordre de Fourier}^2.\pi^2} \qquad (3.8)$$

Ce procédé a permis de caracté iser efficacement des œuvres sur site, un outil a é é dé eloppé à cet effet sous *Labview* permettant de faire directement les calculs à partir d'un thermogramme (voir annexe a), page 368 pour une description plus précise).

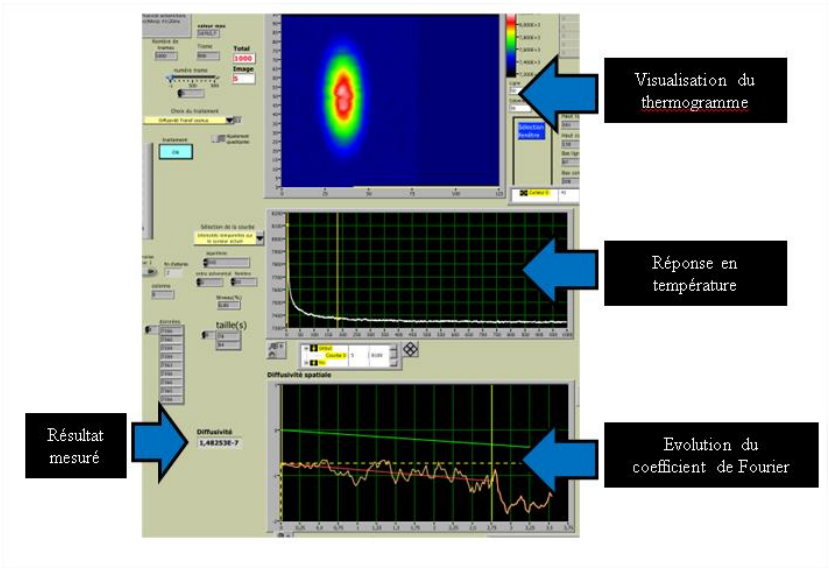


Figure 151 : Interface de l'outil d'analyse

Afin d'étendre les possibilité de **SAMMTHIR** en matière de caractérisation et ne pas être dép ndant d'une seule mé hode d'analyse, nous avons mis au point deux autres mé hodes alternatives de mesure de a inspirée des travaux décris dans la publication de **F. Cernuschi et al** [162] . Ces méthodes reposent toutes sur le même modèle théorique et exploitent toutes trois les caractéristiques au cours du temps du profil spatial d'une perturbation thermique appliqué localement. Nous allons commencer par décrire le modèle théorique avant de nous intéresser tour à tour à chacune de ces méthodes.

135

15.2. Connaissance de la diffusivité thermique et finalités

$$a.\Delta T(r,z,t) = \frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} \tag{3.9}$$

L'équation de la chaleur fait apparaitre le terme de diffusivité thermique a. Cette grandeur intensive[16] est intiment liée au processus de diffusion de la chaleur dans les matériaux. Tous les modèles théoriques décrivant un phénomène faisant appel à la conduction thermique en régime instationnaire font apparaitre cette grandeur thermophysique. La diffusivité thermique que nous notons "a", fait intervenir deux notions antagonistes : une notion relevant de la conduction de la chaleur dans le matériau représentée par λ et une notion de stockage représentée par le groupement $\rho.C_p$ et dont elle est inversement proportionnelle :

$$a = \frac{\lambda}{\rho.C_p} \tag{3.10}$$

Nous voyons bien en observant cette relation que la diffusion de la chaleur est d'autant meilleure que le maté iau conduit bien la chaleur et qu'il la stocke d'autant moins, c'est donc une notion centrale qui gouverne toute la conduction instationnaire, il convient donc de l'é aluer avec pré ision afin d'alimenter les modè es.

Plus concrètement notre objectif est d'estimer la profondeur des dé auts affectant les œuvres d'art, plusieurs approches permettent d'estimer cette profondeur comme nous le verrons par la suite. Il est

[16] **Grandeur intensive** : En physique et en chimie, une variable intensive est une quantité qui ne dépend pas de la quantité de matière. C'est le contraire d'une grandeur extensive. Exemple de grandeurs intensives : la masse volumique, la vitesse ou la pression.

par exemple possible d'estimer grossiè ement la profondeur p d'un dé aut à l'aide de l'expression suivante :

$$p \simeq \sqrt{a.\tau} \tag{3.11}$$

Comme on peut le remarquer cette profondeur dép nd du temps de migration τ né essaire à la chaleur pour atteindre le défaut et des propriétés du matériau, représentées par la diffusivité thermique a. Nous donnerons un exemple de cette application dans ce chapitre. On comprend aisément l'importance de connaitre avec pré ision cette grandeur, cette né essité se justifie d'autant plus que les matériaux avec lesquels nous travaillons, tels que la pierre, le plâtre, etc., voient leurs propriétés thermophysiques évoluer considérablement au cours du temps au grès des évolutions saisonnières des taux d'humidité et de tempé ature ce qui rend trè alé toires l'utilisation de grandeurs de ré é ence tiré s de la litté ature. Autre application de la connaissance d'un paramè re thermophysique comme la diffusivité thermique est de pouvoir repérer la présence de pollutions chimiques dans un matériau par simple comparaison de propriétés entre un matériau sain – de référence – et un matériau pollué, cette application sera détaillée dans le chapitre IV consacré à la détection des infiltrations de sels hygroscopiques dans la pierre. Ainsi nous voyons bien la né essité d'une bonne estimation des grandeurs thermophysiques est leur importance dans la caracté isation des dé auts qu'ils soient de nature structurelle ou chimique.

15.3. Méthodes alternatives, modèle théorique

Le modèle a été décrit par **F. Cernuschi et al** dans la publication [162]. Soit une plaque d'é p isseur L soumise localement à une perturbation thermique δ (t) de Dirac temporellement et gaussienne spatialement. Cette excitation est appliquée à t = 0 s, au centre de la plaque – voir la figure ci-dessous. Soit R le rayon de la tache de l'excitation à l'instant initial (le rayon est dé ini comme la distance à l'origine, correspondant à u e réduction d'un facteur $1 / e^2$ de l'intensité du faisceau).

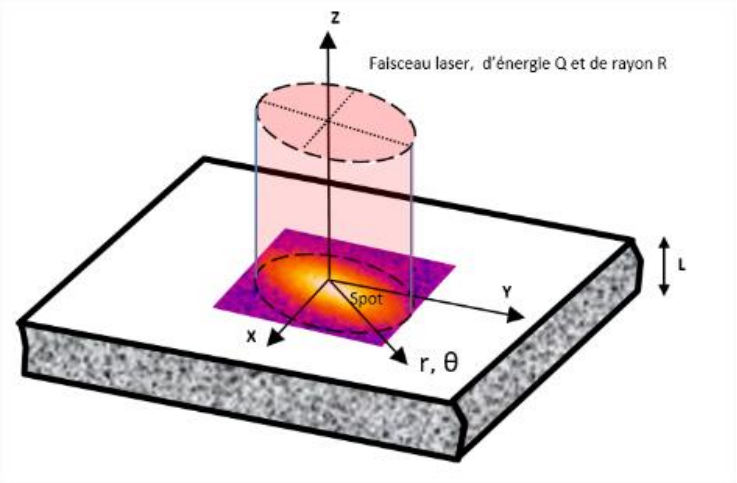


Figure 152 : Excitation par une diode laser

Soient λ et a respectivement la conductivité thermique et la diffusivité thermique du matériau – voir définitions chapitre1.

L'échantillon est initialement à tempé ature ambiante T_{ext}.

Le modèle néglige les pertes convecto-radiatives entre l'échantillon et son environnement.

La traduction mathématique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant :

Équation de la chaleur : $$\Delta T\left(r,z,t\right) - \frac{1}{a}\frac{\partial T\left(r,z,t\right)}{\partial t} = 0 \tag{3.12}$$

Les conditions aux limites appliquées à notre échantillon d'étude sont les suivantes :

$$\begin{cases} \text{En z = 0} & -\lambda.\dfrac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = \dfrac{2Q}{\pi R^2}.\exp\left(-\dfrac{2r^2}{R^2}\right).\delta(t) \\ \text{En z = L} & -\lambda.\dfrac{\partial T(r,z,t)}{\partial z} = 0 \\ \text{A t = 0} & T = T_{ext} \end{cases}$$

Avec Q : énergie du faisceau en [J]

Pour résoudre ce syste e d'équ tions diffé entielles du 2nd ordre on procède à deux transformations intégrales, une transformation de Hankel sur r, équation (3.13) et une transformée de Fourier sur le temps, équation (3.14).

$$H_0\left[\frac{1}{r}.\frac{\partial}{\partial r}.\left(r\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial r}\right)\right] = -\sigma^2\int_0^{\infty} r.J_0(\sigma.r).T(r,z,t).dr \tag{3.13}$$

$$F\left(\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t}\right) = \frac{i.\omega}{\sqrt{2.\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty} T(r,z,t).\mathrm{e}^{-i\omega t}.dt \tag{3.14}$$

Ces transformations appliqué s à 'éq ation de la chaleur donnent :

$$\frac{\partial^2 T(\sigma,z,\omega)}{\partial z^2} - \left(\sigma^2 + \frac{i.\omega}{a}\right).T(\sigma,z,\omega) = 0 \tag{3.15}$$

Avec σ, ω variables dans les espaces de Hankel et Fourier.

En posant $\sigma^2 + \frac{i.\omega}{a} = \varphi^2$ nous obtenons la solution générale de (3.15) :

$$T(\sigma,z,\omega) = C_1.\exp(\varphi.z) + C_2.\exp(-\varphi.z) \tag{3.16}$$

En appliquant les conditions aux limites à l'équation, (3.16) on détermine les constantes C_1 et C_2 :

$$C_1 = \frac{Q}{2\pi}\frac{e^{\frac{-\sigma^2R^2}{8}}}{\lambda.\varphi.\left(e^{2.\varphi.L}-1\right)} \tag{3.17}$$

$$C_2 = e^{2.\varphi.L}.C_1 \tag{3.18}$$

En remplaçant C_1 et C_2 dans (3.16) on obtient l'é olution selon l'axe z de la tempé ature dans l'espace transformé :

$$T(\sigma,z,\omega) = \frac{Q}{2\pi\lambda}\frac{e^{\frac{-\sigma^2R^2}{8}}}{\varphi}\frac{Ch[(z-L).\varphi]}{Sh(L.\varphi)} \tag{3.19}$$

En inversant les transformations inté rales et après simplification, nous obtenons l'expression de la réponse en température en surface (z=0) :

$$T(r,0,t)=\frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2+8at}.\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right).\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty}\exp\left\{-\frac{[(n-1)L]^2}{at}\right\} \qquad (3.20)$$

Le terme b repré ente l'effusivité thermique du maté iau. Comme nous pouvons le voir cette expression comporte une série dépendant du temps, de l'é aisseur du maté iau L et de ses proprié és thermophysiques a (diffusivité thermique). Nous avons étudié cette série pour les matériaux habituellement rencontrés – comme le plâtre – ayant une diffusivité avoisinant les 4.10^{-7} m²/s et une épaisseur supérieure à 1 cm, avec un nombre de termes n = ± 10 000. En traçant le résultat nous avons constaté que cette série tendait vers 1 pour des temps inférieurs à 60 s or nos observations sont toujours inférieures à 60 s, nous pouvons donc considé er que cette sé ie n'intervient pas avec les conditions expérimentales habituellement retenues dans nos travaux de caractérisation thermique, nous pouvons donc négliger ce terme.

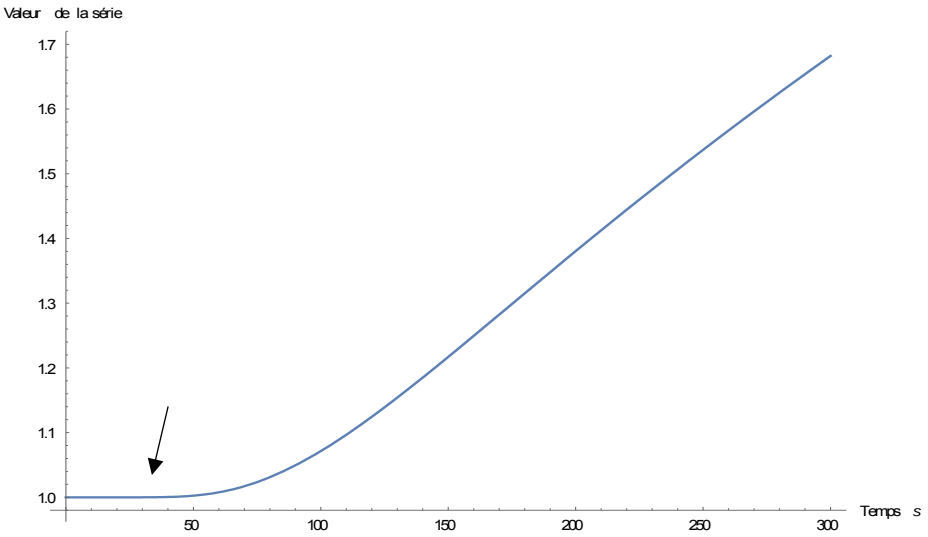


Figure 153 : Évolution de la série par rapport au temps

Nous obtenons finalement l'expression du champ de tempé ature simplifié :

$$T(r,0,t)\approx\frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2+8at}.\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right) \qquad (3.21)$$

Nous nous appuierons sur cette expression pour modé iser le comportement thermique d'un échantillon excité localement et démontrer la possibilité de remonter à la valeur de a. **F. Cernuschi et al** dé rit l'une de ces mé hodes [162] basées sur l'observation de l'é olution au cours du temps du rayon caractéristique de la perturbation thermique, nous avons mis en œuvre cette « méthode radiale » et nous allons présenter nos résultats.

15.4. Mise en œuvre de la « méthode radiale »

Reprenons l'expression (3.21), si nous nous plaçons en r = 0 nous obtenons l'expression de la température maximale à chaque instant :

$$T_{\max}(0,0,t)\approx\frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2+8at} \qquad (3.22)$$

(3.21) peut donc s'é rire ainsi :

$$T(r,0,t) \approx T_{\max}(0,0,t).\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right) \tag{3.23}$$

On peut remarquer que lorsque $r^2 = R^2 + 8at$ nous avons :

$$T(r,0,t) \approx \frac{T_{\max}(0,0,t)}{e^2} \tag{3.24}$$

Ainsi la diffusivité thermique a peut-e re déterminée très simplement à partir de l'é olution temporelle d'un rayon caractéristique r^2 mesuré à chaque instant et correspondant à $\frac{T_{\max}(t)}{e^2}$.

15.4.1. Simulation théorique

Nous avons testé cette mé hode de mesure longitudinale de la diffusivité thermique à l'aide d'une simulation développée avec un logiciel de calcul par élément finis. Les conditions de simulations retenues sont les suivantes : la puissance émise totale émise par la source est de 3W, le rayon R du spot a été fixé à 1 mm (nous avons voulu nous rapprocher autant que possible des conditions réelles de manipulation), la durée d'excitation est de 20 ms de façon à approcher un δ de Dirac. S'agissant de l'échantillon nous avons modélisé un bloc de plâtre de dimensions 1,2 cm x 1,2 cm x 3 mm, de conductivité thermique λ = 0,4 W/m.K, de masse volumique ρ = 1100 kg/m^3 et avec un C_p de 830 J/kg.K, soit une diffusivité thermique théorique a de 4,38.10^{-7} m²/s. Nous avons choisi un maillage progressif raffiné à l'endroit de la perturbation thermique. L'observation se fait pendant 3 s par pas de temps de 20 ms.

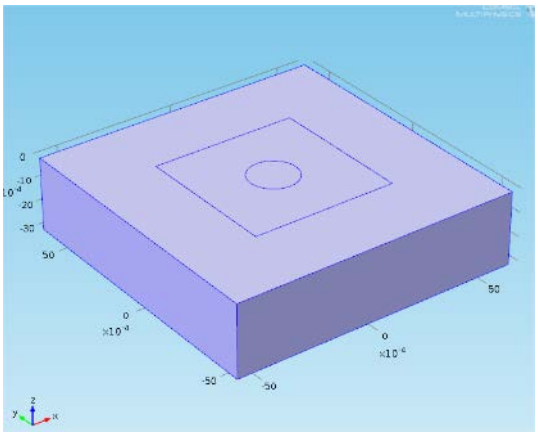


Figure 154 : Géométrie

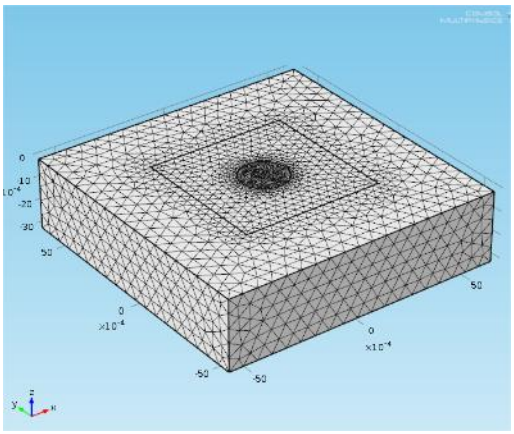


Figure 155 : Maillage de la géométrie (fin)

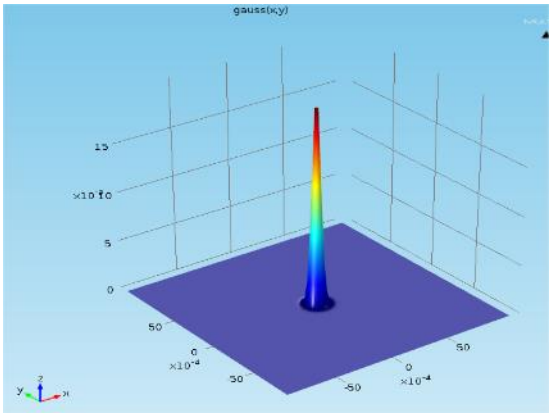


Figure 156 : Modulation spatiale

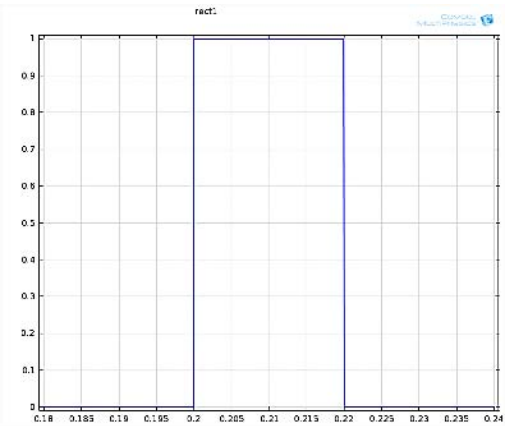


Figure 157 : Modulation temporelle

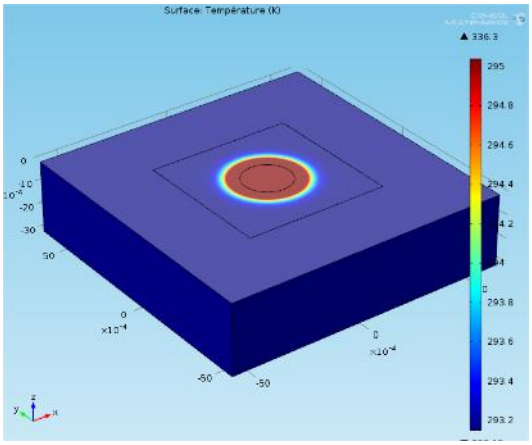


Figure 158 : Face avant à t =0,5 s

La Figure 159 présente différents profils à diffé ents instants le long d'une ligne de coupe passant par le centre de la zone d'excitation, cette figure montre que l'atténuation en intensité de la perturbation thermique et sa diffusion spatiale au cours du temps.

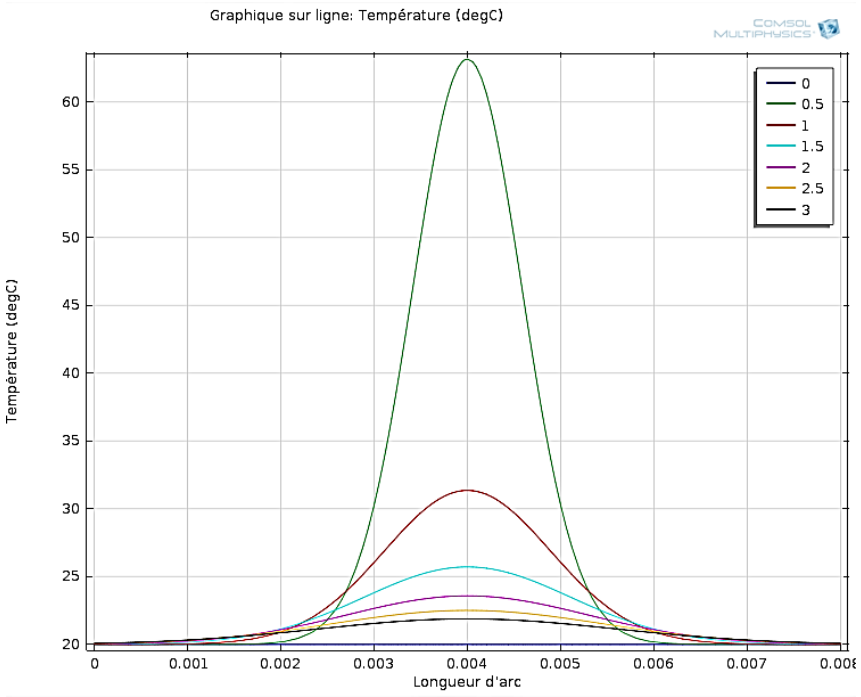


Figure 159 : Profils de température à différents instants

Nous allons dé erminer la diffusivité thermique à l'aide de l'outil que nous avons dé eloppé pour SAMMTHIR (voir Figure 151), nous avons implémenté la méthode radiale. Le logiciel détermine analytiquement pour chaque image du thermogramme le rayon caractéristique (voir Figure 160) en procédant par ajustement entre une gaussienne et chaque profil (voir page 368). L'équation du profil permet d'obtenir aisément la valeur du rayon caracté istique.

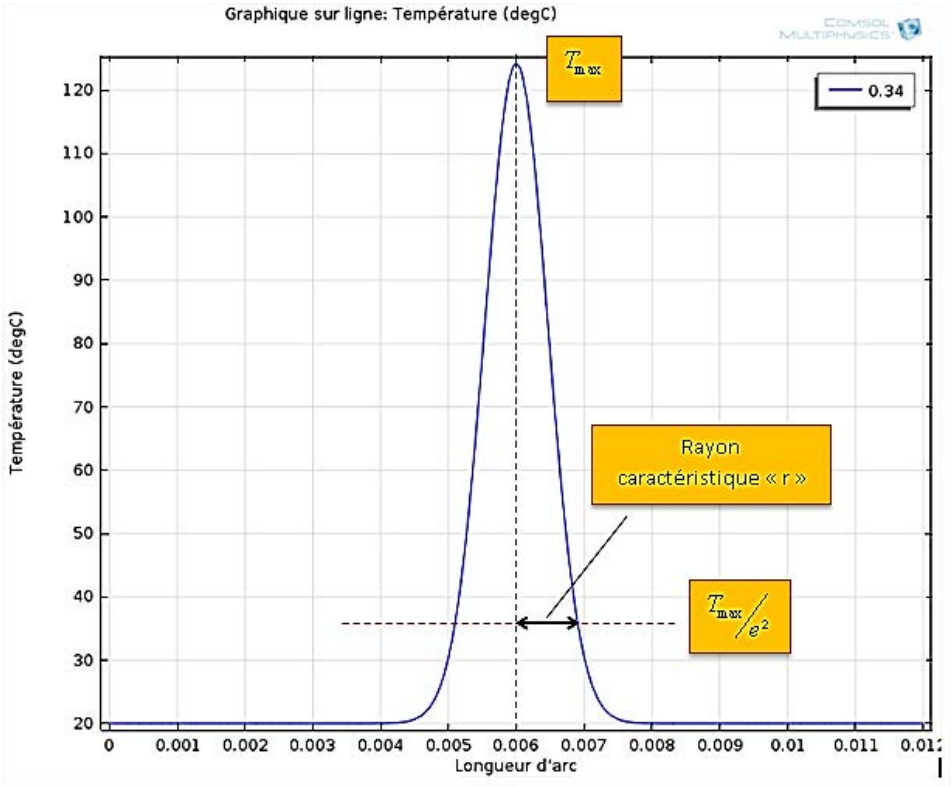


Figure 160 : Principe de la méthode

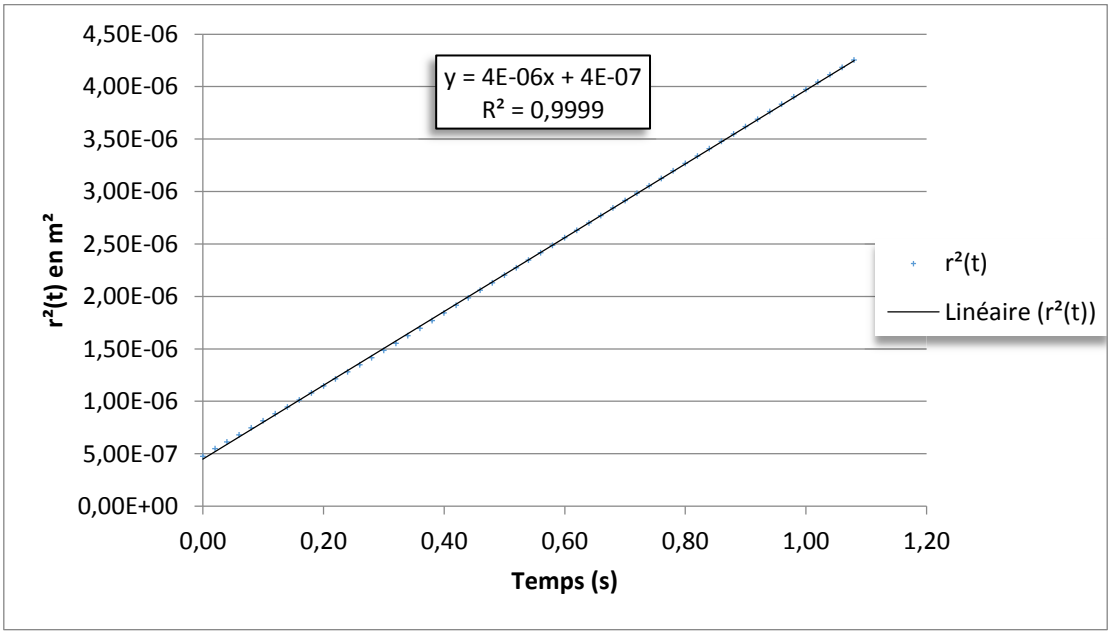


Figure 161 : Évolution de r²(t)

La Figure 161 montre l'évolution au cours du temps de r² ; cette évolution est linéaire et croissante, le calcul de la pente divisé par huit permet d'obtenir la valeur de la diffusivité thermique. Nous avons calculé une pente de $3{,}52.10^{-6}$, ce qui donne $a \approx 4{,}39.10^{-7}\ m^2/s$ au lieu de $4{,}38.10^{-7}$ m²/s, soit un é art relatif de 0,23 % à la valeur théorique. Ce ré ultat dé ontre qu'il est possible d'obtenir une bonne estimation de la diffusivité thermique d'un maté iau à 'aide de cette mé hode.

15.4.2. Validations expérimentales

La modélisation a permis de confirmer notre modèle théorique, vérifions cette approche expérimentalement. Nous procéderons en deux temps, nous é udierons tout d'abord un bloc de plâtre peint en noir et ensuite une réplique de fresque.

15.4.2.1. Estimation de la diffusivité thermique longitudinale sur un bloc de plâtre

Nous pré entons un résultat obtenu sur un bloc de plâtre. La source d'excitation est constituée d'une diode laser é ettant à 810 nm associé à une optique de collimation et focalisation. L'acquisition infrarouge est constitué d'une camé a « ondes longues » à bolomètres, travaillant en mode macro (pour obtenir une ré olution spatiale suffisante). Cette dernière est placé à l'aplomb de l'échantillon. Le faisceau laser est du fait de l'encombrement de la caméra, envoyé de façon inclinée sur l'é hantillon à analyser. Sa forme est de ce fait légè ement elliptique. Afin d'é iter une possible influence de ce paramè re sur le ré ultat final, nous avons veillé à ce que la mesure s'effectue selon un axe non affecté par cette inclinaison (axe perpendiculaire), pour ce faire nous avons tourné la caméra d'un angle de 90°. Cette diode laser est piloté en courant. Cela permet d'obtenir un faisceau d'excitation de forme temporelle contrôlé , en cré eaux dans notre cas d'étude (figure 2).

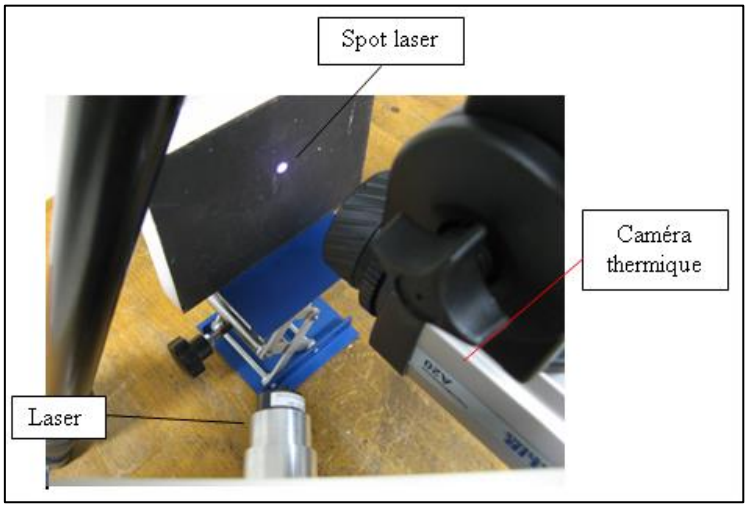


Figure 162 : Le dispositif expérimental avec spot laser

L'échantillon que nous avons analysé dans cette étude est un bloc de plâtre de 15 cm de longueur, de 12,5 cm de largeur et de 2 cm d'ép isseur (figure ci-dessus). Ce bloc de plâtre a é é ecouvert d'une fine couche de peinture thermo résistive afin de simuler une couche picturale, ce qui a aussi pour effet d'homogé iser ses propriété radiatives.

Notre étude s'est déroulé en deux temps : nous avons d'abord effectué une mesure de référence de la diffusivité thermique de cet é hantillon à l'aide d'un diffusivimè re flash (modè e assemblé par le LEMTA de Nancy).

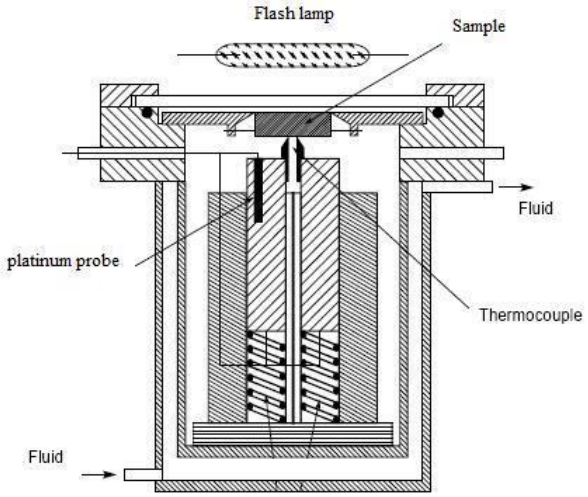


Figure 163 : Le diffusivimètre flash de référence mis en œuvre pour l'étude

À cet effet un morceau de l'é hantillon initial a é é prélevé et usiné sous la forme d'une pastille de diamè re 30 mm et d'épaisseur 6,05 mm. L'échantillon a été soumis à une impulsion de Dirac et l'é olution temporelle de la tempé ature en face arrière a été recueillie. Le diffusivimetre flash permet d'appliquer les quatre modes de dépo illement dé ris en 15.1 : Les valeurs de diffusivité transverse alors obtenues sont les suivantes :

Tableau 33 : Valeurs de référence de la diffusivité thermique sur un bloc de plâtre

Méthode de dépouillement	Valeur estimée de diffusivité thermique [m²/s]
Méthode de Parker (modèle sans perte qui surestime de ce fait a)	$4{,}05 \times 10^{-7}$
Méthode des temps partiels	$3{,}49 \times 10^{-7}$
Méthode des moments temporels	$3{,}53 \times 10^{-7}$
Ajustement théorie / expérience	$3{,}49 \times 10^{-7}$

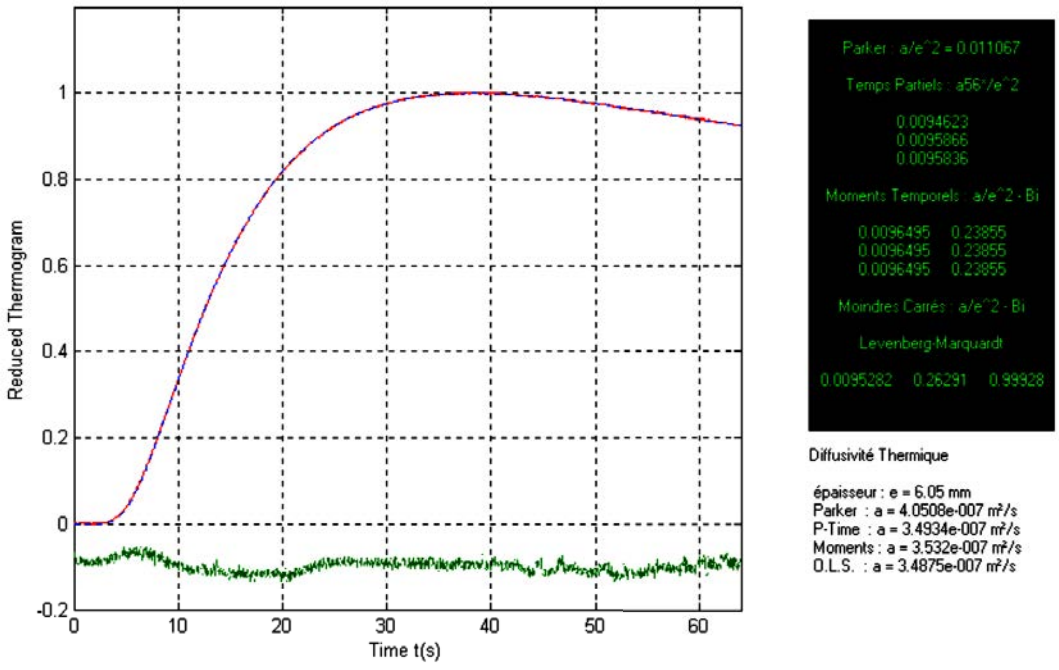


Figure 164 : Résultats de mesures de la diffusivité thermique à l'aide du diffusivimetre flash

La seconde étape de notre é ude a alors consisté à é udier ce me e bloc de plâtre à l'aide du syste e SAMMTHIR en mode macro. Voici les conditions expérimentales retenues pour l'é ude

- distance de 5 cm entre la caméra de thermographie infrarouge et l'é hantillon é udié
- une puissance d'excitation de 2 W
- duré d'excitation de 20 ms et une fré uence d'analyse de 50 Hz.

La figure 5 illustre quatre images infrarouges repré entatives de l'é olution temporelle de la signature thermique du spot laser. On remarque bien que cette dernière devient plus étendue et moins intense au fur et à esure que le temps s'é oule.

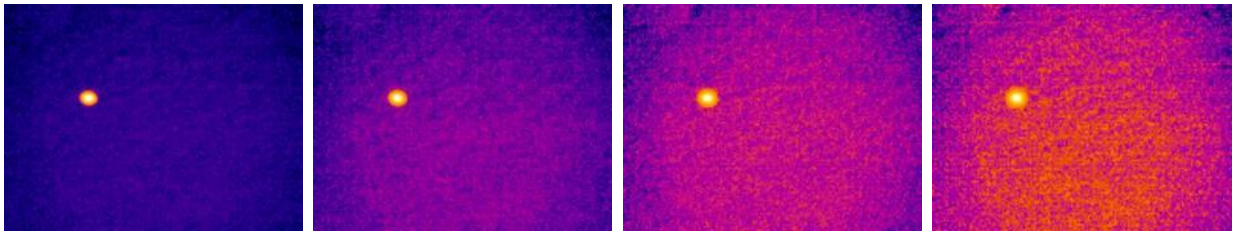


Figure 165 : Évolution de la signature infrarouge de l'échauffement laser avec le temps

À partir de ces thermogrammes, nous avons alors dé erminé l'é olution du rayon caracté istique au cours du temps, $r(t)$, la Figure 166 repré ente l'é olution de $r^2(t)$. Nous trouvons comme le prévoit la théorie, une droite de pente positive.

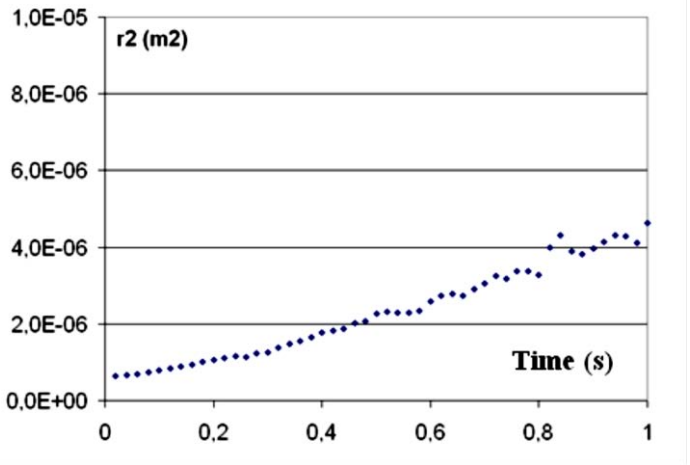


Figure 166 : Évolution en fonction du temps du rayon caractéristique de la signature photothermique expérimentale

Le calcul de cette pente permet de déduire la valeur de a. Valeur de la pente : $2{,}86 \times 10^{-6}$ $m^2.s^{-1}$, valeur de la diffusivité thermique : $\mathbf{3{,}57 \times 10^{-7}\ m^2.s^{-1}}$, ce qui est très proche de valeurs obtenues à l'aide du diffusivime re flash (voir Tableau 33, page 143)

15.4.2.2.Caractérisation d'une fresque académique

Figure 167 : Réplique du Saint-Christophe

Étudions la réplique du Saint-Christophe présentée au chapitre II. Cette éprouvette comprend six défauts, nous en avons repéré un certain nombre, mais pour être en mesure de les caractériser correctement, c'est-à-dire être en mesure de déterminer leur profondeur et pour cela nous devons déterminer la diffusivité thermique du matériau constituant cette éprouvette. Cette étude a déjà été effectué à l'aide de la méthode de Fourier, ce travail a été présenté dans la thèse de **Jean-Charles Candoré** [151] (pages 105 à 108), nous allons refaire le même type de mesure avec la méthode radiale.

Figure 168 : Zone étudiée

Dans ce travail nous nous inté esserons à l'œil droit du personnage, la mé hode de Fourier avait permis d'estimer la diffusivité thermique à cet endroit à **5,13.10^{-7} m²/s**.

Les conditions expérimentales retenues sont les suivantes :

- ◊ L'é hantillon est placé à 7,5 cm de la camé a et à 10 cm de la source laser.
- ◊ La puissance du laser est de 2 W.
- ◊ La duré d'excitation est de 1 s.
- ◊ La fré uence d'acquisition est de 50 Hz.

Résultat

La Figure 169 repré ente l'é olution du rayon caractéristique au cours du temps. La pente estimé est de 4,078.10^{-6} m²/s soit une diffusivité de **5,09.10^{-7} m²/s**. Ce résultat est très proche du résultat obtenu avec la méthode de Fourier.

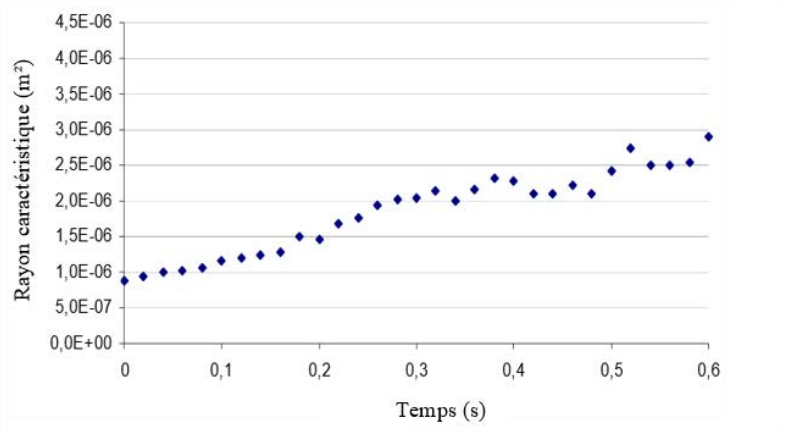


Figure 169 : Évolution de r²(t)

Ces résultats permettent de confirmer expérimentalement la validité de cette approche de mesure de la diffusivité thermique longitudinale par thermographie IR.

Notre travail a permis de mettre au point des variantes à cette méthode, examinons-les.

15.5. Mise en œuvre de la « méthode du Tmax »

Intéressons-nous maintenant à une autre approche possible pour déterminer a. Comme nous l'avons vu précédemment la valeur maximale de la température est obtenue au centre du spot (en r = 0). Nous avons vu qu'elle avait pour expression (3.22) :

$$T_{\max}(0,0,t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} . \frac{1}{R^2 + 8at}$$

En réarrangeant mathématiquement cette expression, nous pouvons alors écrire :

$$\frac{1}{T_{\max}(0,0,t)\sqrt{t}} \approx \frac{bR^2\sqrt{\pi^3}}{2Q}\left(1 + \frac{8a}{R^2}t\right) \qquad (3.25)$$

Avec $K = \frac{bR^2\sqrt{\pi^3}}{2Q} = cst$ (valeur de l'ordonnée à l'origine).

On remarque en observant cette expression que le premier terme tend asymptotiquement vers une droite de pente $\frac{8aK}{R^2}$. Il est possible à partir de là de déterminer simplement à partir de la pente et de l'ordonné à l'origine de cette droite (K), la diffusivité thermique.

$$a = \frac{pente.R^2}{8.K} = \frac{pente.R^2}{8.ordonnée} \qquad (3.26)$$

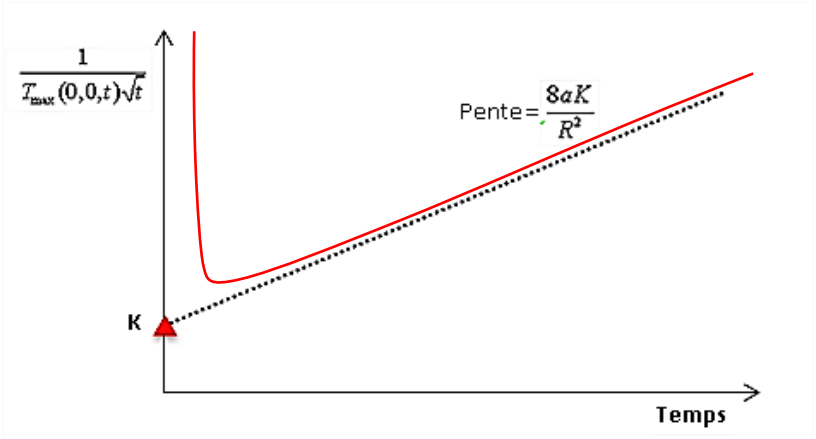


Figure 170 : Principe

Cette méthode présente un intérêt évident dans la mesure ou la valeur du T_{max} est directement accessible contrairement au rayon caractéristique. Cette grandeur est aussi plus rapide à obtenir pour des analyses thermophysiques étendues à l'aide d'une camé a HD par exemple. Nous avons là une nouvelle mé hode d'estimation de la diffusivité hermique.

15.5.1. Simulation théorique

Reprenons la simulation présentée en 15.4.1 et appliquons à celle-ci la méthode de dépouillement que nous venons de dé rire. Nous rappelons que la diffusivité thermique théo ique (a) de l'é hantillon est de $4{,}38.10^{-7}$ m²/s. La figure ci-dessous repré ente l'é olution temporelle du terme $\frac{1}{T_{max}(0,0,t).\sqrt{t}}$,

on peut remarquer que nous obtenons bien une évolution linéaire comme le prévoit le modèle. La mesure de la pente est estimée à 0,113 $K^{-1}.s^{-3/2}$, la valeur à l'origine avoisine $1{,}40.10^{-2}$ $K^{-1}.s^{-1/2}$, ce qui donne une valeur de diffusivité estimée de $4{,}39.10^{-7}$ m²/s. Cette mesure valide bien notre modèle thé rique, il est donc passible d'estimer la valeur de la diffusivité hermique à 'aide d'une observation au cours du temps de la température au centre de la perturbation thermique.

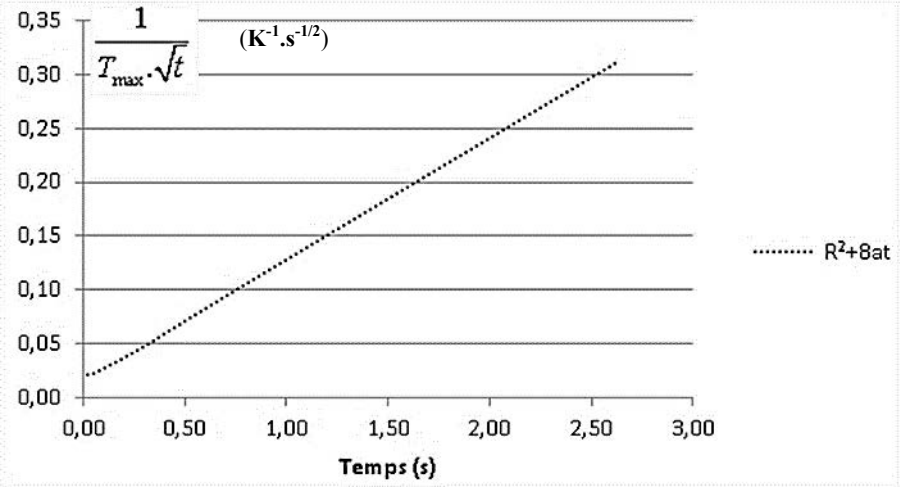


Figure 171 : Résultat de simulation

15.5.2. Validations expérimentales

15.5.2.1. Estimation de la diffusivité thermique longitudinale sur un bloc de plâtre

Appliquons la methode aux données obtenues sur le bloc de plâtre étudié précédemment (15.4.2.1). Nous obtenons la courbe suivante :

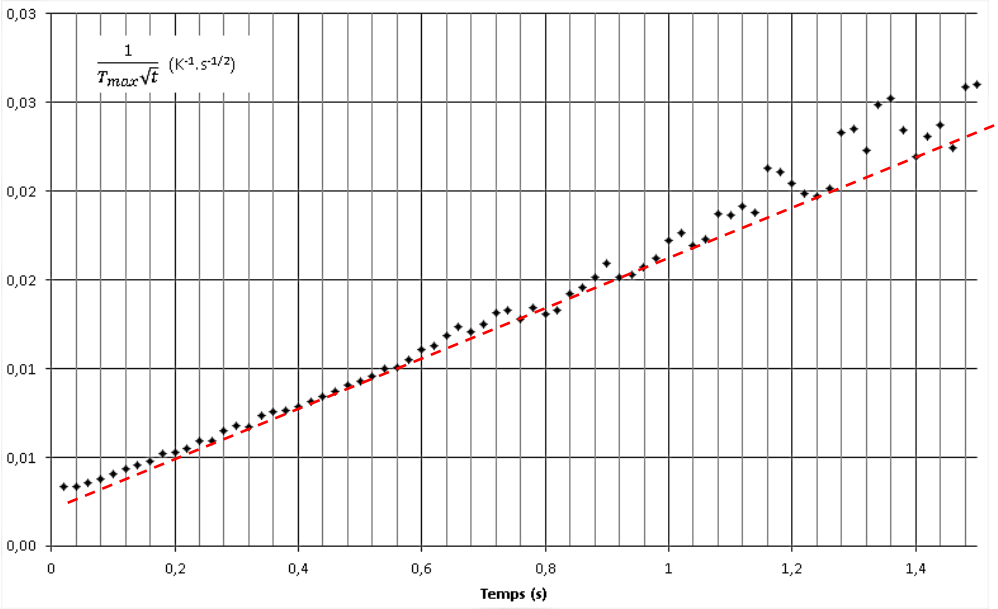


Figure 172 : Résultat expérmimental (methode Tmax)

La pente est estimée à 0,014 $K^{-1}.s^{-3/2}$, l'ordonné à l'origine à 5.10^{-3} $K^{-1}.s^{-1/2}$, nous obtenons pour un rayon d'excitation de 1 mm une valeur de diffusivité a = $3,58.10^{-7}$ m²/s ce qui est très proche des valeurs de références présentées précédemment (voir Tableau 33, page 143).

15.5.2.2. Caractérisation d'une fresque académique

Reprenons la fresque académique étudiée en 15.4.2.2.

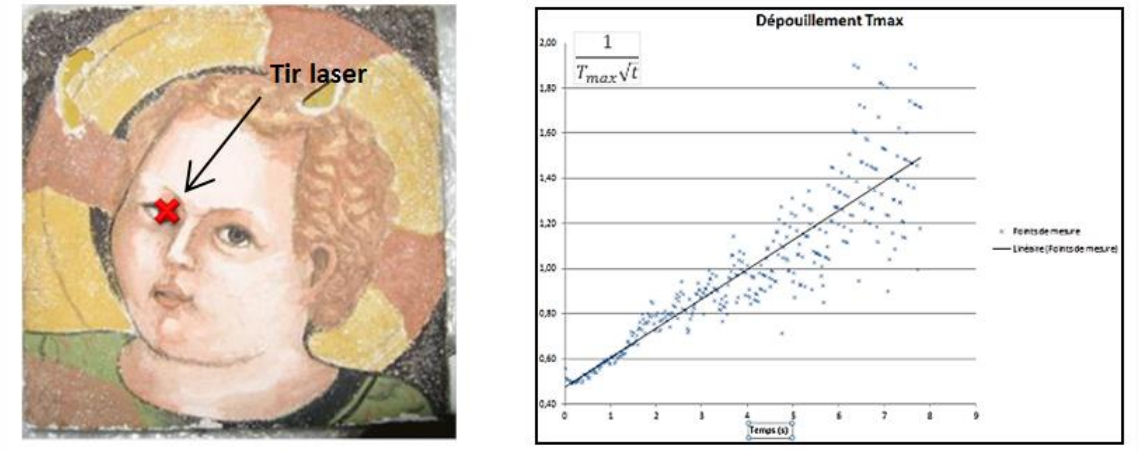


Figure 173 : Analyse du St Christophe à l'aide de la méthode du Tmax

Un tir laser a é é effectué sur zone que nous avons eu l'occasion de tester pré éd mment. Nous nous sommes inté essé à l'œil droit du personnage dont la valeur de diffusivité mesurée connue est de $5,13.10^{-7}$ m²/s. Deux essais ont été effectués et consignés dans le tableau suivant :

Tableau 34 : Mesures de diffusivité thermiques sur une fresque académique (méthode du Tmax)

	Diffusivité thermique mesurée a (m²/s)	Valeur de référence (m²/s)	Écart relatif (%)
Essai N°1	$5{,}37.10^{-7}$	$5{,}13.10^{-7}$	5.2 %
Essai N°2	$4{,}96.10^{-7}$		-2.7 %
Moyenne	**$5{,}16.10^{-7}$**		**-0,6 %**

Nous remarquons une nouvelle fois que cette approche permet d'avoir une bonne estimation de la diffusivité thermique.

15.6. Méthode des « moments »

Reprenons à nouveau l'expression (3.21) :

$$T(r,0,t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2+8at}.\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right)$$

$$\text{Avec } T_{\max}(0,0,t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2+8at}$$

Calculons l'inté rale spatiale $I(t)$ de (3.21) et appelons ce terme « *Moment de* $T(r,0,t)$ », nous obtenons :

$$I(t) = \int_0^\infty T(r,0,t).dr = \frac{1}{2}.T_{\max}(0,0,t).(R^2+8at).\sqrt{\frac{\pi}{2}}.erf\left(\sqrt{\frac{2}{R^2+8at}}.r\right) \qquad (3.27)$$

Cette expression est d'un maniement laborieux en raison de la fonction « erreur » $Erf(r,t)$, voyons s'il est possible d'apporter des simplifications : la figure suivante montre que cette fonction tend vers 1 dès que son argument est supérieur à 2, ce qui rend son influence négligeable.

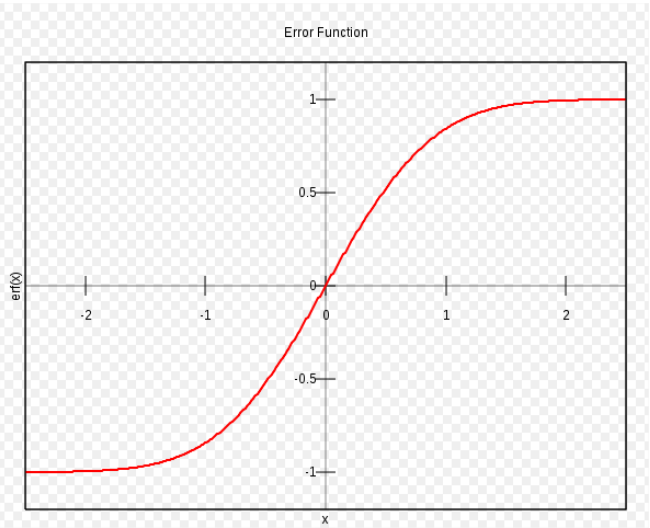


Figure 174 : Les propriétés de la fonction « *erf* »
Tiré de Wikipédia

Cela se traduit donc par la condition suivante :

$$\sqrt{\frac{2}{R^2+8at}}.r \geq 2 \tag{3.28}$$

Ce qui impose :

$$r^2 \geq 2\left(R^2 + 8at\right)$$

En considé ant maintenant un rayon d'excitation de l'ordre de R = 2 mm, une diffusivité thermique a = 3.5 10^{-7} m^2/s et une duré d'analyse t = 1s (ce sont les conditions expérimentales habituellement rencontrées dans notre étude), cette condition devient :

$$r \geq 1,6\,R$$

Il est donc possible de négliger la fonction « *Erf* » dans l'expression (3.27) dès que la borne supérieure d'inte ration vaut au moins 1,6 R. Dans ces conditions, nous pouvons écrire :

$$I(t) = \frac{1}{2}.T_{\max}(0,0,t).(R^2+8at).\sqrt{\frac{\pi}{2}} \tag{3.29}$$

Ce qui peut s'é rire aussi :

$$R^2+8at = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}}.\frac{I(t)}{T_{\max}(0,0,t)} \tag{3.30}$$

Une nouvelle fois nous constatons qu'il est possible de relier simplement l'évolution du terme R^2+8at à l'évolution d'une grandeur $I(t)$ dépendant des caractéristiques de la perturbation thermique. Cette expression montre la possibilité d'aboutir à une estimation de la diffusivité thermique recherchée à partir de l'estimation temporelle du moment de la signature thermique. La détermination de $I(t)$ consiste simplement à déterminer l'évolution à chaque instant de l'aire sous le profil spatial à cet instant.

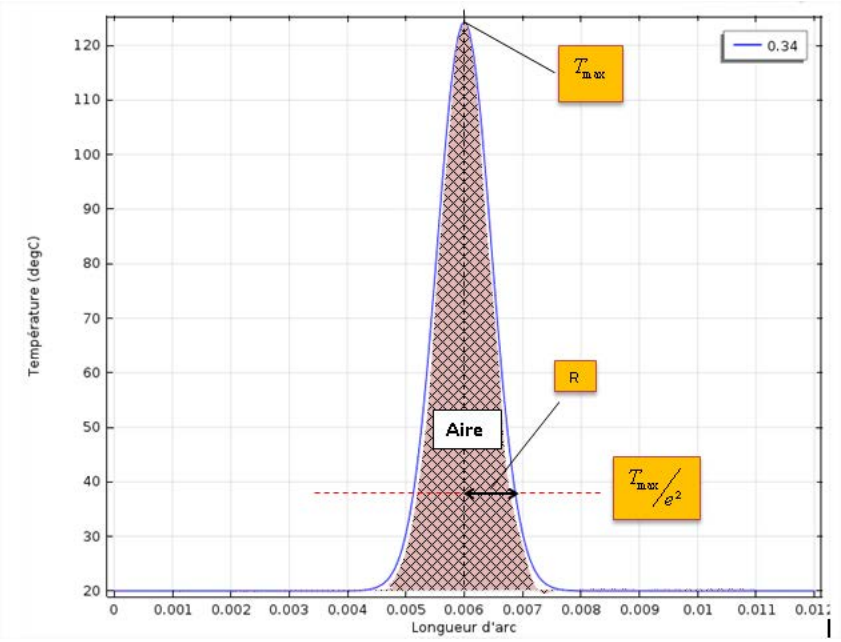


Figure 175 : Moment à un instant t=0,34 s

15.6.1. Simulation théorique

Afin de vérifier cette nouvelle technique de mesure de diffusivité thermique locale, nous avons modélisé le problème en reprenant les conditions de simulations de 15.4.1 :

Tableau 35 : Conditions de simulation

Conductivité thermique λ (W/m.K)	Masse volumique ρ (Kg/m3)	Chaleur spécifique de Cp (J/Kg.K)	Diffusivité thermique théorique a (m²/s)
0,4	1100	830	$4\ ,38.10^{-7}$

Une excitation énergétique a été déposée au centre de ce bloc de plâtre. La forme temporelle de cette excitation est un créneau d'une durée de 20 ms. Le rayon caractéristique d'excitation a été fixé à R = 1,8 mm, pour une puissance excitatrice mise en œuvre de 3 W. Ces valeurs correspondent à celles couramment observées lors de nos expériences. Les thermogrammes ont permis d'extraire la succession des profils spatiaux de température à l'aplomb de l'excitation laser. Nous avons ensuite calculé l'intégrale spatiale de ces profils successifs.

L'estimation de la diffusivité thermique recherchée s'obtient à partir de l'évolution du rapport de cette l'intégrale spatiale à la valeur maximale de température de la signature thermique à chaque instant. Nous observons que cette évolution au cours du temps est croissante et linéaire comme attendu (voir figure ci-dessous). Cette grandeur évolue selon une pente estimée de $3{,}510^{-6}$ m²/s ce qui conduit par application de (3.30) à une valeur de diffusivité thermique estimée de $4{,}37.10^{-7}$m²/s au lieu de $4{,}38.10^{-7}$m²/s (valeur théorique).

Ces valeurs sont très proches, ce qui montre bien la faisabilité de la méthode.

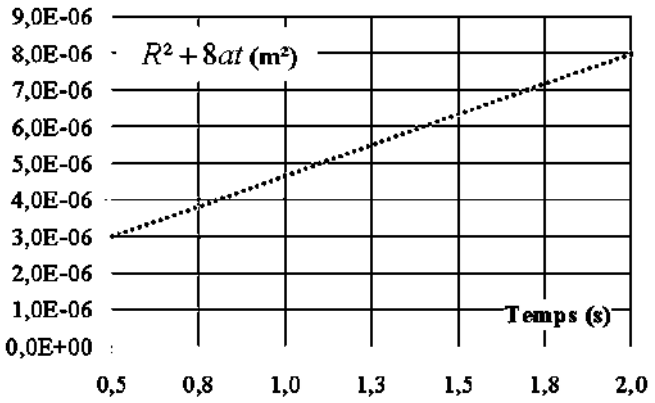


Figure 176 : Résultat de la validation théorique

15.6.2. Validations expérimentales

15.6.2.1. Estimation de la diffusivité thermique longitudinale sur un bloc de plâtre

Reprenons le thermogramme obtenu lors de l'étude du bloc de plâtre étudié en 15.4.2 et appliquons aux données cette méthode de dépouillement.

Rappelons que les valeurs obtenues à l'aide du diffusivimetre flash allaient pour cet é hantillon de $3{,}49.10^{-7}$ à $3{,}53.10^{-7}$ m²/s. Le résultat obtenu est présenté sur la figure ci-dessous. Elle fait apparaître, comme le prévoit la théorie, une droite de pente positive. Nous avons alors estimé cette pente à 2,74 10^{-6} m^2/s, ce qui conduit à une diffusivité thermique de 3,43 $10^{-7} m^2/s$.

Cette valeur est proche des valeurs de références (voir Tableau 33, page 143). Cela confirme donc expérimentalement la faisabilité de la méthode.

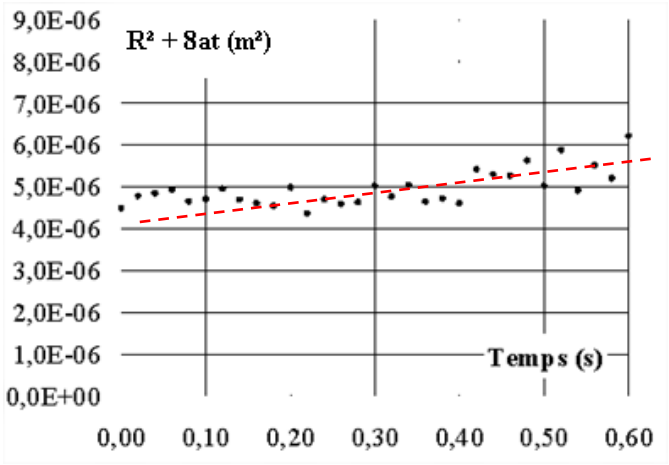


Figure 177 : Caractérisation d'un échantillon de plâtre par la méthode des moments

15.6.2.2. Caractérisation d'une fresque académique

Nous avons procédé de même pour la fresque académique étudiée en 15.4.2.2, nous avons repris les donné s tiré s de l'analyse de l'œil droit du personnage et avons appliqué cette mé hode de dépou llement. Les valeurs de diffusivité thermique estimé à l'aide de la *Méthode de Fourier*, de la *Méthode radiale* et de la *Méthode du* T_{max} étant respectivement de $5{,}13.10^{-7}$ m²/s, $5{,}08.10^{-7}$ m²/s et $4{,}96.10^{-7}$ m²/s.

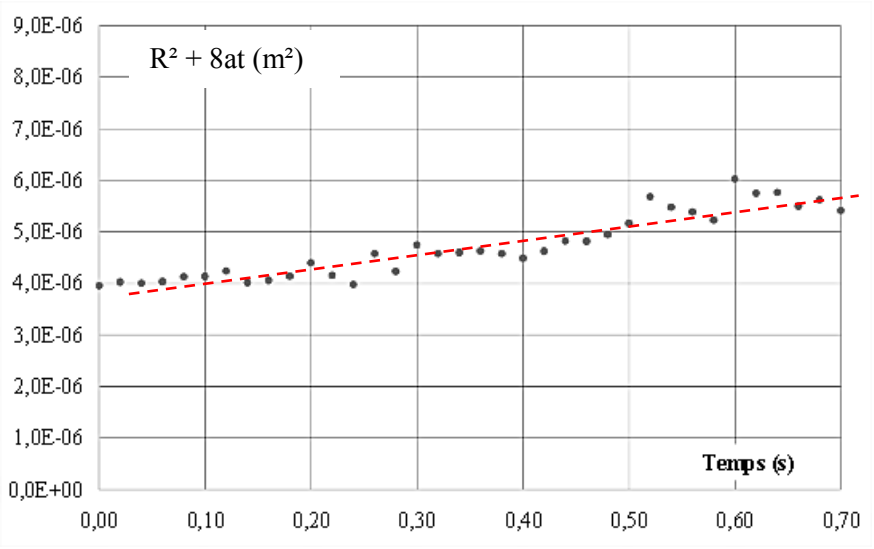


Figure 178 : Caractérisation d'une fresque académique

La pente a été estimée à $4{,}08.10^{-6}$ m²/s soit une diffusivité thermique de $5{,}1.10^{-7}$ m²/s. Cette valeur est proche des valeurs obtenues à l'aide des autres méthodes de caractérisation, cette mesure valide cette mé hode d'analyse.

15.6.3. Récapitulatif

Nous avons présenté trois mé hodes par thermographie infrarouge, permettant d'estimer la diffusivité thermique d'un é hantillon ép is à l'aide d'une excitation locale et par analyse de l'é olution temporelle de paramè res lié au profil spatial de tempé ature. Nous avons dé ontré la validité des modè es théo iques sur lesquels reposaient ces mé hodes à l'aide d'une simulation puis nous avons observé que ces modes de dépouillement étaient opérants sur des échantillons et des éprouvettes de laboratoire. Le tableau suivant reprend ces résultats :

Tableau 36 : Récapitulatifs des mesures de diffusivité par méthodes photothermiques

Méthode de dépouillement	Simulation		Bloc de plâtre		Saint-Christophe	
	Référence $4{,}38.10^{-7}$ m²/s	Écart relatif (%)	Référence $3{,}49.10^{-7}$ m²/s	Écart relatif (%)	Référence $5{,}13.10^{-7}$ m²/s	Écart relatif (%)
Méthode radiale	$4{,}39.10^{-7}$	0,23 %	$3{,}57.10^{-7}$	2,29 %	$5{,}09.10^{-7}$	-0,78 %
Méthode du T_{max}	$4{,}39.10^{-7}$	0,23 %	$3{,}58.10^{-7}$	2,58 %	$5{,}16.10^{-7}$	0,58 %
Méthode des Moments	$4{,}37.10^{-7}$	-0,23 %	$3{,}43.10^{-7}$	-1,72 %	$5{,}10.10^{-7}$	-0,58 %

Les résultats obtenus sont très proches des valeurs attendues, ce qui est satisfaisant, mais ces résultats ne permettent pas de classer ces mé hodes. Procédons à un calcul d'incertitude afin de déterminer si ces trois méthodes de dépouillement sont équivalentes.

15.7. Application : Estimation de profondeurs de défauts

A ce stade il est possible d'envisager des applications à la possibilité qui nous est donnée de caracté iser des maté iaux, voyons un exemple d'application en ce qui concerne la caractérisation de dé auts et plus précisément l'estimation de leurs profondeurs.

a) Cas de l'éprouvette IDK

Dans le cadre d'une collaboration[17] avec le laboratoire I.D.K. de Dresde (*Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen Anhalt e.V.*) nous avons eu à étudier une éprouvette en béton comportant un certain nombre de défauts intéressants, dont deux inserts en forme de rampe. Le laboratoire nous a fait parvenir un échantillon du béton utilisé pour la fabrication de cette ép ouvette. Nous avons estimé sa diffusivité thermique à l'aide des mé hodes photothermiques que nous venons de décrire. Cette estimation nous permettra d'estimer la profondeur des diffé ents inserts de l'é rouvette. L'ép ouvette sera pour cela chauffé à l'aide de source et l'observation de sa réponse en température nous permettra de remonter à la profondeur par différentes méthodes.

Détermination des propriétés du béton IDK

Le tableau ci-dessous regroupe les mesures de diffusivité que nous avons effectuées sur l'échantillon de béton avec différentes mé hodes : photothermiques et diffusivimetre flash (mesure de contrôle). Pour nos calculs nous retiendrons la valeur de **$5{,}5.10^{-7}$ m²/s** qui est la valeur moyenne mesuré à l'aide des 4 mé hodes photothermiques.

Tableau 37 : Mesures de la diffusivité thermique du béton IDK

	Durée d'excitation	Méthodes photothermiques	Valeurs mesurées (m²/s)	Moyenne (m²/s)	Diffusivimètre (m²/s)	Écart relatif avec la mesure du diffusivimetre flash (%)
Béton IDK	20 ms	Radiale	$5{,}7.10^{-7}$ $6{,}4.10^{-7}$ $6{,}3.10^{-7}$	$6{,}13.10^{-7}$	$5{,}95.10^{-7}$	2,9
		Tmax	$5{,}1.10^{-7}$ $4{,}4.10^{-7}$ $4{,}7.10^{-7}$	$4{,}75.10^{-7}$		20,2
		Cos ordre 2	$5{,}6.10^{-7}$ $5{,}2.10^{-7}$ $6{,}1.10^{-7}$	$5{,}63.10^{-7}$		5,4
		Cos ordre 4	$5{,}6.10^{-7}$	$5{,}62.10^{-7}$		5,6
		Intégrale	$5{,}2.10^{-7}$ $5{,}4.10^{-7}$	$5{,}32.10^{-7}$		10,7

Description de l'éprouvette

L'éprouvette é udié est un bloc de béton lé er de 45 kg (ρ=1760 kg/m^3) recouvert d'un enduit de plâtre et de dimensions 0,7 x 0,46 x 0,08 m de comportant 10 défauts se situant à différentes profondeurs dans le bloc.

[17] Programme de recherche franco-allemand d'é ude des mé hodes d'analyse des biens culturels par photothermie infrarouge (PHC PROCOPE, n°25064RJ, 2011-2012)

Figure 179 : Image en visible de l'éprouvette

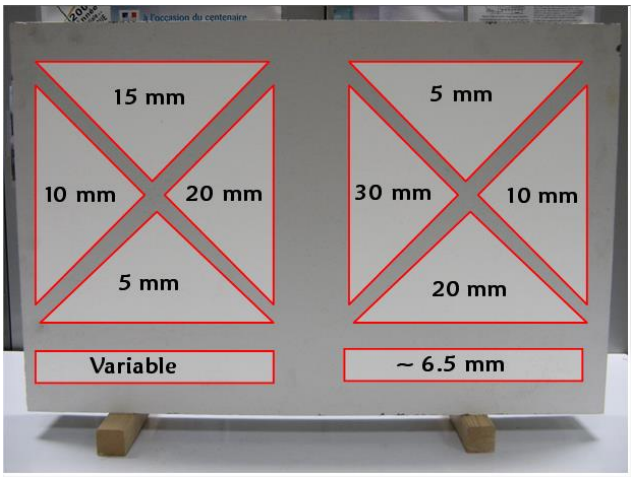


Figure 180 : Localisation des défauts

L'échantillon comporte sur le côté droit 4 lacunes triangulaires de 5 mm d'ép isseur noyé s dans la masse à différentes profondeurs allant de 5 mm à 30 mm, sur le côté gauche nous avons 4 défauts triangulaires fins pris en sandwich et représentant le comportement de fissures, toujours à différentes profondeurs allant de 5 à 20 mm.
Nous avons en outre sur le bas de l'ép ouvette 2 lacunes en forme de coin ou de rampe, positionné s tête-bê he l'une par rapport à 'autre, voir figure ci-dessous :

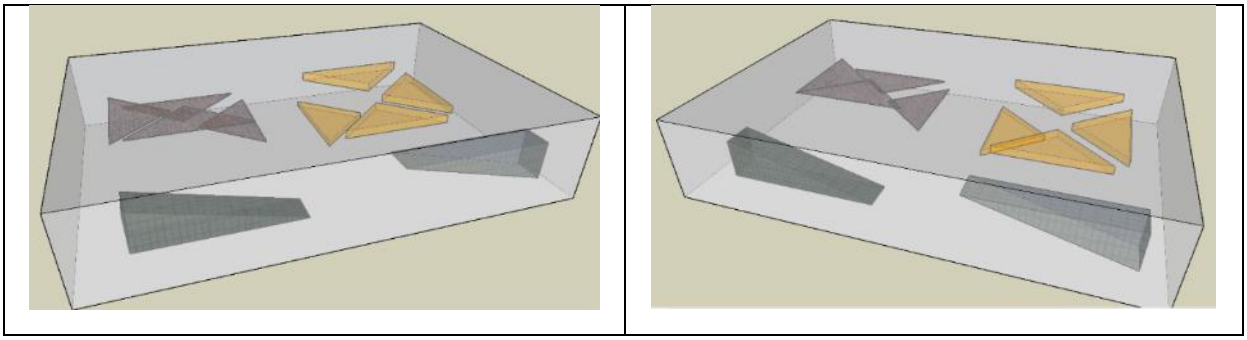


Figure 181 : Représentation 3D de l'éprouvette avec les inserts

Description du dispositif expérimental

Le dispositif se compose de 2 sources halogè n s d'une puissance unitaire de 500 W disposées symé riquement de part et d'autre de l'ép ouvette à une distance d'environ 30 cm. Ces sources sont alimentées par un générateur à courant continu 0 ~ 10 V.
Une caméra thermographique est placée en vis-à-vis à environ 40 cm de l'é rouvette (voir figure ci-dessous).

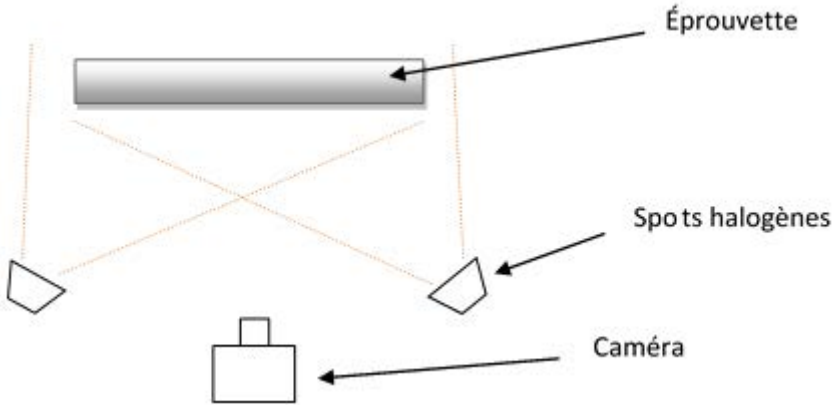


Figure 182 : Dispositif expérimental

15.8. Description de la configuration expérimentale

- ◊ Analyse photothermique face avant 1D
- ◊ Excitation : Créneau avec halogènes (1000 W)
- ◊ Duré d'excitation : 3 mn
- ◊ Épaisseur d'é hantillon : 0,08 m
- ◊ Fréquence d'analyse : 1 s avec caméra Flir A20
- ◊ Duré de l'analyse : 7 mn

Les

Figure 183 & Figure 184 représentent respectivement les thermogrammes avec les repérages des zones é udiées. Dans cette é ude on ne s'inté essera pas à la l'étude des dé auts en forme de rampe.

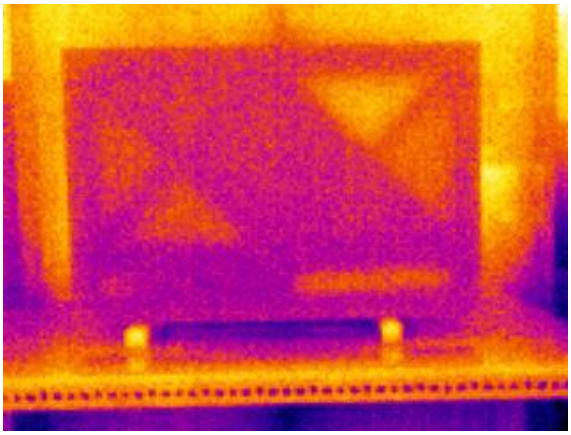


Figure 183 : Image thermique brute : détection de 8 défauts /10 repérés

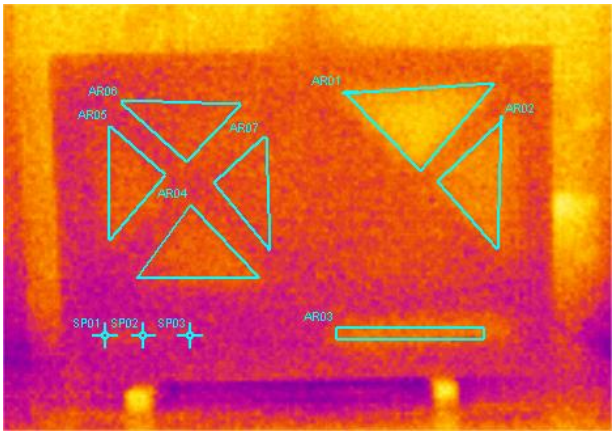


Figure 184 : Repérage des zones

Valeurs de références et résultats

Le Dr Christoph Franzen de l'IDK (Dresde) nous a fourni les valeurs de profondeurs des dé auts rectangulaires :

No:	description	depth [cm]	No:	description	depth [cm]
04	fissure crack	0.5	01	void of 0,5 cm	0.5
05	fissure crack	1.0	02	void of 0,5 cm	1.0
06	fissure crack	1.5	09	void of 0,5 cm	2.0
07	fissure crack	2.0	08	void of 0,5 cm	3.0
A:	wedge, slope near to surface		03	wedge, bottom parallel to surface	

Figure 185 : Valeurs de référence

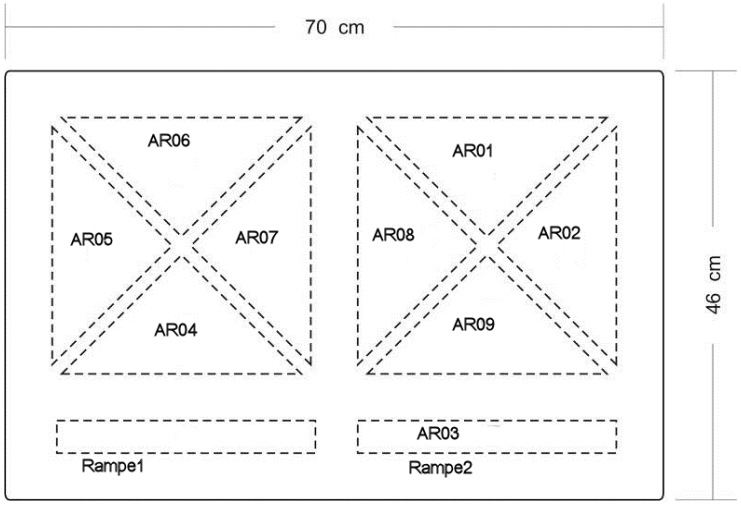


Figure 186 : Repérages des défauts

Pour déterminer la profondeur des défauts nous avons procédé par ajustement théorie expérience (estimation de paramètres).

La difficulté rencontrée réside dans la détermination de la conductivité thermique du matériau, cette information n'est pas directement accessible. Nous l'avons estimé à partir de la rép nse thermique de la zone 1 (AR01) : nous avons injecté dans le modèle la diffusivité thermique mesurée précédemment ainsi que la profondeur connue de ce dé aut et nous avons fait tourner l'outil (voir annexes page 370) afin d'obtenir cette grandeur. La grandeur compatible est avec les données de l'expé ience est de l'ordre de 0,78 W/m.K. Connaissant cette grandeur il a ensuite été possible d'estimer les profondeurs des autres zones de l'éprouvette. Le tableau ci-dessous regroupe ces estimations de profondeur :

Tableau 38 : Résultats des mesures de profondeur des défauts

No :	description	Profondeur de référence [cm]	Valeur mesurée [cm]	No :	description	Profondeur de référence [cm]	Valeur mesurée [cm]
AR04	fissure	0,5	0,6 (+20 %)	AR01	Vide de 0,5 cm	0,5	**Référence**
AR05	fissure	1,0	1,0	AR02	Vide de 0,5 cm	1,0	**1,0**
AR06	fissure	1,5	1,2 (-20%)	AR09	Vide de 0,5 cm	2,0	**1,9 (-5 %)**
AR07	fissure	2,0	1,6 (-20 %)	AR08	Vide de 0,5 cm	3,0	**Pas détecté**

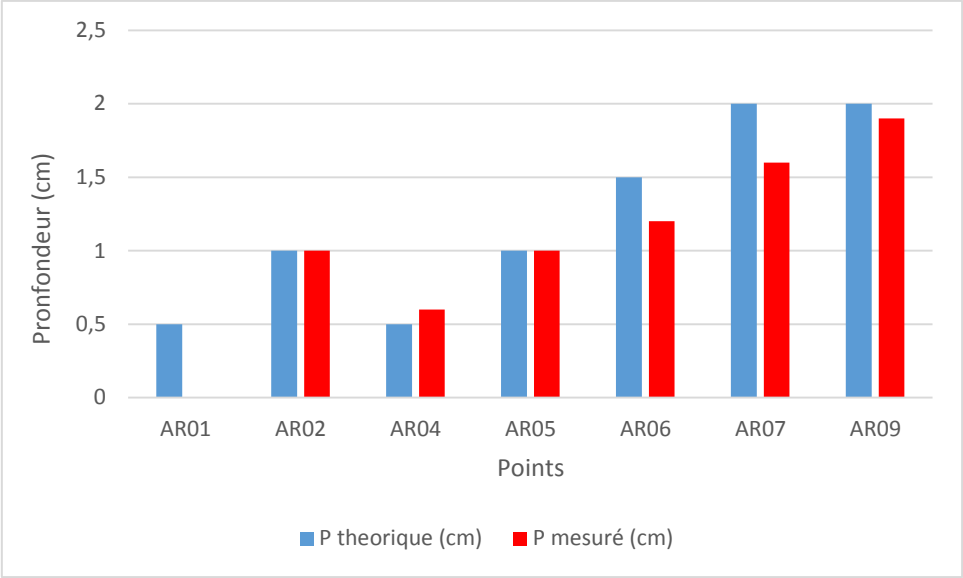


Figure 187 : Estimation de profondeur de défauts par méthodes photthermiques sur l'éprouvette IDK

Les résultats peuvent e re pré is, mais dans l'ensemble ils pré entent une erreur qui peut avoisiner 20 % pour les défauts les plus profonds, néanmoins les ordres de grandeur sont respectés. L'incertitude de mesure provient de l'accumulation de nombreux facteurs et du cumul des erreurs dans l'estimation des grandeurs comme la diffusivité thermique ou la conductivité thermique.

Cet aspect a attiré notre attention. Nous avons souhaité identifier les principaux paramètres qui pouvaient influencer l'estimation d'une grandeur comme la diffusivité thermique. Ce travail a été mené, mais nous avons considéré qu'il n'é ait pas assez complet pour figurer dans cette thèse. Une ébauche de ce travail figure en Annexe (voir page 362).

15.9. Conclusion

Nous venons de dé ontrer qu'il est possible de caracté iser un maté iau d'épaisseur quelconque en utilisant trois techniques basées sur les propriétés géométriques des profils spatiaux du champ de température en surface. Pour obtenir ces profils, nous tirons un axe de symétrie traversant de part en part le point de chaleur engendré par une perturbation thermique locale et nous analysons la variation au cours du temps de certaines caractéristiques liées à la géométrie de ces profils temporels successifs.

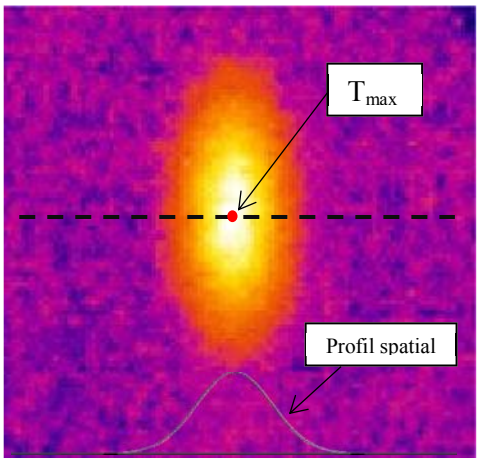


Figure 188 : Extraction d'un profil spatial

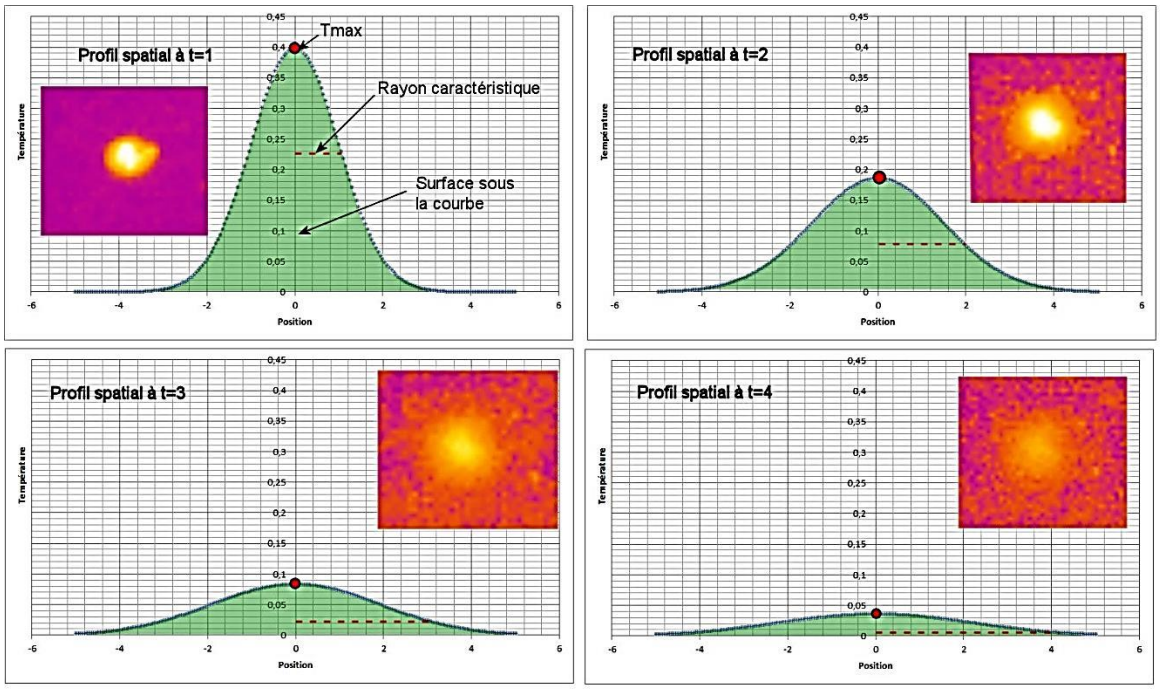


Figure 189 : Évolution temporelle des paramètres attachés aux profils spatiaux

Nous avons vu que la mise en œuvre des trois mé hodes de caractérisation dé rites ne sont pas équivalentes et ne nécessitent pas la même connaissance des conditions expérimentales : la méthode du T_{max} est plus simple à mettre en œuvre sur un plan pratique, car ne né essitant que la connaissance à chaque instant de la température au centre du spot contrairement à la méthode radiale et à la méthode des moments qui demandent le calcul de grandeurs annexes telles que le rayon caractéristique ou l'aire des profils spatiaux. Nous avons démontré que les sensibilités des trois méthodes aux paramètres expérimentaux n'étaient pas éq ivalentes. Ainsi la mé hode du T_{max} est très sensible à certains paramè res comme le rayon d'excitation, ce qui implique une bonne connaissance de ce paramè re ce qui n'est pas le cas des deux autres mé hodes. En outre toutes ces méthodes sont sensibles au bruit, ce souci peut être réglé par une amélioration du rapport signal sur bruit, mais cela peut se révéler problématique sur des matériaux fragiles.

Mode de dépouillement	Aspect calculatoire	Dépendance aux paramètres expérimentaux	Précision
Méthode radiale	Calcul du rayon caractéristique	Dépendance au bruit	Bonne
Méthode du T_{max}	Pas de calcul, exploitation directe des données brutes (Tmax)	Forte dépendance, nécessite une connaissance précise du rayon d'excitation + Dépendance au bruit.	Moyenne
Méthode des moments	Calcul d'aire	Dépendance au bruit	Bonne

16. Détermination de l'effusivité thermique

Dans cette section nous nous intéressons à un autre paramètre thermophysique permettant de caractériser les matériaux : l'effusivité thermique. Il est pertinent d'exploiter tous les paramè res mesurables porteurs d'information aux différents stades de l'expé ience. Nous savons par la littérature que les grandeurs thermophysiques se manifestent à différents stades de l'expérience photothermique, la diffusivité gouverne la conduction c'est-à-dire la diffusion thermique à l'inté ieur du matériau aux temps interméd aires, l'**effusivité thermique** dépend quant à elle du flux absorbé et se manifeste aux premiers instants de l'observation. Elle est souvent la seule grandeur accessible sur des échantillons thermiquement épais, d'où son intérêt pour l'étude des œuvres d'art

16.1. Connaissance de l'effusivité thermique et finalités

L'effusivité thermique que nous notons « b » dépend des grandeurs de base suivantes : la conductivité thermique λ , la capacité thermique massique C_p et la masse volumique ρ du maté iau. Son expression est donnée par :

$$b = \sqrt{\lambda.\rho.C_p} \tag{3.31}$$

Cette grandeur s'exprime en $J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-½}$, sa valeur permet de quantifier l'aptitude d'un maté iau à changer de tempé ature lorsqu'il est soumis à une perturbation thermique.

Les applications pratiques de la connaissance de ce paramètre sont nombreuses pour notre thématique de recherche :

- ◊ Cette grandeur peut nous permettre de repérer des défauts
- ◊ La connaissance de cette grandeur est particulièrement adaptée aux matériaux épais comme les peintures murales.

Dans les prochains chapitres, nous verrons d'autres applications :

- ◊ Nous verrons au chapitre IV l'inté êt de b dans le domaine de la déte tion des infiltrations de sel hygroscopiques dans la pierre.
- ◊ Nous verrons au chapitre V la possibilité offerte par la connaissance de ce paramètre dans la caractérisation d'une technique picturale.

De nombreuses mé hodes existent pour estimer l'effusivité thermique telles que la mé hode du « touchau » ou celle du « plan chaud », nous ne nous étendrons pas sur ces aspects, nous renvoyons le lecteur vers des documents plus exhaustifs tel que l'article des Techniques de l'ingén eur (2006), é rit par **Jean-Claude KRAPEZ** [163] à ce sujet. Décrivons maintenant le principe que nous utiliserons dans cet exposé, permettant de mesurer cette grandeur thermophysique.

16.2. Approche surfacique

16.2.1. Aspects théoriques et mode opératoire

16.2.1.1. Modèle théorique

Le principe de cette mé hode d'estimation est le suivant : deux é hantillons, l'é hantillon é udié et un échantillon de référence présentant les mêmes propriétés radiatives de surface sont soumis à une excitation flash étendue, temporellement proche d'une fonction delta de Dirac $\delta(t)$. On mesure alors, les élévations de température de la face avant de ces échantillons, induites par cette excitation, à l'aide d'une camé a de thermographie infrarouge. À partir des évolutions temporelles de ce champ de tempé ature obtenue, nous remontons, à l'aide d'un post-traitement mathématique à la valeur de l'effusivité thermique du maté iau étudié. Examinons en dé ail ce post-traitement mathématique sur lequel est basée cette technique de mesure.

Soit une plaque d'é aisseur e, semi-infinie latéralement et opaque. Soit une perturbation thermique très brève (Fonction delta de Dirac temporelle $Q.\delta(t)$), appliquée sur toute l'étendue de la

plaque étudiée. Cette dernière étant opaque, toute l'énergie apporté par l'excitation est strictement absorbé en surface. Soient k, ρ, C_p, a et b, respectivement, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique du matériau constitutif de la plaque étudiée (ces propriétés thermophysiques sont supposées constantes avec la température et au cours du temps).

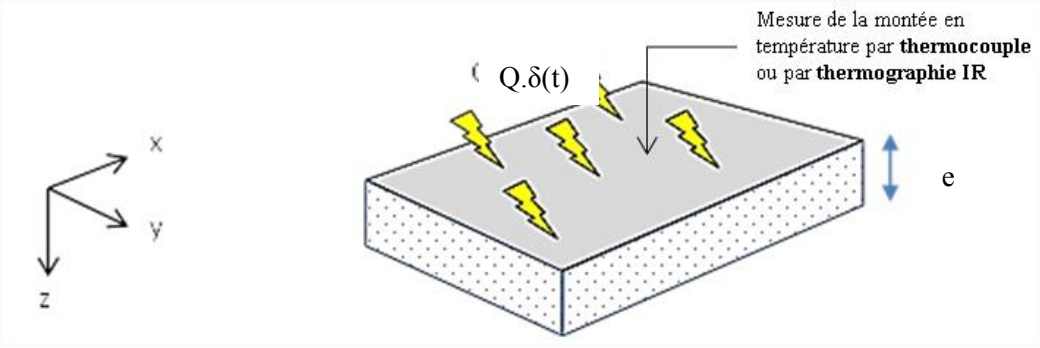


Figure 190 : Configuration expérimentale

L'échantillon est initialement en équilibre thermique avec son environnement dont la température est prise égale à 0°C. Enfin, le modèle néglige les échanges convecto-radiatifs entre l'échantillon é udié et l'environnement. La traduction mathé atique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{a}\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = 0 \tag{3.32}$$

Avec les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{cases} x = 0 & -\lambda . \dfrac{\partial T(0,t)}{\partial x} = Q.\delta(t) \\ x = e & -\lambda . \dfrac{\partial T(e,t)}{\partial x} = 0 \\ t = 0 & T(x,0) = 0 \end{cases} \tag{3.33}$$

Inspirons-nous maintenant du formalisme des quadripôles thermiques [164], [165] pour résoudre ce problème. Cette méthode consiste à appliquer une transformé de Laplace à l'expression de la tempé ature sur une expression matricielle reliant la face avant et la face arrière de l'é hantillon modé isé, ce mode de calcul nous amène à 'expression matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \theta(0,p) \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) & \dfrac{Sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{\lambda S\sqrt{\frac{p}{a}}} \\ \lambda S\sqrt{\frac{p}{a}}\, sh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) & Cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \theta(e,p) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

En développant ce système matriciel, nous obtenons, exprimé dans l'espace de Laplace, l'expression de la tempé ature surfacique de l'échantillon étudié :

$$\theta(0,p) = \frac{Q}{\lambda S\sqrt{\frac{p}{d}}}\frac{Cosh\left(\sqrt{\frac{p}{d}}e\right)}{Sinh\left(\sqrt{\frac{p}{d}}e\right)} \tag{3.35}$$

Plaçons-nous maintenant aux tout premiers instants de l'analyse, c'est-à-dire lorsque $t \to 0$. Dans l'espace de Laplace, cette condition se traduit par $p \to \infty$. L'expression (3.35) devient alors :

$$\underset{p\to\infty}{\theta(0,p)} \approx \frac{Q}{\lambda.\sqrt{\frac{1}{a}}.\sqrt{p}} = \frac{Q}{\sqrt{\lambda.\rho.c}.\sqrt{p}} = \frac{Q}{\sqrt{b}.\sqrt{p}} \tag{3.36}$$

Soit après retour dans l'espace temporel :

$$\underset{t\to 0}{T(0,t)} \approx \frac{Q}{\sqrt{\lambda.\rho.c}\sqrt{\pi.t}} = \frac{Q}{b.\sqrt{\pi.t}} \tag{3.37}$$

Cette dernière expression montre que l'évolution temporelle de la température aux tout premiers instants de l'expérience photothermique est liée de façon simple à l'effusivité thermique du matériau étudié (*b*). Cela peut donc permettre de l'estimer. Se pose toutefois le problème de la connaissance de l'énergie déposée *Q*. La formule (3.37) montre qu'il faut la connaitre avec précision pour aboutir à une bonne estimation de l'effusivité thermique recherchée. Dans notre cas d'étude, nous avons choisi de l'estimer à l'aide d'un matériau de référence dont les propriétés radiatives sont identiques à celles de l'échantillon étudié (échantillon inconnu) et dont l'effusivité thermique était parfaitement connue. Dans ces conditions, nous aboutissons au système suivant :

$$\begin{cases} T_{ref}(0,t) \approx \dfrac{Q}{b_{ref}\sqrt{\pi.t}} \\ T_{inc}(0,t) \approx \dfrac{Q}{b_{inc}\sqrt{\pi.t}} \end{cases} \tag{3.38}$$

Par division des deux expressions, il est aisé d'obtenir à partir de (3.38) l'expression de l'effusivité th rmique de l'échantillon inconnu :

$$b_{inc} \approx \frac{T_{ref}(0,t)}{T_{inc}(0,t)}.b_{ref} \tag{3.39}$$

Cette méthode est désignée dans la littérature sous le terme de « Méthode des comparaisons », l'expression (3.39) suppose que les deux échantillons reçoivent exactement la me^ e densité d'énergie Q (appelé aussi *fluence*) or il n'en est pas toujours ainsi en pratique. Le cas le plus fréqu nt apparait lorsque l'é hantillon de réfé ence et l'é hantillon é udié n'ont pas la me^ e surface, autre possibilité les deux é hantillons n'ont pas les mêmes absorptivités. Réécrivons le système (3.38) en tenant compte de ces facteurs. Nous savons que $Q = \frac{\alpha.E}{S}$, ce qui donne :

$$\begin{cases} T_{ref}(0,t) \approx \dfrac{\alpha_{ref}.E}{S_{ref}.b_{ref}.\sqrt{\pi.t}} \\ T_{inc}(0,t) \approx \dfrac{\alpha_{inc}.E}{S_{inc}.b_{inc}.\sqrt{\pi.t}} \end{cases} \quad (3.40)$$

Avec E = éne gie totale en [J], α = absorptivité t S = Surface en [m²].

En procédant de me e qu'en (3.39) nous avons l'expression gén rale suivante :

$$b_{inc} = \frac{T_{ref}(0,t)}{T_{inc}(0,t)}.\frac{\alpha_{inc}}{\alpha_{ref}}.\frac{S_{ref}}{S_{inc}}.b_{ref} \quad (3.41)$$

Lors de nos manipulations, nous veillerons à avoir des absorptivités identiques en peignant les échantillons $\left(\frac{\alpha_{inc}}{\alpha_{ref}} = 1\right)$, l'expression finale s'é rit :

$$b_{inc} = \frac{T_{ref}(0,t)}{T_{inc}(0,t)}.\frac{S_{ref}}{S_{inc}}.b_{ref} \quad (3.42)$$

NB : Un exemple de résolution de ce problème du mur plan par une autre méthode est présenté en Annexe I page 328.

16.2.1.2. Mode opératoire

163

Le modèle que nous venons de décrire ne prend pas en compte les pertes thermiques, de plus l'expression (3.37) suppose que nous placions à des temps courts ($t \to 0$), c'est-à-dire dans une configuration où l'é hantillon est vu comme semi-infini dans la direction z (en épaisseur), c'est ce qui explique que la solution trouvé ne dép nde pas de l'ép isseur e de l'é hantillon. Examinons cette expression et passons-la en logarithme, nous avons :

$$T(t) = \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}}$$

$$Log\left[T(t)\right] = Log(Q) - Log(b) - Log\left(\sqrt{\pi t}\right)$$

$$Log\left[T(t)\right] = Log(Q) - Log(b) - \frac{1}{2}\left(Log(\pi) + Log(t)\right)$$

Ce qui donne :

$$Log\left[T(t)\right] = \underbrace{Log(Q) - Log(b) - \frac{1}{2}Log(\pi)}_{A} - \frac{1}{2}Log(t)$$

$$Log\left[T(t)\right] = A - \frac{1}{2}Log(t)$$

Ainsi lorsque cette expression est représentée en Log-Log nous obtenons une droite décroissante, de pente -½, ce comportement est pré u par la littérature dans le cas d'un solide semi-infini soumis à une excitation flash. En pratique il suffit d'appliquer l'expression (3.42) dans les limites temporelles du domaine de validité du modèle de Parker caractérisé par une pente -1/2 en représentation log-log. Dans la pratique nous avons souvent une rupture de pente qui apparait, cette rupture de pente est la manifestation des pertes qui s'é ablissent en face arrière dans le cas d'é hantillons minces, le mode e qui décrit ce comportement sort du cadre de ce travail.

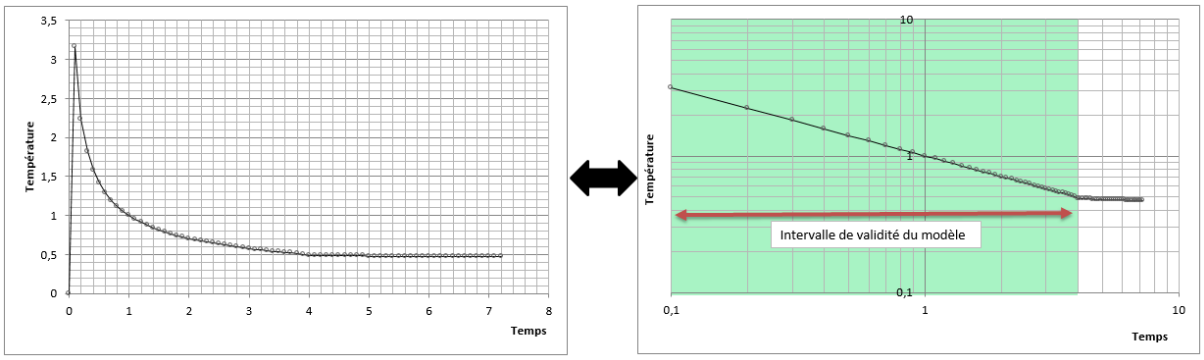


Figure 191 : Réponse en température face avant et passage en représentation Log-Log

16.2.2. Simulation théorique

Procédons à une simulation numérique afin de vérifier le modèle théorique présenté. Nous allons modéliser la réponse thermique en face avant de deux échantillons de surfaces identiques (PVC et pierre calcaire) soumis à une excitation flash afin d'estimer la valeur d'effusivité d'une pierre calcaire à partir d'un é hantillon en PVC dont l'effusivité est rép té connue (échantillon de référence). Partons des grandeurs théoriques suivantes :

Tableau 39 : propriétés de simulation

Matériau	Conductivité thermique k (W/m.K)	Capacité thermique C_p (J/kg.K)	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Épaisseur échantillon e (m)	Effusivité thermique théorique b (J.m^{-2}.K^{-1}.s$^{-½}$)
PVC	0,16	960	1101	0,015	408
Pierre calcaire	0,93	830	1375	0,015	1030

Voici les répo ses en tempé atures respectives obtenues à partir d'une densité d'én rgie Q de 1000 J/m² :

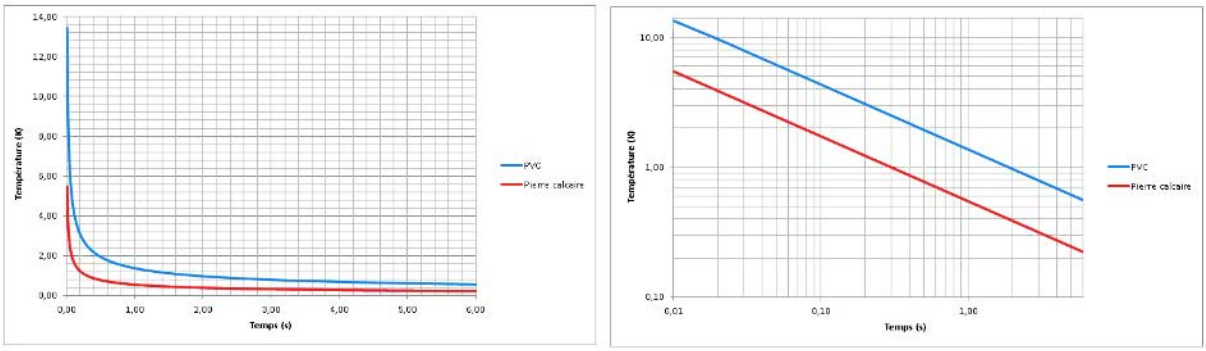


Figure 192 : Réponse en température de deux échantillons (PVC et pierre calcaire) en représentation ordinaire et Log-Log

Nous observons bien la décroissance en pente -½ des deux réponses thermiques en représentation Log-Log.

Dé erminons la valeur de l'effusivité thermique de la pierre calcaire en appliquant la relation (3.39) à chaque instant de l'expé ience photothermique, nous obtenons une valeur qui s'é ablit à 1022,1 J.m^{-2}.K^{-1}.s$^{-½}$, soit un écart relatif de -0,77 % avec la valeur théorique attendue.

Ce ré ultat dé ontre qu'il est donc possible d'estimer simplement l'effusivité d'un échantillon inconnue par comparaison de sa rép nse thermique avec celle d'un é hantillon de ré é ence.

16.2.3. Validation expérimentale

16.2.3.1. Dispositif

Le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'é ude est le syste e SAMMTHIR. Nous avons vu dans le chapitre II que ce dispositif était polyvalent et qu'il permettait d'utiliser un grand nombre de types de sources d'excitation. Pour cette é ude nous disposons d'un jeu de lampes flash (jusqu'à 4 lampes) de marque *Elinchrom Zoom pro*© associées à des générateurs *Digital 2400 RX* du même fabricant pouvant délivrer jusqu'à 2400 J pendant une fraction de temps de l'ordre de quelques millisecondes. Le dispositif d'acquisition a déjà é é décrit, il est composé d'une camé a à bolomè res onde longue de type FLIR SC 655 et d'une informatique d'acquisition et de post traitement des donné s. Le pilotage des sources s'effectue pour le moment en mode manuel, ce point a été inté ré à notre agenda d'amé iorations futures du syste e.

Figure 193 : Lampe flash

Figure 194 : Générateur Digital 2400 RX

Figure 195 : Dispositif expérimental et échantillons

16.2.3.2. Mesures absolues d'effusivité thermique

Intéressons-nous maintenant à deux échantillons rectangulaires de plâtre et essayons de déterminer leurs effusivité hermiques respectives à l'aide de cette mé hode.

a) Étude d'échantillons calibrés par le CERTES à l'aide du sipositif DICO

Le CERTES de Créteil nous a fournis une série de cinq échantillons de référence, ils ont été expertisés à l'aide de DICO (voir description du dispositif en annexe page 366). Cette série est composée d'un é hantillon de PVC, d'un échantillon de baké ite et trois é hantillons de différents types de nylon.

Le tableau ci-dessous récapitule leurs propriétés :

Tableau 40 : Résultats mesure de b à l'aide de DICO

Matériau	Dimensions (mm)	Épaisseur (mm)	Mesures de b obtenues avec DICO ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-½}$)
PVC référence	**42,13 × 42,14**	**10,39**	**408**
PVC (ech A)	40,00 × 40,00	2,95	345
Bakélite (ech B)	40,00 × 40,00	2,92	471
Nylon 1 (ech C)	40,00 × 40,00	3,00	358
Nylon 2 (ech D)	40,00 × 40,00	3,00	555
Nylon 3 (ech E)	40,00 × 40,00	3,01	611

Les cinq é hantillons ont é é disposés sur une surface isolante à proximité de l'é hantillon de ré é ence en PVC et soumis à une excitation flash à l'aide de quatre lampes (voir figures suivantes). La fréqu nce d'acquisition a é é fixé à 100 Hz. Le dépo illement a été effectué comme expliqué précédemment.

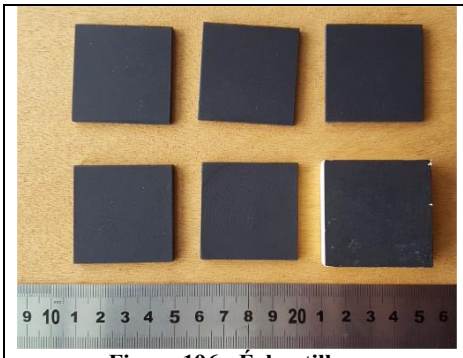


Figure 196 : Échantillons

Figure 197 : Dispositif

La figure ci-dessous montre les échantillons juste après le flash, nous pouvons noter que leurs signatures thermiques sont caractéristiques, il est donc possible de les identifier par ce moyen.

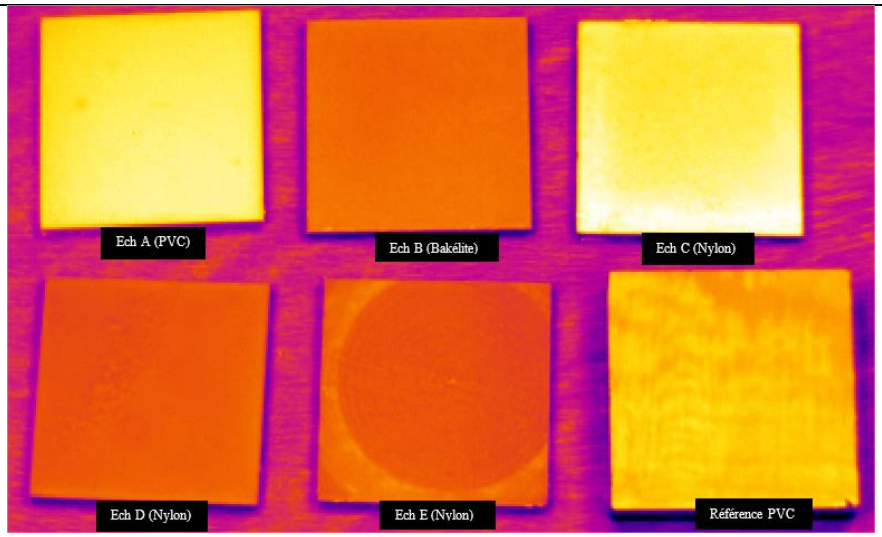


Figure 198 : Image thermique (après le flash)

Observons les résultats de ces mesures :

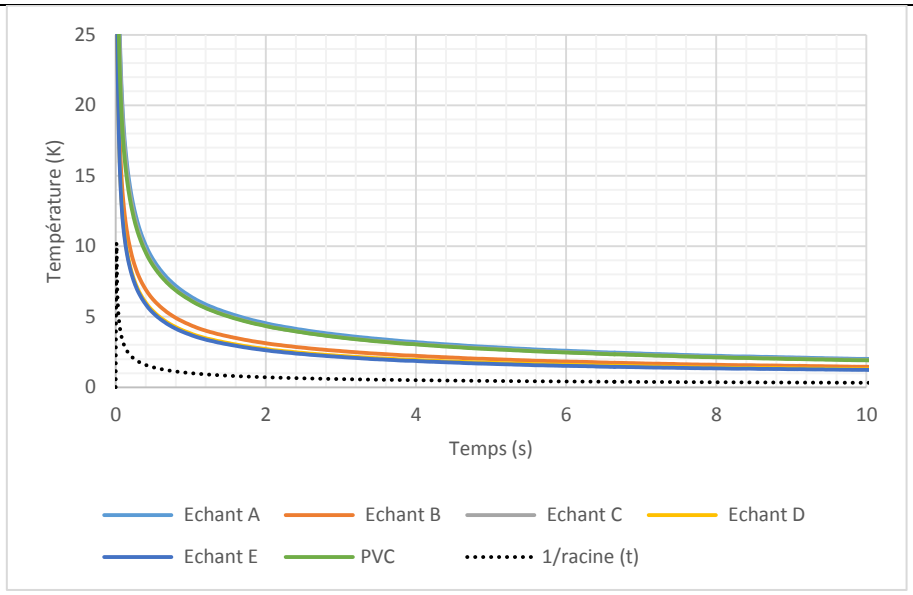


Figure 199 : Réponses en température

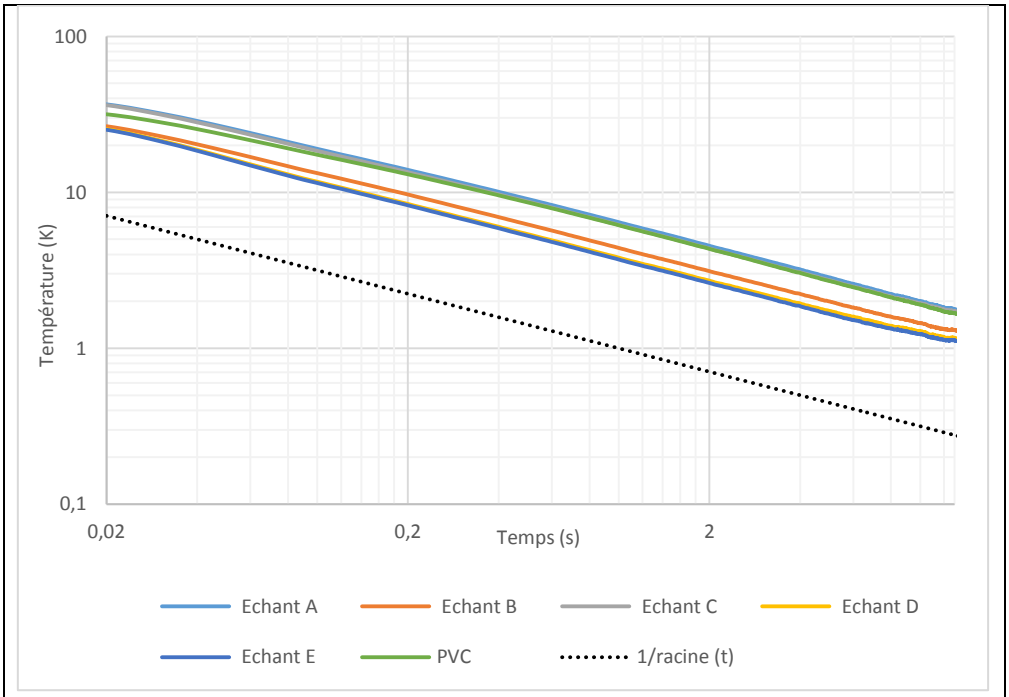


Figure 200 : Réponses en température (représentation Log-Log)

Le tableau suivant récapitule nos résultats de mesure :

Tableau 41 : Résultats mesures d'effusivité b, comparaison avec DICO

	b ech A	b ech B	b ech C	b ech D	b ech E
b mesuré (S)	388,1	559,1	404,4	643,3	668,3
Incertitude (SI)	4,0	21,5	4,4	28,3	17,5
b référence DICO (SI)	345	471	358	555	611
Incertitude DICO (SI)	25	22	21	28	45
Écart relatif %	12,5%	18,7%	13,0%	15,9%	9,4%

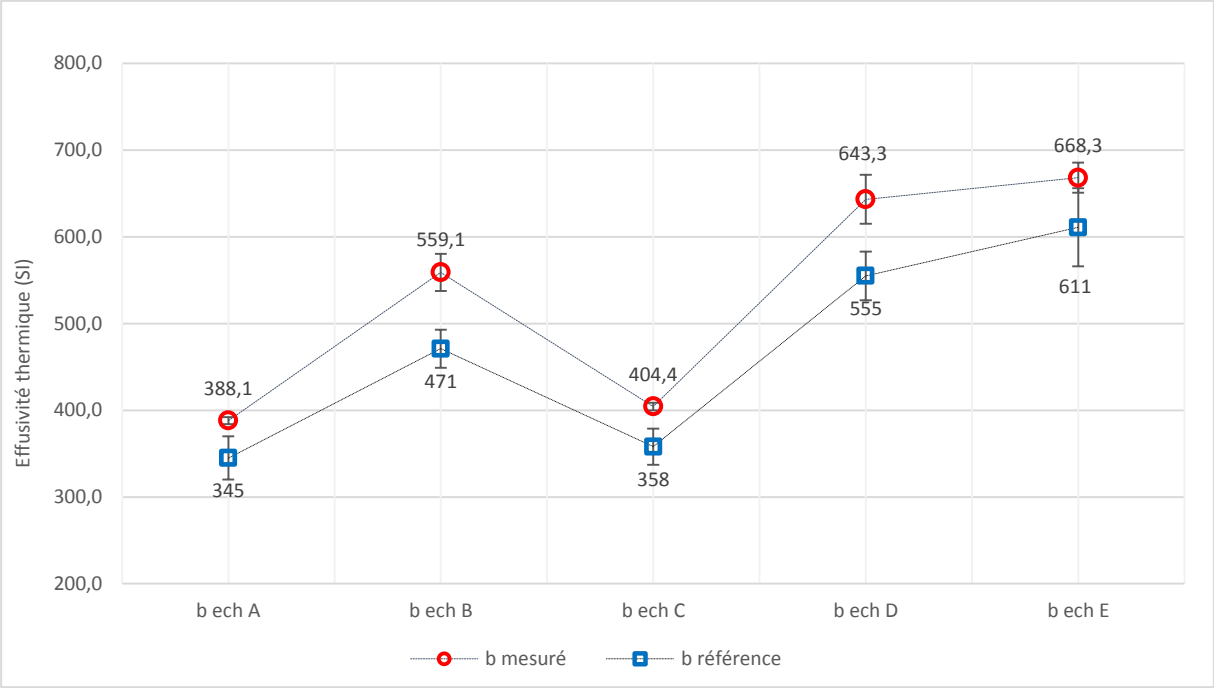


Figure 201 : Comparaison valeurs d'effusivité DICO et valeurs mesurées

Ces résultats sont proche des valeurs obtenues avec Dico, les écarts relatifs avec ces valeurs de référence oscillent entre 10 et 20 %, nous retrouvons donc bien les ordres de grandeur attendus. De plus les résultats évoluent de façon identique avec les deux méthodes de mesure ce qui se traduit par un parallélisme dans l'é olution des mesures avec SAMMTHIR et DICO, ce qui laisse supposer l'existence d'une erreur syste atique pouvant provenir soit d'un proble e au niveau de l'é hantillon de référence en PVC – son effusivité supposée est-elle exacte ? Autre possibilité, l'une des deux mé hodes provoque un lé er biais de mesure. Ce biais n'est pas un proble e pour nos applications orientées terrain, car notre objectif n'est pas d'effectuer des mesures de qualité métrologique, mais des comparer des échantillons entre eux, notre intérêt se porte essentiellement sur les valeurs relatives d'effusivité thermique plus que sur leurs valeurs absolues. Nous allons voir d'ailleurs qu'il est plus pertinent de s'intéresser à es variations relatives de propri és qu'à leurs valeurs absolues.

b) Cas de deux échantillons de plâtre dont les propriétés sont proches d'une peinture murale

Nous avons deux é hantillons rectangulaires préalablement recouverts d'une couche de peinture noire, de dimensions 4,4 × 4,4 cm et d'é aisseur 7.7 mm et 4,15 mm. L'effusivité thermique de ces é hantillons a été mesuré à l'aide du dispositif DICO[18] du laboratoire CERTES de l'université de Créteil. Nous avons utilisé comme échantillon de référence un bloc de PVC peint lui aussi en noir, de dimensions suivantes : 4cm de côté et 10 mm d'ép isseur. L'estimation des effusivités thermiques fournie par le système **DICO** pour ces échantillons figure dans le tableau suivant :

Tableau 42 : Résultats de mesure d'effusivité sur des échantillons de plâtre (DICO)

	PVC	**Plâtre 7,7 mm**	**Plâtre 4,15 mm**
Effusivité thermique ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	408	756	801
Incertitude ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	± 22	/	/

[18] DICO : Acronyme de « **DI**ffusivité **CO**nductivité », ce dispositif permet d'effectuer des mesures conjugué s de ces deux grandeurs et d'obtenir ainsi l'effusivité thermique (voir annexe I pour une description plus précise di dispositif)

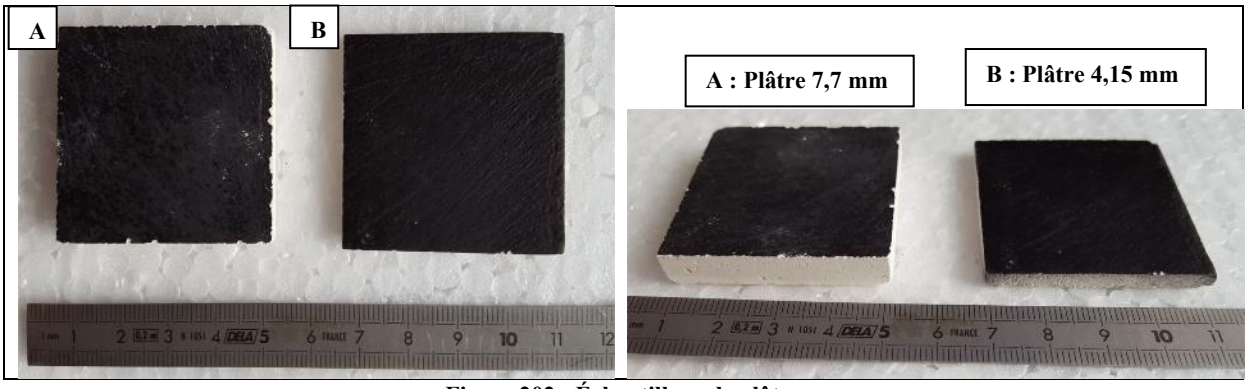


Figure 202 : Échantillons de plâtre

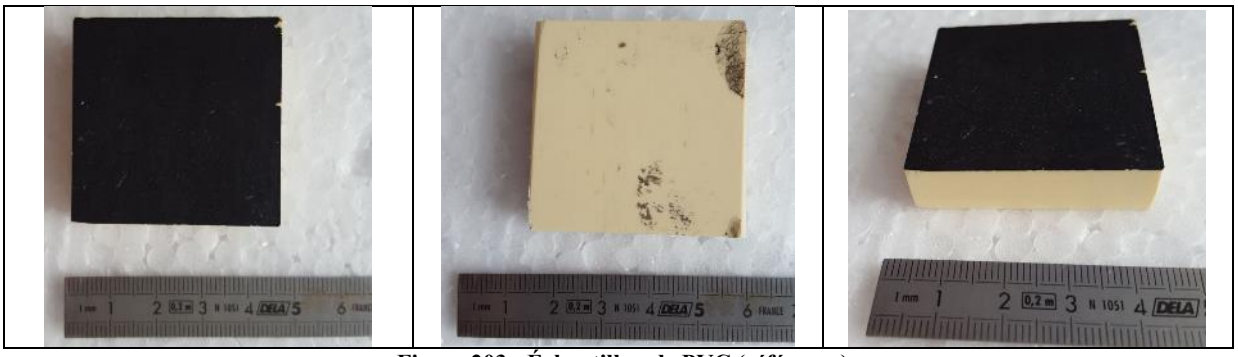


Figure 203 : Échantillon de PVC (référence)

Les échantillons ont été mis côté à côté avec le bloc de PVC et ont été soumis à une impulsion flash, la mesure a été effectuée avec un cadencement de 200 Hz. La figure suivante représente les réponses en température des trois échantillons en représentation classique et en Log-Log :

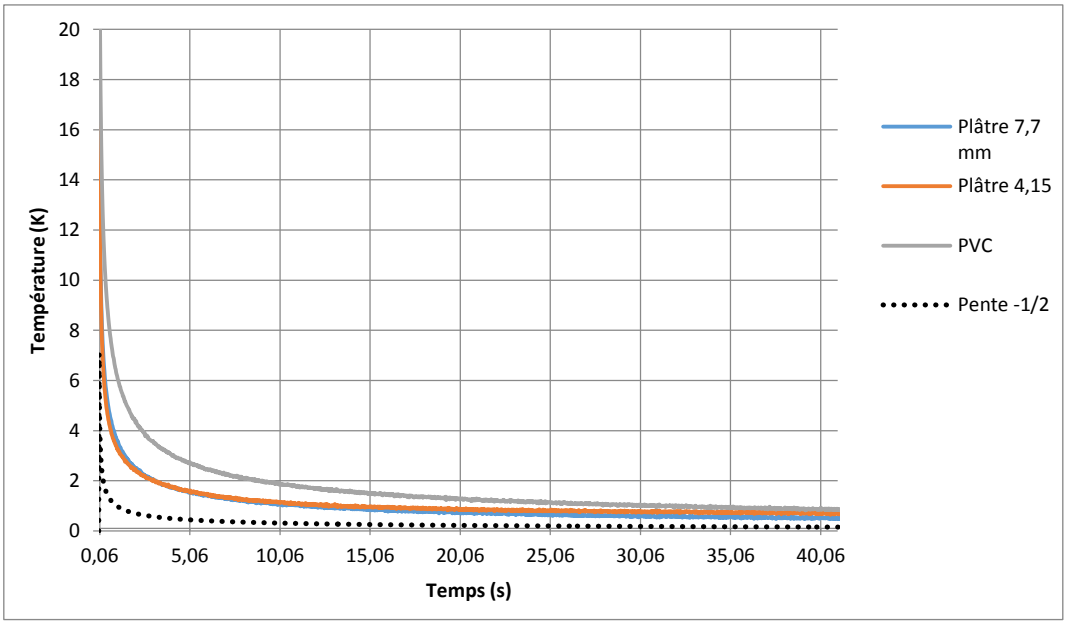


Figure 204 : Réponses en température (représentation classique)

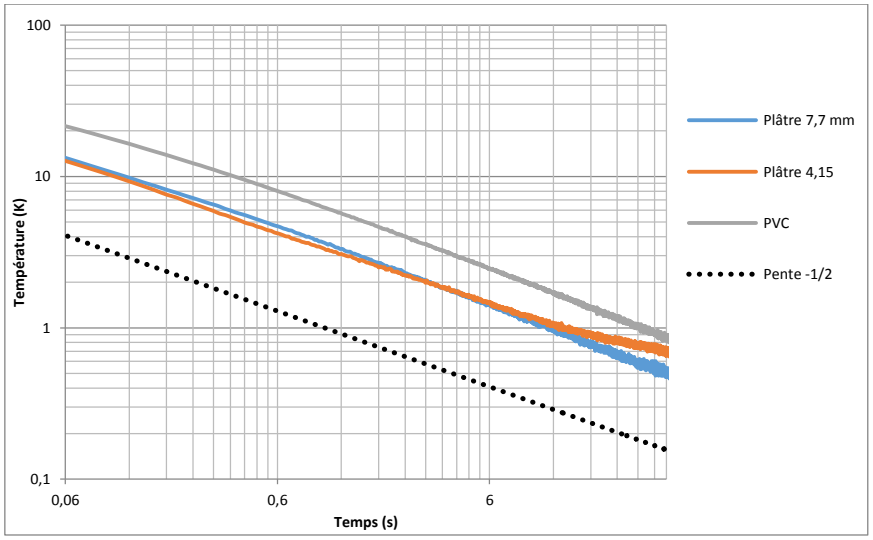


Figure 205: Réponses en température (représentation Log-Log)

Tableau 43 : Mesure d'éffusivité sur deux échantillons de plâtre (méthode phothermique)

Matériau	Plâtre 7,7 mm	Plâtre 4,15 mm
Effusivité de référence ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	756	801
Effusivité mesurée ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	794,8	942,9
Écart relatif (%)	5,1 %	17,7 %

Les résultats obtenus sur ces deux échantillons sont proches des ordres de grandeur attendus. Le plâtre 4,15 mm donne un résultat un peu plus éloigné, mais cela peut s'expliquer par la nature même des échantillons, particulie ement sensibles à l'humidité.

16.2.3.3. Mesures relatives d'effusivité thermique

La présence d'un é hantillon de ré é ence peut poser des difficultés sur le plan pratique. Le modèle théorique suppose que l'échantillon é udié soit soumis au même dépô d'én rgie que l'échantillon de ré érence, ce qui impose une condition en termes d'absorptivité et d'exposition des deux échantillons. Ces deux conditions ne sont pas toujours aisées à réunir en pratique et ces diffé ences engendrent l'incertitude sur la mesure de l'effusivité, c'est la raison pour laquelle il est souvent préfé able de travailler en relatif et de s'intéresser aux variations relatives d'effusivité sur un échantillon unique et non aux valeurs absolues de celle-ci, l'intérêt pour nous est d'é iter le recours à un deuxiè e é hantillon et de ré ler le problè e de l'absorptivité puisque nous avons un seul é hantillon avec une absorptivité rép té uniforme. Cette approche a aussi l'avantage de faciliter la gestion du problè e de l'exposition énergé ique. Ainsi nous n'avons qu'un seul échantillon d'absorptivité uniforme et nous aurons à considé er un point de cet é hantillon comme ré é ence à 1 de l'effusivité ce qui permet de mesurer au niveau de cet échantillon des variations spatiales d'effusivité relatives sur cet é hantillon.

La connaissance de l'effusivité absolue ne présente pas d'intérêt en soi pour nos applications. Ainsi nous dé inissons l'effusivité elative noté $b*$:

$$b_{inc}^{*} = \frac{T_{ref}}{T_{inc}} \tag{3.43}$$

L'effusivité d'un point inconnu se détermine au temps court à partir de la relation précédente en procédant de même que pour le calcul de l'effusivité absolue : comparaison des températures sur l'étendue temporelle en pente -1/2 (en représentation log-log). Nous verrons dans le chapitre IV consacré aux infiltrations de sels, plusieurs exemples de mesure d'effusivité relative.

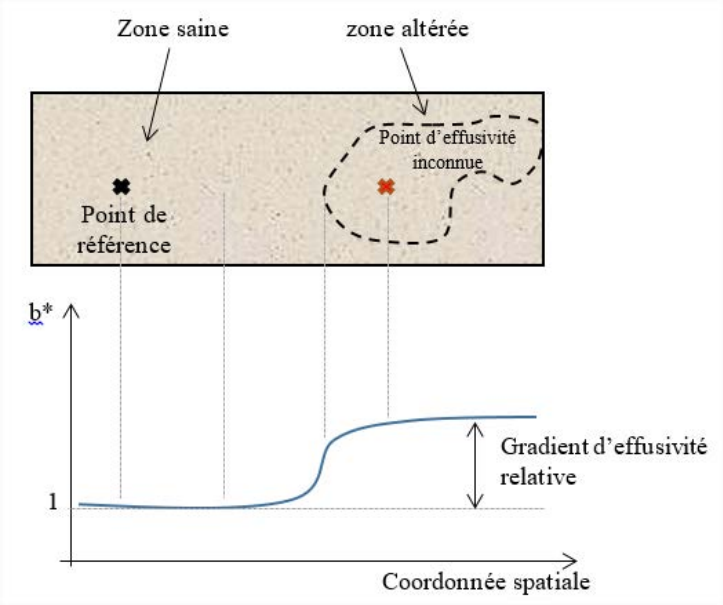


Figure 206 : Principe de détermination de l'effusivité relative

171

16.3. Nouvelle méthode : approche locale

Nous avons dé ontré qu'il é ait possible d'estimer l'effusivité thermique à l'aide de mé hodes photothermique avec des moyens simples. La méthode que nous venons de présenter est une méthode surfacique qui rompt avec l'esprit du chapitre, nous avons dé ontré dans les parties 15.3 à 15.7 qu'il est possible à partir d'une excitation locale de remonter à la diffusivité thermique, pouvons-nous envisager de faire de me e avec l'effusivité thermique ? Est-il possible d'envisager qu'on puisse accéder aux deux grandeurs au moyen d'une excitation locale ? Nous savons que l'approche locale est de nature 3 D alors que l'approche surfacique aux temps courts est de type 1 D, comment concilier ces deux approches afin de passer de l'une à 'autre ?

Nous proposons de cette partie de l'exposé de dé rire les étapes théoriques puis expérimentales permettant de rapprocher l'expression (3.21) de l'expression (3.37).

16.3.1. Considérations générales

Reprenons les expressions décrivant la réponse en température – en face avant – d'un échantillon soumis à une excitation flash locale et surfacique :

	Solution 1D (surfacique)	**Solution 3D (local)**
Réponse en température en face avant d'un échantillon soumis à un δt de Dirac	$T(0,t) \underset{t\to 0}{\approx} \frac{Q}{b.\sqrt{\pi.t}}$	$T(r,0,t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} . \frac{1}{R^2+8at} . \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right)$

Examinons pour commencer les deux expressions : nous observons qu'elles pré entent des similarité , l'expression 2 est identique à la solution 1D à d ux élé ents près :

◊ Présence du facteur $\frac{2}{\pi}.\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right)$, sans dimension.

◊ Présence du terme correctif $\frac{1}{R^2+8at}$ (en m^{-2})

Ce terme correctif a pour effet de donner à la grandeur Q, la dimension d'une énergie et non d'une densité d'é ergie. La configuration 3D pour e re pertinente doit inté rer la totalité du flux sur l'espace, ce qui ne présente pas d'inté e dans le cas d'une conduction unidirectionnelle (1D) identique en tout point de la surface dans une direction donnée. Pour être plus clair nous pouvons dire que ces diffé ences s'expliquent par le fait qu'en local la tempé ature en un point dé end de la totalité de l'é ergie reçue par la surface (➔ Q total) alors que dans le cas du 1D cette température ne dépend que de l'é ergie reçu en ce point (➔ densité d'énergie). Ces considérations gén rales sur l'architecture des deux équations doivent nous amener à imaginer les modifications expérimentales pouvant réduire la contribution du facteur et du terme de correction de la solution 3D. Nous allons pour cela étudier certaines évolutions en termes de configuration expérimentale afin de voir leur influence sur la solution 3D.

On peut tout d'abord remarquer que ces 2 termes dép ndent de R – le rayon d'excitation – et du temps t, ces 2 termes évoluent en raison inverse de R, nous pouvons supposer qu'une augmentation de ce rayon aura pour effet de diminuer le poids de ces 2 termes dans l'expression de la solution 3D, examinons tout cela de plus pre à 'aide d'une mode isation.

16.3.2. Approche au moyen d'un simulation numérique

Nous avons retenu les conditions de simulation suivantes :

Tableau 44 : Conditions de simulations

Paramètres généraux	
Énergie totale (J)	100
Pas de temps (s)	0.1
Diffusivité thermique a (m^2/s)	$8{,}15.10^{-7}$
Effusivité thermique b ($J{\cdot}K^{-1}{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^{-1/2}$)	1030

Excitation surfacique		Excitation locale	
Densité 'énergie (J/m^2)	Variable selon R, de 8,106 J/m^2 à 2.104 J/m^2.	Rayon d'excitation R (m)	Variable, de 2 mm à 4 cm

La repré entation s'effectue en tempé ature normalisée pour des raisons de compatibilité d'unité entre le 1D et le 3D. Examinons les deux types de ré onses selon le temps pour un rayon d'excitation donné – dans ce cas précis, nous avons R = 4 cm :

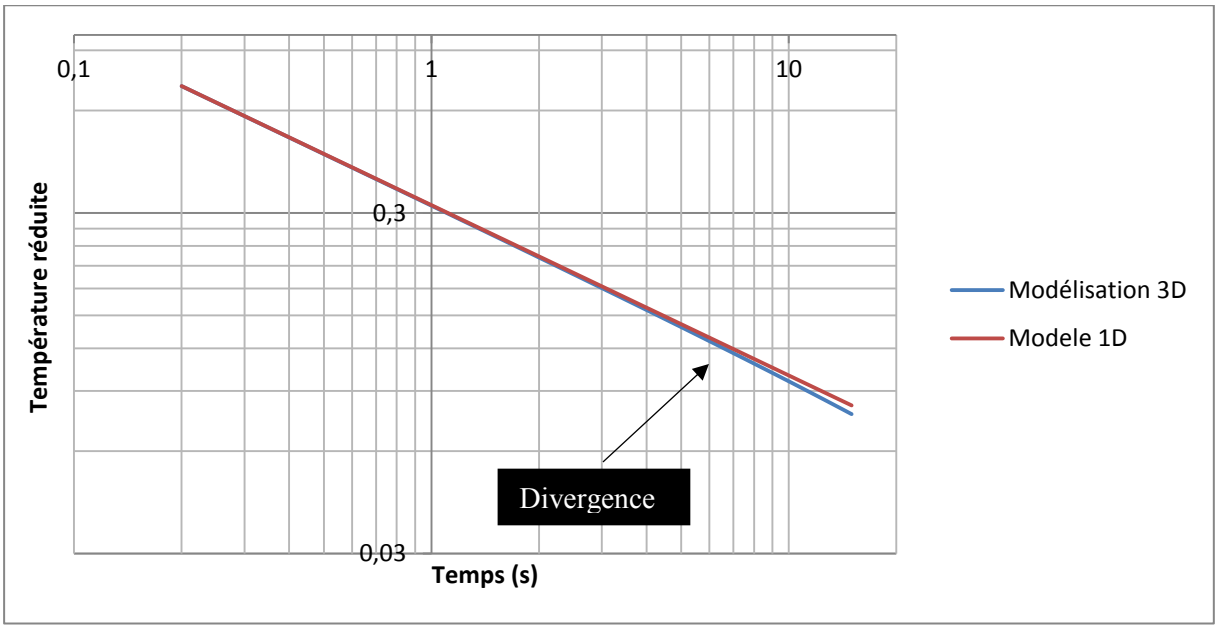


Figure 207 : Comparaison modèles 1D et 3D pour un rayon donné (représentation Log-Log)

Le graphique montre que les évolutions pour les deux modèles sont identiques aux temps courts, mais une divergence est observé au bout d'une certaine duré (manifestation des effets 3D).

Observons l'effet de la variation du rayon sur le comportement de la répo se : La Figure 208 montre que cette divergence entre les 2 modèles évolue lorsque le rayon change, la Figure 209 représente cette évolution. Nous pouvons dire à la vue de ces résultats que la conformité du modèle 3D à une é olution 1D augmente avec le rayon d'excitation et voit donc apparaitre une divergence entre les deux comportements d'autant plus tardive que ce rayon est important, exemple : lorsque l'on passe le rayon d'excitation au-delà de 2 cm cette évolution du temps de stabilité du modèle augmente rapidement. Ce résultat nous permet de tirer un certain nombre de conclusions pratiques : Pour nous rapprocher d'une configuration 1D il faut augmenter le rayon d'excitation et observer le phéno ène aux temps courts, cette dernière remarque est compatible avec ce que nous savons de l'effusivité thermique et de sa manifestation aux premiers instants de l'expé ience photothermique.

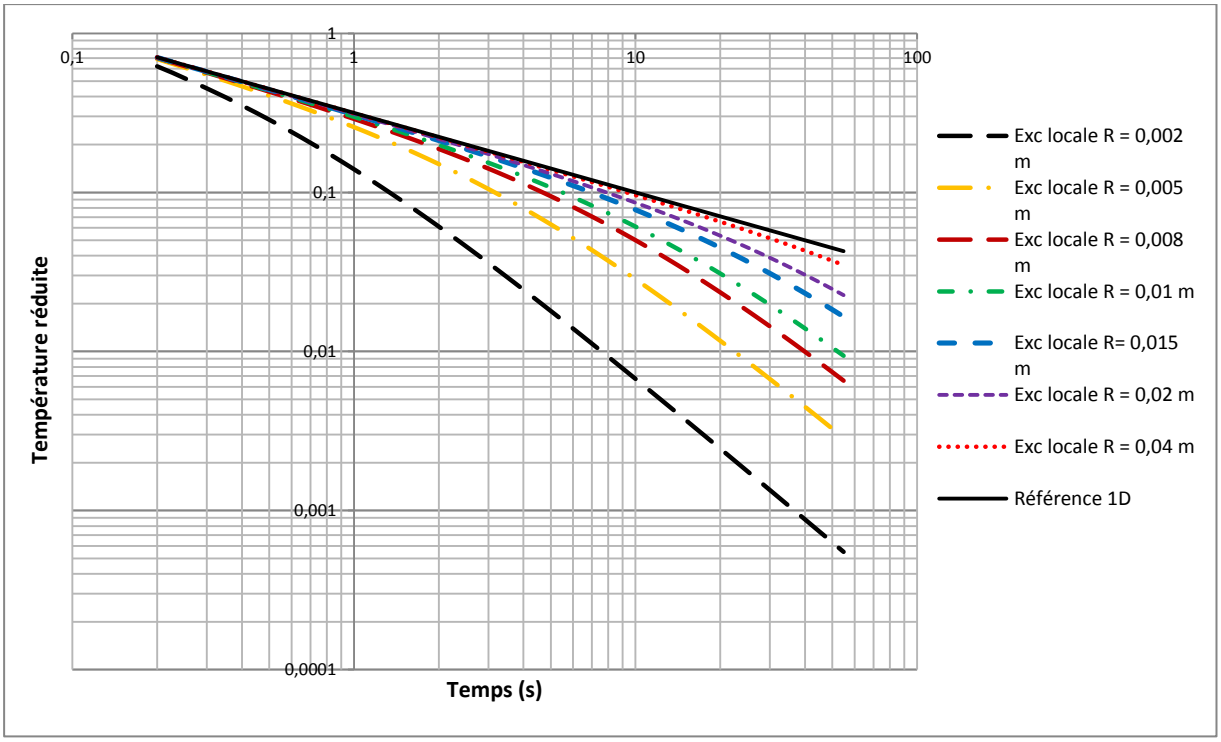


Figure 208 : Comparaison modèles 1D et 3D avec prise en compte de l'influence du rayon (représentation Log-Log)

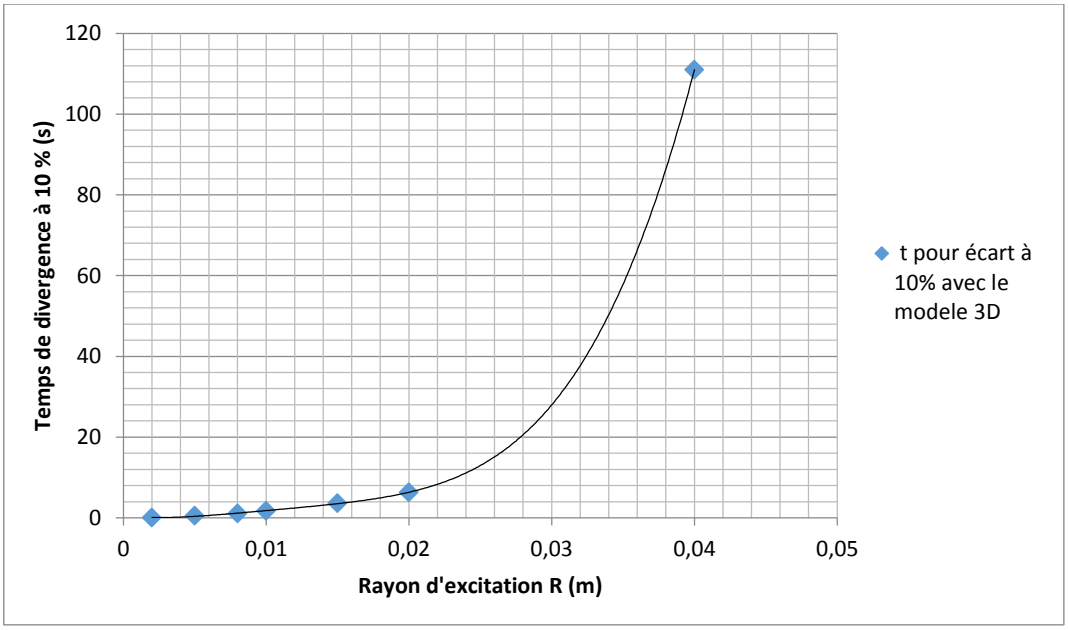


Figure 209 : Évolution de la divergence des modèles 1D et 3D avec l'augmentation du rayon d'excitation

Tentons maintenant de démontrer ces observations par le calcul. Que pouvons-nous dire de l'expression suivante du champ de tempé ature en local ?

$$T(r,0,t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2+8at} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2+8at}\right)$$

Nous décrirons deux approches différentes permettant de ramener ce problème à un problème 1D.

16.3.2.1.Approche ponctuelle

Si nous appliquons les observations que nous avons faites précédemment, le terme $\frac{1}{R^2+8at}$ peut être ramené à une constante $\frac{1}{R^2}$ si nous travaillons avec des valeurs de R importantes et à des temps courts ce qui rend négligeable le produit $8at$.

L'expression peut ainsi se simplifier :

$$T(r,0,t)=\frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2}.\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \tag{3.44}$$

Lorsque $r\to 0$ nous avons $\exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right)\to 1$, ce qui donne :

$$T(0,0,t)=\frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}}.\frac{1}{R^2} \tag{3.45}$$

Cette expression est similaire à l'expression 1D d'un é hauffement surfacique si on pose $Q'=\frac{2Q}{\pi R^2}$

On obtient alors :

$$T(t)=\frac{Q'}{b\sqrt{\pi t}} \tag{3.46}$$

Ainsi en se plaçant au plus prè du centre du spot d'excitation et aux premiers instants il est possible d'approcher un comportement 1D, cette condition est d'autant plus simple à reproduire que le rayon d'excitation R est important. Il est ainsi possible de dé erminer l'effusivité b d'un é hantillon en comparant les répon es en tempé ature en face avant d'un é hantillon inconnu et d'un échantillon de ré é ence au moyen d'une excitation localisée.
Cette méthode comporte un inconvénient sur le plan pratique: un rapport signal sur bruit défavorable. Ceci s'explique simplement par le fait qu'on ne prend en compte qu'une partie de la puissance excitatrice – celle du centre – sans tenir compte de la puissance déposée en périphérie, la solution envisagé est d'inté rer la totalité du signal sur l'é endue spatiale impacté par la perturbation. On observe que lorsqu'on moyenne sur une zone les températures d'une perturbation 3D cela éq ivaut à un plan chaud se comportant selon un mode de diffusion 1D. Essayons de mettre en œuvre ce principe à ravers une mé hode que nous qualifierons d' « approche intégrale ».

16.3.2.2.Approche intégrale ou étendue

En pratique une moyenne spatiale peut être assimilée à une somme, ce qui revient à procéder à une inté ration sur l'espace des diffé entes contributions. L'inté ration sur la totalité de la surface excitée est pertinente à double titre : elle permet d'obtenir une bonne réjection du bruit et un rapport signal sur bruit favorable et elle nous rapproche d'un comportement 1D permettant d'estimer simplement l'effusivité hermique par la mise en œuvre de la mé hode des comparaisons.

Une simulation numérique de ce problème nous a permis de dé ontrer qu'il é ait possible d'obtenir une bonne estimation de l'effusivité thermique b en inté rant sur une zone pé iphé ique autour du spot suffisamment étendu :

Cette simulation porte sur une plaque de plâtre d'ép isseur 1 mm et de rayon 30 mm, d'effusivité **604,3 $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$**. Cette plaque a é é soumise à un signal d'excitation de 20 ms de type gaussien spatialement et d'une puissance de 0,01 W.

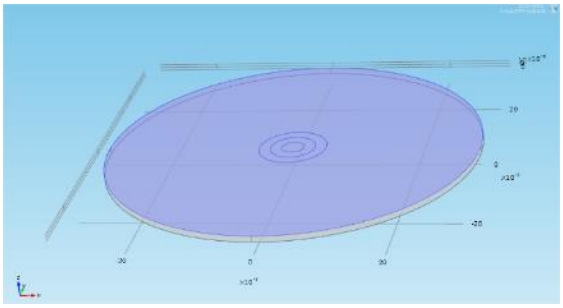


Figure 210 : Géométrie

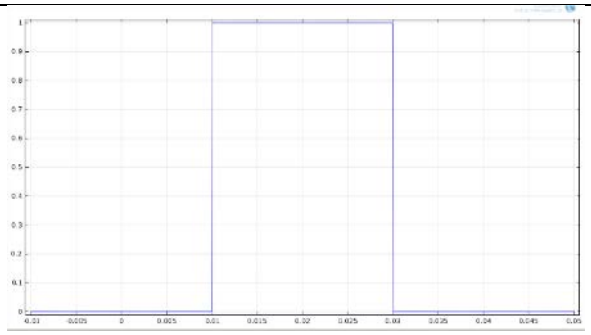


Figure 211 : Modulation temporelle

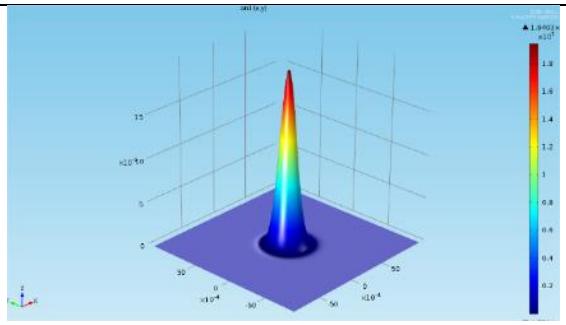


Figure 212 : Modulation spatiale

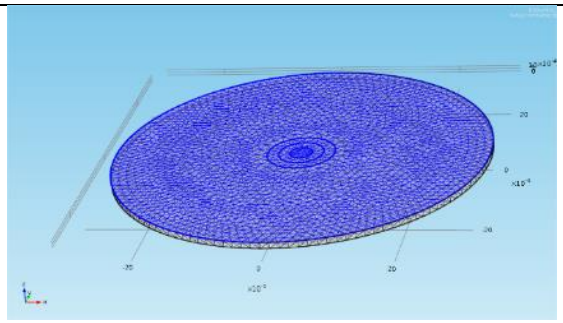


Figure 213 : Maillage

Les paramè res d'acquisition sont les suivants :

◊ Pas de temps :5 ms
◊ Duré d'observation : 5 s

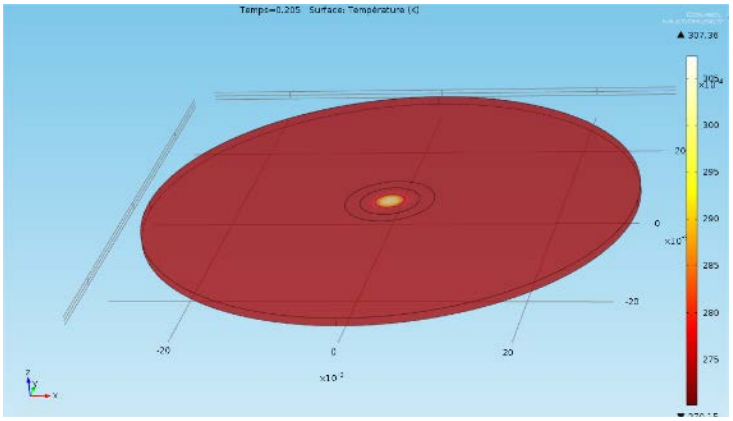


Figure 214 : Résultat de modélisation

La Figure 215 représente les ré onses en tempé ature avec les étendues d'inté ration suivantes :

◊ 1 fois le rayon d'excitation
◊ 2 fois le rayon d'excitation
◊ 3fois le rayon d'excitation

Nous effectuons une moyenne des températures sur des différentes étendues et nous calculons l'effusivité partir de l'é olution de ces moyennes au cours du temps.

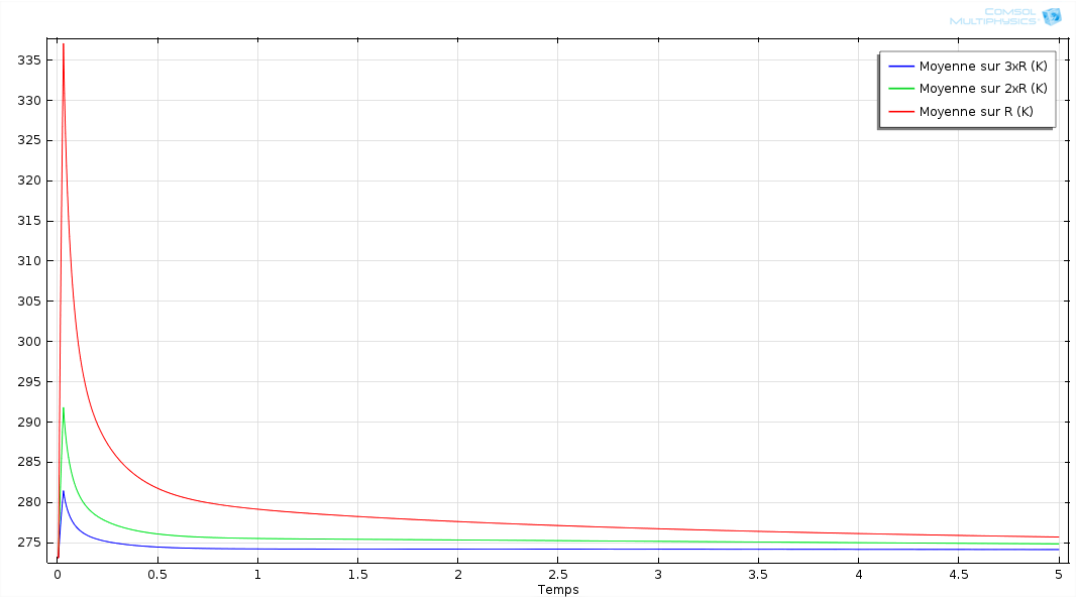


Figure 215 : Réponses moyennes en température T(t) sur différentes étendues d'intégration

Voici les évolutions en représentation Log-Log pour les différentes é endues d'inté ration :

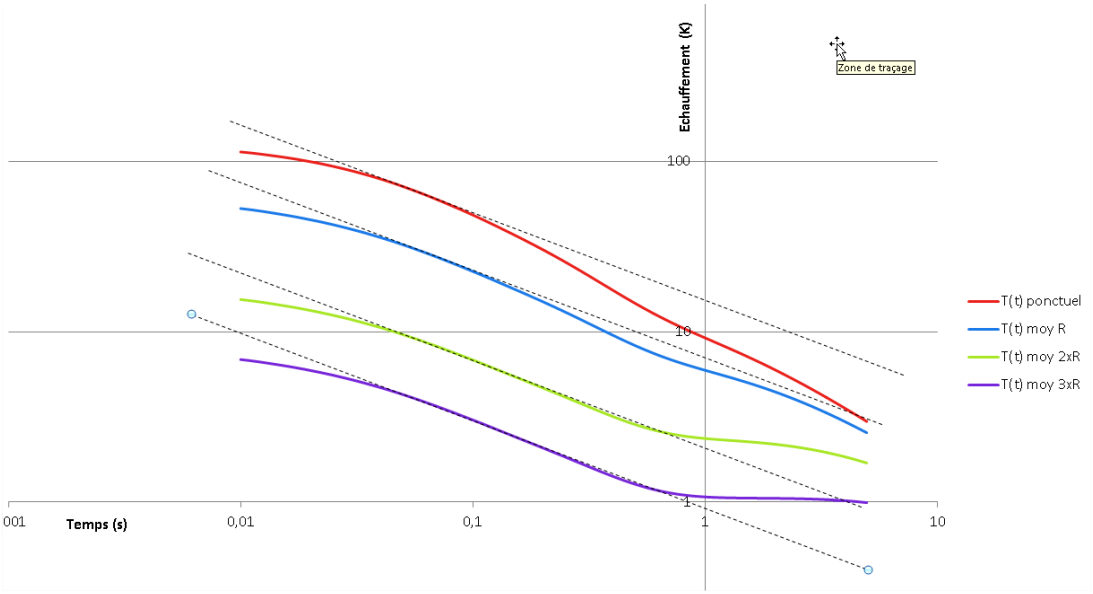


Figure 216 : Représentation Log-Log de l'évolution de T(t) pour différentes étendues d'intégration

Le tableau suivant contient les valeurs d'effusivité calculé à partir des courbes des figures précédentes :

Tableau 45 : Résultats de simulation (passage local à surfacique)

Étendue d'intégration	Valeur b mesurée (SI)	Écart relatif (%)
Ponctuel	38,4	-93,6%
b sur R	84,2	-86,1%
b sur 2×R	282,4	-53,3%
b sur 3×R	636,9	5,4%
Référence	**604,3**	**/**

Nous pouvons remarquer en observant la Figure 216 que la longueur des étendues temporelles exploitables pour le calcul de b augmente avec la taille de la zone d'inté ration, par contre le niveau du signal diminue lorsque l'étendue d'inté ration augmente ce qui en pratique se traduira par une baisse du rapport signal sur bruit…

Le tableau ci-dessus montre que les valeurs calculées d'effusivité se rapprochent des valeurs attendues lorsque nous augmentons la taille de la zone d'inté ration, les effets du bruit ne se font pas sentir ici, car il s'agit d'un calcul numé ique dans lequel nous n'avons pas introduit ce paramè re.

Essayons maintenant de retrouver ces observations par le calcul :

Inté rons sur r l'expression locale du champ de tempé ature simplifié que nous venons de calculer (3.44), nous reprenons la méthode décrite en page 151 :

$$I(t) = \int T(r,0,t).dr = \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} . \frac{1}{R^2} \int exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right).dr$$

La solution est la suivante :

$$I(t) = \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} . \frac{1}{R^2} . \frac{1}{2} . \sqrt{\frac{\pi R^2}{2}} . erf\left(\frac{r\sqrt{2}}{R}\right) \tag{3.47}$$

Nous avons vu en page 149 qu'il était possible de négliger la fonction *erf* lorsqu'on inté re sur des valeurs de $r \geq 1,6R$, si nous passons le tout au carré on obtient :

$$I^2(t) = \frac{4Q^2}{b^2\pi^3 t} . \frac{1}{R^4} . \frac{1}{4} . \frac{\pi R^2}{2}$$

Ce qui donne après calcul :

$$I(t) = \frac{Q}{R\sqrt{2\pi}} . \frac{1}{b\sqrt{\pi t}} \tag{3.48}$$

Si on pose, $Q' = \frac{Q}{R\sqrt{2\pi}}$ nous avons :

$$I(t) = \frac{Q'}{b\sqrt{\pi t}} \tag{3.49}$$

Comme précédemment, en 16.3.2.1, nous retrouvons un comportement de type 1D (à un facteur prè). Nous venons de dé ontrer théoriquement qu'il est donc possible de dé erminer l'effusivité b à l'aide de la mé hode des comparaisons au moyen d'une excitation locale en procéd nt à une inté ration sur l'espace, on doit s'intéresser pour cela aux instants initiaux de l'expérience photothermique et régler la focalisation du laser de telle sorte à avoir un spot de dimension centimé rique et inté rer sur une zone assez large autour du spot (2 à 3 fois le rayon d'excitation, cf simulation précédente). Appelons ce mode de dépouillement « analyse intégrale » ou « analyse étendue ». Vérifions maintenant ces supputations à l'aide de vé ifications expé imentales.

16.3.3. Validation expérimentale

16.3.3.1. Dispositif

Le dispositif est constitué d'une potence supportant une camé a thermique, nous utiliserons la camé a SC 655. Cette camé a est positionnée à l'aplomb de l'é hantillon. L'é hantillon est soumis à une excitation laser provenant d'une source laser fibrée d'une puissance de 3 W émettant à 810 nm, ce laser est piloté par un ordinateur de mê e que la camé a. Le faisceau est dé ié sur l'échantillon au moyen d'un miroir. L'ensemble est synchronisé par une carte d'interfaçage National Instrument. L'acquisition peut se faire à 50, 100 et 200 Hz. Nous disposons aussi d'un jeu d'objectifs macro permettant d'augmenter la ré olution spatiale d'un facteur 5,8.

Figure 217 : Photos du dispositif

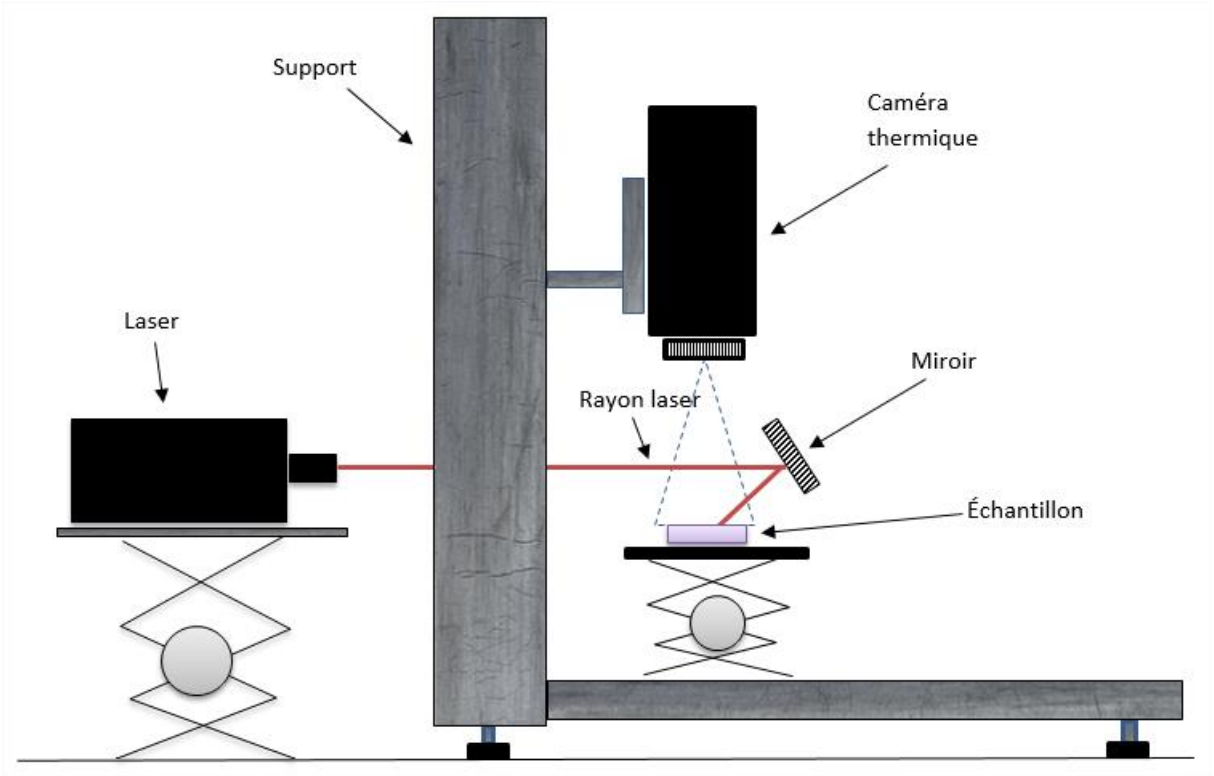


Figure 218 : Principe du dispositif

16.3.3.2. Mesure d'effusivité thermique absolue

a) Mesure sur des échantillons calibrés

Reprenons les échantillons étudiés en page 165 que nous a fourni le CERTES. Nous rappelons que cette série d'échantillons a é é étudié à l'aide du dispositif DICO et qu'elle comprend un échantillon de PVC et de bakélite et trois échantillons de nylon. Nous utiliserons comme précédemment un bloc de PVC comme é hantillon de réfé ence. Chaque é hantillon a été soumis à deux tirs d'une puissance de 3 W. L'acquisition a été fixé à 100 Hz. Le dépo illement a été effectué selon les deux modes de dépouillement que nous venons de décrire.

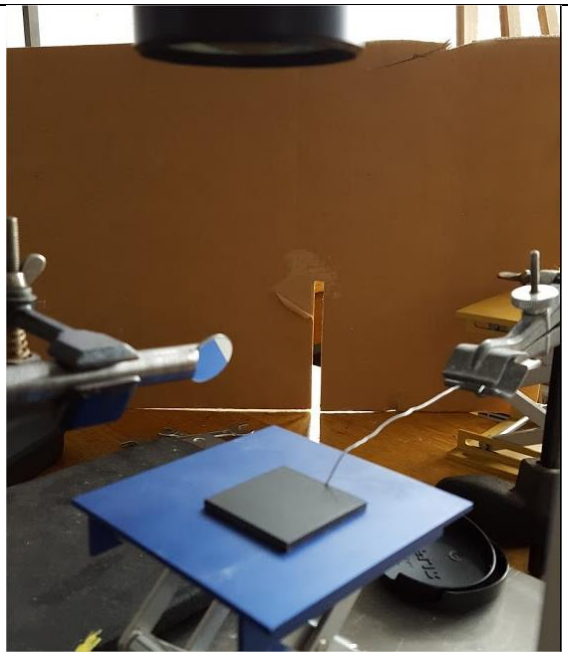


Figure 219 : Échantillon en place

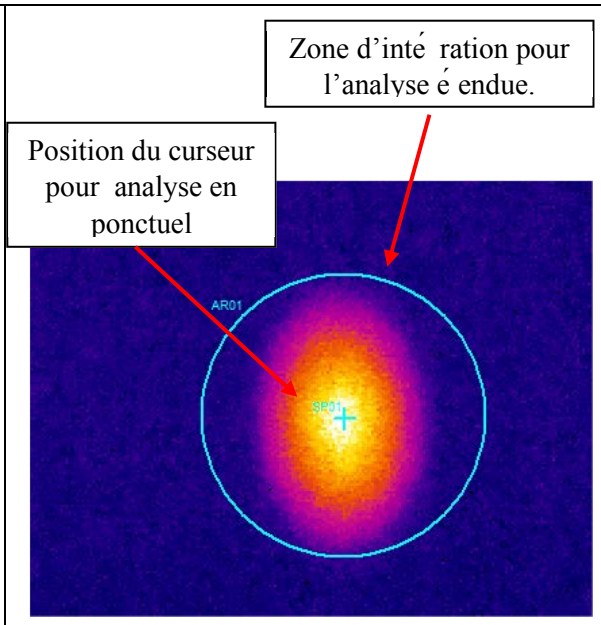


Figure 220 : Image infrarouge du spot laser avec délimitation de la zone d'intégration

Examinons ces résultats :

Analyse ponctuelle

Les figures suivantes représentent les réponses en température des échantillons en représentation classique et en représentation log-log, on repè e bien la pré ence d'une pente -1/2 aux premiers instants de l'analyse.

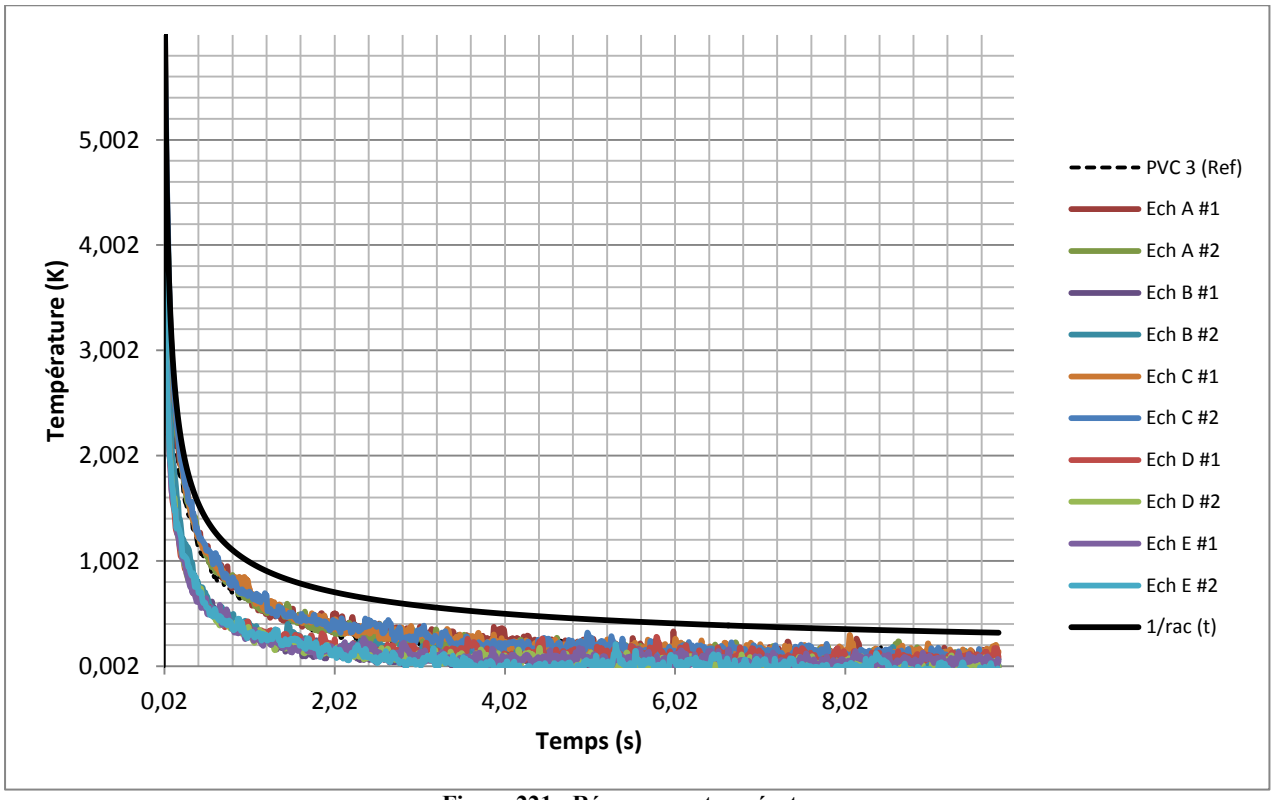


Figure 221 : Réponses en température

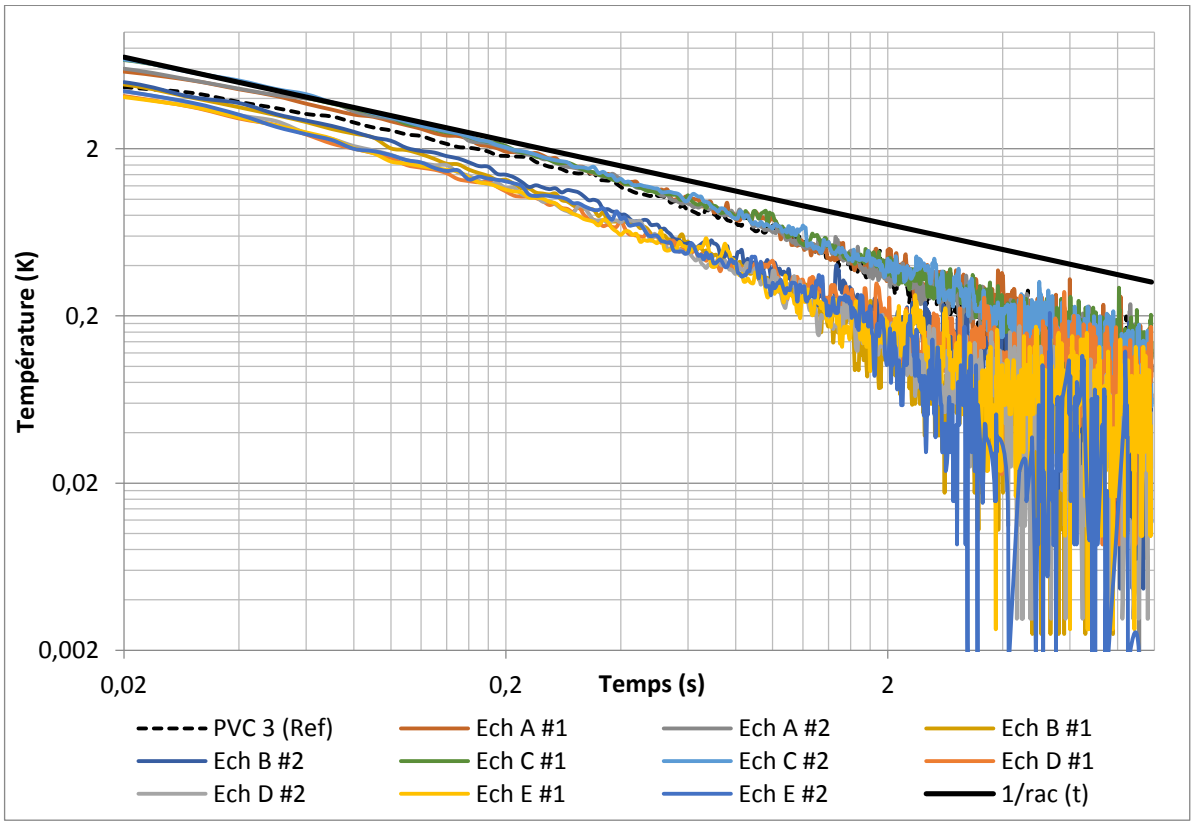


Figure 222 : Réponses en température (Log-Log)

Le tableau suivant regroupe nos résultats de mesures :

Tableau 46 : Résultats approche ponctuelle

	Echantillon A		Echantillon B		Échantillon C		Échantillon D		Échantillon E	
	essai 1	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**
b mesuré (SI)	355	343	491	466	334	331	567	543	563	537
b théorique (SI)	345	345	471	471	358	358	555	555	611	611
Incertitude (SI)	8	10	38	27	13	13	42	41	39	34
Écart relatif %	2,8%	-0,5%	4,2%	-1,0%	-6,8%	-7,6%	2,2%	-2,1%	-7,9%	-12,1%

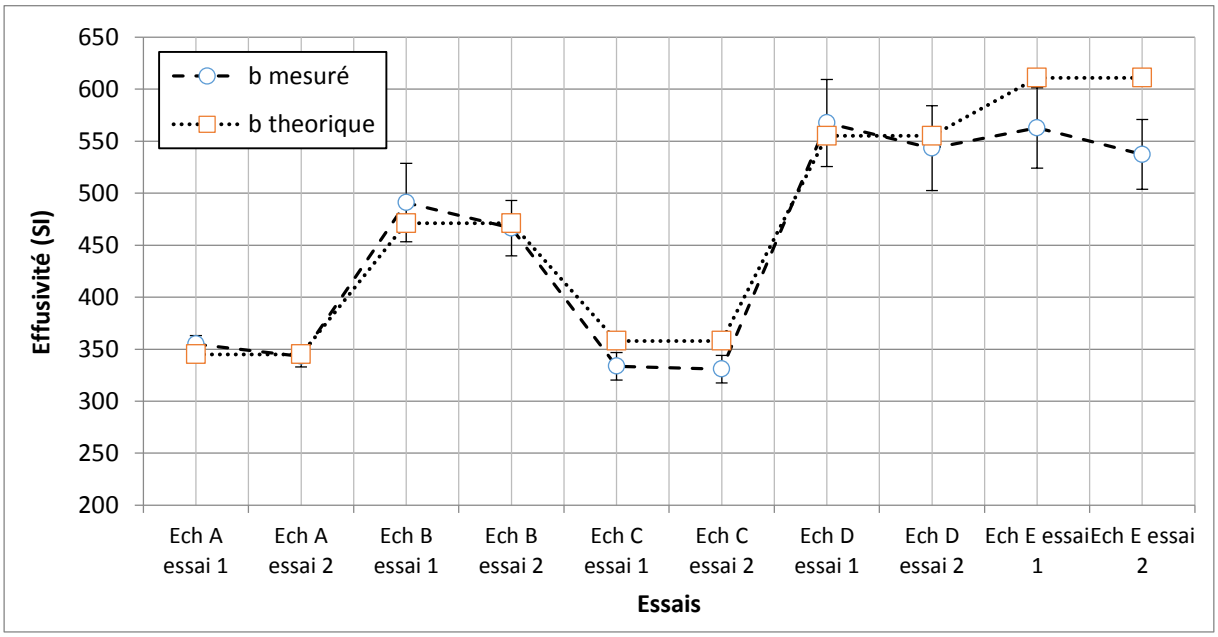


Figure 223 : Résultats mesures effusivité méthode ponctuelle

L'analyse ponctuelle donne de bons ré ultats, conformes aux valeurs attendues. Les écarts relatifs ne dépassent pas 12 % (voir Tableau 46).
Il faut noter que cette méthode est exploitable sur une faible étendue temporelle ce qui peut avoir une incidence sur la précision de la mesure (voir Figure 221 et Figure 222). Ce n'est pas le cas ici, car nous avons assez de points de mesure en débu d'excitation, car nous avons effectué une analyse à 100 Hz, mais cette question de la fréqu nce d'analyse n'est pas à n gliger pour ce type d'étude.

Analyse intégrale ou étendue

Effectuons l'analyse en é endue des é hantillons. Les rép nses en tempé ature figurent dans les deux graphes suivants :

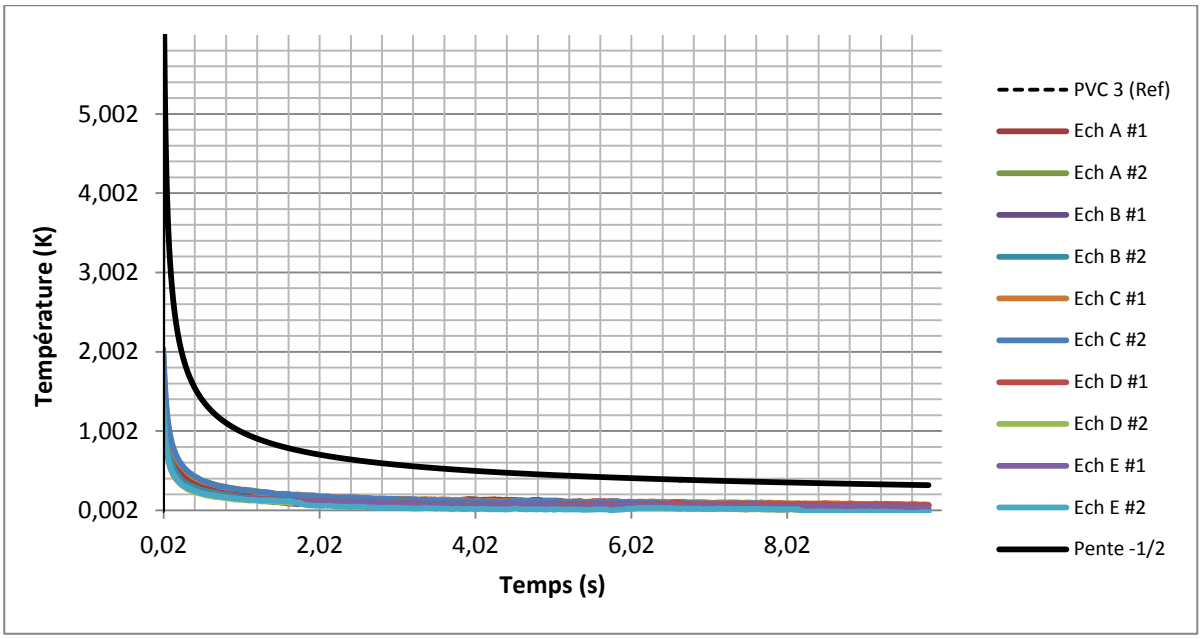


Figure 224 : Réponses en température

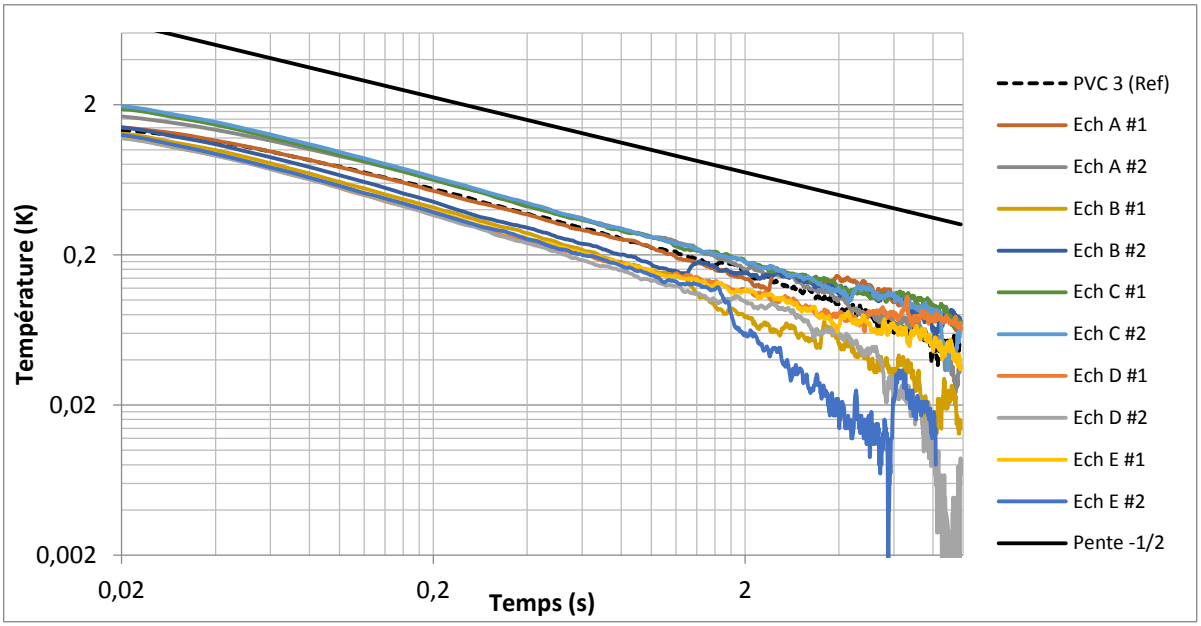


Figure 225 : Réponses en température (représentation Log-Log)

Le tableau suivant regroupe nos résultats :

Tableau 47 : Résultats approche étendue

	Echantillon A		Echantillon B		Échantillon C		Échantillon D		Échantillon E	
	essai 1	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**
b mesuré (SI)	409	346	531	485	346	334	578	600	559	567
b théorique (SI)	345	345	471	471	358	358	555	555	611	611
Incertitude (SI)	8	7	28	26	13	13	30	43	29	34
Écart relatif %	18,6%	0,3%	12,8%	2,9%	-3,4%	-6,8%	4,1%	8,1%	-8,5%	-7,2%

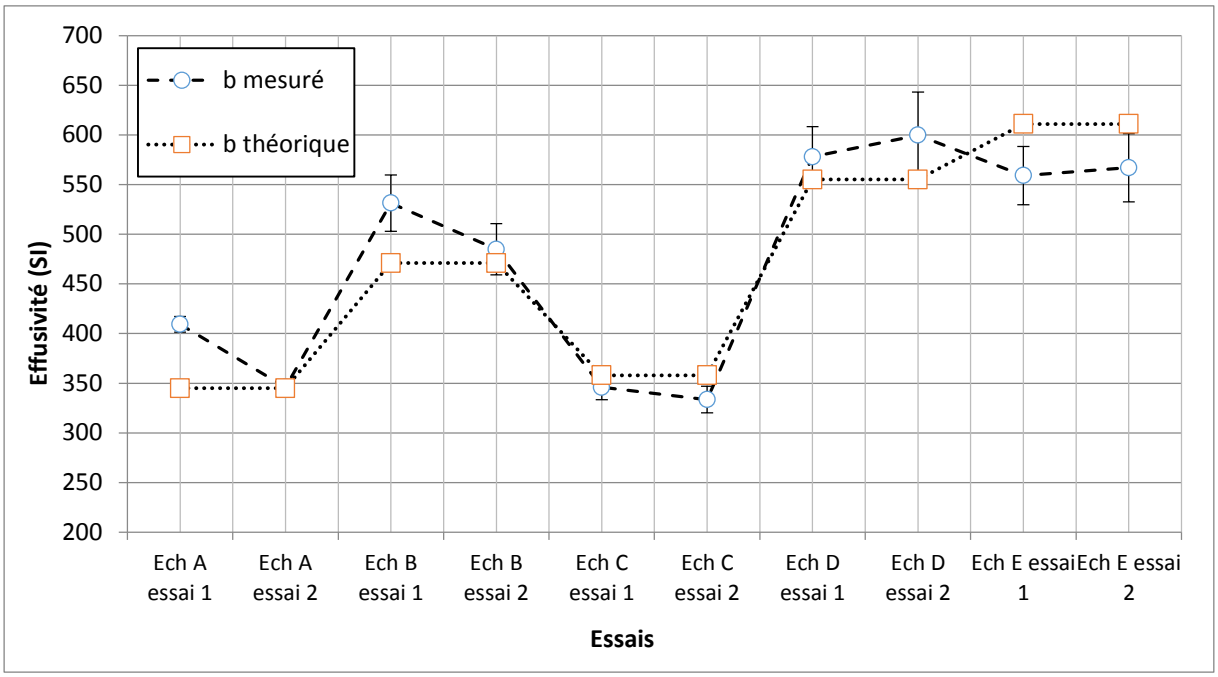


Figure 226 : Résultats mesures effusivité méthode étendue

La Figure 226 présente des résultats satisfaisants, nous retrouvons bien les valeurs attendues avec des écarts qui ne dépassent pas 18 %. Nos résultats ne permettent pas d'observer de différence significative dans la précision des mesures par rapport à la méthode précédente. On peut néanmoins remarquer à la vue des réponses en température (Figure 225) des signaux moins bruités. Essayons de comparer les deux approches.

Comparaison des deux modes de dépouillement

Nous avons regroupé dans le tableau suivant les résultats en local et en étendu :

Tableau 48 : Récapitulatif des deux méthodes

	Échantillon A		Échantillon B		Échantillon C		Échantillon D		Échantillon E	
	essai 1	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**	**essai 1**	**essai 2**
b ponctuel	355	343	491	466	334	331	567	543	563	537
Incertitude	8	10	38	27	13	13	42	41	39	34
Écart relatif	2,8%	-0,5%	4,2%	-1,0%	-6,8%	-7,6%	2,2%	-2,1%	-7,9%	-12,1%
b étendu	409	346	531	485	346	334	578	600	559	567
Incertitude	8	7	28	26	13	13	30	43	29	34
Écart relatif	18,6%	0,3%	12,8%	2,9%	-3,4%	-6,8%	4,1%	8,1%	-8,5%	-7,2%
b référence	345	345	471	471	358	358	555	555	611	611

Le graphe ci-dessous laisse à penser que les deux approches sont éq ivalentes, mais l'observation des réponses en température (Figure 228) montre que ce n'est pas le cas.

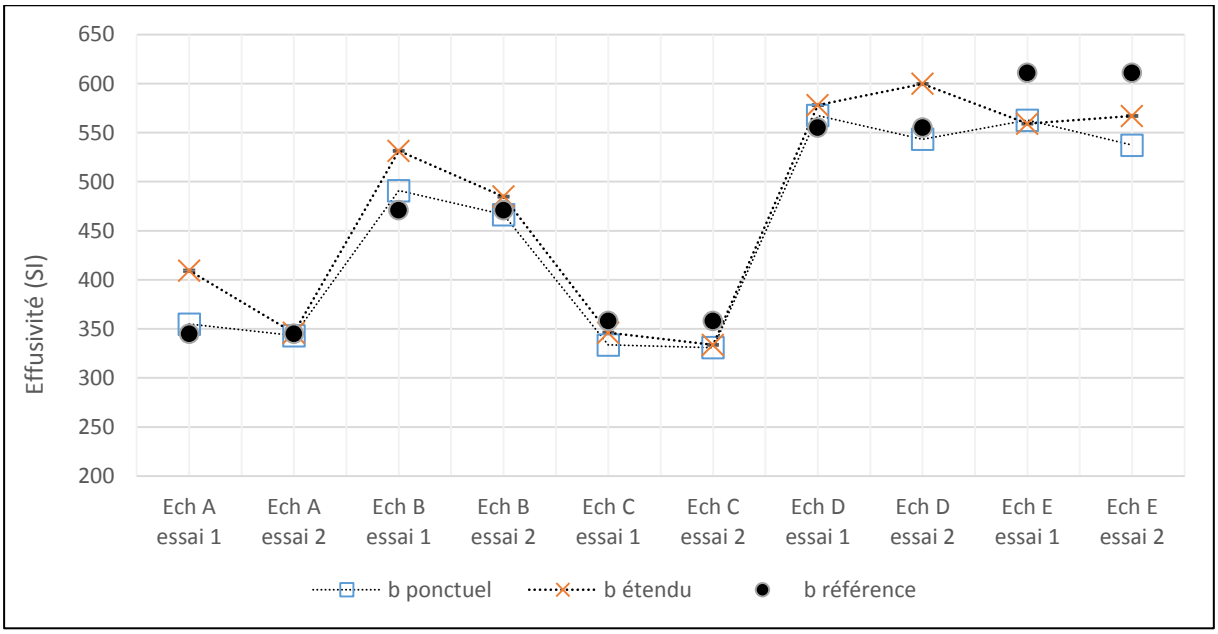


Figure 227 : Comparaison des méthodes

La Figure 228 permet de constater que les deux méthodes ne sont pas équivalentes en termes de pré ision, la mé hode ponctuelle offre une étendue d'analyse moindre et elle est plus sensible au bruit, ce qui peut avoir pour effet de la rendre moins précise.

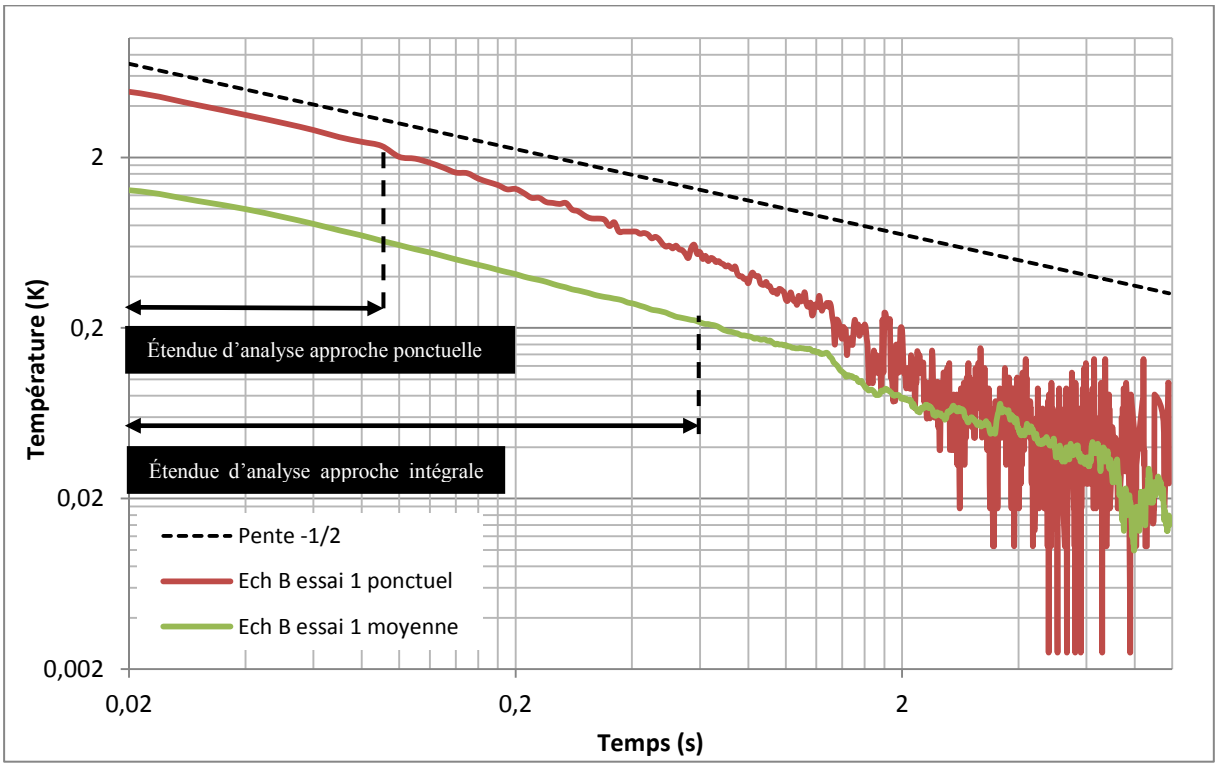


Figure 228 : Comparaison des réponses en température selon les deux méthodes

b) Cas de deux échantillons de plâtre

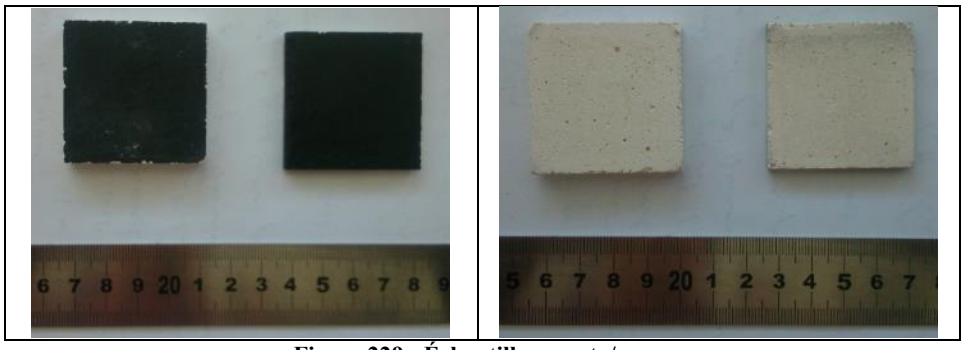


Figure 229 : Échantillons recto/verso

Des mesures d'effusivité par la mé hode des comparaisons ont été effectuées sur les é hantillons calibré de plâtre d'ép isseurs 4.15 et 7.7 mm que nous avons déjà étudiés, nous avons soumis ces é hantillons à un δt de Dirac surfacique et local, les ré ultats de ces mesures figurent dans le tableau suivant :

Tableau 49 : Comparaison mesure d'effusivité par mesure surfacique et locale

		Valeurs théoriques b ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	Valeurs mesurées b ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	Écart relatif avec les valeurs théoriques (%)
Excitation surfacique	Plâtre 4,15 mm	801	832	3,9
	Plâtre 7,7 mm	756	703,9	-6,9
Excitation localisée (dépouillement methode intégrale)	Plâtre 4,15 mm	801	747,8	-6,7
	Plâtre 7,7 mm	756	607,5	-19,6

Le mode de dépouillement choisi en excitation locale est le dépouillement par la méthode de la « moyenne », la méthode ponctuelle donne des résultats difficilement exploitables, les réponses obtenues en mode ponctuel sont fortement bruité s. Il semble plus judicieux d'exploiter des ré ultats issus de cette méthode de dépouillement. La méthode ponctuelle semble très sensible au relief et rugosité de surface des échantillons et difficilement exploitable en l'état.

Cette étude préliminaire a permis de valider les mesures selon deux approches :

- ◊ Une excitation flash surfacique habituelle.
- ◊ Une excitation locale, avec dépouillement via l'approche inté rale dé rite précédemment, les résultats sont conformes aux valeurs théoriques.

17. Conclusion du chapitre III

Ce travail nous a permis de faire de décrire certaines méthodes de caractérisation thermique actuellement en œuvre en laboratoire, de mieux appréhender leurs limites pratique pour nos applications. Il a permis d'introduire des mé hodes nouvelles, reposant sur la photothermie infrarouge stimulé . Les mé hodes présenté s sont simples dans leurs mises en œuvre et sont compatibles avec les contraintes du terrain.

Nous avons dé ontré qu'il é ait possible à l'aide d'une excitation flash locale obtenue à l'aide d'un tir laser, d'estimer les paramètres fondamentaux du matériau que sont la diffusivité thermique et l'effusivité thermique en analysant simplement la rép nse en tempé ature captée en face avant à l'aide d'une camé a thermique.

Trois modes de dépo illement originaux ont été dé rits permettant d'estimer la diffusivité thermique longitudinale d'un maté iau é ais : la méthode du Tmax et la méthode des moments qui

complètent utilement la méthode de Fourier présentée dans la thèse de **Jean-Charles Candoré**. À chaque fois ces dépo illements on fait l'objet d'une imple entation dans SAMMTHIR.

Concernant l'effusivité thermique, nous avons dé ontré les possibilités d'une analyse surfacique, mais surtout la pertinence et la faisabilité d'une analyse en local. Nous avons pour cela dé rit deux approches originales permettant de tirer le parti d'une analyse en locale : un mode de dépouillement ponctuel, sensible aux conditions expé imentales et un mode d'analyse plus robuste que nous avons baptisé « approche intégrale », les deux approches nous ont permis d'obtenir de bons ré ultats.

Ce travail demande bien entendu des raffinements en matière de dispositifs, des réglages et une réflexion sur le plan métrologique qui dépasse le cadre de cet exposé, mais nous pouvons considérer que ce travail a permis de franchir une étape en démontrant la faisabilité de ces approches nouvelles.

Chapitre 4

18. Introduction chapitre IV

Au cours des précédents chapitres, nous avons dé ontré qu'il était possible d'amé iorer significativement la qualité de la dé ection des dé auts pouvant affecter les œuvres du patrimoine à l'aide de post-traitement et d'amé ioration du dispositif expérimental et enfin nous avons présenté au chapitre III plusieurs mé hodes de caractérisations thermiques permettant d'estimer l'effusivité thermique (b) et la diffusivité thermique (a). Les biens culturels peuvent faire l'objet d'alté ations de nature chimique et physique comme celles survenant suite aux infiltrations de sels hygroscopiques. À ce stade nous pouvons nous interroger sur la possibilité de détection et de caractérisation de ce type d'altération à 'aide de **SAMMTHIR** dans les matériaux constituant les peintures murales.

Pour commencer, nous ferons un bref rappel du phénomène d'infiltration d'espè es chimiques dans la pierre.

Tout au long de ce chapitre notre dé arche s'appuiera sur l'idé centrale selon laquelle il est possible de détecter la présence de ces sels et que leur présence affecte les propriétés thermo physiques de la pierre analysée. Nous vérifierons si des mesures de propriétés thermo physiques par thermographie infrarouge stimulée permettent de les mettre en évidence dans le matériau. Nous étudierons les possibilités de post-traitements dans cette détection ainsi que les possibilités en matière de caractérisation de ces sels. Enfin nous présenterons des résultats issus de manipulation effectuée sur le terrain.

Notre objet d'étude sera constitué principalement d'é hantillons de pierres calcaires soumis à des infiltrations de chlorure de sodium (NaCl).

19. Les infiltrations de sels hygroscopiques et effets sur les peintures murales

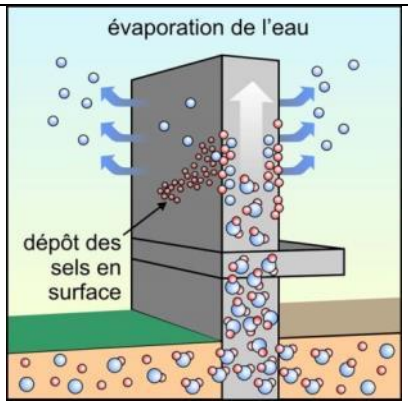


Figure 230 : Principe des remontées capillaires

Figure 231 : Efflorescence de sel sur mur porteur

La présence de sels est un problème couramment observé dans les bâtiments exposés à l'humidité. Il est souvent la conséquence des remontées capillaires appelée aussi « humidité ascensionnelle ». L'humidité contenue dans les sols ou déposée sur les parois exposées à la pluie a tendance à se diffuser dans la structure du bâti et à remonter dans les murs (voir Figure 230). L'eau est naturellement chargée en minéraux (sulfates, nitrates, chlorures, carbonates…) provenant principalement du sol, mais aussi des matériaux ayant servi à la construction ou à la restauration (mortier, liant) ou d'origine aérienne (pollution, air marin…) – voir à ce propos les articles de **J.M. Vallet et al, Camuffo et al** et **Chabas et al** [39], [40], [166] sur l'origine de ces sels. Ces espèces chimiques hydratées sont ainsi transportées sous forme dissoute dans la structure par la progression humide, vers des zones d'évaporation. Lorsque l'eau s'évapore au gré des variations saisonnières de température et d'humidité relative[19] (RH), ces minéraux cristallisent et s'accumulent au fil des mois et des années dans le réseau poreux de la pierre. La cristallisation se traduit par l'apparition d'efflorescences en surface qui provoquent des dégâts (délitement, pelliculation, exfoliation). À l'intérieur du matériau, cette cristallisation invisible est désignée sous le terme de *subflorescence* ou de *cryptoflorescence* quand elle est plus profonde. Les dégâts engendrés par ce phénomène sont plus importants que ceux provoqués par les efflorescences. Le mécanisme gouvernant ce phénomène est sujet à discussions, la théorie admise jusqu'alors mettait en cause l'apparition de pressions internes très élevées dans les pores et cavités fermées engendrées par la croissance des cristaux, voir à ce propos **Hammecker** [167] (1993), depuis peu de nouveaux modèles sont apparus qui remettent en cause cette interprétation : voir par exemple **Benavente** (1999), **Scherer** (1999), **Flatt** (2002) [168]–[170] ou encore **Désarnaud et al** (2013) [38] sur la croissance des cristaux de KCl. Concernant le stress mécanique provoqué par la cristallisation du Na_2SO voir **M. Steiger, S. Asmussen** [171], se reporter aussi à l'ouvrage de **E.M. Winkler** [172] : *Stone in Architecture*.

[19] **Humidité relative** : "L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur) à la même température. Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions. Ce rapport changera si on change la température ou la pression bien que l'humidité absolue de l'air n'ait pas changé." *Source: Humidité relative* - https://fr.wikipedia.org

Exemple de sels formant des efflorescences
Les sulfates : Na_2SO_4 $MgSO_4$ $CaSO_4$ (Gypse)
Les chlorures : $NaCl$ KCl
Les nitrates : KNO_3 (Salpêtre) $NaNO_3$

Sels formant des encroutements
Les carbonates: $CaCO_3$ $MgCO_3$

Aspect des efflorescences
Pulvérulente
Duveteuse
Pustuleuse

Exemples de type d'altérations visibles sur la pierre
Desquamation
Alvéolisation ou désagrégation sableuse
Croûtes noires (gypse noirci)
Croûtes blanches (calcite recristallisée)

Pour les termes et définitions, se reporter au glossaire **ICOMOS** [173].

Dans le cas des peintures murales, l'évolution du phénomène est d'abord discrète puis si le phénomène n'est pas repéré et stoppé il conduit à la dégradation des différentes couches constituant le support de l'œuvre (décollement à l'interface couche picturale-enduit, à l'interface enduit-maçonnerie), à des pertes de cohésion interne (désagrégation granulaire, pulvérulence), à des pertes de matière au niveau de la couche picturale et à l'obscurcissement de celle-ci. Outre l'aspect esthétique, c'est la structure même de l'œuvre qui est menacée par l'effondrement les uns après les autres d'écaillements de la surface pour finalement conduire à la disparition totale de l'œuvre d'art.

Figure 232 : Efflorescence sur une peinture murale (Chapelle Saint-Pierre à Villefranche-sur-Mer)

Figure 233 : Gros plan d'une surface peinte détériorée par des remontées de sels hygroscopiques

19.1. Principes physiques

19.1.1. Milieux poreux et diffusion d'espèces chimiques

On définit un milieu poreux comme un milieu matériel composé de l'imbrication d'une phase solide (la matrice) et d'une phase fluide (gaz ou liquide). Les exemples de milieux poreux sont innombrables, on peut citer les sols, la plupart des roches, certains matériaux vivants, des matériaux artificiels comme le bé on, etc. Le milieu poreux est constitué d'une matrice solide et de petits espaces appelés pores, celui-ci est perméable à un écoulement fluide.

Il est possible de caracté iser un tel milieu à l'aide de deux paramè res : la porosité[20] et la perméabilité[21].

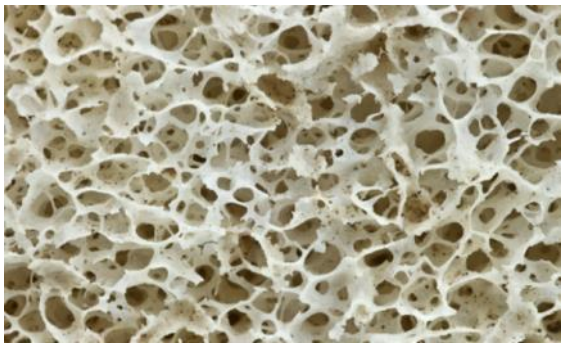


Figure 234 : Coupe d'un matériau poreux

Les *Lois de Darcy* et de *Fick* sont les deux grandes lois qui décrivent le transport et la diffusion des sels dans la pierre. Le coefficient de diffusion de la *loi de Fick* dépend de la température de même que la viscosité dynamique figurant dans la *Loi de Darcy*, cette loi fait aussi intervenir un gradient de pression qui peut évoluer selon la pression atmosphérique, on peut donc conclure à la forte dépendance de l'infiltration saline dans les roches aux conditions du milieu ambiant. Nous allons voir qu'il en est de mê e pour les transformations chimiques au sein de ces milieux poreux.

[20] La **porosité** est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz).

[21] La **perméabilité** d'un matériau (une roche, un tissu, etc.) correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide de référence sous l'effet d'un gradient de pression. (Tirés de Wikipédia)

19.1.2. Lois d'équilibre

Nous savons que des espèces chimiques (arrangement atomique cristallin) solubles telles que le $NaCl$, le $Na_2SO_4.nH_2O$ ou le Na_2CO_3 ont une grande affinité avec l'eau, leur solubilité peut atteindre plusieurs centaines de g/litre alors que d'autres espèces telles que $AgCl$ ou $Cu(OH)_2$ ont des solubilité inférieures au mg/litre. Les sels solubles lorsqu'ils sont en présence d'eau se dissolvent et se dissocient pour former des cations chargés positivement et des anions chargés négativement. Cette solubilité réversible est soumise à différents paramètres physiques tels que la température, la pression et la nature des espèces présentes. Le problème des sels hygroscopique relève de l'équilibre chimique entre le sel à l'état solide et le liquide puis à l'équilibre entre le sel solide et la vapeur d'eau.

19.1.2.1. Équilibre solide-liquide

Dans le cas d'espèces chimiques solides ioniques comme les sels et pour une réaction de dissolution typique :

$$\underset{solide}{X_\alpha Y_\beta} \rightleftharpoons \underbrace{\alpha X^{\beta+} + \beta Y^{\alpha-}}_{aqueux}$$

Nous avons à partir de la *Loi d'action de masse* la relation suivante à l'équilibre :

$$K_s = \left[X^{\beta+}\right]^{\alpha}.\left[Y^{\alpha-}\right]^{\beta}$$

Le terme K_s désigne dans ce cas le *Produit de solubilité*.

L'adjonction d'autres espèces ou la variation des conditions de pression ou de température entraine la variation de ce produit de solubilité K_s ce qui a pour effet de modifier la solubilité des espèces chimiques. L'équilibre chimique évoluera soit dans le sens de la dissolution des sels solides hydratés ou alors dans celui de la cristallisation des composés dissous. Ces réactions peuvent s'accompagner d'une absorption ou d'une libération d'énergie thermique (réaction endothermique ou exothermique).

La théorie des phases donne sous forme de diagramme les différents domaines d'existence des différentes phases pour différentes températures et concentrations séparées par des limites représentant la transition d'un état à l'autre. Voir ci-après l'exemple du sulfate de sodium (Na_2SO_4) avec son diagramme de solubilité dans l'eau :

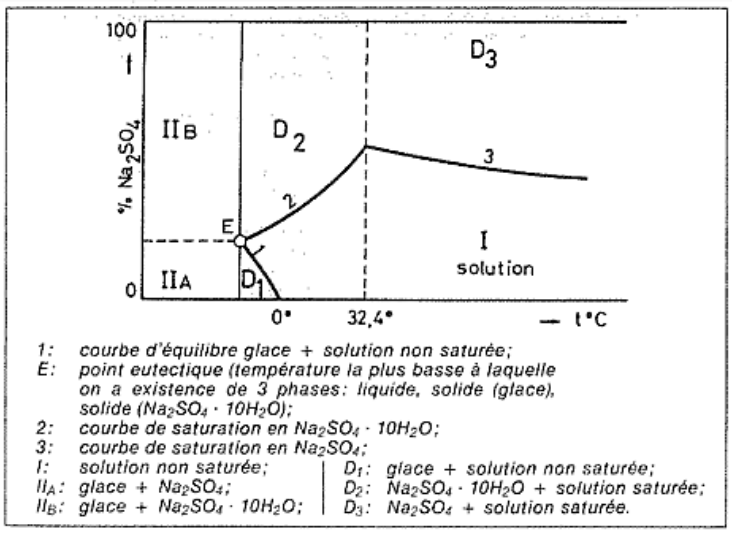


Figure 235 : Diagramme de solubilité du Na2SO4 dans l'eau
(Tiré de « Cristallisation de sels et dégâts de matériaux », V. Furlan et Y. Houst)

Si on observe ce diagramme on remarque qu'aux tempé atures habituelles (hors gel) le $Na_2SO_4.nH_2O$ peut exister sous plusieurs formes :

- ◊ Une forme dissociée (en solution non saturée) ➔ Domaine I
- ◊ Une forme hydraté (avec diffé ents degrés 'hydratation) en solution saturé ➔ Domaine D2
- ◊ Une forme anhydre en solution saturée ➔ Domaine D3

19.1.2.2. Équilibre solide-vapeur d'eau

À l'air libre, la forme hydraté ($Na_2SO_4.10H_2O$) se transforme progressivement en forme anhydre. Cette transition qui débouche à terme sur la cristallisation lorsqu'il y a sursaturation est aussi régie aussi par une loi d'éq ilibre. Dans le cas du Na_2SO_4 nous avons :

$$\underbrace{Na_2SO_4.10H_2O}_{Mirabilite} \rightleftharpoons \underbrace{Na_2SO_4}_{Thénardite} + 10H_2O$$

La forme décahydratée du sulfate de sodium – appelée aussi *mirabilite* – libère 10 molécules d'eau au contact de l'air sec pour former des cristaux de *thénardite*. Cette transformation est exothermique, elle peut donc être observée avec une caméra thermique, voir à ce propos les travaux suivants de **P. Vázquez, C. Thomachot-Schneider et al** (2014 et 2015) [174], [175].

Figure 236 : Cristaux de mirabilite

Figure 237 : Cristaux de thénardite

Cette é olution ré ersible dép nd de l'humidité relative RH de l'air et de sa tempé ature et elle est représenté comme pour l'éq ilibre solide-liquide par un diagramme d'équ libre :

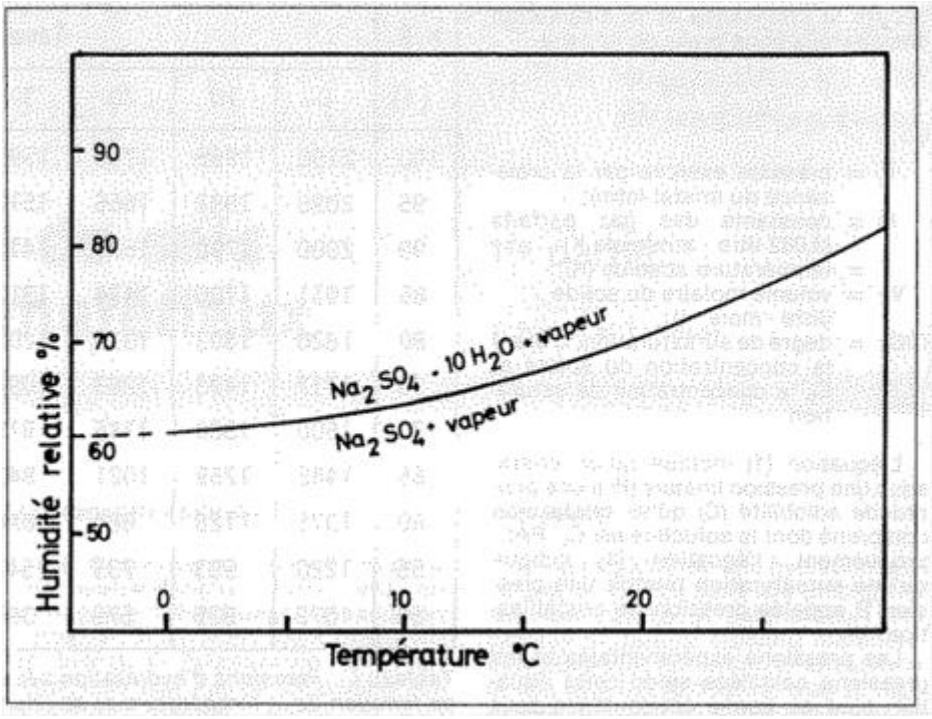


Figure 238 : Diagramme d'équilibre du système Na2SO4-vapeur d'eau en fonction de la température
(Tiré de « Cristallisation de sels et dégâts de matériaux », V. Furlan et Y. Houst)

La figure ci-dessus nous montre que la transition entre la forme hydratée et la forme anhydre est d'autant plus favorisée que la tempé ature est élevé et que l'humidité relative est basse, on remarque par exemple que pour la plage de température comprise entre 0 C° et 30 C° et un RH < 60% la transition vers la thé ardite s'effectue syste atiquement.

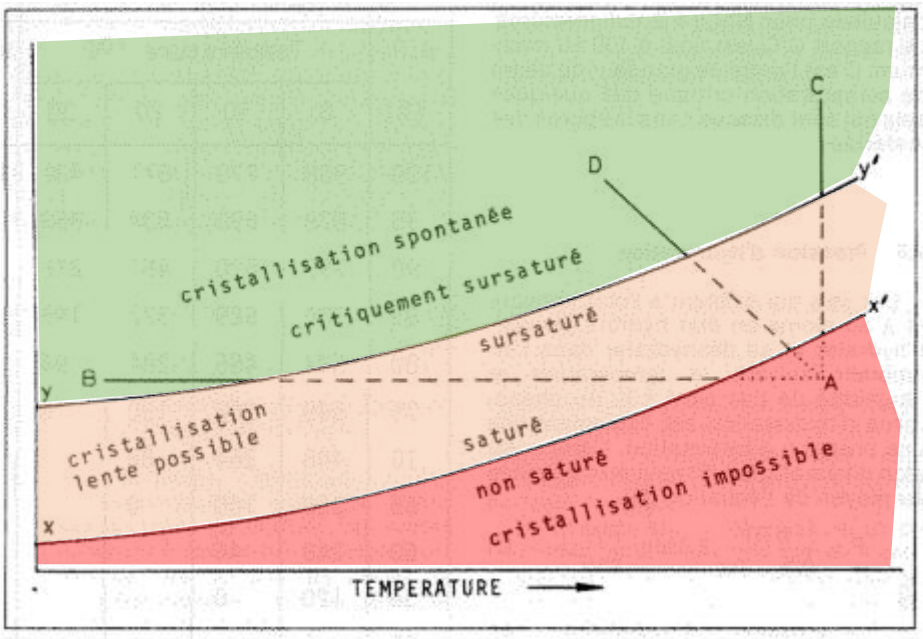


Figure 239 : Cristallisation en solution
(Tiré de « Cristallisation de sels et dégâts de matériaux », V. Furlan et Y. Houst)

Si la solution se trouve dans l'état intermé aire (mé astable) délimité par les courbes de sursaturation y-y' et de saturation x-x' alors la cristallisation reste possible, mais lente, celle-ci est en général provoquée par un germe étranger ou une anisotropie du milieu poreux agissant comme un catalyseur. Cette cristallisation peut se faire selon plusieurs scénarios (en partant du point A) :

- ◊ Par diminution de la température ➔ trajet AB
- ◊ Par augmentation de la concentration par évaporation ➔ trajet AC
- ◊ Par les deux processus conjoints (baisse de température + évaporation) ➔ trajet AD

Ainsi un cristal peut se développer à l'intérieur du réseau poreux s'il est alimenté par une solution sursaturée.

19.1.3. Pressions de cristallisation et d'hydratation

La *pression de cristallisation* est considérée par une partie de la communauté scientifique comme la cause d'endommagement par les sels, il s'agit de la pression exercée par la croissance des sels lors du processus de cristallisation lorsqu'ils sont confinés dans le réseau poreux.

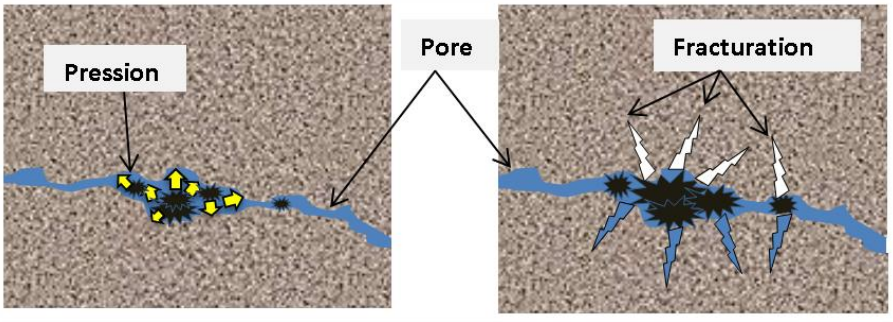


Figure 240 : Pression cristalline à l'intérieur d'un pore

Ce phénomène a commencé à être étudié à partir du XIXe (**De Thury** 1828 [176], Lavalle 1853 [177], puis au XXe siecle **Taber** 1916 [178], **Correns** 1949 [179]) et continue encore de faire l'objet de nombreuses discussions (**Desarnaud et al** 2013 [38], [180]). Nous n'entrerons pas dans le détail de ces travaux et de ces développements qui ne sont pas en rapport avec ce travail de thèse, notons simplement que la compréhension du mécanisme de ce phénomène est sujette à discussion, voir thèse de **Desarnaud** [181] (2009).

L'un des premiers modèles dérivant cette pression est le modèle de **Correns** décrit par l'équation suivante :

$$\Delta P = \frac{RT}{V_{Sel}} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \tag{4.1}$$

Avec ΔP la pression de cristallisation en [Pa] par rapport à la pression ambiante, R la *Constante des gaz parfaits* (8,314 J.K^{-1}.mol^{-1}), T la température en [K] et V_{Sel} le volume molaire du cristal de sel en [m^3.mol^{-1}] et $\frac{C}{C_0}$ le degré de sursaturation. On remarque un rapport de proportionnalité en observant l'expression (4.1) entre le degré de sursaturation et la pression de cristallisation on constate aussi la dépendance à la température et donc aux conditions ambiantes.

Un autre mécanisme identifié à l'origine des contraintes mécaniques engendré par le cristal est la *pression d'hydratation*, ce mécanisme a été décrit par **Mortensen** en 1933 [182]. Cette pression est engendré par l'hydratation de cristaux de sel ce qui a pour effet d'augmenter leur volume et d'engendrer des contraintes internes, c'est selon **Mortensen** le seul mécanisme pouvant expliquer la détérioration de roche par les sels dans des milieux désertiques : en absence d'eau les sels sont cristallisé , seul un apport d'humidité par l'air (phénomène de rosé) est susceptible d'hydrater les cristaux.

Le phénomène modélisé est décrit par l'expression suivante :

$$P = \left(\frac{nRT}{V_H - V_A} \right) \ln \left(\frac{PW}{P_0 W} \right) \quad (4.2)$$

Cette expression fait apparaitre P la pression d'hydratation en [Pa], n le nombre de moles gagnés lors de l'hydratation, comme précédemment R la *Constante des gaz parfaits* et T la température en [K], V_H et V_A les volumes molaires du cristal hydraté et anhydre en [m^3/mol], PW représente la pression de vapeur d'eau dans l'atmosphère à la température T [Pa], P_0W la pression de vapeur d'eau du sel hydraté à température T [Pa].

Comme pour la pression de cristallisation on observe dans l'équation (4.2) la forte dépendance de cette pression d'hydratation aux conditions de pression et de température du milieu ambiant.

19.1.4. Facteurs déclenchants

Nous avons mis en évidence, par simple observation de certaines relations dérivant l'infiltration de sel hygroscopique et la cristallisation, la forte dépendance de ces phénomènes aux conditions thermo-hydriques régnant dans l'environnement immédiat de la pierre. Essayons de répertorier les principaux facteurs favorisant l'attaque par les sels de la pierre.

19.1.4.1. Présence d'eau et humidité

La présence d'eau qu'elle se manifeste sous forme de vapeur d'eau, de brouillard, de ruissellement ou de poche souterraine est bien entendu le prérequis indispensable à la dissolution des espèces chimiques présentes dans l'environnement et à leur transport dans le réseau poreux, ce transport peut s'effectuer selon différentes modalités :

- ◊ Sous forme de **remontée capillaire (**humidité ascensionnelle)**.** Les hauteurs de remontées peuvent avoisiner 1,5 m, cette hauteur dépend du diamètre des pores de la pierre, plus ce diamètre est petit et plus la montée est importante.
- ◊ Sous forme d'**infiltration** : Les infiltrations ont pour origine les eaux de pluie qui se chargent en éléments chimiques présents dans l'air sous forme de polluants et imbibent les façades, la propagation le long des façades se fait par gravité, la pénétration se fait généralement de façon latérale.
- ◊ Sous forme de **condensation en surface** : La vapeur d'eau de l'air humide peut se condenser sur la surface de la pierre et provoquer l'hydratation ou la dissolution des sels.
- ◊ La **baisse de température** : la condensation est atteinte à une température critique appelée *température de rosée*. Ce phénomène est régulièrement observé dans les bâtiments mal chauffés comme les églises par exemple.
- ◊ l'**augmentation de l'humidité à température constante.** Ce phénomène a été observé en Égypte sur le plateau de Gizeh, l'afflux de touristes menace, à long terme, les peintures murales en raison de la respiration et de la transpiration de ceux-ci.

La présence d'eau qu'elle soit sous forme de vapeur d'eau ou liquide est une condition nécessaire, mais non suffisante, d'autres paramètres interviennent.

19.1.4.2. Source(s) d'éléments chimiques solubles

Le phénomène nécessite un environnement riche en éléments chimiques solubles, la nature du sol et la pollution atmosphérique (au sens large) en sont les principaux pourvoyeurs.

Type de sel	Origines possibles
Sulfate de sodium (mirabilite, thénardite)	ciments de type Portland, mortiers au ciment, bétons, lessives, briques...
Carbonate de sodium, de potassium Natron, thermonatrite, trona…	ciments de type Portland, mortiers au ciment, bétons, lessives, résidus de nettoyage chimique...
Chlorure de sodium (halite)	eau de mer, embruns, sels de déverglaçage, sel de salaison...
Chlorure de potassium (sylvite)	sol...
Sulfate de calcium (gypse, anhydrite, bassanite)	plâtre, mortiers contenant du plâtre, ciments, mortiers au ciment, SO_2 atmosphérique, embruns, activités bactériennes
Sulfate de magnésium (hexahydrite, epsomite)	pierre dolomitique, chaux magnésienne…
Nitrate de sodium (Nitratine)	sol, engrais, matières organiques décomposées, activités bactériennes
Nitrate de potassium (Nitre)	matières organiques décomposées, sol, engrais, activités bactériennes
Sels doubles (Aphthitalite, glaubérite, syngénite…)	Origine variée en fonction des ions disponibles et des équilibres chimiques

Figure 241 : Origine des sels (tiré du Guide « Altération de la pierre » 2010 de l'Association Medistone)

19.1.4.3. Nature des pierres et roches

La nature des roches est aussi un facteur essentiel, car elle détermine les propriétés de transfert du ré eau poreux et sa capacité à favoriser le transport d'un liquide chargé chimiquement ou à le stocker. La granulométrie et les paramètres de taille, de forme du milieu poreux déterminent par exemple la cinétique d'é aporation de cette pierre. Ainsi deux pierres ayant des porosités identiques peuvent avoir des processus de capillarité différents si la taille des pores et leur connectivité sont différentes.

19.1.4.4. Exposition et arrangement

D'autres facteurs relevant de la disposition ou de l'**exposition** d'une façade aux pré ipitations à l'ensoleillement peuvent avoir un impact considérable sur cette évolution : la succession des alternances jour/nuit, l'exposition au gel, etc., peut favoriser le phéno èn d'infiltration s'il est associé à d autres facteurs.

19.1.4.5. Compatibilité des matériaux

La mauvaise compatibilité des types de pierre ou de matériaux de construction en raison d'une incompatibilité hydrique ou petrophysique peut aussi favoriser l'endommagement par les sels.

19.1.4.6. Répétitions de cycles d'imbibition et séchage

Les variations climatiques rapides et répétées comme des successions échauffement/refroidissement (déserts) ou des répétitions de séchage/mouillage accélèrent considé ablement le phén mèn d'altération par les sels, c'est d'ailleurs l'un des moyens employés en laboratoire pour étudier ce type de processus d'altération.

19.1.4.7. Expansion volumique différentielle

Le milieu poreux et les sels ont des coefficients de dilatation thermique souvent très éloignés ce qui a pour effet d'induire une d'expansion volumique diffé entielle à l'origine de contraintes internes parfois intenses comme dans les zones désertiques soumises à de fortes variations de température, ce phénomène a été décrit en 1968 par **Cooke et Smalley** [183] .

19.1.5. Conclusion

Cette présentation non exhaustive a permis de cerner la nature des phénomènes physico-chimiques entrant en jeu dans le phénomène des remontées capillaires de sel hygroscopique dans les pierres.

Nous avons souligné l'importance des paramètres thermodynamiques (humidité, pression, température) ce qui donne aux variations climatiques et saisonnières un rôle essentiel dans la compréhension et l'évolution plus ou moins rapide du phénomène de dégradation de la pierre. Notons aussi que ce phénomène peut évoluer discrètement dans la structure même du réseau poreux et se manifester sous forme d'efflorescences ou de taches à un stade déjà avancé d'où l'importance d'une détection précoce. Nous avons survolé la complexité de ce processus de dégradation de la pierre par infiltration capillaire, nous n'irons pas plus loin dans la description de ces phénomènes, pour plus de précision le lecteur est encouragé à se reporter à des ouvrages spécialisés tels que ceux-ci : **Winkler** [172], **J. Philippon et al** [184]**, S. Lorusso et al** [185]**, M. Rautureau** [186]**, JP Bigas et al** [187] ainsi qu'aux travaux de thèse suivants **Hammecker** [167] (1993), **K. Beck** [188] (2006), **Desarnaud** [181] (2009) et **M. Denecker** [189] (2015).

Nous allons maintenant nous intéresser aux possibilités que nous offre la thermographie infrarouge en matière de détection et de caractérisation de ces sels dans les matériaux constituant les peintures murales.

20. Études sur échantillons

Dans cette section nous nous intéresserons à l'observation des effets des sels sur les propriétés thermophysiques d'échantillons de pierres calcaires. Dans un premier temps nous nous intéresserons à la faisabilité de cette détection par les méthodes classiques de laboratoire (DSC, diffusivimetre flash) ensuite nous vérifierons ces observations au moyen de la thermographie infrarouge stimulée. Notre intérêt se portera dans un premier temps sur l'étude d'échantillons minces de pierre d'Avignon soumis à une contamination par le chlorure de sodium (NaCl). On s'intéressera d'abord à la variation de température des échantillons, on affinera ensuite en estimant divers paramètres décrits au chapitre III tels que la diffusivité thermique et l'effusivité thermique en mettant en œuvre les méthodes de mesure décrites au chapitre précédent :

- ◊ Mesure de a et b au moyen d'une excitation surfacique (étude)
- ◊ Mesure de a et b au moyen d'une excitation locale

Nous testerons l'influence des paramètres expérimentaux tels la mise sous contrainte (surfacique, locale, flash, créneau, aléatoire) des échantillons.

Nous compléterons ensuite ces analyses par l'étude d'échantillons épais.

Notre démarche expérimentale sera à chaque fois appuyée par une validation issue de résultats de simulation.

20.1. Analyse d'échantillons minces.

Figure 242 : Carrière Sarragan, Baux-de-Provence (tiré de [22])

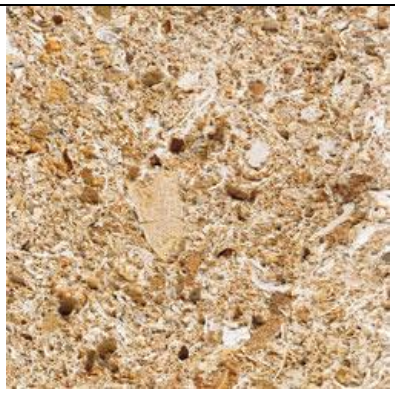


Figure 243 : Gros plans sur des calcaires extraits dans la région d'Avignon

Les échantillons analysés sont constitués de pierre d'Avignon ou pierre du midi (appelé aussi molasse burdigalienne). Cette roche sédimentaire date du miocène et affleure dans la basse vallée du Rhône. C'est un calcaire biodétritique[23] grossier, hétérogène (voir à ce propos la thèse de **J. Berthonneau** (2013) [190]). Largement utilisé depuis l'antiquité comme matériau de construction en raison de ses caractéristiques intéressantes : roche facile à travailler qui durcit au contact de l'air et qui résiste aux intempéries. Au nombre des nombreux monuments édifiés à l'aide de la pierre du midi citons le Antiques à Glanum, le Pont du Gard et l'aqueduc de Nîmes, les arcs de triomphe d'Orange et de Carpentras…

20.1.1. Échantillons

Pour cette étude 10 pastilles de pierre d'Avignon ont été façonnés à partir d'un bloc de pierre d'Avignon et réparties en deux lots : nous disposons de 5 échantillons de diamètres 2 cm et d'épaisseurs connues (environs 5 mm) chargés en NaCl et de 5 échantillons identiques sains (échantillons témoins). Un lot de cinq échantillons a été plongé dans une solution en NaCl (4% en masse) durant 8 heures, les échantillons ont été ensuite séchés pendant 48 heures.

[22] http://www.carrieresdesbauxdeprovence.fr

[23] Biodétritique : Qualifie une roche sédimentaire composée d'au moins 50% de débris formés par des squelettes d'organismes vivants.(Source : https://fr.wiktionary.org).

Figure 244 : Échantillons

20.1.2. Analyse par des méthodes de laboratoire

En laboratoire il existe une grande quantité de propriétés physiques mesurables. Nous pouvons nous interroger sur les paramètres physiques les plus pertinents pour mettre en évidence la présence de sel dans une pierre. Voyons s'il est possible d'observer des é olutions de la masse volumique ou des propriétés thermiques en présence de sels.

Nous allons vérifier s'il est possible d'observer des variations qui soient mesurables de propriétés sur les différents types d'é hantillons.

Dans un premier temps nous avons estimé les masses volumiques d'un é hantillon té oin et d'un échantillon avec sel. Nous nous sommes intéressés ensuite aux propriétés thermo physiques d'é hantillons de pierre d'Avignon de dimensions identiques. Nous avons estimé la capacité thermique de deux é hantillons à l'aide d'une mé hode de laboratoire appelé *Differential Scanning Calorimetry* (*DSC*). Nous avons ensuite mesuré les diffusivités thermiques des deux séries d'é hantillons par *méthode flash* à l'aide d'un diffusivimetre flash.

20.1.2.1. Estimation de la masse volumique par la méthode des comparaisons.

Les é hantillons ont été soigneusement mesuré à l'aide d'un pied à coulisse et pesés avec une balance de précision.

Tableau 50 : Mesure de masses volumiques sur échantillons de pierre d'Avignon

Échantillon	N°	Épaisseur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	Masse volumique (kg/m^3)
Sans sel	N1	5,12	30,58	6,3	1675,4
	N2	5,13	30,44	6,7	1794,6
	N3	5,21	30,58	7	1829,3
	N4	5,12	30,55	6,5	1731,9
	N5	5,15	30,68	6,3	1654,8
				Moyenne	1737,2
sel	S1	5,49	30,62	7,3	1805,7
	S2	5,48	30,7	7,9	1947,5
	S3	5,39	30,8	7,3	1817,8
	S4	5,39	30,82	7,2	1790,6
	S5	5,21	30,84	7,3	1875,7
				Moyenne	**1847,5**
				Écart relatif (%)	**6,30%**

Un écart d'environ 6 % est observé entre les deux séries d'échantillons de pierre d'Avignon. Ce résultat semble indiquer qu'il est possible de différencier les échantillons témoin des échantillons avec sel.

20.1.2.2. Estimation de la capacité thermique à l'aide du DSC

Les chaleurs spécifiques des échantillons de pierre d'Avignon ont été mesurés à l'aide du DSC. Cette technique d'analyse thermique permet de déterminer la chaleur spécifique d'un échantillon par mesure des échanges de chaleur entre un échantillon à analyser et un échantillon de référence.

a) Principe

Figure 245 : DSC de laboratoire

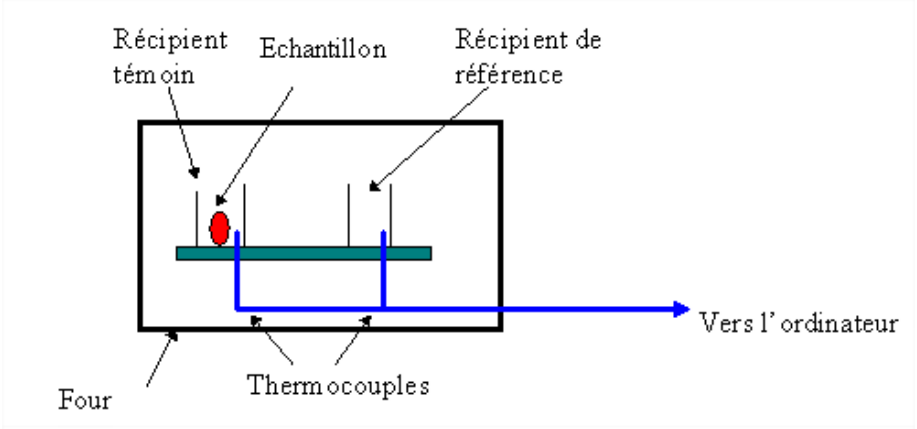


Figure 246 : Principe du DSC

Ce procédé consiste à chauffer 2 récipients de façon progressive et contrôlée (vitesse de chauffage connue) et à comparer à chaque température le flux échangé entre l'échantillon et le récipient témoin, ce flux se déduit à partir de la différence de température entre les 2 récipients.
La capacité thermique Cp de l'échantillon se déduit très simplement à partir de l'expression suivante :

$$C_p = \frac{Flux\,de\,chaleur}{Vitesse\,de\,chauffage} \quad \text{en [J/kg.K]} \qquad (4.3)$$

b) Résultat

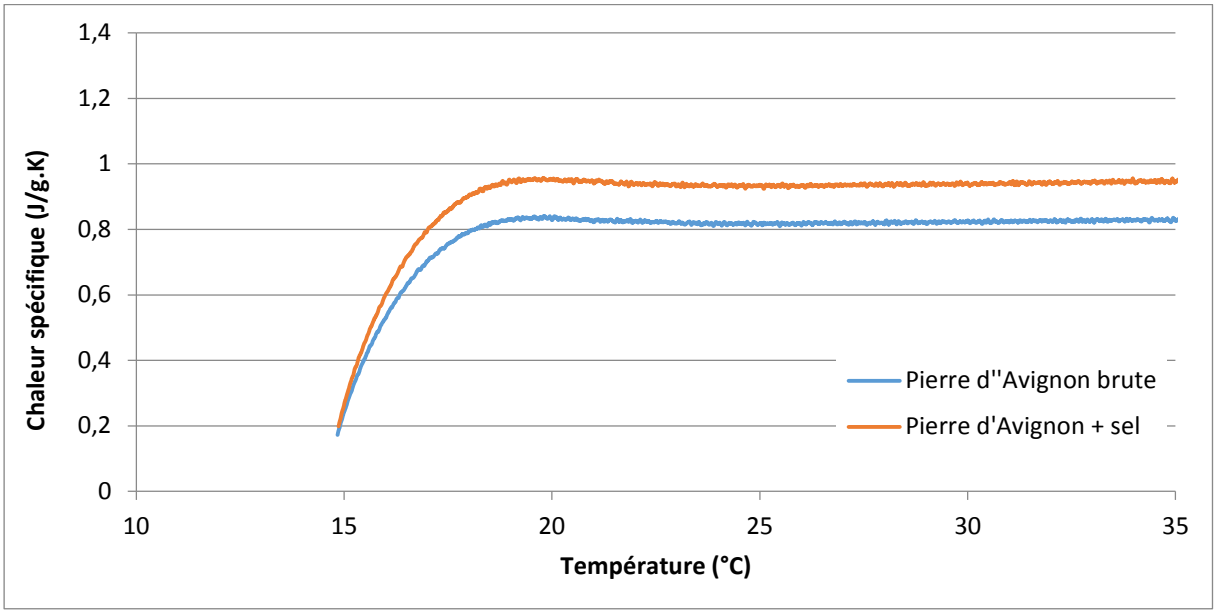


Figure 247 : Mesure de la chaleur spécifique sur de la pierre d'Avignon

Tableau 51 : Mesure de la capacité thermique sur pierre d'Avignon

	Valeur moyenne chaleur spécifique (J/kg.K)	Écart relatif (%)
Pierre d'Avignon témoin	830	
Pierre d'Avignon + sel	950	+ 14,4

On observe qu'en pré ence de sel (NaCl) la capacité thermique augmente. L'écart relatif estimé est de 14 % avec la valeur de référence.
La présence de NaCl conduit ainsi à une variation mesurable de la capacité thermique du matériau.

20.1.2.3. Estimation de la diffusivité thermique à l'aide de la méthode flash

Pour le principe de cette méthode, se reporter au chapitre III (voir page 130). Nous allons simplement vé ifier à l'aide du diffusivimetre flash la possibilité pratique de mettre en évidence la pré ence de sel dans des é hantillons de pierre calcaire (Pierre d'Avignon) dont nous avons mesuré la diffusivité thermique a.

a) Mode opératoire

Les é hantillons ont été peints en noir en face avant pour uniformiser l'absorption du flux d'excitation et recouverts d'une mince couche de laque d'argent en face arrière pour permettre le contact électrique avec la sonde thermocouple.

Figure 248 : Échantillons (vue de face)

Figure 249 : Échantillons (vue de dos)

Chaque échantillon a subi plusieurs essais-mesures à l'aide du diffusivimetre flash de laboratoire et a été dépouillé selon les quatre méthodes de dépouillement décrites au chapitre III.

Figure 250 : Diffusivimetre flash

b) Résultats obtenus

Résultat obtenu sur un échantillon de pierre d'Avignon plongé dans une solution de NACl à %.

Tableau 52 : Mesure diffusivité thermique sur échantillons minces

	Méthode de dépouillement			
	Sans pertes	Avec pertes		
	Parker (m²/s)	P. time (m²/s)	Moments (m²/s)	OLS (m²/s)
Moyenne Avignon avec sel	**$9{,}72.10^{-07}$**	**$9{,}02.10^{-07}$**	**$9{,}19.10^{-07}$**	**$9{,}04.10^{-07}$**
Moyenne Avignon témoin	**$8{,}92.10^{-07}$**	**$8{,}11.10^{-07}$**	**$8{,}24.10^{-07}$**	**$8{,}15.10^{-07}$**
Écart Avignon sel 4%/Avignon brut	8,98%	11,28%	11,61%	10,95%

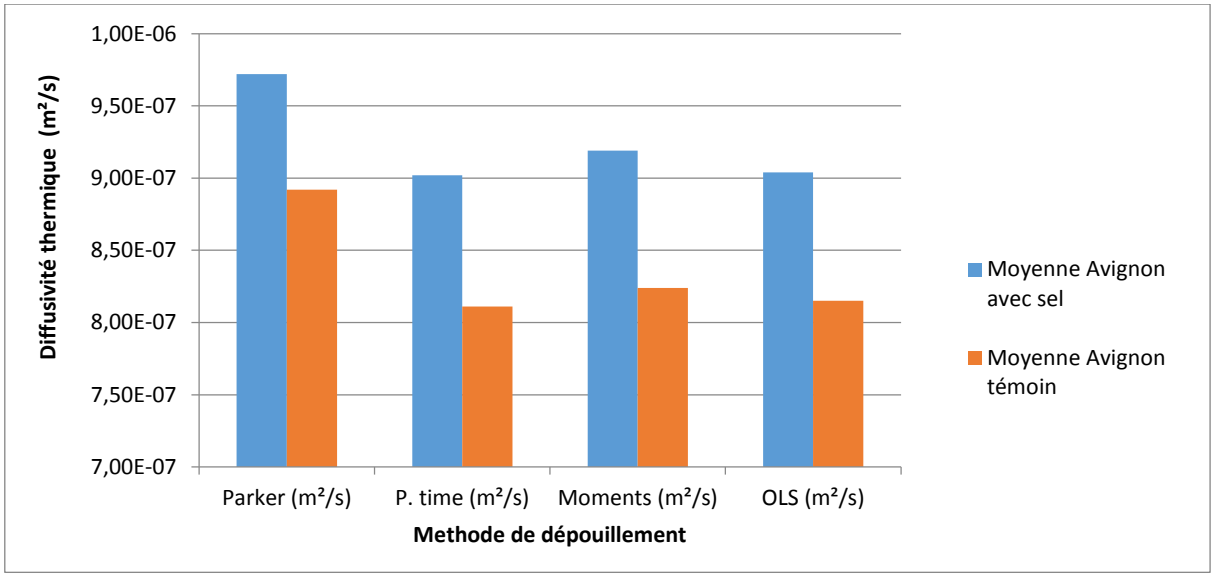


Figure 251 : Diffusivité thermique sur échantillons minces de pierre d'Avignon

Les résultats détaillés se trouvent en annexe (voir Tableau 101, page 376).

Les résultats du Tableau 52 montrent un écart relatif de l'ordre de 11 % sur les valeurs de diffusivité thermiques mesurées entre le lot de référence et le lot d'échantillons soumis à une infiltration de NaCl.

Ce résultat semble démontrer la possibilité de mettre en évidence la présence de sels hygroscopique au moyen de méthodes photothermiques.

Ce résultat peut-il être considéré comme significatif ? Effectuons pour cela un test d'hypothèse.

c) Validation statistique

Nous allons comparer deux séries de mesure, un échantillon témoin de 25 mesures et un échantillon test comportant aussi 25 mesures, nous allons estimer l'écart statistique entre ces deux échantillons et vérifier s'ils diffèrent significativement l'un de l'autre.

Nous allons d'abord vérifier la normalité des deux distributions à l'aide d'une représentation de type Quantile-Quantile (q-q plot). Cette représentation permet de conclure à la normalité si les points sont alignés sur la première bissectrice. Nous poserons ensuite les hypothèses du test et nous effectuerons un test de *Student* sur échantillons indépendants, car nos échantillons comportent moins de 30 mesures et qu'ils sont issus de populations à priori indépendantes.

Échantillons

Le Tableau 53 regroupe les valeurs mesurées par méthode des moindres carrés sur les deux échantillons. Le Tableau 101 (voir annexes page 376) plus complet comprend toutes les méthodes de dépouillement.

Tableau 53 : Comparaison d'échantillons avec la méthode des moindres carrés

	Échantillons témoins (25 valeurs)	Échantillons avec sel (25 valeurs)
moyenne (m²/s)	**8,15E-07**	**9,04E-07**
Écart type (m²/s)	**1,86E-08**	**2,85E-08**

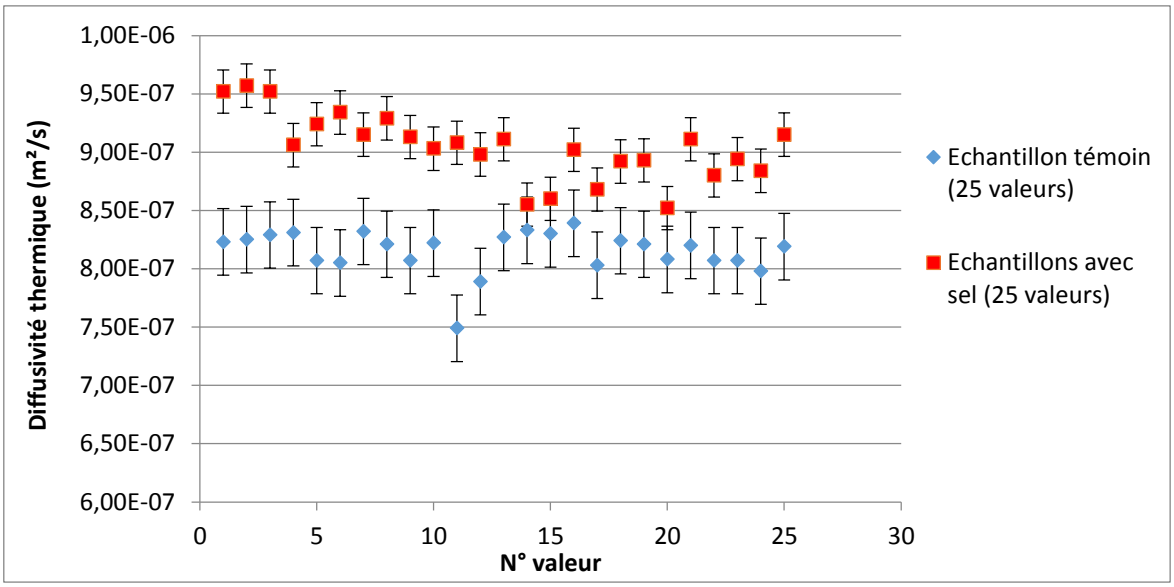


Figure 252 : Représentation des mesures obtenues

Vérification de la normalité

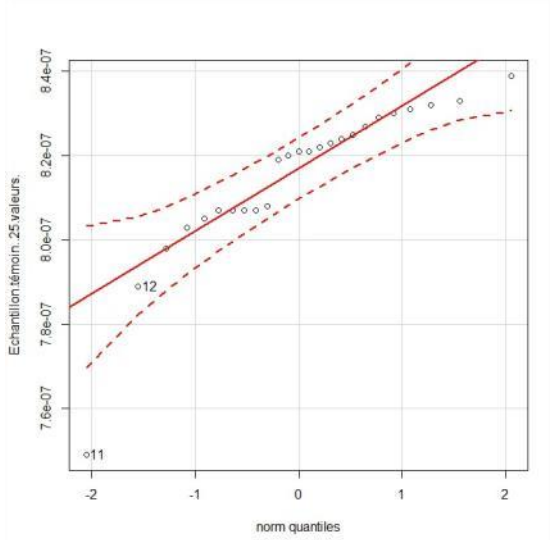


Figure 253 : Diagramme qq-plot échantillon témoin

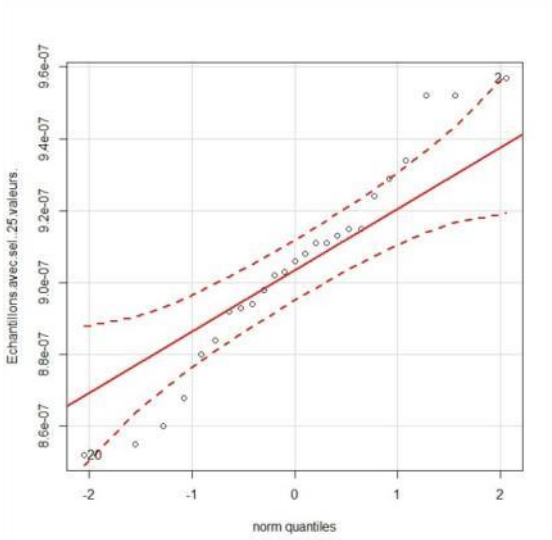


Figure 254 : Diagramme qq-plot échantillon avec sel

L'observation du diagramme qq-plot de la Figure 253 montre un comportement normal de la distribution des valeurs de l'échantillon témoin, le diagramme de la Figure 254 s'écarte légèrement de la normalité pour les quantiles extrêmes. Nous considérerons les deux distributions comme normales.

Hypothèses

Pour effectuer ce test, nous allons faire deux hypothèses, une hypothèse H_0 selon laquelle notre échantillon témoin est semblable à l'échantillon plongé dans une solution saline. Cette condition revient à supposer que l'écart observé entre les deux échantillons relève d'une fluctuation statistique (erreur de première espèce). Si cette hypothèse est observé, l'écart entre les moyennes des deux échantillons doit être négligeable d'un point de vue statistique…

L'hypothèse alternative H suppose que cet écart est significatif et que les deux échantillons appartiennent à des populations différentes.

Fixons un seuil critique d'erreur de première espèce α de 95 % ce qui revient à fixer un risque d'erreur de 5%. On rejettera l'hypothèse H_0 si l'écart statistique entre les deux échantillons dépasse ce seuil critique, dans ce cas nous rejetterons H_0 et nous retiendrons l'hypothèse alternative H. Les échantillons seront alors considérés comme significativement distincts l'un de l'autre.

Test d'adéquation

Ce test de *Student* unilatéral porte sur l'échantillonnage de la différence des moyennes de deux échantillons indépendants. Le **théorème de la limite centrée** nous dit que si l'hypothèse nulle H_0 est vérifiée alors la distribution des différences des moyennes de nos échantillons suit une loi normale N centrée ayant les paramètres suivants :

$$\mu_2 - \mu_1 = 0$$

$$s^2 = \frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}$$

Avec μ_1, μ_2 les moyennes respectives des séries 1 et 2 et $\sigma_1, n_1, \sigma_2, n_2$ leurs écarts types et effectifs respectifs, s^2 l'estimateur de la variance combiné des deux échantillons.

Calculons notre statistique t :

$$t = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{s^2\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

Nous avons :

$$t \approx \frac{9{,}04.10^{-7} - 8{,}15.10^{-7}}{\sqrt{5.79.10^{-16}.\left(\frac{1}{25} + \frac{1}{25}\right)}} \approx 13{,}07$$

Une table de **Student** (voir annexe) nous donne un seuil critique (de signification) $\alpha \approx 1{,}68$ qui correspond à un intervalle de confiance compris entre [7,83…8,46].

Nous constatons que notre statistique $t \gg \alpha$ ce qui nous permet de rejeter l'hypothèse H_0 avec un risque d'erreur inférieur à 5%. Dans notre cas ce risque est totalement négligeable, car inférieur à 1‰...

Les deux échantillons sont donc significativement distincts. Une augmentation de la diffusivité thermique est observée en présence de sel et il est donc possible d'affirmer en l'état que la mesure de la diffusivité thermique à l'aide de méthodes photothermiques permet de repérer efficacement les échantillons ayant été soumis à une infiltration saline de NaCl.

À ce stade on peut s'interroger sur les possibilités que nous offre **SAMMTHIR** et la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de ces sels de chlorure de sodium.

20.1.3. Analyse d'échantillons minces par thermographie infrarouge stimulée

Nous venons de voir que des méthodes de laboratoire (DSC, diffusivimetre flash, etc..) permettent d'accéder à certains paramètres thermo physiques des échantillons, mais cette approche de laboratoire n'est pas adaptée à nos contraintes de terrain. Ces méthodes nécessitent un prélèvement,

elles sont donc destructrices, elles demandent un temps d'analyse non né ligeable, un appareillage parfois complexe et souvent fragile. Voyons s'il est possible d'obtenir des ré ultats par **thermographie infrarouge stimulée**.

Afin de mettre en place une expérimentation non destructive et adaptée au terrain, nous testerons différents types de configurations expérimentales à l'aide de **SAMMTHIR** – excitation flash, cré eau, alé toire… À chaque fois nous nous intéresserons à différents paramètres mesurables avec ce type de méthode :

- ◊ L'é hauffement maximal des échantillons que nous noterons T_{max}
- ◊ La diffusivité thermique a
- ◊ L'effusivité thermique b

Nous allons commencer par é udier les possibilité de l'excitation flash et ses limites si elles existent. Nous savons que cette méthode peut poser des problèmes, car elle est limitée en énergie et soumet l'é hantillon analysé à une contrainte thermique importante ce qui peut être dommageable pour l'échantillon.

20.1.3.1. Étude au moyen d'une excitation surfacique flash

a) Mode opératoire

Nous reprenons les 10 échantillons précédemment étudiés – composés d'une sé ie de 5 é hantillons avec sel et d'une série de 5 échantillons sans sel – ont été peints en noir pour homogén iser l'absorption, ils ont ensuite été disposés sur un support isolant en contreplaqué. Nous avons déposé à proximité un échantillon calibré de PVC (étalonné par le CERTES, voir page 368) qui servira à estimer les effusivités thermiques.

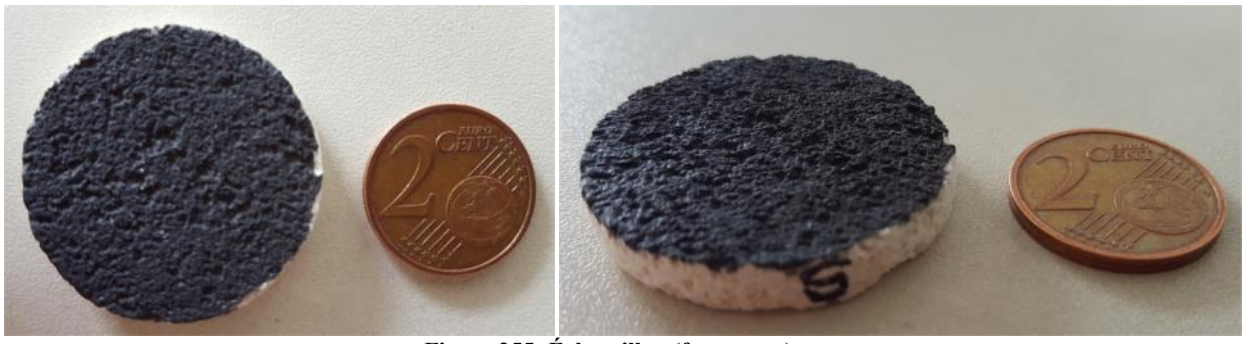


Figure 255: Échantillon (face avant)

L'acquisition est effectué à l'aide d'une camé a à bolomè res de type **FLIR SC 655**. Il s'agit d'une camé a « ondes longues ».

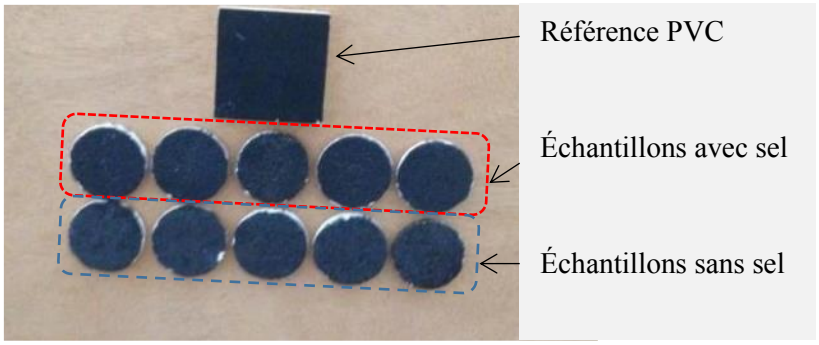


Figure 256 : Échantillons

Excitation surfacique flash

L'excitation surfacique flash par opposition à une excitation locale que nous verrons ulté ieurement, permet d'obtenir la rép nse impulsionnelle (RI) du matériau, cette réponse est facilement modélisable mathématiquement – cf modèle théorique chapitre III, 130 – et il est possible d'estimer facilement la diffusivité et l'effusivité thermique à partir de celle-ci. Pour cela nous avons soumis les échantillons aux flashs de quatre lampes disposées de façon symétrique et délivrant une énergie de 4 x 2400 J pendant environs 5 ms.

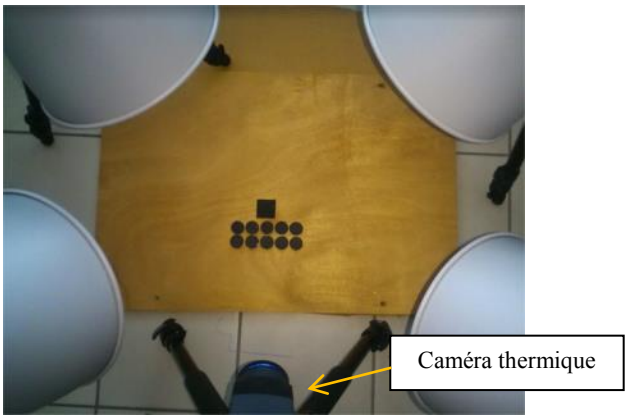


Figure 257 : Dispositif expérimental

b) Observation qualitative

Observons l'image thermique à l'instant d'é é ation maximale de tempé ature (fin de flash) .

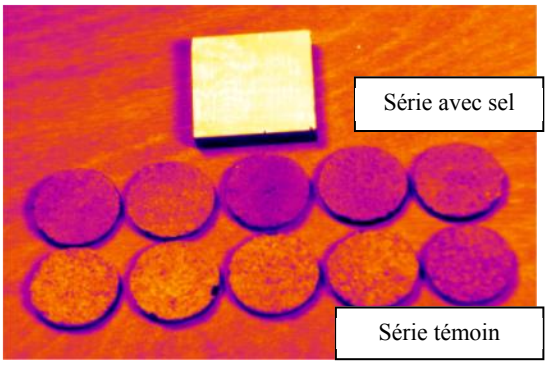
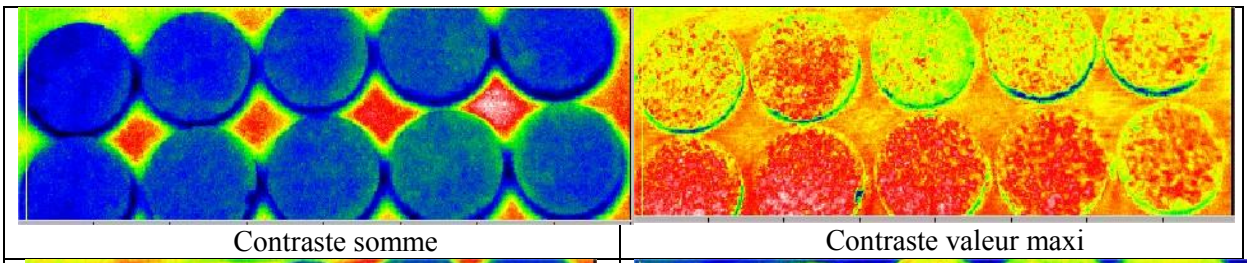


Figure 258 : Image thermique brute

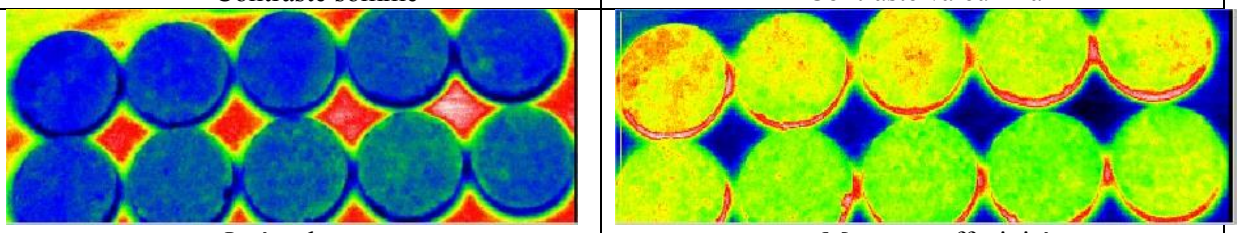
On remarque que la série avec sel (haut) présente un contraste par rapport à la série sans sel du bas. Les échantillons avec sel semblent s'échauffer moins que les échantillons de la série témoin avec un doute sur les deux échantillons situé à droite (possible inversion d'é hantillons lors de la fabrication). Le thermogramme a ensuite été raité l'aide de certains post-traitements numériques que nous avons présentés au chapitre II (à partir de la page 84).

Post-traitement

Tableau 54 : Filtres numériques et image d'effusivité



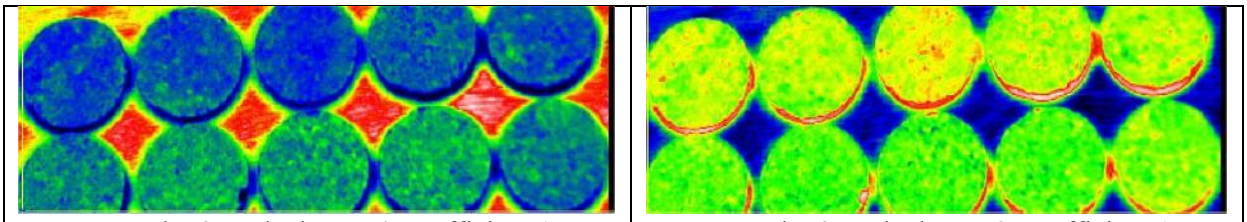
Contraste somme | Contraste valeur maxi



Intégral curseur | Moyenne effusivité

Les images d'effusivité et le contraste valeur maxi montrent une différence nette entre les deux séries. Ces deux post-traitements semblent être de bons indicateurs de la présence de NaCl dans la pierre.

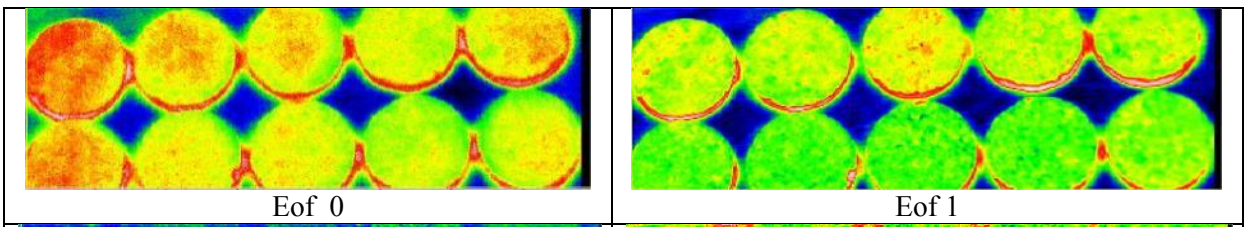
Tableau 55: Décomposition polynomiale



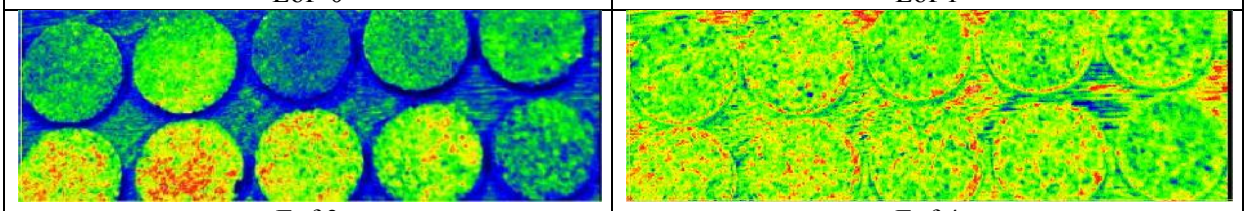
Polynôme de degrés 4, coefficient 1 | Polynôme de degrés 3, coefficient 1

La décomposition polynomiale est un traitement que nous n'avons pas décrit au chapitre II. Son principe est le suivant : il exploite la décomposition sous forme d'un polynôme de la réponse en température. Il est possible à partir d'un polynôme f d'ordre n ($f = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + ... + a_1 X^n + a_0$) de créer des images de ses coefficients successifs (a_0, a_1, a_2 etc.). L'application de ce post-traitement permet d'observer des différences de contraste entre les deux séries d'échantillons.

Tableau 56: Décomposition SVD



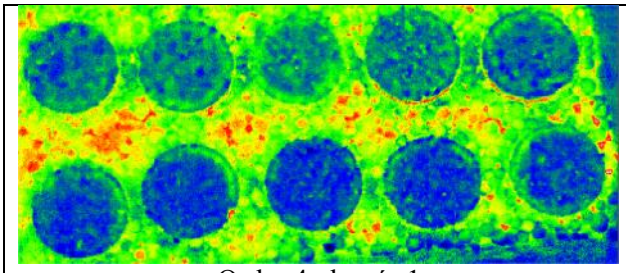
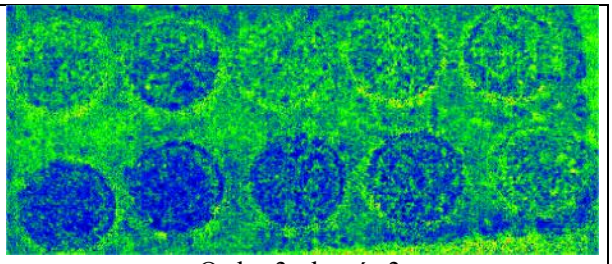
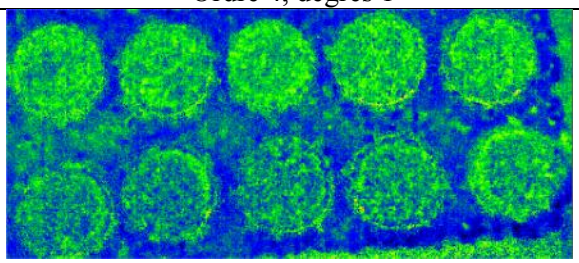
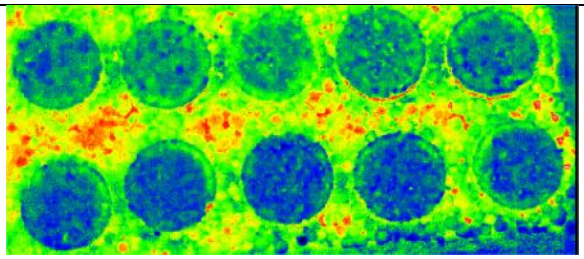
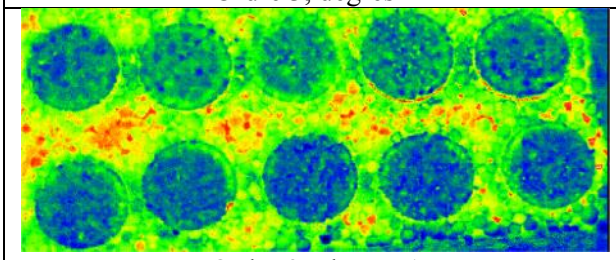
Eof 0 | Eof 1



Eof 3 | Eof 4

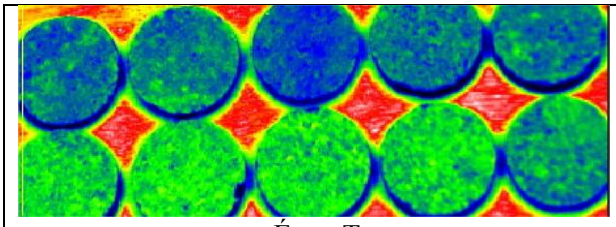
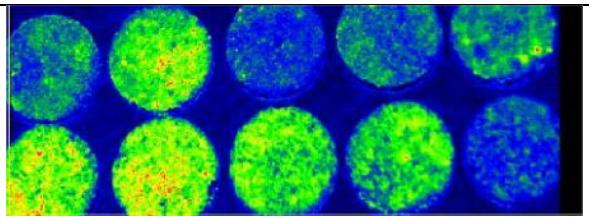
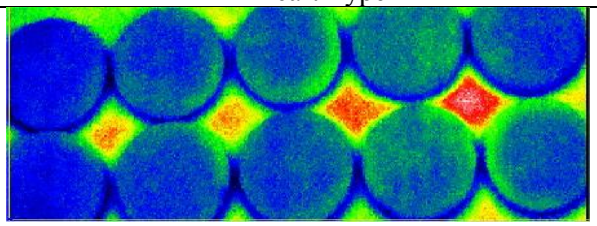
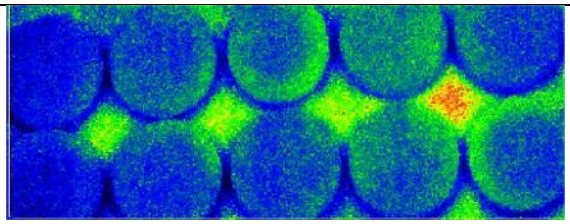
La décomposition SVD permet de mettre en évidence des différences entre les deux séries aux Eof 1 et 3.

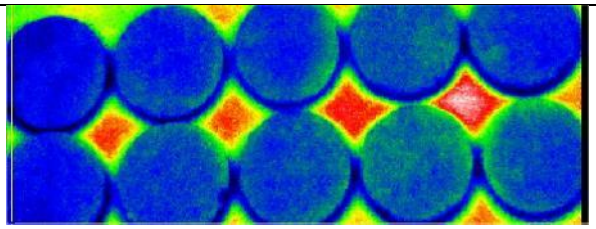
Tableau 57 : TSR

 Ordre 4, degrés 1	 Ordre 3, degrés 3
 Ordre 3, degrés 2	 Ordre 3, degrés 1
 Ordre 2, degrés 1	

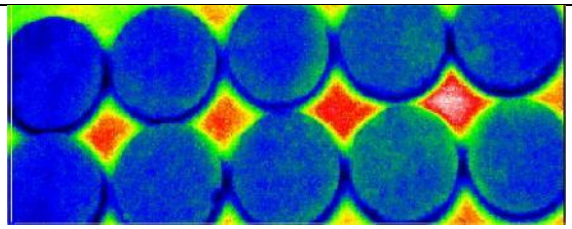
Le TSR permet de mettre en évidence des différences de contraste entre les deux séries d'é hantillons.

Tableau 58: Statistique temporelle

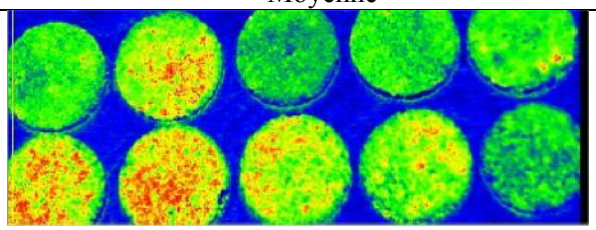
 Écart Type	 Kurtosis
 Médiane	 Mode



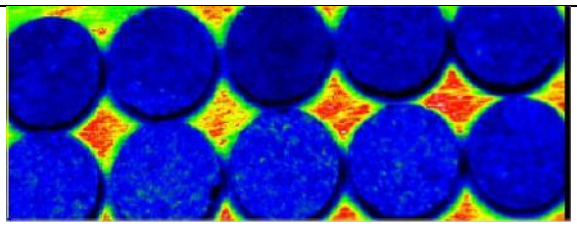
Moyenne



RMS



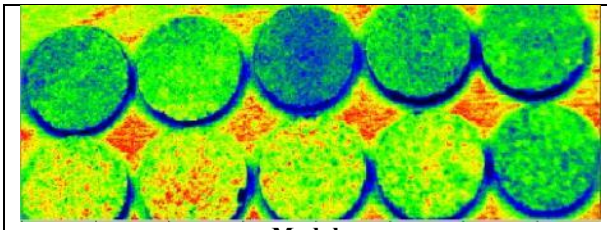
Skewness



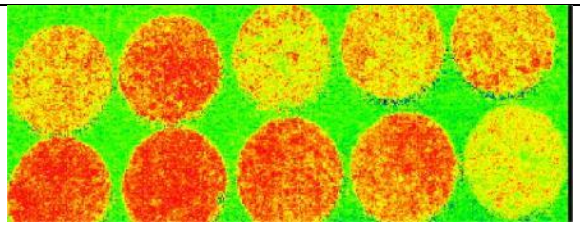
Variance

Les statistiques temporelles donnent des ré ultats inté essants pour l'é art type, le kurtosis et le skewness).

Tableau 59: Transformée de Fourier temporelle



Module



Phase

Les images de phase de la transformée de Fourier permettent de mettre en évidence la présence de deux séries distinctes.

Ainsi nous avons pu observer des résultats prometteurs en matière de détection de la série comportant des sels.

Analyse spatiale

Traçons sur l'image thermique correspondant à l'é hauffement maximal deux profils de température et comparons les évolutions spatiales de température des séries témoins et avec sel.

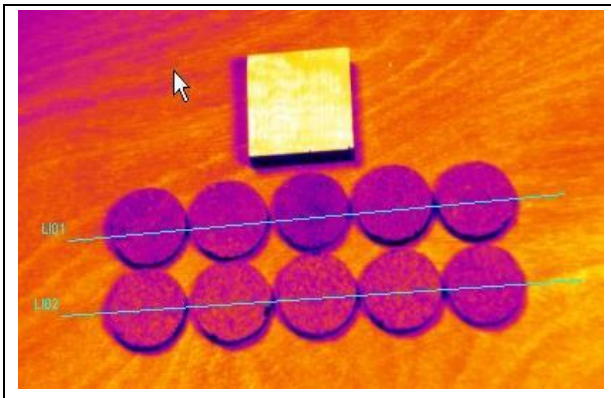


Figure 259 : Image thermique avec profil spatial

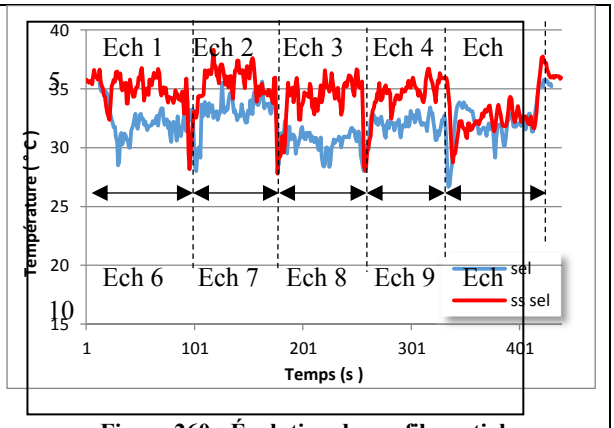


Figure 260 : Évolution du profil spatial

L'observation des profils spatiaux de température montre un écart de température entre les deux séries de l'ordre de 2 à 3 °C. Les échantillons avec sel s'échauffent moins que les échantillons témoins.

Analyse temporelle

Les réponses en température des échantillons ont été relevées.

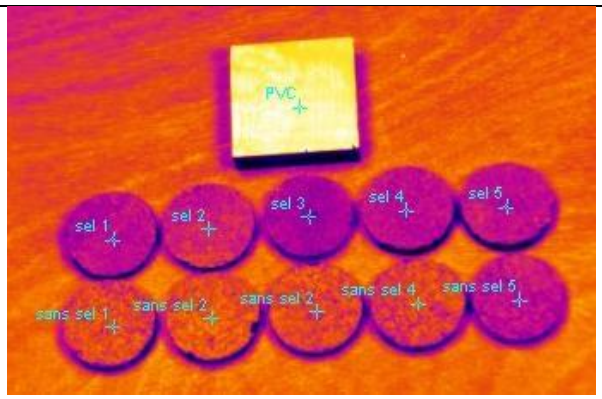


Figure 261 : Image thermique avec les points

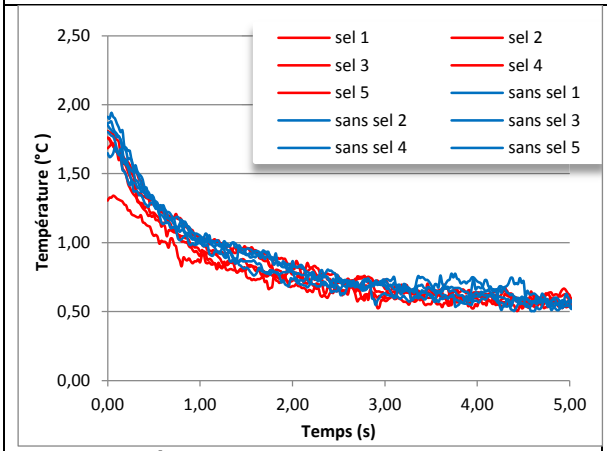


Figure 262 : Évolutions temporelles des échantillons sel et sans sel

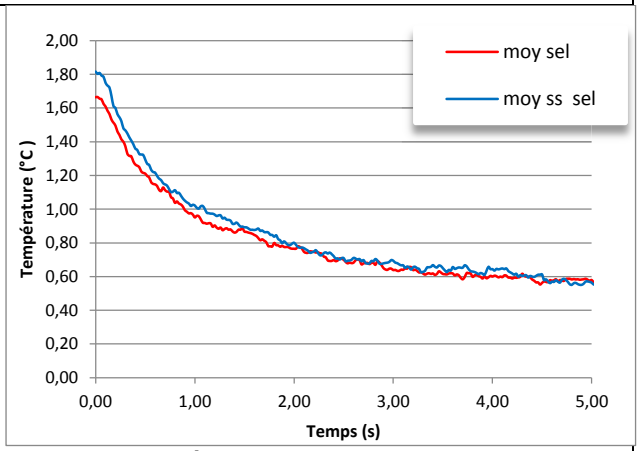
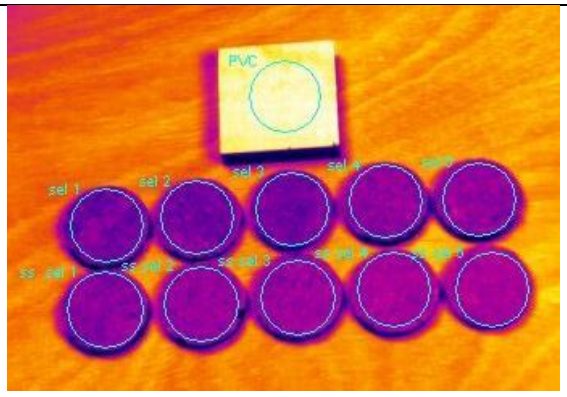


Figure 263 : Évolutions temporelles moyennes des échantillons sel et sans sel

L'observation des courbes montre des différences entre les deux séries d'échantillons. Lorsque l'on trace les courbes moyennes des deux séries – Figure 263 – on observe que la série témoin s'échauffe plus que la série d'échantillons avec sel. Afin d'éliminer le bruit de mesure, dé imitons sur chaque échantillon une zone circulaire sur laquelle la température moyenne est mesurée au cours du temps. Nous obtenons des courbes lissées permettant d'obtenir d'observer des évolutions plus régulières et de déduire plus facilement les propriétés thermophysiques moyennes des échantillons.



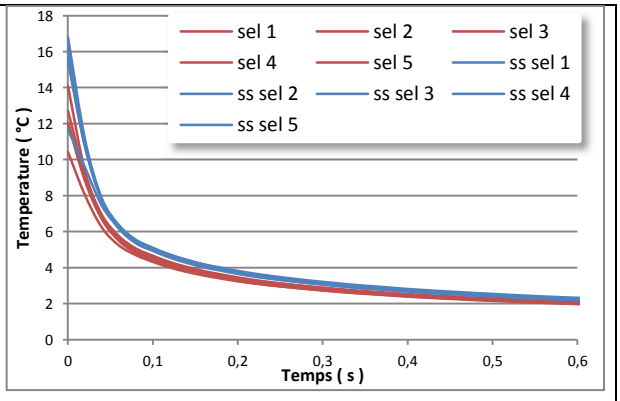


Figure 264 : Image thermique avec zone d'analyse	Figure 265 : Évolution temporelle moyenne

L'observation de ces réponses en température – Figure 265 – confirme l'observation que nous avons faite : les échantillons témoins – courbe bleue – s'échauffent plus que les échantillons avec sel. Essayons de caractériser maintenant ces échantillons.

c) Caractérisation thermophysique

Nous allons maintenant nous intéresser aux aspects quantitatifs en estimant certains paramètres thermophysiques, comme indiqué précédemment on s'intéressera à l'amplitude de l'échauffement – T_{max}, à l'effusivité thermique et à la diffusivité thermique.

Mesure de L'effusivité thermique et T_{max}

Déterminons l'effusivité thermique b des 10 échantillons à l'aide de la *méthode des comparaisons* (voir chapitre III page 162). On rappelle que cette méthode utilise la comparaison des réponses thermique avec celle d'un échantillon calibré – ici un bloc de PVC ayant une effusivité thermique de 408 ± 22 $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$. L'échauffement se détermine en mesurant la hauteur de pic de la réponse. Précisons que ces mesures ont été obtenues à partir des réponses en température moyenne obtenue en intégrant sur la surface totale des échantillons (Figure 266), afin de limiter le bruit et l'incertitude sur nos résultats. D'autres mesures ont été obtenues en prenant en compte la zone centrale (Figure 267) ou le centre de chaque échantillon (Figure 268) afin de limiter les effets de bord. Après comparaison des résultats obtenus, nous avons observé que le dépouillement 1 ne différait pas du dépouillement 2. Les résultats du dépouillement 3 sont quant à eux plus dispersés et bruités. Nous ne retiendrons que les résultats obtenus avec le mode de dépouillement 1.

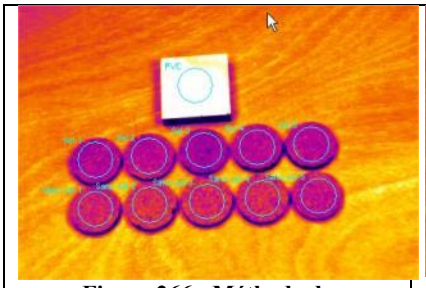


Figure 266 : Méthode de dépouillement 1

Figure 267 : Methode de dépouillement 2

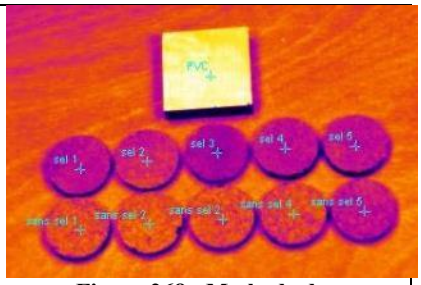


Figure 268 : Methode de dépouillement 3

.

Les réponses en température en représentation classique et log-log sont représentées dans les deux figures suivantes :

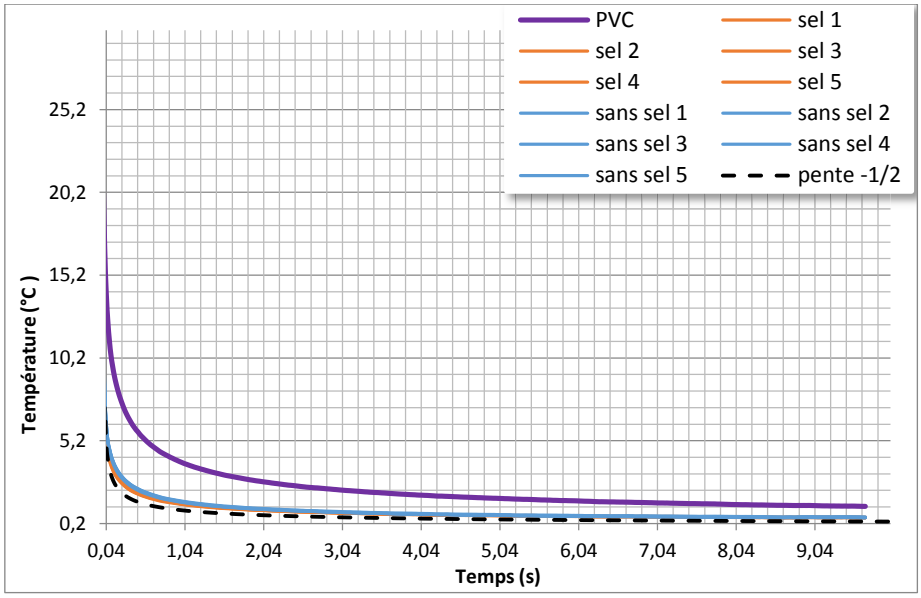


Figure 269 : Réponses en température des échantillons

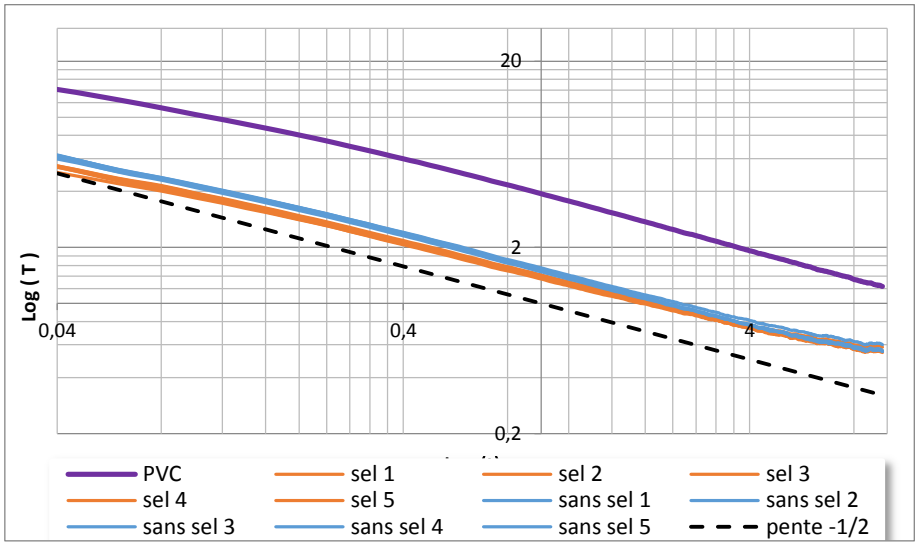


Figure 270 : Réponses en température des échantillons (représentation Log-Log)

Tableau 60 : Valeurs d'effusivité thermique et de Tmax mesurées (méthode de dépouillement 1)

Désignation de l'échantillon	Effusivité thermique b mesurée (SI)	b moyen (SI)	écart type (SI)	T_{max} (K)	T_{max} moyen	Ecart type T_{max} (K)
b sel 1	1107,7	1101,1	18,1	9,7	9,7	0,9
b sel 2	1124,7			11,0		
b sel 3	1093,7			8,5		
b sel 4	1075,7			9,6		
b sel 5	1103,9			9,9		
b sans sel 1	1049,7	1030,9	19,3	12,9	12,2	1,2
b sans sel 2	1039,6			13,3		
b sans sel 3	1034,4			12,5		
b sans sel 4	1032,0			12,3		
b sans sel 5	998,6			10,1		

Les graphes suivants reprennent les résultats rassemblés dans le tableau :

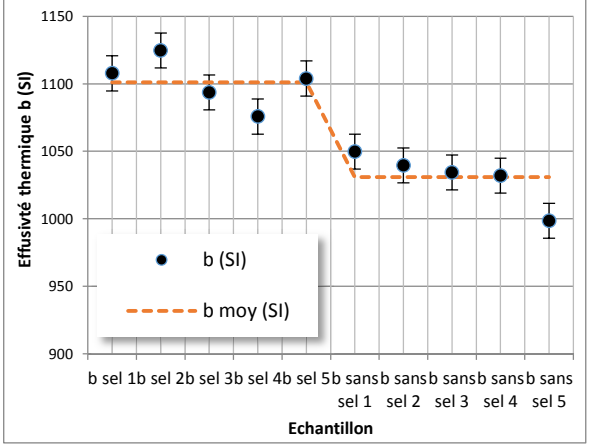


Figure 271 : Variation de l'effusivité thermique b

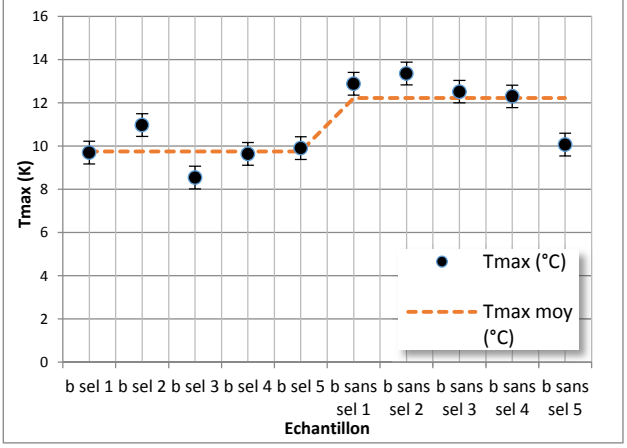


Figure 272 : Variation du T_{max}

Les mesures ont été rassemblées dans le Tableau 60. Les données relatives montrent qu'il existe des écarts mesurables entre les deux séries d'échantillons sur les paramètres d'effusivité thermique et d'échauffement. L'effusivité thermique des échantillons avec sel est supérieure à celle de la série témoin. L'échauffement est quant à lui moins important pour les échantillons de la série témoin. Quelle peut en être l'explication ? Nous avons observé que les échantillons avec sel avaient des surfaces plus réfléchissantes que ceux de la série témoin, on suppose donc, sans l'avoir vérifié, que la réflectivité des échantillons avec sel (propriétés radiatives) est supérieure en raison des cristaux de sel présents en surface ce qui peut expliquer une absorption moindre de flux thermique et donc un échauffement moindre.

Mesure de la diffusivité thermique (a) en face avant

Intéressons-nous à la diffusivité thermique. Vérifions si cette grandeur est sensible à la présence de sel comme nous l'avons observé pour l'effusivité thermique. Les deux grandeurs étant liées on peut raisonnablement supposer que cette grandeur sera affectée par la présence de sel. Pour estimer les diffusivités en face avant nous avons procédé selon les deux méthodes suivantes :

Par la *méthode de Parker* qui repose sur la mesure du temps de rupture de pente (t_{rp}) de la réponse en température (voir page 130). L'estimation du temps de rupture de pente a été réalisée sur les 10 échantillons en déterminant l'abscisse du point l'intersection des tangentes temps longs et temps court des réponses en température (voir Figure 273), on démontre que la diffusivité s'obtient simplement à partir de l'expression suivante :

$$a = \frac{L^2}{\pi . t_{rp}} \qquad \text{(avec L = épaisseur de l'échantillon en [m] et t en [s])}$$

Cette méthode est applicable en l'espèce, car nous sommes en présence d'échantillons minces. Notons aussi que ce modèle de Parker est un modèle sans pertes ce qui a pour effet de surestimer les valeurs estimées de diffusivité.

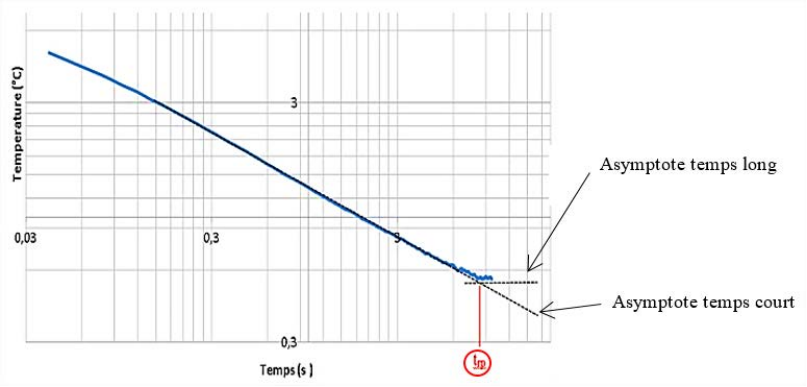


Figure 273: Détermination du temps de rupture de pente

Par ajustement théorie/expérience : Cette méthode consiste à ajuster une courbe théorique issue d'un modèle à un courbe expérimentale par variation du paramètre recherché voir Figure 274).

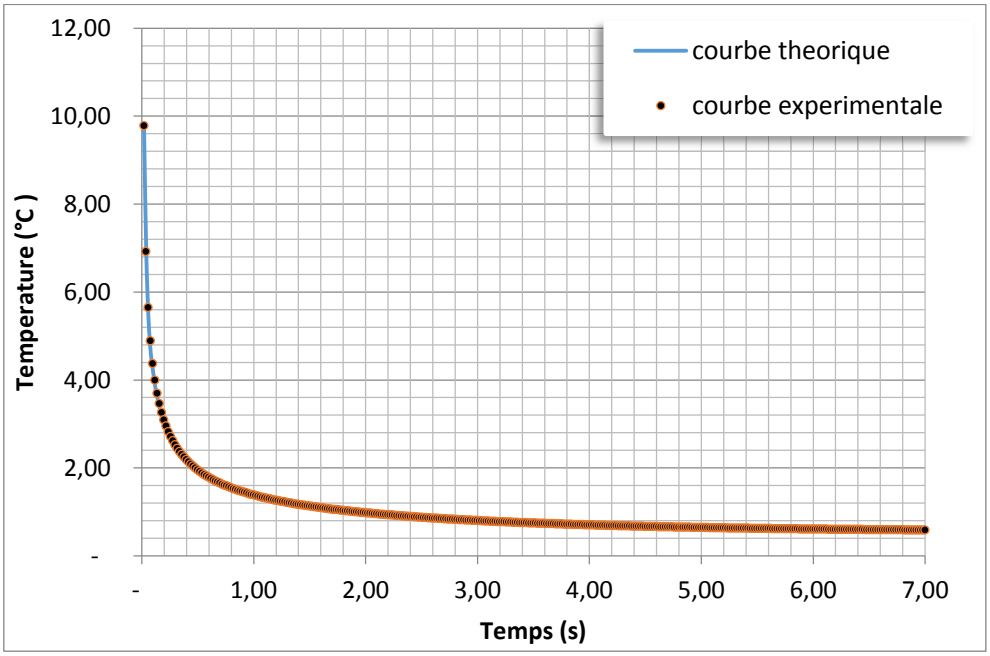


Figure 274 : Ajustement d'un relevé expérimental (sel 1) avec une courbe théorique

Le tableau suivant regroupe un écart sur la diffusivité entre les deux séries ; le tableau complet est consultable en annexe (Tableau 103, page 378).

Tableau 61 : Mesures de diffusivité face avant ech. minces

	Témoin		sel	
	Diffusivité Parker (m²/s)	**Diffusivité ajustement (m²/s)**	**Diffusivité Parker (m²/s)**	**Diffusivité ajustement (m²/s)**
Moyenne totale	9,21E-07	8,58E-07	9,80E-07	9,98E-07
Écart type total	4,01E-08	6,32E-08	5,16E-08	4,82E-08

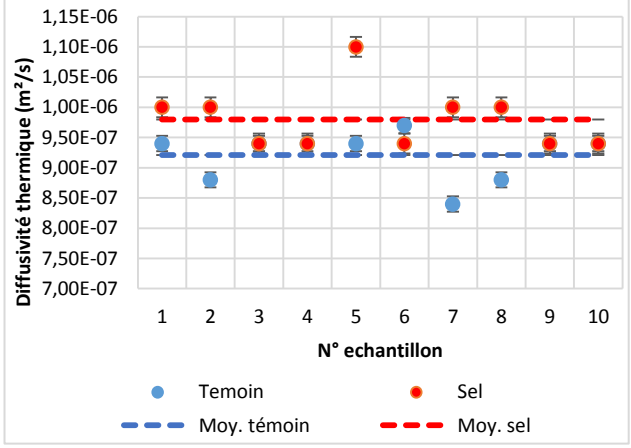


Figure 275 : Diffusivités (méthode de Parker)

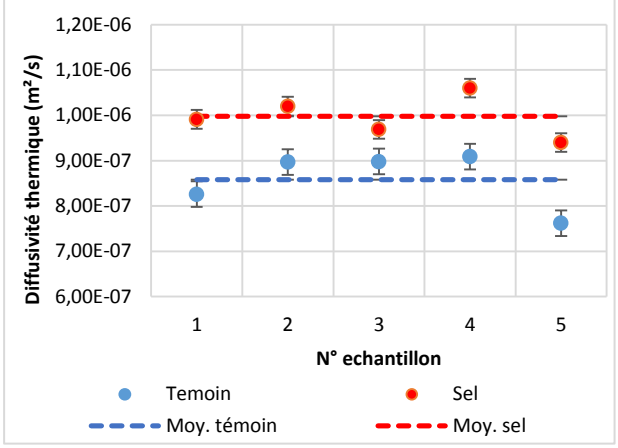


Figure 276 : Diffusivités (méthode par ajustement)

Tableau 62: Récapitulatif

Échantillon	Diffusivité thermique a (m²/s) modèle de Parker	Diffusivité thermique a (m²/s) ajustement
Moyenne ech. Témoins (sans sel)	$9{,}21.10^{-7}$	$8{,}58.10^{-7}$
Écart relatif par rapport à la valeur du diffusivimetre flash ($8{,}92.10^{-7}$ m²/s)	3,25 %	-3,81 %
Moyenne ech. sel	$9{,}80.10^{-7}$	$9{,}98.10^{-7}$
Écart relatif par rapport à la valeur du diffusivimetre flash ($9{,}72.10^{-7}$ m²/s)	0,82 %	2,67 %
Écart relatif inter-echantillons	**6,40 %**	**16,31 %**

Les deux méthodes d'estimation de la diffusivité thermique montrent que les valeurs mesurés pour la série d'échantillons comportant du sel sont supérieures à la série d'échantillons saine. Les écarts relatifs peuvent dépasser 15 % entre les deux séries. Les différences entre les deux modes de dépouillement proviennent du fait que la méthode de Parker néglige les pertes, mais elle est plus simple et plus rapide à mettre en œuvre, le temps de rupture de pente étant facilement accessible. Nous considérerons le dépouillement par ajustement plus fiable et c'est celui-là que nous retiendrons.

NB : Il faut avoir à l'esprit que ces échantillons ne sont pas inertes dans le temps comme pourrait l'être du PVC par exemple. Nous savons que la pierre absorbe et libère de l'humidité ce qui peut occasionner un biais sur les mesures, c'est pourquoi nous avons pris soin de faire ces manipulations dans des délais courts afin de limiter cet effet dans la mesure du possible.

Mesure de la diffusivité thermique (a) en face arrière

La diffusivité thermique des échantillons en face arrière a aussi été estimé à l'aide d'un dépouillement par ajustement théorie/expérience. Deux mesures ont été effectuées pour chaque échantillon. L'intérêt de cette analyse est de vérifier et valider les résultats obtenus en face avant.

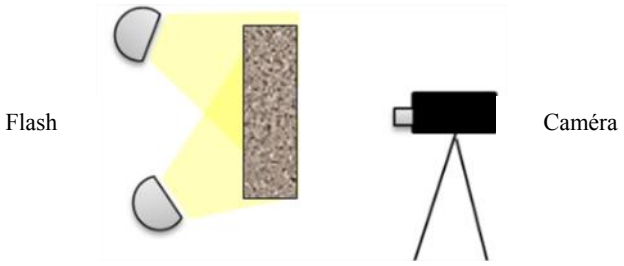


Figure 277 : Principe de la mesure en face arrière

Résultats

Les résultats ont été regroupés dans le tableau ci-dessous (le tableau complet est consultable en annexe : Tableau 104 page 379).

Tableau 63 : Résultat mesures de la diffusivité en face arrière – Methode par ajustement

	Échantillon avec sel		Échantillons témoins	
	Moyenne	**$9{,}32E^{-07}$**	**Moyenne**	**$7{,}99E^{-07}$**
	Écart type	**$9{,}94E^{-08}$**	**Écart type**	**$4{,}11E^{-08}$**
Comparaison ech sel/échantillons témoin	**Écart (%)**			
	16,71%			

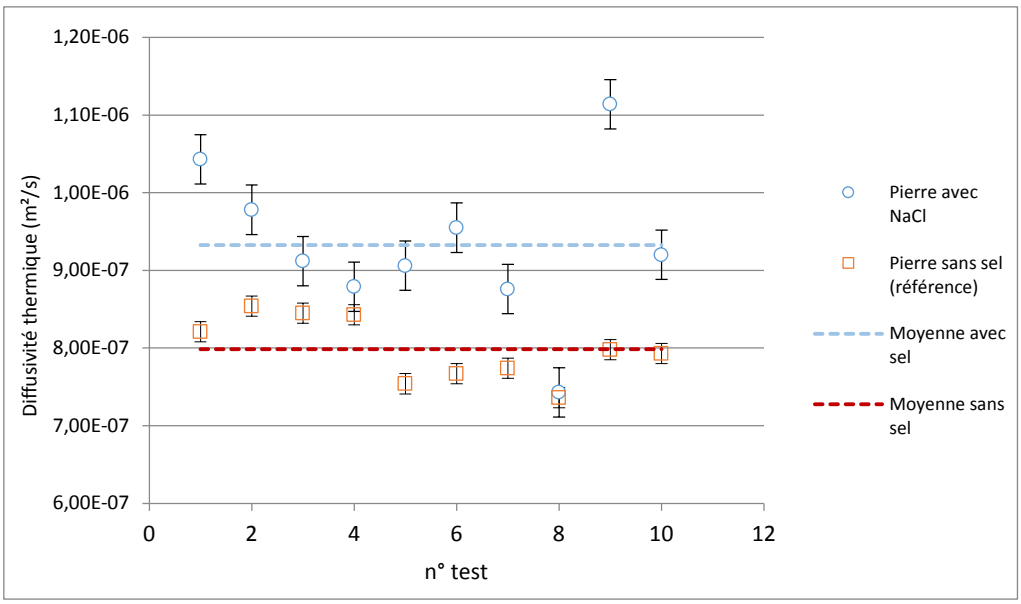


Figure 278: Mesures de la diffusivité thermique en face arrière

On peut observer un écart de l'ordre de 16 % entre les deux é hantillons (voir Tableau 63), cet écart est du même ordre que celui observé en face avant avec la mé hode de l'ajustement. Ce résultat confirme donc celui obtenu précédemment. Cette é ude confirme l'observation qui a déjà été faite, la diffusivité thermique des échantillons témoins est inférieure à celle des échantillons soumis à une infiltration saline.

Proce ons comme pre éd mment en effectuant une validation statistique à l'aide d'un test t de *Student*.

d) Validation statistique

Effectuons un test t sur les valeurs moyennes de nos échantillons, comme précédemment (voir page 206) nous posons deux hypothèses :

- ◊ l'hypothèse nulle H_0 : Les écarts entre moyennes ne sont pas significatifs (au seuil α de 5%).
- ◊ L'hypothèse alternative H : Les écarts entre les moyennes ne s'expliquent pas par la statistique.

Les résultats de cette étude statistique ont été consignés dans le tableau suivant :

Tableau 64 : Validation statistique des paramètres thermophysiques mesurés

Paramètre	**Effusivité thermique b**	**T_{max}**	**Diffusivité thermique face avant**	
Méthode	**Méthodes des comparaisons**	**Mesure directe**	**Modèle de Parker**	**Ajustement**
Échantillonnage	5	5	10	5
Région d'acceptation	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,262…2,262]	[-2,776…2,776]
Statistique de test	8,67	-6,21	3,62	6,49
Intervalle de confiance ech.sel.	[1078,6…1123,6]	[8,58…10,82]	$[9,43.10^{-7}…10,17.10^{-7}]$	$[9,38.10^{-7}…10,58.10^{-7}]$
Hypothèse retenue	H_0 rejetée	H_0 rejetée	H_0 rejetée	H_0 rejetée

Paramètre	**Diffusivité thermique face arrière**
Méthode	**Ajustement**
Échantillonnage	10
Région d'acceptation	[-2,262…2,262]
Statistique de test	4,23
Intervalle de confiance	$[8,61.10^{-7}…10,03.10^{-7}]$
Hypothèse retenue	H_0 rejetée

L'étude statistique sur les différents paramètres indique que les mesures des échantillons de la série avec sel diffèrent de manière significative des mesures effectuées sur les échantillons témoins. Bien entendu cette étude est sommaire, le nombre de mesures est faible, mais il est néanmoins possible d'affirmer que ces différences proviennent de la présence de sel dans ces échantillons et qu'il est possible de mettre en évidence leur présence à l'aide du dispositif SAMMTHIR sur des échantillons minces.

e) Vue synthétique

Dans les graphes suivants, nous avons représenté chaque paramètre (mesurés en face avant) par rapport à l'un des deux autres paramètres. Ce type de représentation permet d'obtenir une représentation graphique parlante du croisement de nos données selon plusieurs paramètres et de visualiser l'éloignement de plusieurs séries de mesures.

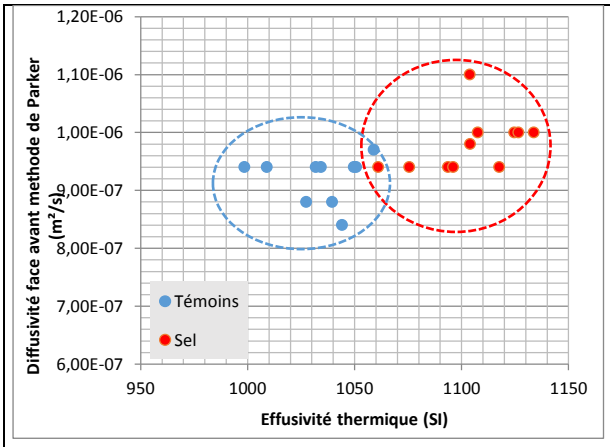


Figure 279 : Diffusivité en fonction de l'effusivité thermique

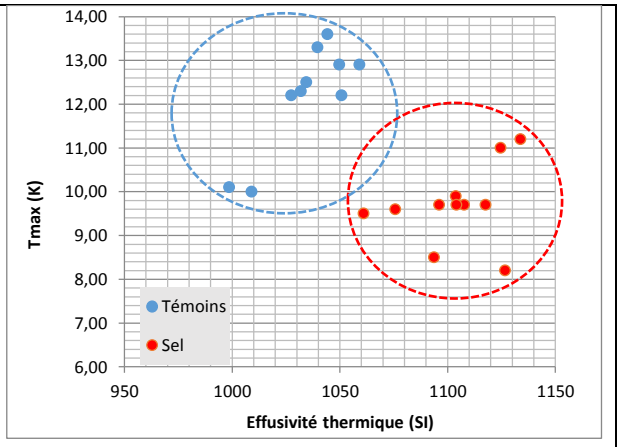


Figure 280 : T_{max} en fonction de l'effusivité thermique

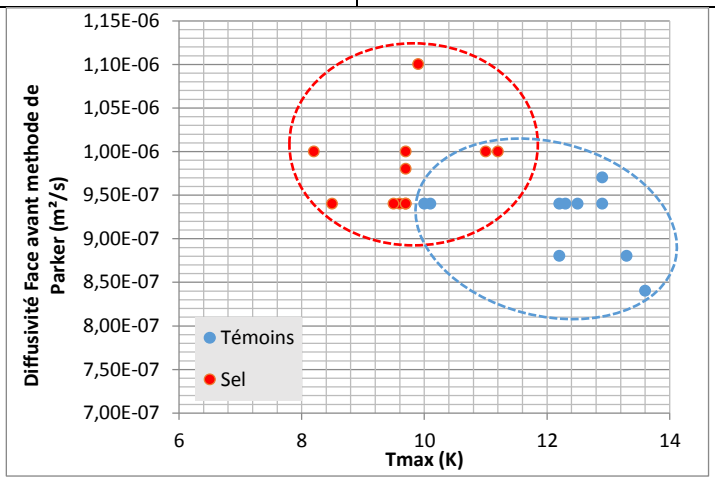


Figure 281 : Diffusivité thermique en fonction du T_{max}

Lorsque nous croisons les données, nous obtenons plusieurs graphes qui mettent en évidence des répartitions distinctes des nuages de points. On peut remarquer que les barycentres des nuages correspondants s'écartent les uns des autres de plusieurs écarts types.

f) Conclusion

L'observation des échantillons par thermographie à l'aide d'une excitation flash nous permet de tirer plusieurs conclusions. Il est tout d'abord possible de différencier les deux séries d'échantillons à l'aide de la thermographie infrarouge stimulée. Le repérage peut se faire par une simple observation du thermogramme à l'instant de l'échauffement, où des écarts de température significatifs sont constatés.

Nous avons observé en outre que certains post-traitements comme les traitements statistiques permettaient de repérer efficacement les échantillons comportant des sels (kurtosis, écart type). Les profils spatiaux et temporels de température confirment les résultats obtenus après une observation directe du thermogramme. L'estimation des paramètres thermophysiques tels que l'échauffement maximal (T_{max}), l'effusivité thermique ou le diffusivité thermique face avant ou arrière permettent eux aussi de séparer efficacement les séries d'échantillons, ces mesures ont été validées sur le plan statistique. Nous avons démontré qu'en présence de sel les échantillons de pierre calcaire ont des effusivités thermiques et diffusivités thermiques plus élevées que les échantillons témoin, l'échauffement observé est quant à lui plus faible que celui des échantillons témoins. En conclusion nous pouvons dire que l'excitation flash associé au dispositif de mesure par thermographie IR stimulée (SAMMTHIR) est un moyen efficient pour repérer des échantillons minces ayant été soumis à une infiltration saline de chlorure de sodium (NaCl).

Examinons maintenant s'il est possible d'avoir le même type de résultat avec une excitation surfacique de type créneau.

20.1.3.2. Excitation surfacique de type créneau

L'excitation créneau permet un dépôt d'énergie plus important sur la durée donc une meilleure détection (meilleur contraste thermique), c'est ce type de mise sous contrainte que nous privilégions habituellement sur le terrain par souci de préservation des œuvres artistiques. Nous supposons que ce type de mise sous contrainte peut permettre de repérer les échantillons soumis au sel. Vérifions ce point dans un premier temps à l'aide d'une simulation numérique avant de procéder à l'étude expérimentale des échantillons que nous venons d'étudier en flash.

a) Simulation du problème en excitation Créneau

Le modèle théorique créneau développé pour l'étude utilise le modèle convolutif utilisé classiquement en physique. Cette simulation nous permettra deux choses, tout d'abord qu'il est possible avec une excitation créneau de repérer la présence de sels, mais aussi de démontrer qu'il est possible d'estimer la valeur de l'effusivité thermique b (habituellement déterminée en flash).

Mode opératoire

Cette modélisation se fera à l'aide d'un logiciel de simulation développé sous *Labview* (Réponse Parker Face avant). Après avoir préalablement renseigné certains paramètres thermophysiques tirés des expérimentations précédentes (voir tableau ci-dessous), cet outil renvoie pour un signal donné la réponse en température face avant du matériau.

Tableau 65 : Valeurs théoriques

	k (W/m.K)	ρ (kg/m3)	C_p (J/kg.K)	b ($J/m^2.K.s^{1/2}$)	a (m^2/s
Échantillon sans sel	0,93	1375	830	1030	$8{,}15 \cdot 10^{-7}$
Échantillon sel	1,05	1219	950	1103	$9{,}04 \cdot 10^{-7}$
PVC	0,16	1101	960	408	$1{,}49 \cdot 10^{-7}$

Nous testerons différentes durées de créneaux d'excitations 20 ms, 60 ms, 100 ms, 1s, 3s afin de nous rapprocher le plus possible du modèle théorique de Parker, nous porterons un intérêt particulier à l'estimation des paramètres thermophysique (a, b, T_{max}).

Détermination des propriétés thermophysiques

La Température maximale

C'est un paramètre qui est simple à obtenir, nous avons montré expérimentalement qu'il permettait de mettre en évidence la présence de sel dans des pierres calcaires. Il est donc intéressant de la considérer aussi pour une excitation de type créneau. La figure ci-dessous représente l'évolution de la température au cours du temps avec différents créneaux d'excitations (20mms, 60ms, 100ms, 500ms, 1s, 3s) sur les échantillons avec sel :

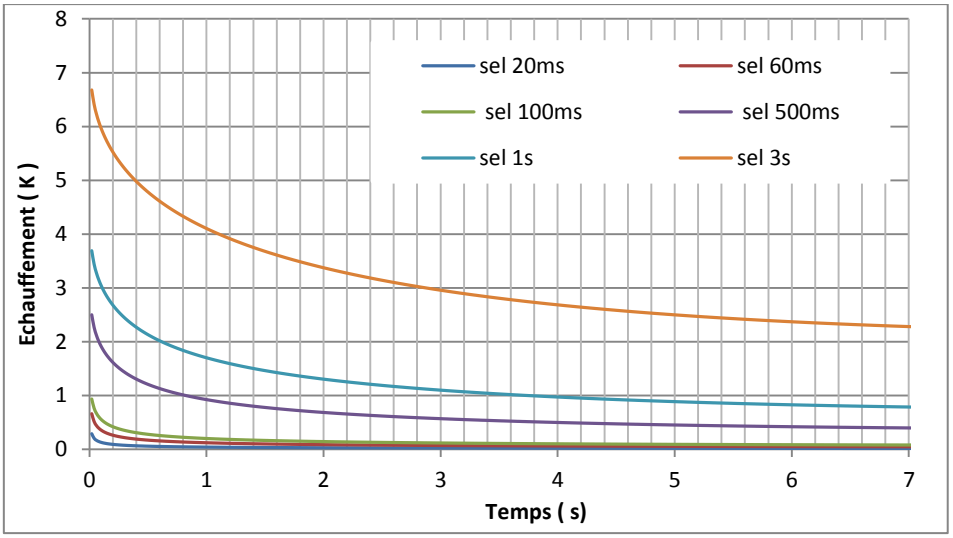


Figure 282 : Exemple de réponses en température de l'échantillon avec sel avec différentes excitations créneaux

Les valeurs T_{max} ont été regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 66 : Résultats de simulation créneau

	T_{max} (K)		
Excitation	**Témoin**	**Avec sel**	**Écarts relatifs (%)**
Créneau 20 ms	0,31	0,3	-3,2 %
Créneau 60 ms	0,71	0,7	-1,4 %
Créneau100 ms	1,00	0,9	-10 %
Créneau 500 ms	2,68	2,5	-6,7 %
Créneau 1s	3,91	3,7	-5,4 %
Créneau 3s	7,15	6,7	-6,3 %

Comme observé précédemment les échauffements sont moindres en présence de sel. Les écarts observé par rapport à l'échantillon té oin est de l'ordre de 5 % ce qui permet d'envisager une possible détection de la présence de sel dans des pierres calcaires par une analyse de la température maximale.

L'Effusivité thermique b

Dans la figure suivante nous avons représenté les réponses photothermiques avec différentes excitations crén aux d'un é hantillon contaminé par du sel. Ces figures montrent des comportements similaires à ceux observés en flash : décroissance en pente -1/2 puis pré ence d'un plateau. La présence de cette pente -1/2 laisse envisager des mesures d'effusivité thermique, mais la duré de celle-ci baisse avec la durée du créneau ce qui la rend difficilement exploitable pour des durées d'excitation supérieures à 1s.

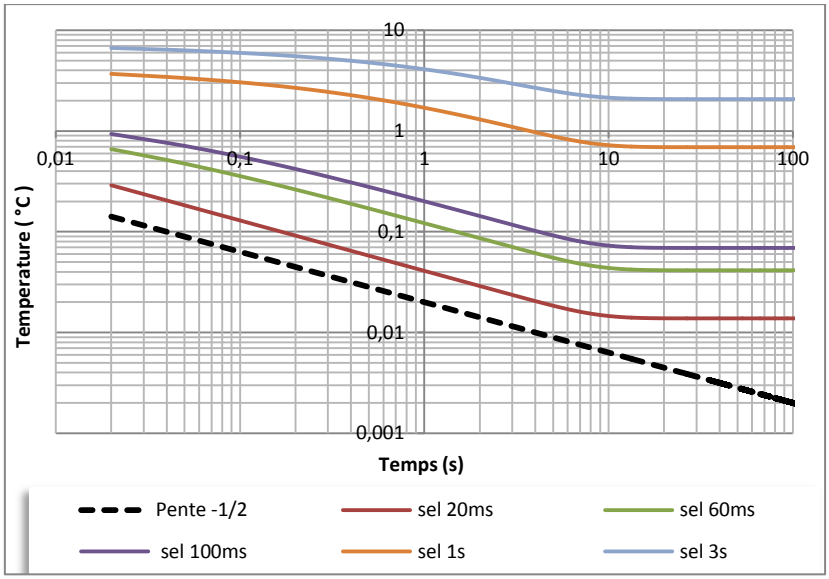


Figure 283 : Réponses en température d'échantillons avec sel (représentation Log-Log), simulation créneau

Tableau 67: Estimation de l'effusivité thermique à partir d'une simulation créneau

	Témoin		Avec sel		
Excitation	b (SI)	Écart relatif par rapport à la valeur théorique (%)	b (SI)	Écart relatif par rapport à la valeur théorique (%)	Écart relatif sel /témoin (%)
Valeur théorique	1030	0%	1100	0%	6,8 %
Créneau 20 ms	1021,56	-0,6%	1092,81	-0,6%	7 %
Créneau 60 ms	1021,89	-0,7%	1092,77	-0,6%	6,9 %
Créneau100 ms	1021,73	-0,8%	1092,74	-0,66%	6,9 %
Créneau 500 ms	1021,82	-0,79%	1093,22	-0,61%	7 %
Créneau 1s	1017,84	-1,1%	1093,19	-0,6%	7,4 %
Créneau 3s	1021,59	-0,8%	1092,11	-0,7%	6.9 %

Les valeurs estimé s de b correspondent aux valeurs attendues. On ne remarque pas d'é arts significatifs suivant la durée du créneau, les écarts entre échantillons avec sel et témoin sont de l'ordre de 7 % quel que soit la duré de l'excitation crén au ce qui permet d'envisager des possibilités en matiè e de mise en é idence de la pré ence de NaCl dans la pierre à partir d'une estimation de l'effusivité hermique effectué au moyen d'une excitation de type créneau.

La diffusivité thermique a

Comme précédemment nous avons mis en place deux techniques d'estimation du paramè re diffusivité thermique, la premiè e utilise l'estimation à partir du temps de rupture de pente, la seconde repose sur un ajustement théorie expérience.

Le temps de rupture de pente obtenu à partir des simulations permet de déduire la diffusivité thermique du matériau :

Tableau 68 : Diffusivité thermique par estimation du temps de rupture de pente (simulation créneau)

	Témoin			Avec sel		
Mesure de a	**t_{rp} (s)**	**a (m²/s)**	**Écart relatif (%)**	**t_{rp}(s)**	**a (m²/s)**	**Écart relatif (%)**

Valeur théorique		**$8{,}15.10^{-07}$**			**$9{,}04.10^{-07}$**	
Créneau 20 ms	10	$7{,}96.10^{-07}$		8,5	$9{,}37.10^{-07}$	
Créneau 60 ms	10	$7{,}96.10^{-07}$		8,5	$9{,}37.10^{-07}$	
Créneau 100 ms	10	$7{,}96.10^{-07}$		8,5	$9{,}37.10^{-07}$	
Créneau 500 ms	10	$7{,}96.10^{-07}$	-2,3%	8,5	$9{,}37.10^{-07}$	3,6%
Créneau 1s	10	$7{,}96.10^{-07}$		8,5	$9{,}37.10^{-07}$	
Créneau 3s	10	$7{,}96.10^{-07}$		8,5	$9{,}37.10^{-07}$	
Écart relatif entre a sans sel et a avec sel					17%	

Le tableau ci-dessus présente de façon synthétique et pour différentes durées d'excitation les valeurs estimées de la diffusivité thermique a. Voyons ce que donne la méthode de calcul de a par ajustement :

Tableau 69 : Diffusivité thermique par estimation de paramètre (ajustement), simulation créneau

	Témoin		Avec sel		Écart relatif témoins et echa. avec sel (%)
Mesure de a	**a (m²/s)**	**Écart relatif par rapport à la valeur théorique (%)**	**a (m²/s)**	**Écart relatif par rapport à la valeur théorique (%)**	
Valeur théorique	**$8{,}15.10^{-07}$**	**0,00%**	**$9{,}04.10^{-07}$**	**0,00%**	**10%**
Créneau 20 ms	$8{,}12.10^{-07}$	-0,36%	$9{,}05.10^{-07}$	0,12%	17%
Créneau 60 ms	$8{,}16.10^{-07}$	0,12%	$9{,}05.10^{-07}$	0,14%	16%
Créneau 100 ms	$8{,}14.10^{-07}$	-0,01%	$9{,}07.10^{-07}$	0,36%	19%
Créneau 500 ms	$8{,}13.10^{-07}$	-0,15%	$9{,}05.10^{-07}$	0,11%	11%
Créneau 1s	$8{,}14.10^{-07}$	-0,02%	$9{,}07.10^{-07}$	0,36%	11,3%
Créneau 3s	$8{,}12.10^{-07}$	-0,36%	$9{,}04.10^{-07}$	0,05%	11%
Écart relatif moyen entre a témoin et a avec sel					**14%**

Comme en mode flash, l'excitation créneau semble permettre la détection de la présence de NaCl dans la pierre calcaire d'Avignon.

Cette étude montre que les paramètres thermophysiques a, b et T_{max} peuvent êtres estimés de façon précise à partir d'une excitation créneau et qu'ils peuvent être utiles à la mise en évidence de sel dans des échantillons de pierre calcaire. La durée d'excitation pour de faibles durées (moins de 3 s) ne semble pas s'écarter notablement de ce qu'on peut obtenir avec une excitation flash ; on ne constate pas de différences notables par rapport aux valeurs théoriques attendues. Les écarts relatifs entre l'échantillon sain (témoin) et l'échantillon avec sel peuvent atteindre jusqu'à 19 %. Il est donc possible d'utiliser l'excitation créneau pour mettre en évidence la présence d'infiltration de NaCl dans de la pierre calcaire.

Procédons maintenant à l'étude expérimentale en soumettant les échantillons que nous avons étudiés à une excitation de type créneau.

b) Description du dispositif expérimental et mode opératoire

Pour les manipulations suivantes, nous utiliserons deux sources halogènes d'une puissance de 500 W, une caméra *Flir* SC655 cadencée à 50 Hz. L'excitation retenue est un créneau de 1 s, l'observation se fera pendant 30 s.

c) Étude qualitative

Procédons comme précédemment et observons l'image thermique brute en fin d'échauffement.

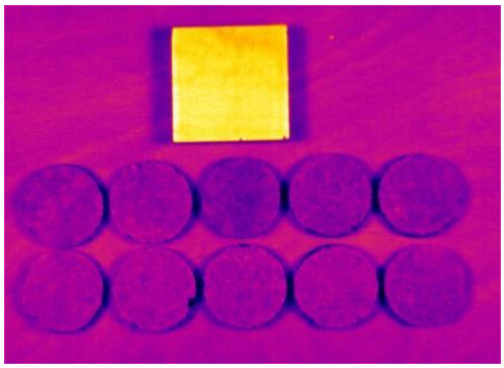


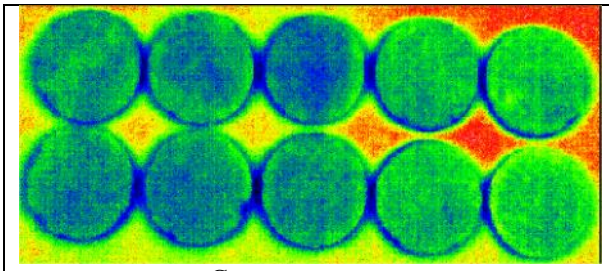
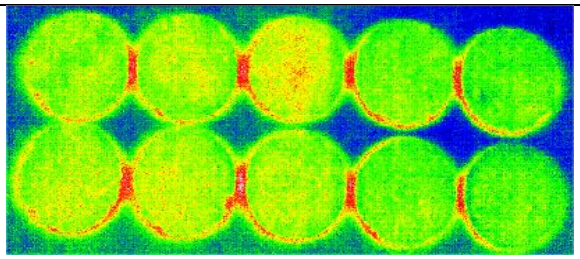
Figure 284 : Image thermique créneau 1 s

L'image brute ne permet pas de distinguer de façon é idente la série té oin et la sé ie avec sel.

Post-traitements

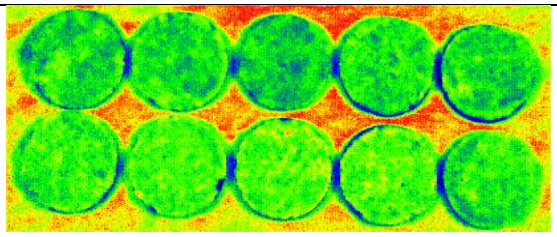
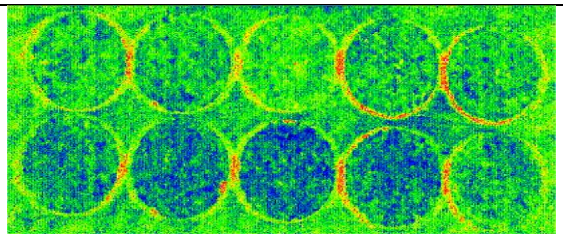
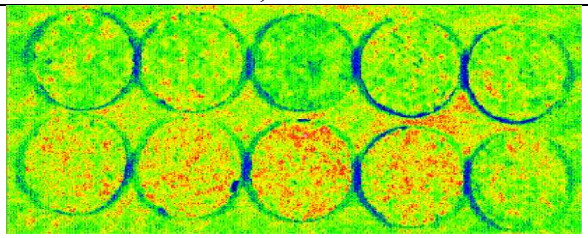
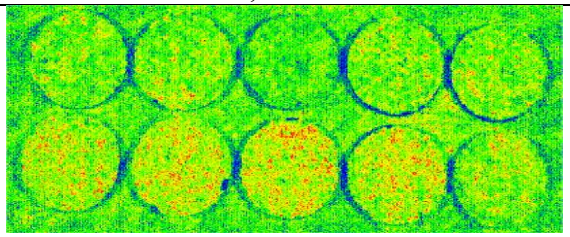
Les post-traitements peuvent-ils améliorer la détection ? Appliquons quelques traitements au thermogramme obtenu.

Tableau 70 : Filtres numériques et image d'effusivité

 Contraste somme	 Effusivité

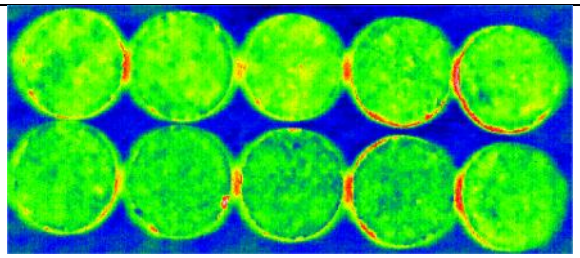
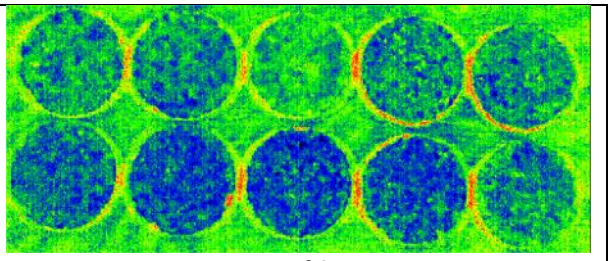
Ce type de traitements n'a pas permis une amé ioration de la détection.

Tableau 71: Décomposition polynomiale

 Ordre 2, coefficient 2	 Ordre 4, coefficient 3
 Ordre 4, coefficient 2	 Ordre 4, coefficient 4

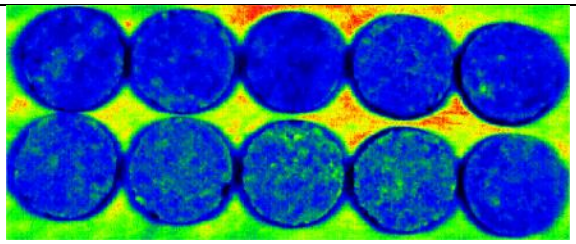
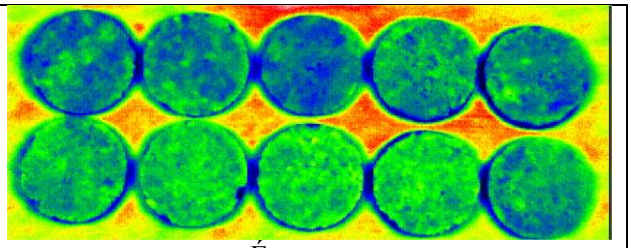
La décomposition polynomiale permet de repérer les deux séries d'échantillons, voir par exemple le résultat correspondant à l'ordre 4, coefficient 3.

Tableau 72 : SVD

	
Eof 2	Eof 3

Le SVD permet donne de bons résultats à l'eof n°3. Cette composante donne souvent de bons résultats (voir chapitre II).

Tableau 73 : Traitement statistique

	
Variance	Écart type

Les images de variance et d'écart type permettent de repérer légèrement les deux séries d'échantillons.

Intéressons-nous maintenant aux profils spatiaux et temporels.

Analyse spatiale

Les figures suivantes représentent les résultats des profils spatiaux de température obtenus sur les deux séries.

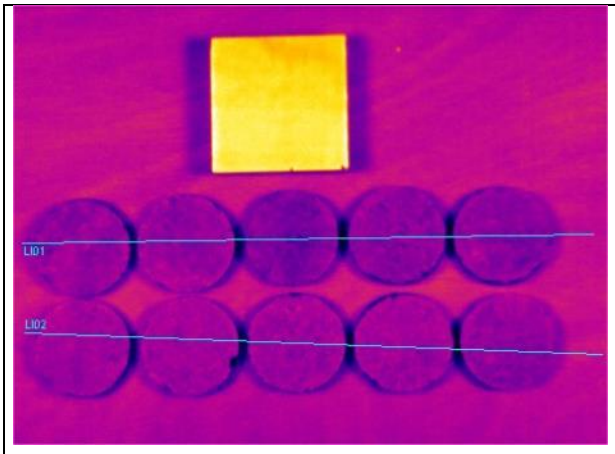


Figure 285: Image thermique avec profil

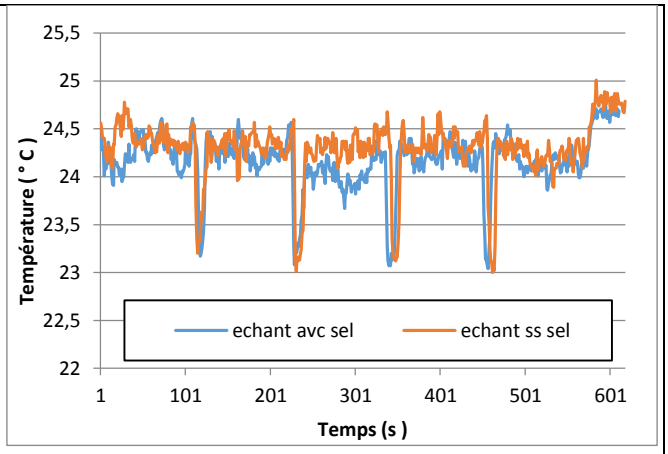


Figure 286 : Évolution des profils spatiaux

L'observation des profils indique une différence plus modeste que dans le cas de l'excitation flash, de l'ordre de 1 à 2 °C entre le profil de la série témoin et celui de la série avec sel. Comme

pré éd mment on observe que l'échauffement est moins important pour la série avec sel. Il est donc possible de repérer les différentes séries d'é hantillons à l'aide des profils spatiaux de tempé ature. Procédons de même avec les profils temporels de température.

Analyse temporelle

Nous avons procédé en définissant pour chaque échantillon une zone circulaire sur laquelle nous avons extrait la température moyenne au cours du temps, nous avons ensuite comparé les évolutions moyennes de température (Figure 288).

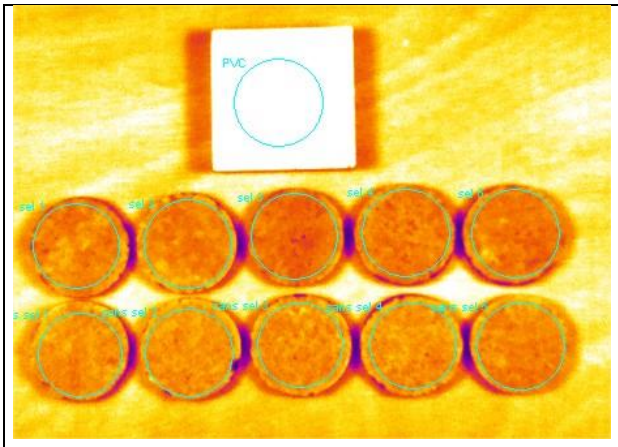


Figure 287 : Échantillons avec délimitation des zones

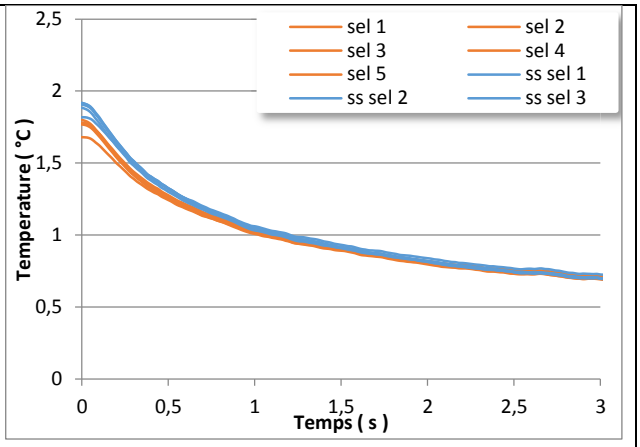


Figure 288 : Évolution temporelle pour chaque échantillon

L'analyse temporelle permet d'observer que les é hantillons avec sel s'é hauffent moins que ceux de la série témoin.

Cette étude du créneau donne des résultats très proches de ce qui a été observé en flash.

d) Caractérisation thermophysique

Mesure de L'effusivité thermique et T_{max}

Comme pré éd mment mesurons l'é hauffement T_{max} et l'effusivité thermique des échantillons par la méthode des comparaisons.

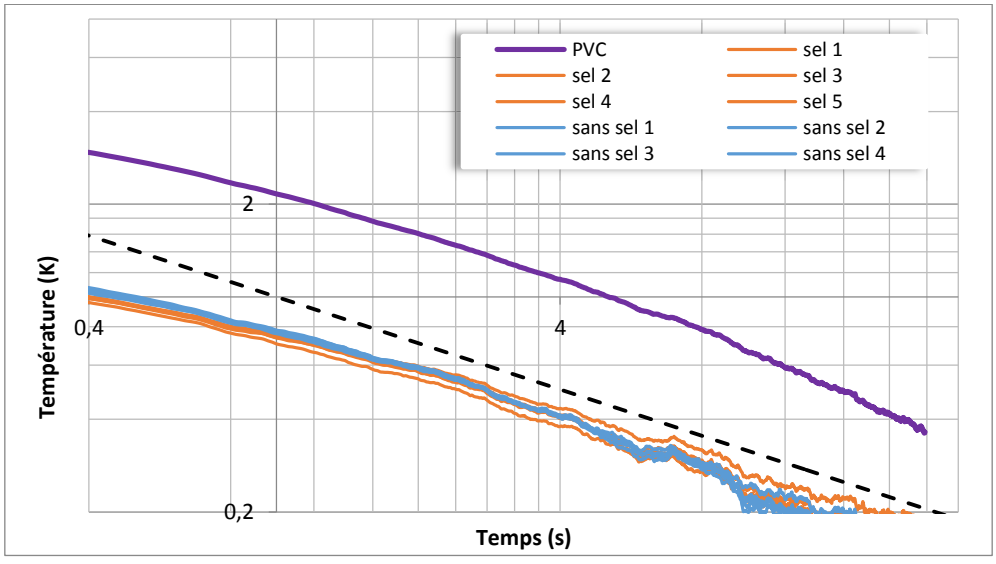


Figure 289 : Réponse en température (représentation Log-Log)

Nous avons regroupé dans le tableau suivant les valeurs estimées de ces paramètres thermophysiques en suivant le protocole n°1 de dépouillement : on moyenne les températures sur la totalité de la surface des échantillons (méthode 1) – voir page 215.

Tableau 74 : Propriétés thermophysiques mesurées (la méthode 1)

	b mesuré (SI)	b moyen (SI)	écart type (SI)	T_{max} (K)	T_{max} moyen	Ecart type T_{max} (K)
b sel 1	997,4	976,9	21,8	1,8	1,76	0,05
b sel 2	965,3			1,8		
b sel 3	948,2			1,7		
b sel 4	974,3			1,8		
b sel 5	999,5			1,8		
b témoin 1	993,4	981,4	19,3	1,9	1,89	0,04
b témoin 2	984,3			1,9		
b témoin 3	991,1			1,9		
b témoin 4	990,8			1,9		
b témoin 5	947,4			1,8		

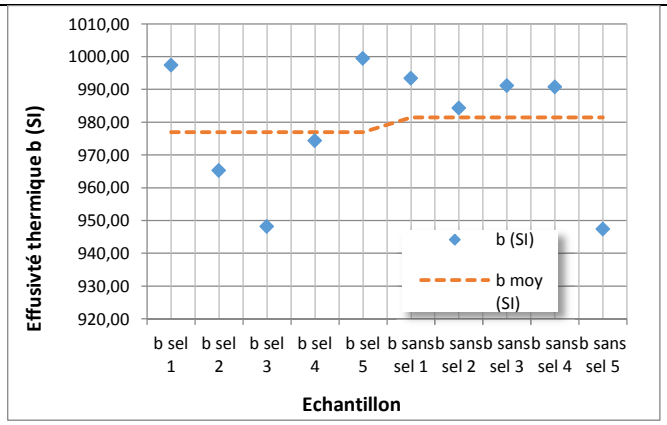


Figure 290 : Variation de l'effusivité thermique b

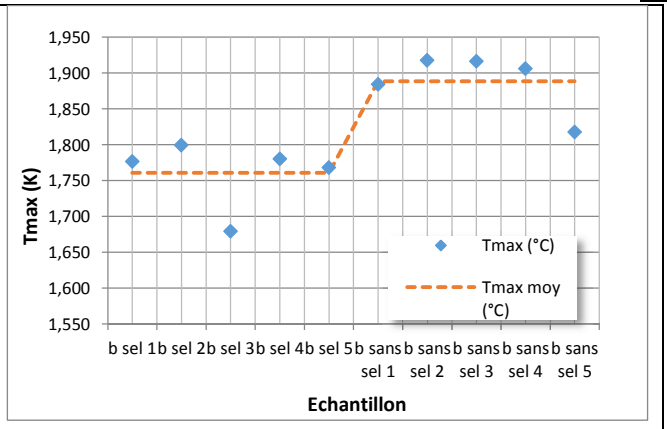


Figure 291 : Variation du Tmax

On observe de légères différences entre dans les grandeurs mesurées.

La mesure de l'effusivité thermique ne donne pas les résultats attendus, les échantillons avec sel ont une valeur moyenne légèrement inférieure à celle des échantillons témoins, ce résultat n'a jamais été observé, mais cette différence entre les deux séries d'échantillons peut-elle être considérée comme significative ? L'observation des écarts types et des écarts moyens entre les deux séries permet d'en douter – ce point sera vérifié en page 233.

Il semblerait que ce mode de dépouillement ne permette pas d'estimer convenablement les grandeurs que nous cherchons à mesurer. Ceci peut s'expliquer par des échauffements moindres et un

mode de dépouillement inadapté, car les mesures sont moyennées ce qui atténue les différences entre les deux séries d'échantillons. Essayons de dépouiller différemment en prenant cette fois un seul point de mesure par échantillon – au centre de celui-ci (méthode 3).

Le graphe suivant représente les réponses en températures de chaque échantillon extraites à partir d'un seul point de mesure par échantillon.

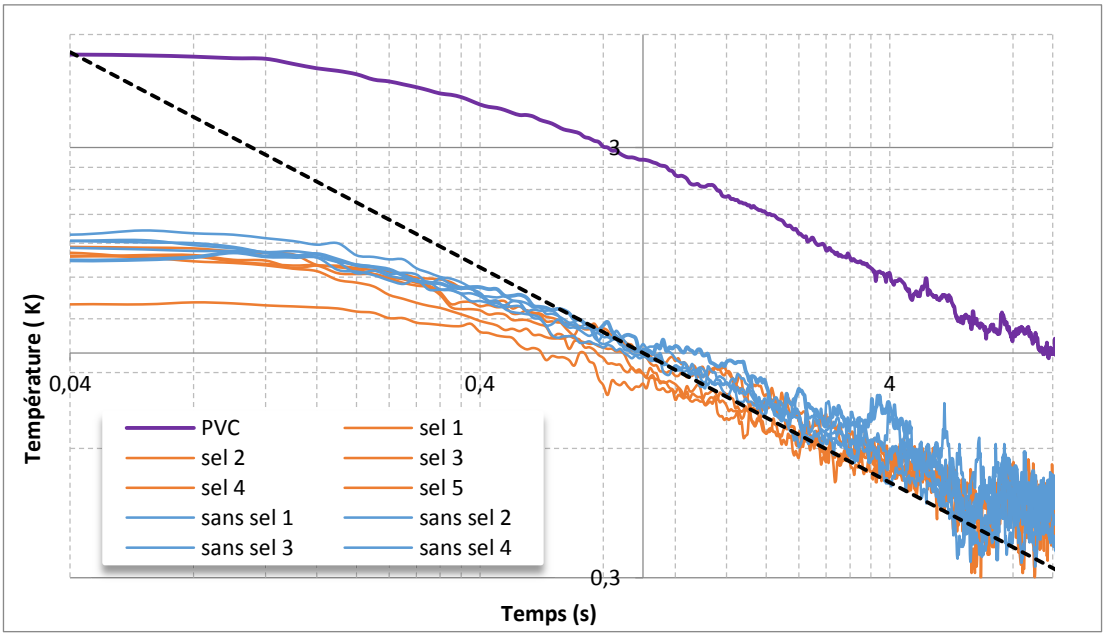


Figure 292 : Évolution logarithmique de la température

231 Les valeurs mesurées ont été regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 75 : Propriétés thermophysiques mesurées par la méthode 3

	b mesuré (SI)	b moyen (SI)	écart type (SI)	T_{max} (K)	T_{max} moyen	Ecart type T_{max} (K)
b sel 1	1071,7	1128,1	50,5	1,70	1,62	0,18
b sel 2	1156,9			1,68		
b sel 3	1179,9			1,31		
b sel 4	1075,7			1,76		
b sel 5	1156,1			1,64		
b sans sel 1	1035,9	1058,6	64,3	1,82	1,78	0,1
b sans sel 2	1146,8			1,72		
b sans sel 3	1058,4			1,81		
b sans sel 4	1081,1			1,90		
b sans sel 5	970,51			1,65		

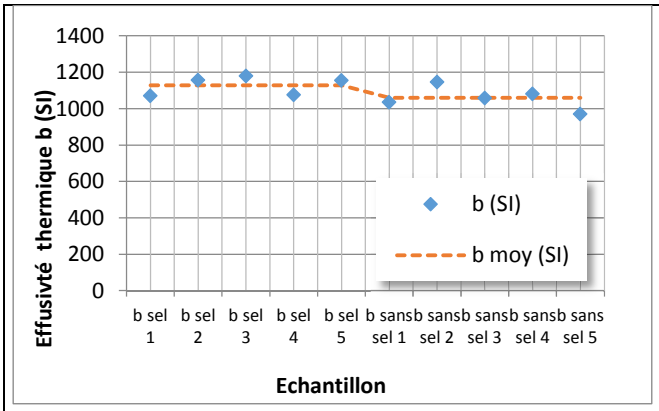


Figure 293 : Variation de l'effusivité thermique b

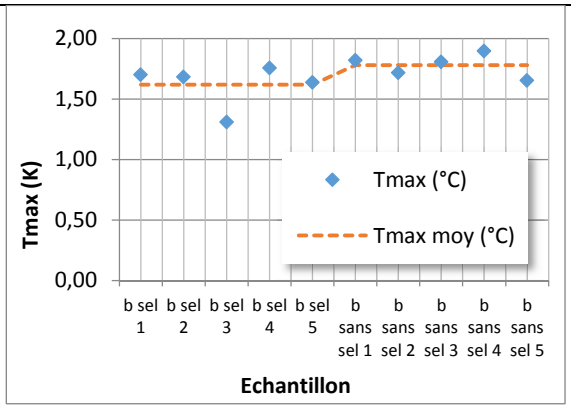


Figure 294 : Variation du Tmax

Nous avons avec ce mode de dépouillement des écarts types supérieurs, car les signaux sont plus bruités, mais les valeurs moyennes mesurées sur les deux séries se rapprochent des valeurs estimées avec la méthode flash.

Intéressons-nous maintenant à l'estimation de la diffusivité thermique. Nous procéderons comme précédemment.

Estimation de la diffusivité thermique

Ce tableau regroupe les estimations de diffusivité thermique obtenues par ajustement théorie/ expérience (pas de Methode de Parker ici, car cette méthode n'est utilisable qu'avec une excitation flash).

Tableau 76 : Estimation de la diffusivité thermique à l'aide d'une excitation créneau

Échantillons (Série 1)	Diffusivité thermique (m^2/s) Ajustement (avec perte)	Échantillons (Série 2)	Diffusivité thermique (m^2/s) Ajustement (avec perte)
Sel 1	1,01E-06	**Témoin 1**	8,66E-07
Sel 2	1,09E-06	**Témoin 2**	7,92E-07
Sel 3	1,11E-06	**Témoin 3**	8,11E-07
Sel 4	9,87E-07	**Témoin 4**	8,04E-07
Sel 5	9,59E-07	**Témoin 5**	8,16E-07
Moyenne sel	**1,03E-06**	**Moyenne Témoin**	**8,18E-07**
Écart type (m^2/s)	**6,57E-08**	**Écart type (m^2/s)**	**2,84E-08**

Écart relatif sel/témoin (%)	**26,09%**

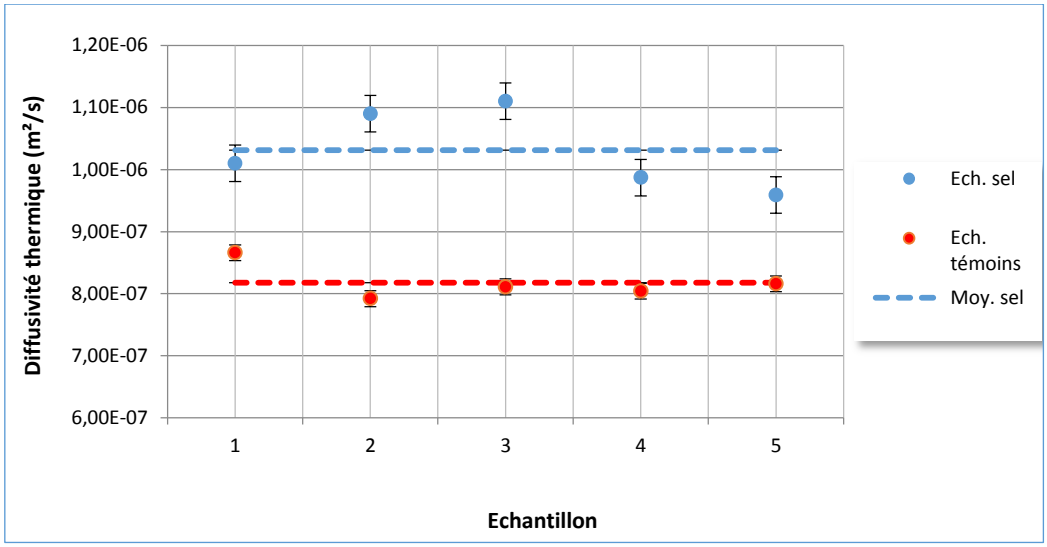


Figure 295 : Diffusivité thermique estimée au moyen d'une excitation de type créneau

Les résultats obtenus montrent que les deux séries sont aisément identifiables par mesure de leur diffusivité thermique. La série avec sel a une diffusivité thermique moyenne estimée supérieure d'environ 26 % par rapport à celle de la sériée témoin.

Ces ré ultats obtenus en excitation cré eau sont conforme à ce qu'on pouvait attendre. Ils montrent que des mesures de grandeurs thermophysiques sont possibles afin de mettre en évidence la présence de sels dans la pierre. C'est un point encourageant, car en pratique nous utilisons ce type de signaux. Néanmoins ce type de signal offre une précision moindre par rapport au flash en raison de contrastes moindres, car l'énergie a peut diffuser dans le maté iau pendant l'analyse ce qui n'est pas le cas avec le flash. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette dimension lors de manipulations et de veiller à d livrer des signaux correctement configuré en terme de durée et d'énergie.

e) Validation statistique

Procédons maintenant comme en page 220, vérifions la validité statistique de nos résultats.

On rappelle que l'hypothè e H_0 représente l'hypothè e nulle c'est-à-dire l'hypothè e selon laquelle il n'y a pas de diffé ence significative entre les mesures effectuées sur la série témoin et la série avec sel.

Les résultats de cette étude statistique figurent dans le tableau suivant :

Tableau 77 : Validation statistique des paramètres thermophysiques mesurés

Paramètre	**Effusivité thermique b**		**T_{max}**		**Diffusivité thermique face avant**
Méthode	**Méthodes des comparaisons (méthode 1)**	**Méthodes des comparaisons (méthode 3)**	**Mesure directe (méthode 1)**	**Mesure directe (méthode 3)**	**Ajustement**
Référence (Témoin)	981,4	1058,6	1,89	1,78	8,18E-7
Échantillonnage	5	5	5	5	5

Région d'acceptation	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]
Statistique de test	-0,46	3,07	-5,81	-1,99	7,21
Intervalle de confiance ech.sel.	[949.8…1004]	[1065,4…1190,8]	[1,70…1,82]	[1,397…1,843]	[9,48.10^{-7}…11,11.10^{-7}]
Hypothèse retenue	H_0 acceptée ➔différences non significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 acceptée ➔différences non significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives

L'étude statistique montre que nous avons des résultats qui ne sont pas toujours significatifs même si ceux-ci semblent conforter les observations obtenues avec la méthode flash à savoir que l'effusivité thermique et la diffusivité thermique sont supérieures dans le cas d'échantillons ayant été soumis au sel, à l'opposé l'échauffement est moindre sur ces échantillons. La méthode de dépouillement des résultats semble aussi avoir une importance dans la fiabilité des mesures, voir par exemple le cas de l'effusivité thermique, non significatif avec la méthode 1 et significatif avec la méthode 3.
Les observations sur le Tmax semblent être en contradiction avec celles obtenues sur l'effusivité : le mode de dépouillement 3 donne des résultats significatifs avec l'effusivité, mais pas avec le Tmax, ceci peut s'expliquer par une dispersion plus importante des résultats en raison d'incertitudes de mesure.

En conclusion nous pouvons dire qu'il est possible d'obtenir des observations significatives avec une excitation créneau, mais que ces résultats doivent faire l'objet d'un examen plus attentif que ceux obtenus avec une excitation pulsée.

f) Vue synthétique

Les représentations suivantes reprennent le principe des figures de la page 221, nous croisons nos données deux à deux afin d'avoir des représentations visuelles des échantillons.

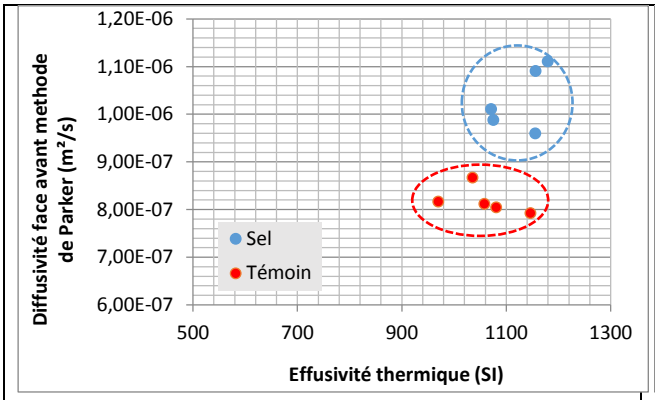


Figure 296 : Diffusivité en fonction de l'effusivité thermique

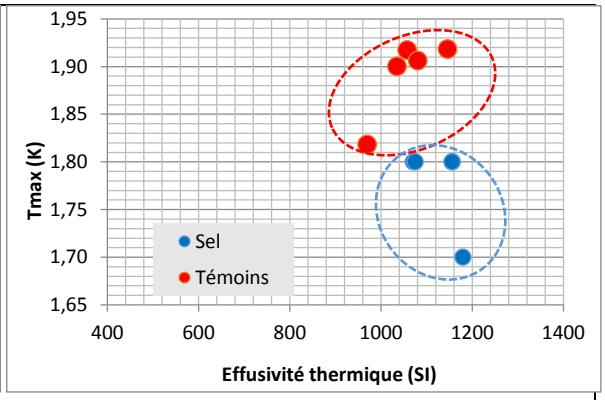


Figure 297 : Tmax en fonction de l'effusivité thermique

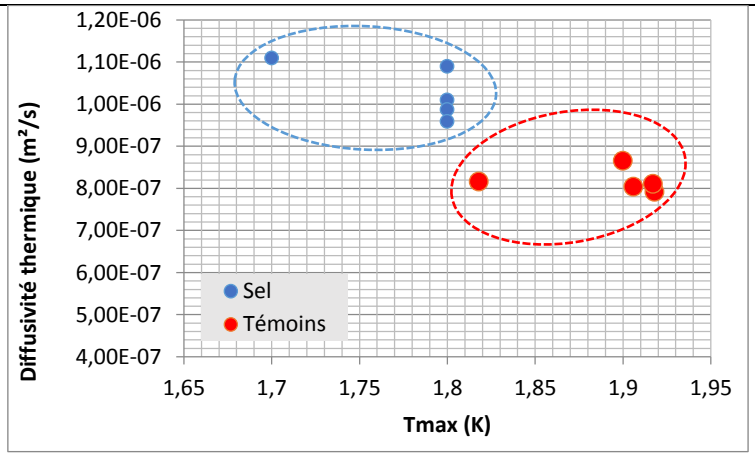


Figure 298 : Diffusivité thermique en fonction du Tmax

Ces résultats permettent de mettre en évidence la possibilité de repérage à l'aide d'une excitation de type créneau.

g) Conclusion

Pour une durée de créneau égale à 1s, l'image thermique brute ne permet pas de distinguer les séries d'échantillons avec sel et sans sel (voir Figure 284). L'analyse des profils spatiaux et temporels permettent de repérer les deux séries, de même qu'avec certains post-traitements. Concernant les analyses de propriétés thermo-physiques on observe ce qui a déjà été vu précédemment à savoir des valeurs d'effusivité supérieures sur les séries avec sel et des valeurs d'élévation de température T_{max} inférieures sur ces mêmes séries (voir Tableau 74, Tableau 75, Tableau 76).

On notera que les résultats obtenus avec l'excitation créneau sont moins précis en raison d'un échauffement moindre et d'une diffusion plus importante de l'énergie pendant l'observation ce qui rend l'interprétation des résultats plus difficile ce qui engendre des contrastes moindres.

Examinons maintenant les résultats que nous pouvons obtenir avec une excitation aléatoire.

20.1.3.3. Excitation aléatoire (PRBS) surfacique

a) Objectif et conditions expérimentales

Nous allons tester les possibilités de l'excitation aléatoire en termes de détection d'échantillons avec sel et sans sel. L'intérêt de l'aléatoire est de permettre de se rapprocher d'une analyse en flash grâce à une reconstruction paramétrique qui nous permettra d'obtenir la réponse impulsionnelle tout en appliquant une densité d'énergie moindre, ce qui présente un intérêt dans l'étude des œuvres d'art. À partir de la réponse impulsionnelle obtenue après reconstruction il sera possible de déterminer les propriétés thermophysiques comme précédemment.

Nous disposons de deux sources halogènes 2x500 W, l'acquisition s'effectue au moyen d'une caméra *Flir* SC655 cadencée à 50 Hz. Le signal d'excitation est un PRBR 256. SAMMTHIR a été réglé sur un pas de temps de 1 s et sur une tension d'alimentation des sources de 6 V. L'observation se fera pendant une durée de 300 s.

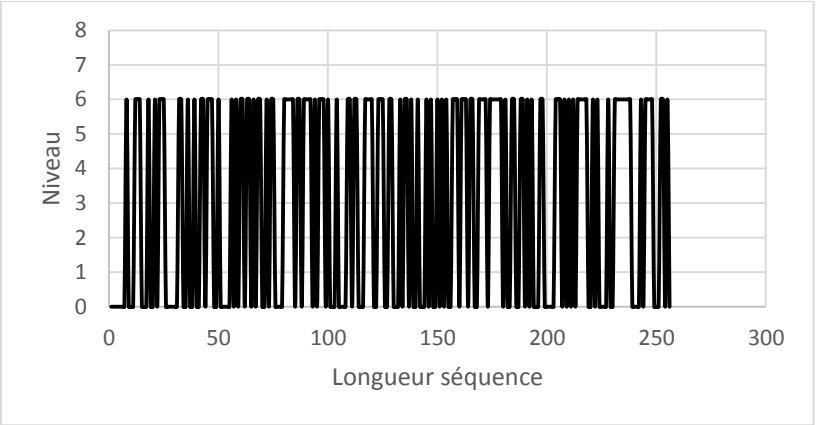
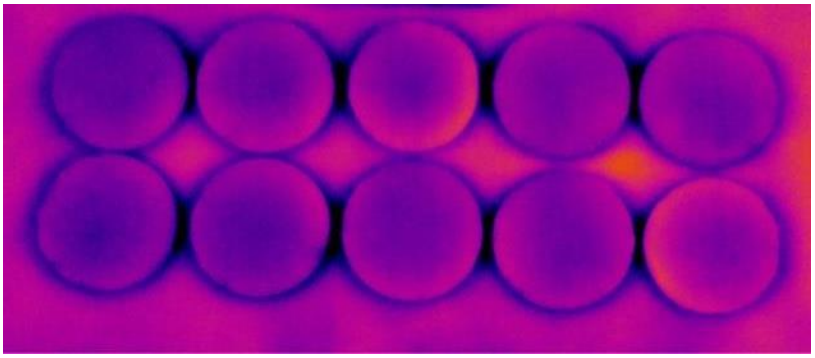


Figure 299 : Signal d'excitation

Les échantillons utilisés sont les mêmes que précédemment : deux séries de 5 échantillons de calcaire ronds composées de 5 échantillons soumis avec sel et un lot témoin de 5 échantillons. Un échantillon de référence en PVC à été disposé à proximité.

b) Observation qualitative



Échantillons témoins

Échantillons avec sel

Figure 300 : Image thermique brute

Les deux séries ne se repèrent pas à l'aide d'une observation directe du thermogramme, observons ce qu'il en est après une reconstruction paramétrique.

Tableau 78 : Images de réponses impulsionnelles

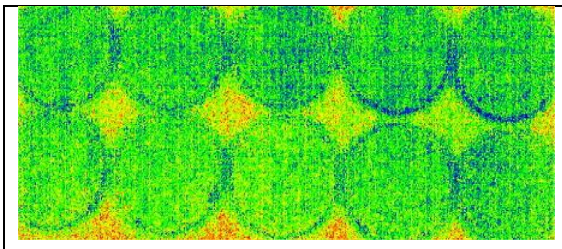
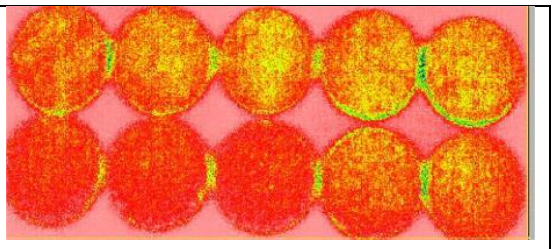
	

Image après reconstruction paramétrique na = nb = 1	Image après reconstruction paramétrique na = nb = 2

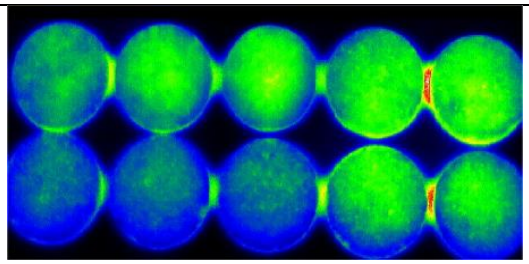


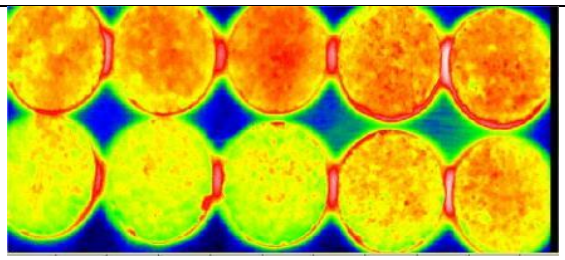
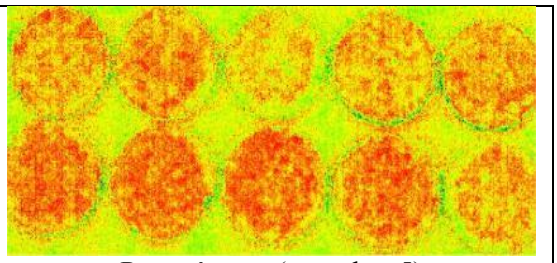
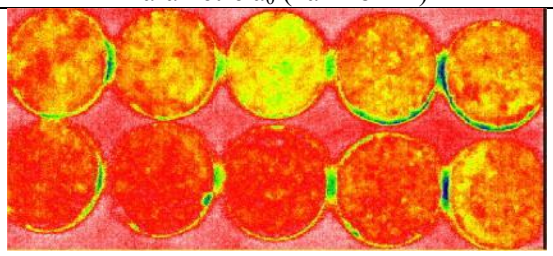
Image après reconstruction paramétrique
na = nb = 5

On a procédé à des reconstructions de la réponse impulsionnelle. Nous avons testé un nombre variable de paramètres de reconstruction n_a, n_b (1, 2 et 5). Les reconstructions à 2 et 5 paramètres laissent apparaitre de légères différences entre les deux séries.

Nous avons ensuite créé des images de paramètres tirées de la reconstruction paramétrique (voir explication du principe chapitre II, page 95), examinons s'il est possible de repérer à l'aide de ces images de paramètre la présence de sel dans la pierre calcaire.

Le tableau suivant regroupe quelques résultats significatifs.
Les résultats de ce type d'analyse sont incertains, ils dépendent grandement de la nature du signal et ds conditions expérimentales. Il est difficile de se prononcer sur un type particulier de réglage avec un nombre particulier de paramètres à prendre en compte.

Tableau 79 : Résultats échantillons minces en aléatoire (image de paramètres)

 Paramètre a_0 (na= nb = 1)	 Paramètre a_2 (na= nb = 5)
 Paramètre a_4 (na= nb = 5)	

Analyse spatiale

Procédons à l'analyse de deux profils spatiaux extraits à partir de la séquence reconstruite (film impulsionnel).

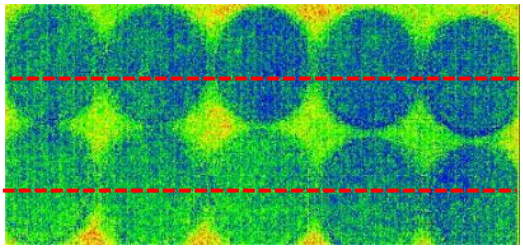


Figure 301: Image reconstruite avec profil spatial

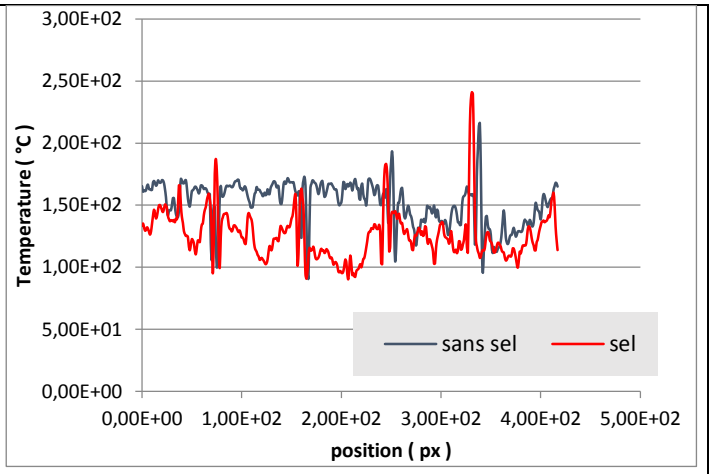


Figure 302 : Évolution des profils spatiaux

Les profils sont distincts, l'é hauffement est moindre sur la série avec sel.

Analyse temporelle :

Pour le dé ouillement on inté re sur la totalité de l'échantillon (mé hode 1), voir image suivante. Nous avons procédé à 2 reconstructions : une reconstruction avec 2 paramètres et une reconstruction avec 5 paramètres.

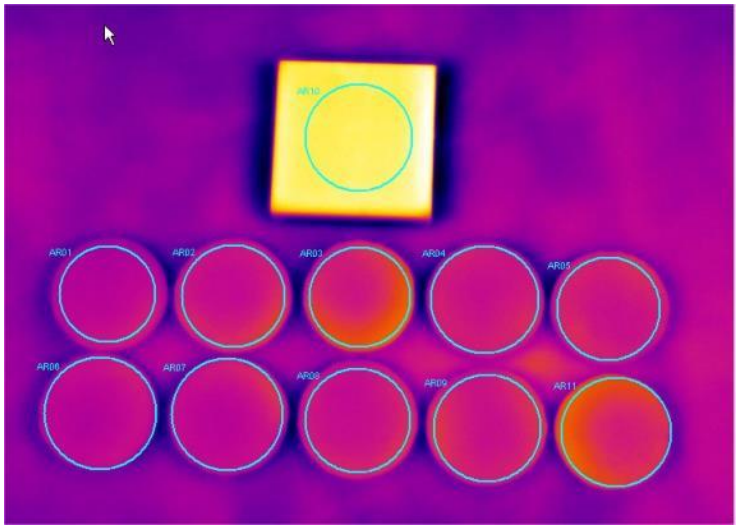


Figure 303 : Image thermique avec zone d'intégration (méthode 1)

Reconstruction avec les paramètres na = nb = 2

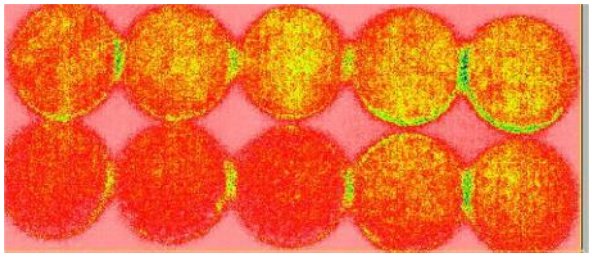


Figure 304: Image thermique reconstruite a T_{max}

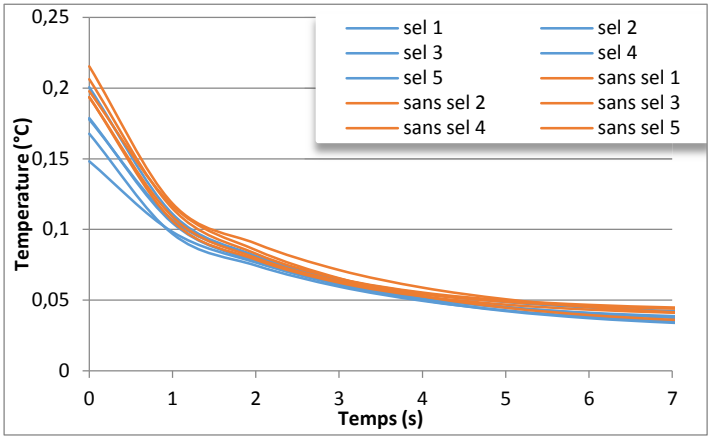


Figure 305: Évolution temporelle des échantillons avec sel et sans sel

L'image thermique reconstruite laisse fait apparaitre contraste entre les deux séries. Les réponses impulsionnelles calculées (Figure 305) montrent un écart de température aux premiers instants entre les deux séries. L'échauffement des échantillons sans sel est plus élevé que celui des échantillons de la série avec sel. Ce fait est comparable à ce qui a déjà été observé précédemment.

c) Caractérisation thermophysique

Comme précédemment on délimite sur chaque échantillon une zone circulaire sur laquelle on mesure les propriétés thermophysiques moyennes.

L'échantillon de PVC servira de référence : b_{ref} = 408 (SI)

Détermination de l'effusivité thermique et du Tmax (Paramètre na = nb = 2)

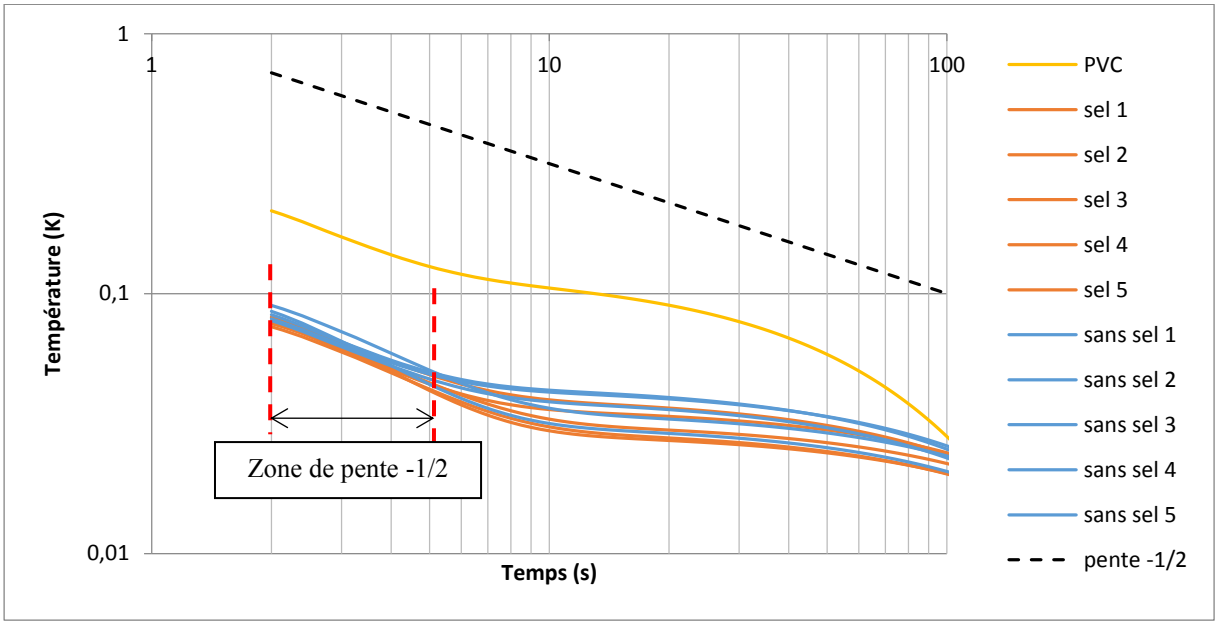


Figure 306: Évolution logarithmique de la température

La zone de pente -1/2 sert à déterminer l'étendu temporelle sur laquelle on le calcul de b est effectué. On calcule la moyenne des valeurs de b calculées à chaque instant sur cette étendue temporelle. Le T_{max} est obtenu simplement par lecture de la première valeur de la réponse impulsionnelle. Les résultats ont été regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 80 : Propriétés thermophysiques mesurées

	b mesuré (SI)	b moyen (SI)	écart type (SI)	T_{max} (K)	T_{max} moyen	Ecart type T_{max} (K)
b sel 1	1069,5			0,18		
b sel 2	1184,1			0,17		
b sel 3	1164,9	1132,9	39,7	0,15	0,17	0,02
b sel 4	1119,0			0,20		
b sel 5	1126,9			0,18		
b théorique sel		1101				
b témoin 1	1084,9			0,19		
b témoin 2	1055,8			0,19		
b témoin 3	1021,0	1035,5	37,7	0,21	0,20	0,01
b témoin 4	980,3			0,22		
b témoin 5	1070,8			0,20		
b théorique témoin		1030				

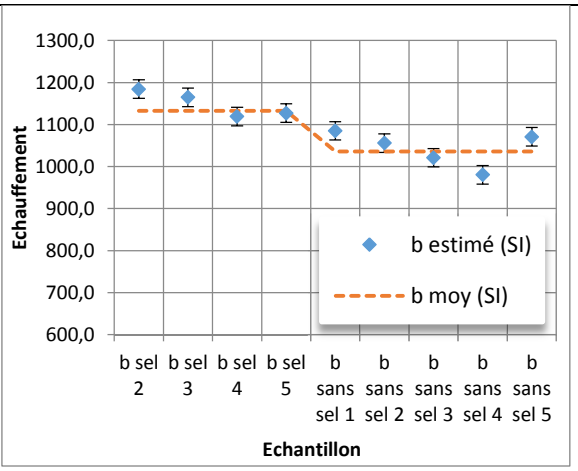


Figure 307 : Évolution de l'effusivité b

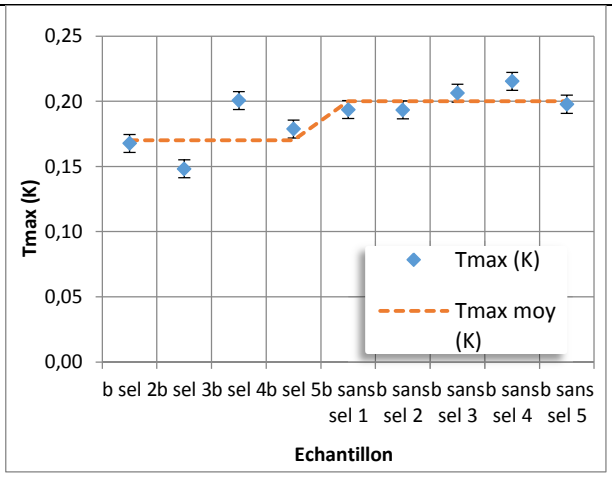


Figure 308 : Évolution de la température max

Une autre analyse a été effectuée avec un autre jeu de paramètre (na = nb =5) qui donne le même type de résultats (voir annexe page 380).

Nous retrouvons avec l'excitation aléatoire les résultats observés en flash et créneau. Les valeurs de grandeurs thermophysiques sont proches de celles obtenues en flash. C'est un résultat encourageant.

Diffusivité thermique

Estimons maintenant la diffusivité thermique. L'estimation a été effectuée par une méthode ajustement théorie/expérience appliquée sur les réponses brutes.

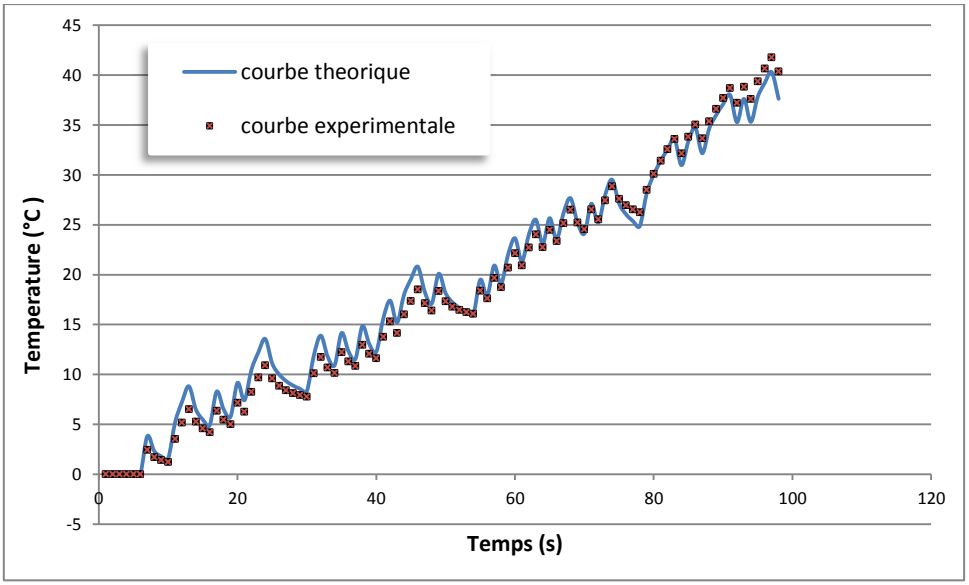


Figure 309 : Exemple d'ajustement pour l'échantillon sel 1

Tableau 81 : Estmations de diffusivité thermique sur des échantillons minces en aléatoire

	Diffusivité thermique a (m²/s) Ajustement (avec pertes)				
	a (m²/s)	**Écart relatif référence(%)**		**a (m²/s)**	**Écart relatif référence(%)**
Témoin 1	$8{,}14.10^{-7}$	-0.12%	**sel 1**	$9{,}95.10^{-7}$	10,06%
Témoin 2	$8{,}18.10^{-7}$	0,36%	**Sel 2**	$9{,}82.10^{-7}$	-2,43%
Témoin 3	$8{,}54.10^{-7}$	4,78%	**sel 3**	$9{,}96.10^{-7}$	10,17%
Témoin 4	$8{,}49.10^{-7}$	4,17%	**sel 4**	$1{,}00.10^{-6}$	10,61%
Témoin 5	$7{,}91.10^{-7}$	-2,94%	**Sel 5**	$1{,}00.10^{-6}$	11,06%
Moyenne Témoin	**$8{,}25.10^{-7}$**	**1,12%**	**Moyenne Témoin**	**$9{,}95.10^{-7}$**	**10,06%**
Écart type (m²/s)	**$2{,}62.10^{-8}$**		**Écart type (m²/s)**	**$8{,}29.10^{-9}$**	
Valeur de référence	$8{,}15.10^{-7}$		Valeur de référence	$9{,}04.10^{-7}$	

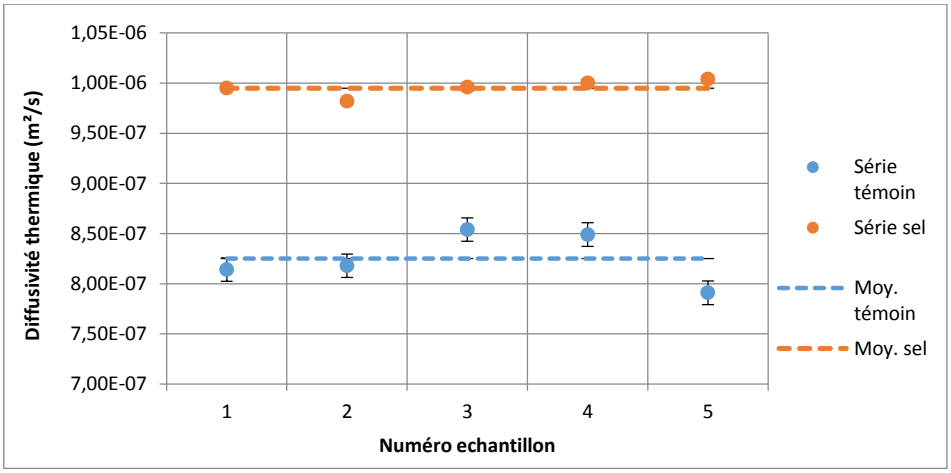


Figure 310 : Mesure de diffusivité thermique en aléatoire

Les valeurs estimées se rapprochent des valeurs par défauts obtenues au diffusivimetre flash. Ces mesures corroborent ce qui a été précédemment observé.

d) Validation statistique

Comme précédemment on effectue un test de *Student* pour estimer le degré de similitude entre les deux séries.

Tableau 82 : Validation statistique des paramètres thermophysiques mesurés

Paramètre	Effusivité thermique b		T_{max}		Diffusivité thermique face avant
Méthode	**Méthodes des comparaisons (mesure 1)**	**Méthodes des comparaisons (mesure 2)**	**Mesure directe (mesure 1)**	**Mesure directe (mesure 2)**	**Ajustement**
Référence (Témoin)	1035,5	1015,0	0,20	0,20	$8{,}25.10^{-7}$
Échantillonnage	5	5	5	5	5
Région d'acceptation	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]
Statistique de test	5,49	3,11	-3,35	-3,35	46,36
Intervalle de confiance ech.sel.	[1083,6…1182,2]	[1023,2…1159]	[0,14…0,19]	[0,14…0,19]	$[9{,}85.10^{-7}…10{,}05.10^{-7}]$
Hypothèse retenue	H0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives

Les résultats montrent des tests statistiques effectués montre des différences significatives entre les deux séries d'échantillons sur les 3 paramètres mesurés.

e) Vue synthétique

Les graphes suivants représentent le croisement des données que nous avons mesurées.

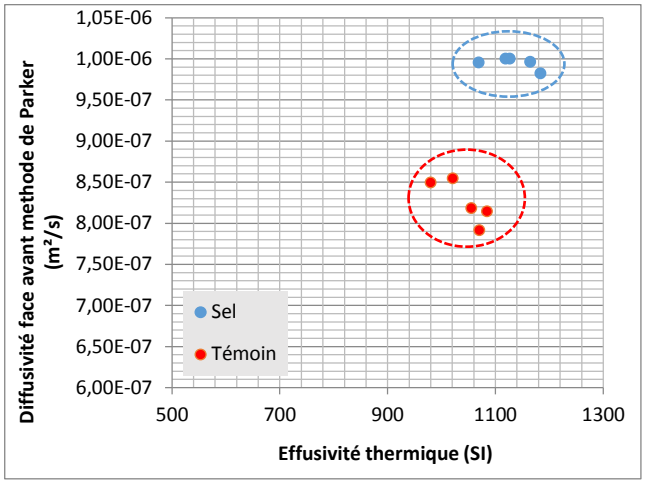


Figure 311 : Diffusivité en fonction de l'effusivité thermique

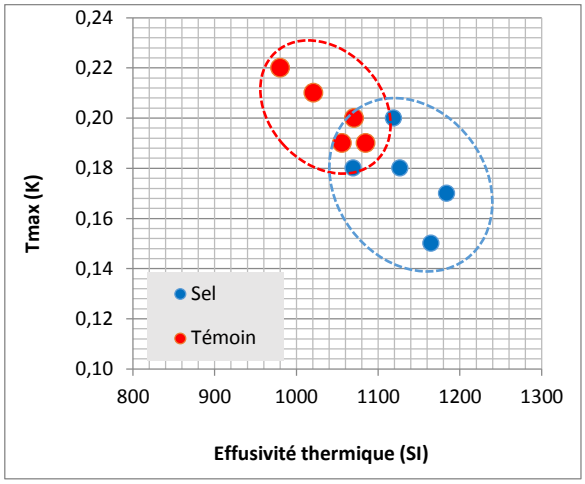


Figure 312 : Tmax en fonction de l'effusivité thermique

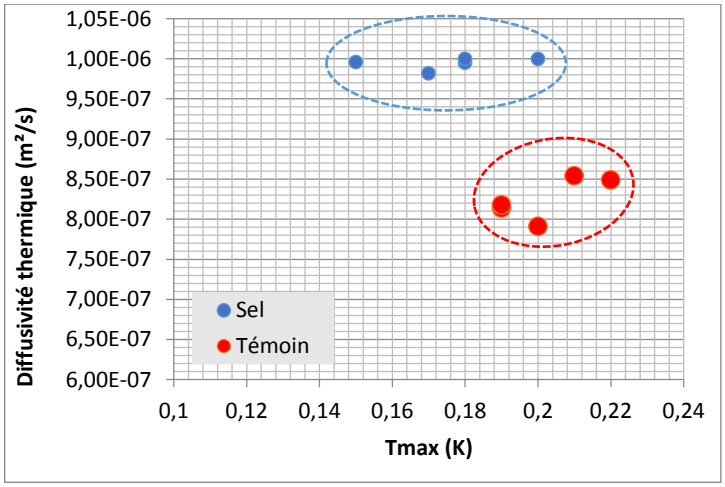


Figure 313 : Diffusivité thermique en fonction du Tmax

La séparation entre les séries est nette sauf lorsqu'on croise l'effusivité thermique avec l'échauffement T_{max}. Ceci peut s'expliquer par une dispersion plus importante des donné s sur un paramètre ou sur les deux. Néanmoins on peut considérer ces résultats comme significatifs compte tenu de la validation statistique des résultats.

f) Conclusion

L'étude en alé toire dé ontre qu'il est possible d'obtenir des ré ultats presque aussi satisfaisants qu'en analyse pulsée. Cette mé hode est plus complexe à mettre en œuvre, mais elle permet d'obtenir des é hauffements moindres des é hantillons é udiés ce qui présente un inté ê dans l'é ude d'œuvres du patrimoine, c'est là l'inté êt essentiel de cette technique sur l'analyse pulsée.

L'analyse qualitative des thermogrammes traités donne des résultats intéressants. S'agissant des mesures de grandeurs thermophysiques, les estimations sont proches de ce qu'on a pu obtenir avec une excitation flash et permettent de différencier convenablement les deux sé ies d'échantillons, quel que soit le nombre de paramètres utilisé pour la reconstruction. La possibilité d'utiliser des signaux alé toires est d'un grand inté êt pour l'étude des peintures murales.

20.1.3.4. Comparaison des modes de mise sous contrainte

Comparons maintenant l'apport des excitations créneau et aléatoires par rapport à une analyse au moyen d'un flash.

Le tableau suivant regroupe les apports des diffé entes techniques d'analyse. La mention « Détection possible » désigne une détection non systématique pouvant dépendre de certains paramétrages ou du mode de dépouillement.

	Analyse qualitative				Analyse quantitative		
Technique d'analyse	Image brute	Post-traitement	Analyse spatiale	Analyse temporelle	Tmax	Effusivité thermique	Diffusivité thermique
Pulsé	Détection	Détection	Détection	Détection	Détection	Détection	Détection
Créneau	Pas de détection.	Détection possible	Détection	Détection	Détection possible	Détection possible	Détection
Aléatoire	Pas de détection	Détection possible	Détection	Détection	Détection	Détection	Détection

Le tableau ci-dessus permet de conclure que la technique d'analyse en pulsé (flash) est la plus performante puisqu'elle permet de repé er les deux séries d'é hantillons de façon syste atique, quel que soit le mode d'analyse. L'analyse crén au ne donne pas des résultats toujours satisfaisants, son avantage est de ne pas trop échauffer les échantillons, nous avons observé que certaines mesures é aient entachées d'impré ision (dispersion importante et peu discriminante) rendant l'interpré ation

difficile. L'analyse en aléatoire se rapproche de l'analyse pulsée, elle offre aussi de nombreux avantages comme un échauffement moindre même si elle est plus complexe à mettre en œuvre.

20.1.4. Conclusion

Ainsi nous avons étudié deux séries de cinq échantillons de pierre calcaire, une série a été soumise à une infiltration de NaCl. Nous avons étudié dans un premier temps à l'aide de différentes techniques d'analyse de laboratoire les séries d'échantillons et nous avons démontré que certains paramètres physiques tels que la masse volumique, la capacité thermique ou encore la diffusivité thermique étaient corrélés à la présence de sel. Nous avons démontré qu'il était possible de repérer ces infiltrations directement à l'aide d'une excitation flash. Nous avons démontré qu'il était possible de mettre en évidence ce phénomène en comparant les réponses temporelles et spatiales du champ de température. L'estimation des paramètres thermo physiques a permis de mettre en évidence la corrélation entre la présence de ces sels et des grandeurs telles que l'échauffement thermique des échantillons, la diffusivité thermique ou l'effusivité thermique. Nous avons démontré que ces mesures étaient significativement distinctes. Enfin notre étude a porté sur d'autres modes de mise sous contrainte, nous avons testé les possibilités des excitations créneau et aléatoire et avons démontré la possibilité d'approcher les résultats obtenus à l'aide d'une analyse pulsée (flash).

Cette étude sur des échantillons minces est terminée, voyons maintenant s'il est possible d'avoir le même type de résultats sur des échantillons épais de pierre calcaire qui se rapprochent plus de la réalité des œuvres d'art.

20.2. Analyse d'échantillons épais

Nous allons étudier un échantillon de laboratoire ayant été soumis à une infiltration de NaCl en son centre. Cet échantillon est constitué d'un bloc de pierre calcaire (pierre du midi). Comme précédemment nous tenterons de repérer la présence de sel dans ce bloc par thermographie infrarouge stimulée. L'intérêt est de s'assurer qu'il est possible d'obtenir le même type de résultats sur un échantillon épais de plusieurs centimètres. Par souci de concision, nous nous limiterons au cas d'une excitation flash surfacique, les résultats obtenus avec les autres modes d'excitation (créneau, aléatoire) figurent en annexe 29.22 page 381.

20.2.1. Analyse du Bloc 1 avec une excitation flash

20.2.1.1. Description

Cet échantillon de bloc pierre d'Avignon (calcaire) a été soumis à une infiltration de NaCl en solution saturée (5 ml) sur l'une de ses faces que nous désignerons comme la face avant. Le bloc a ensuite été séché à l'air ambiant pendant plusieurs jours. La face avant de cet échantillon a ensuite été recouverte d'une mince couche de peinture noire thermorésistante afin d'améliorer la détection et nous rapprocher d'une peinture. Les dimensions de l'échantillon sont les suivantes : Largeur = 11,5 cm longueur =10 cm hauteur = 2,5 cm.

Figure 314 : Préparation de l'échantillon

Figure 315 : Échantillon (face avant)

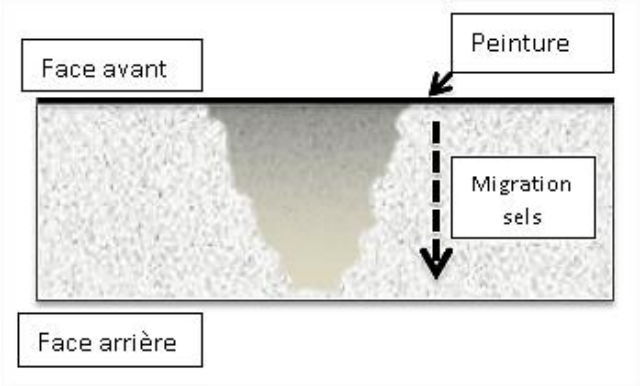


Figure 316 : Principe

20.2.1.2.Mode opératoire :

Quatre flashs sont utilisés pour exciter l'échantillon afin d'homogénéiser le dépôt d'énergie. L'acquisition s'effectue à l'aide d'une caméra thermique de marque *Flir* (modèle SC 655) cadencée à une fréquence d'acquisition de 50 Hz.

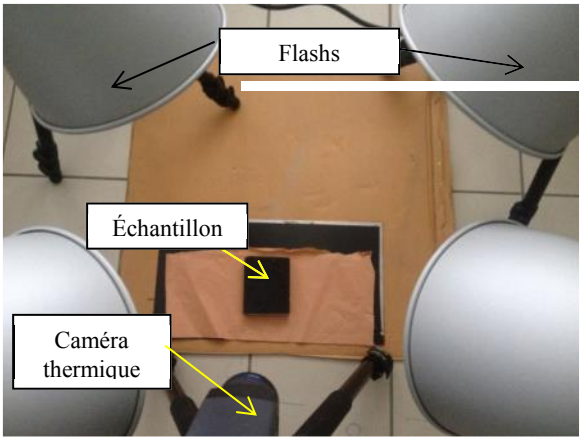


Figure 317 : Dispositif

20.2.1.3.Étude qualitative

Observons à la figure suivante le thermogramme du bloc correspondant à l'échauffement maximal de l'échantillon (au moment du flash).

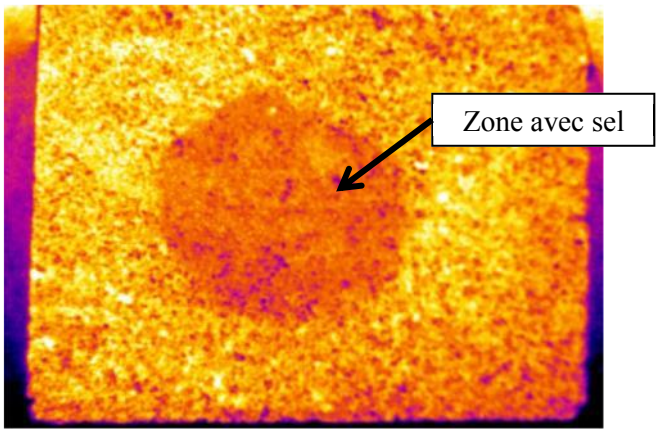


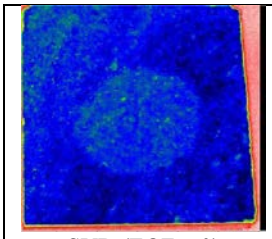
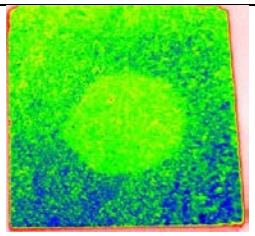
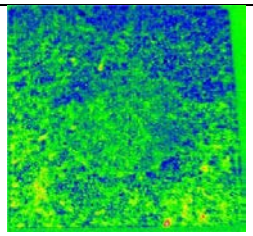
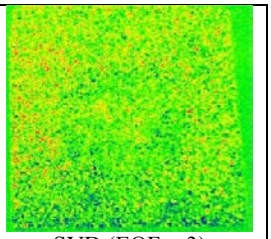
Figure 318 : Image thermique du bloc 1 en face avant

Nous observons une zone circulaire centrale plus froide correspondant à la zone d'infiltration saline. Cette zone a une température moyenne inférieure à la zone périphérique. On repère sans difficulté la zone d'infiltration saline.

Post-traitements

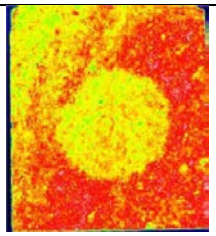
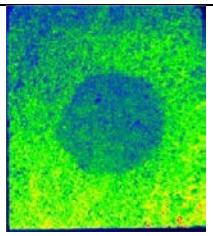
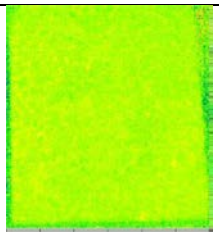
La zone avec sel est repérée, on peut considérer comme négligeable une étude plus poussée, mais voyons ce que nous pouvons tirer d'une analyse avec des traitements tels que le SVD ou le PPT.

Tableau 83: Décomposition SVD

 SVD (EOF = 0)	 SVD (EOF = 1)	 SVD (EOF = 2)	 SVD (EOF = 3)

Bon résultat pour l'eof 1. Cette observation nous amène à penser que le phénomène se manifeste essentiellement sur les composantes les plus énergétiques de la décomposition ce qui laisse supposer que sa manifestation est surtout de nature radiative. Ce point peut expliquer l'échauffement moindre que nous avions observé sur les échantillons minces, nous avions alors supposé que cet échauffement moindre pouvait provenir d'une réflectivité accrue des échantillons induite par la présence de cristaux de sel en surface.

Tableau 84: **Étude d'un bloc avec sel à l'aide d'un post-traitement d'une transformée de Fourier**

 Module (harmonique 1)	 Module (harmonique 2)	 Phase

On remarque que la zone d'intérêt est repérée lorsque nous effectuons une analyse en module à partir de la transformée de *Fourier*, l'analyse en phase ne donne pas de résultat. Nous savons que le module d'une transformée de *Fourier* exprime les aspects énergétiques des différentes harmoniques d'un signal alors que l'analyse de la phase exprime la dépendance temporelle (déphasage) des harmoniques de ce signal. En thermique les phénomènes peuvent être mis en évidence par le déphasage qu'ils induisent, car la propagation d'un signal thermique dans un matériau n'est pas instantanée alors que les phénomènes de nature radiative tels que la réflexion s'effectuent à la vitesse de la lumière et de ce fait ne présentent pas de déphasage. Il semble que le phénomène se manifeste surtout sur un plan énergétique et non par un déphasage temporel ce qui conforte une nouvelle fois l'hypothèse selon laquelle la présence de sel modifie essentiellement les propriétés radiatives du matériau.

Analyse spatiale

Traçons un profil spatial afin d'observer l'évolution spatiale de la température le long de celui-ci (voir figure ci-dessous).

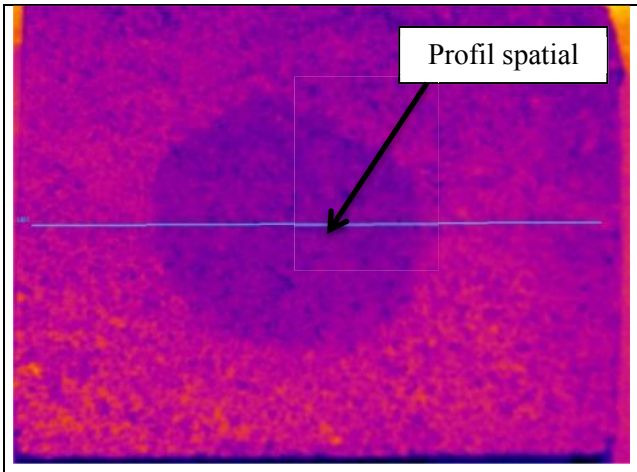


Figure 319 : Image thermique de l'échantillon avec profil spatial

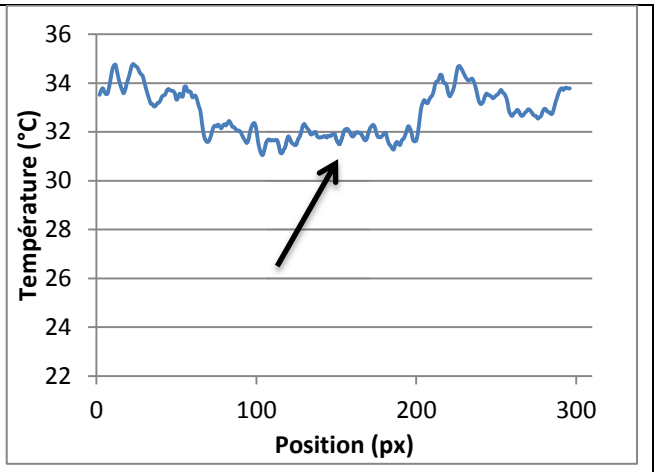


Figure 320 : Profil spatial

La zone d'intérêt est correctement repérée, l'écart de température est de l'ordre de 2 °C par rapport à la périphérie.

Analyse temporelle

Nous nous extrait les profils temporels de 10 points situés sur un profil traversant de part en part la face avant de l'échantillon. Quatre points sont situé dans la zone centrale contenant du sel.

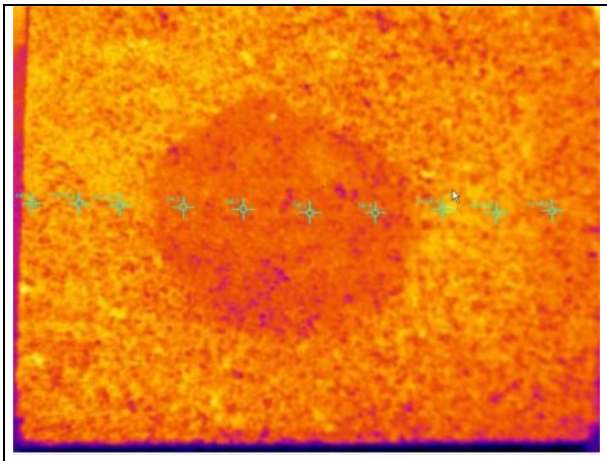


Figure 321 : Image thermique de l'échantillon avec profil

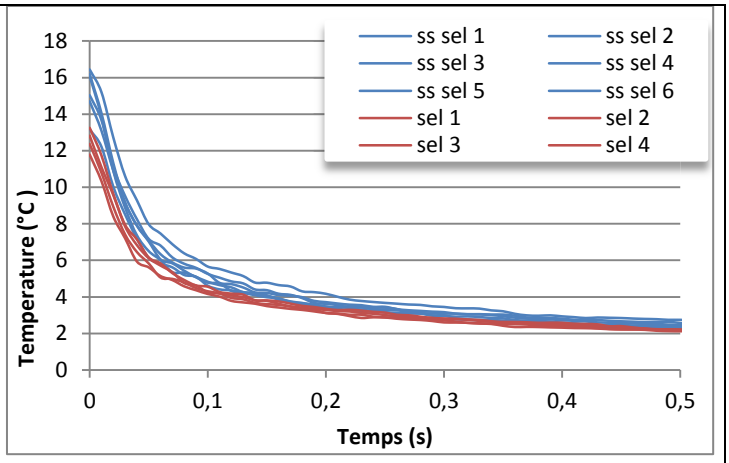


Figure 322: Profils temporels

Les réponses en température forment deux groupes distincts selon leur emplacement sur l'échantillon. L'échauffement de la pé iphérie sans sel est de l'ordre de 4 °C supérieur au centre de l'échantillon. Cette diffé ence de conportement thermique peut donc permettre une caractérisation thermophysique.

20.2.1.4.Caractérisation thermophysique

Nous allons déterminer **l'échauffement maximal Tmax**, l'**effusivité thermique absolue** b et **relative** b* par la **méthode des comparaisons**. L'inté êt du b* relatif s'explique par le fait que son calcul ne nécessite pas l'usage d'un é hantillon de réfé ence ce qui est très inté essant d'un point de vue pratique lorsque nous sommes sur le terrain. Pour le calcul de l'effusivité b nous utilisons l'échantillon de PVC dé rit pré éd mment comme ré é ence (voir Figure 324).

La diffusivité thermique ne peut pas être mesurée avec la *méthode de Parker*, car celle-ci n'est applicable qu'à des échantillons minces. Nous avons vu au chapitre III qu'il é ait possible de faire une telle mesure avec une excitation locale, nous présenterons une application dans la suite (voir page 251).

Nous avons extrait les rép nses en tempé ature d'une quinzaine de points (Figure 323).

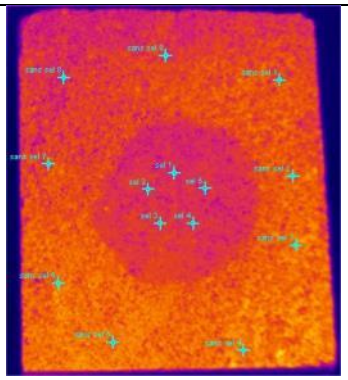


Figure 323 : Emplacement des points étudiés

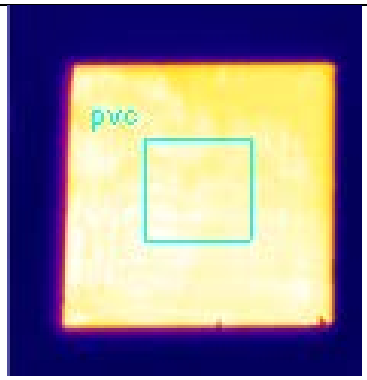


Figure 324 : Image thermique de l'échantillon de PVC

Le graphe suivant représente les réponses en températures des différents points en représentation log-log.

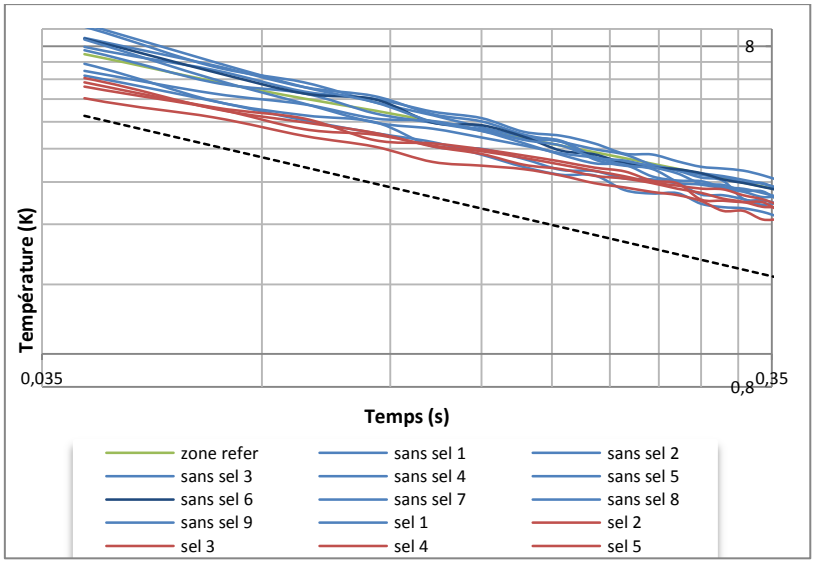


Figure 325 : Représentation en log-log des réponses en température

Les résultats de ces mesures sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 85 : Estimation de l'effusivité thermique b et Tmax mesurés sur un bloc de calcaire

	b absolu mesuré (SI)	b absolu moyen (SI)	Écart type (SI)	T_{max} (K)	T_{max} moyen (K)	Écart type (K)
sans sel 1	925,21	984,3	29,3	15,07	16,5	1,4
sans sel 2	983,84			16,40		
sans sel 3	919,32			17,94		
sans sel 4	1085,20			15,08		
sans sel 5	927,59			16,56		
sans sel 6	941,12			19,36		
sans sel 7	1159,52			13,79		
sans sel 8	995,62			15,81		
sans sel 9	921,28			18,12		
sel 1	1060,53	1166,5	43,9	12,85	12,5	0,4
sel 2	1266,74			11,89		
sel 3	1151,27			12,92		
sel 4	1175,26			12,59		
Sel 5	1178,65			12,18		

(En rouge : valeurs sujettes à caution).

On observe des écarts marqués sur les deux paramètres mesurés entre la région centrale soumise à une infiltration de solution saline et la périphérie du bloc. Les deux graphes suivants confirment les observations déjà effectuées sur les échantillons minces à savoir une plus forte effusivité et un échauffement moindre sur la zone avec sel.

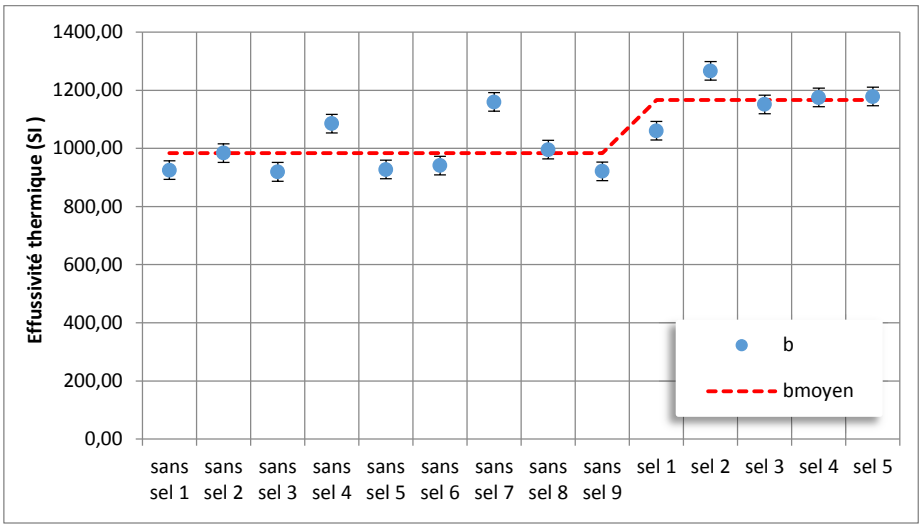


Figure 326: Effusivité thermique b sur bloc

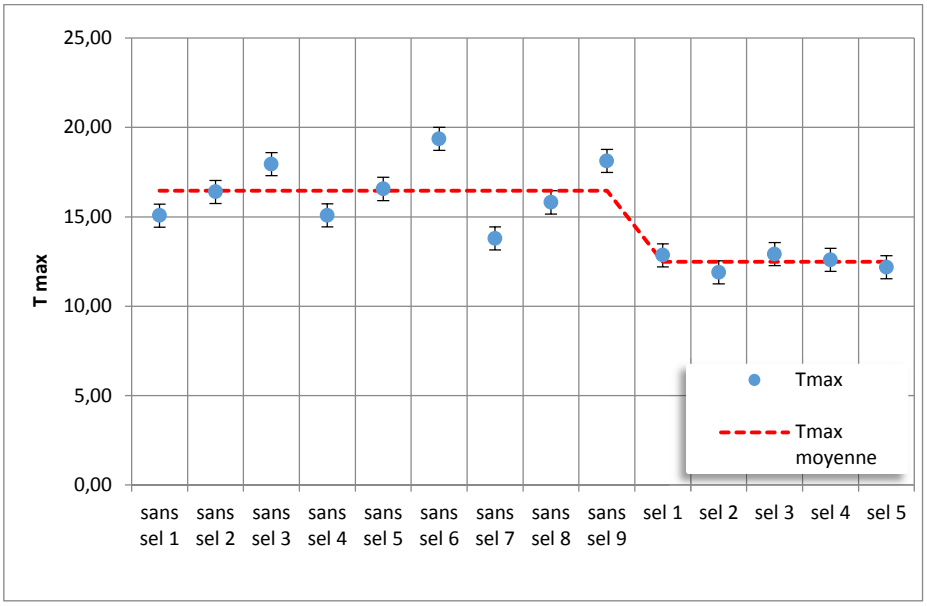


Figure 327 : Échauffement Tmax sur bloc

20.2.1.5. Validation statistique

Nous allons nous assurer au moyen d'un test statistique en t (test de *Student* avec un seuil de signification $\alpha = 5\%$) que les grandeurs mesuré s au centre sont significativement distinctes des valeurs mesurées en zone périphérique du bloc.

Paramètre	**Effusivité thermique b (SI)**	**T_{max} (K)**
Méthode	**Méthodes des comparaisons**	**Mesure directe**
Référence (zone périphérique)	984,3	16.46
Échantillonnage	5	5
Région d'acceptation hypothèse nulle H_0	[-2,776…2,776]	[-2,776…2,776]
Statistique de test	9,29	-222,5
Intervalle de confiance zone centrale	[1112,0…1220,9]	[12,43…12,53]
Hypothèse retenue	H0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives

Les grandeurs mesurées au centre du bloc (zone soumise à une infiltration saline) sont significativement distinctes des valeurs mesurées en périphérie (zone témoin).

20.2.1.6. Conclusion :

Les diffé ents modes d'analyse (visuel, temporelle, spatiale) mettent en é idence une zone de forme circulaire au centre de l'é hantillon, plus froide et d'effusivité thermique supé ieure à la pé iphérie de l'échantillon. Les analyses à l'aide du SVD et du PPT amènent à penser que ces différences sont de nature essentiellement radiatives. Les relevés montrent des différences significatives entre ces deux zones qui ne peuvent pas s'expliquer par un alé statistique. Nous dédu sons donc qu'il est possible de repé er trè simplement la pré ence d'une infiltration de NaCl localisée en surface d'un échantillon épais. Les analyses effectué s au moyen d'une excitation créneau et ensuite en aléatoire – annexe 29.22 page 381 – confirment la possibilité de repérer ce type d'altération avec ces modes de mise sous contrainte plus adapté à l'étude des œuvres d'art. L'excitation crén au est simple à mettre en œuvre, mais elle offre des contrastes moindres et une analyse plus difficile. L'aléatoire se rapproche de l'analyse en flash, mais est plus complexe à mettre en œuvre.

20.3. Analyse locale

Dans le chapitre III nous avons démontré la possibilité de faire des mesures de propriété thermique (a et b) en local avec **SAMMTHIR** au moyen d'un tir laser. Pour ce qui est des mesures de diffisivité thermique l'objectif poursuivi est d'ouvrir les possibilité d'analyse de **SAMMTHIR** aux échantillons épais ce que ne permet pas la méthode de Parker. Cette mé hode permet d'estimer la diffusivité transverse, déduite à partir de la durée nécessaire à une perturbation thermique pour traverser l'é aisseur du matériau é udié, ce type de mesure n'est possible que sur des é hantillons d'ép isseur faible, accessible sur ses deux faces. On comprend dans ces conditions que cette méthode ne puisse s'appliquer à des é hantillons épais tels que des blocs ou des murs par exemple.

Pour relever cette difficulté, nous nous sommes intéressés à la diffusivité longitudinale de l'échantillon plutôt qu'a sa diffusivité transverse (voir Figure 328). On suppose que le matériau est isotrope ce qui revient à considérer que ses diffusivités transversales et longitudinales sont identiques.

Nous avons présenté au chapitre III un certain nombre de méthodes permettant ce type de mesure. En outre nous avons élargi ce type d'approche local à l'estimation de l'effusivité thermique (voir 16.3, page 171). Il est donc possible à l'aide d'un modèle approprié d'estimer ces deux grandeurs sur des échantillons sans avoir à prendre en compte leurs épaisseurs. Vérifions cette approche sur les échantillons minces que nous avons étudiés.

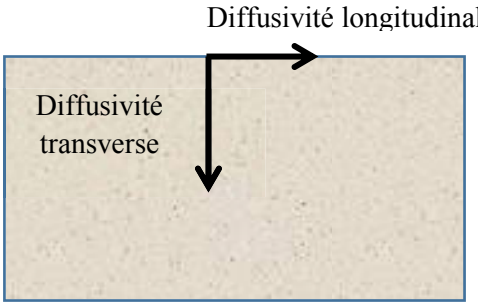


Figure 328 : Mesure transverse et longitudinale

Dans cette section nous présenterons des résultats obtenus sur les 10 échantillons étudiés précédemment. Nous essaierons de caractériser thermiquement ces éprouvettes avec les méthodes que nous avons présentées dans le chapitre précédent.

20.3.1. Analyse d'échantillons minces

Reprenons les deux séries d'échantillons étudiées. Ces échantillons ont été soumis à 3 tirs laser successifs, nous avons procédé de même sur l'échantillon de PVC servant de référence.

20.3.1.1. Conditions expérimentales

Les échantillons des deux séries ont été soumis à trois tirs laser chacun. Chaque impulsion laser d'une puissance de 1,5 W a été observé à l'aide d'une caméra thermique *Flir SC655* cadencée à 200 Hz équipé d'un zoom x 50. La durée d'observation a été fixé à 3 s. Les figures ci-dessous présentent le dispositif.

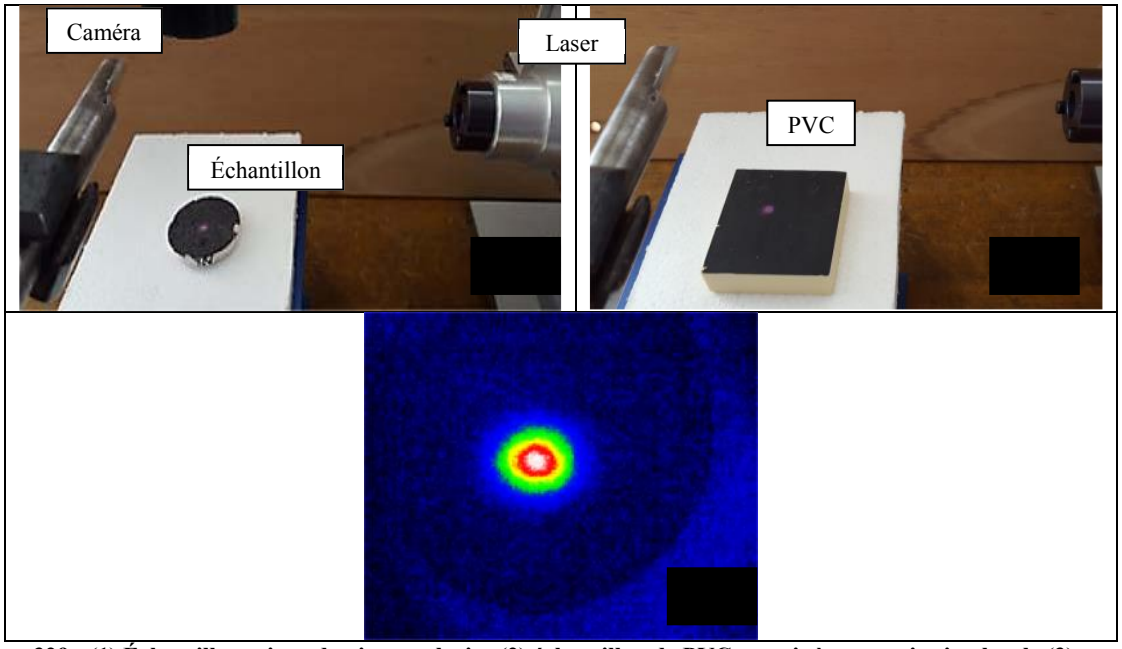


Figure 329 : (1) Échantillon mince de pierre calcaire (2) échantillon de PVC soumis à une excitation locale (3) spot sur échantillon de pierre calcaire.

La figure suivante regroupe les réponses en température mesurées sur les dix échantillons.

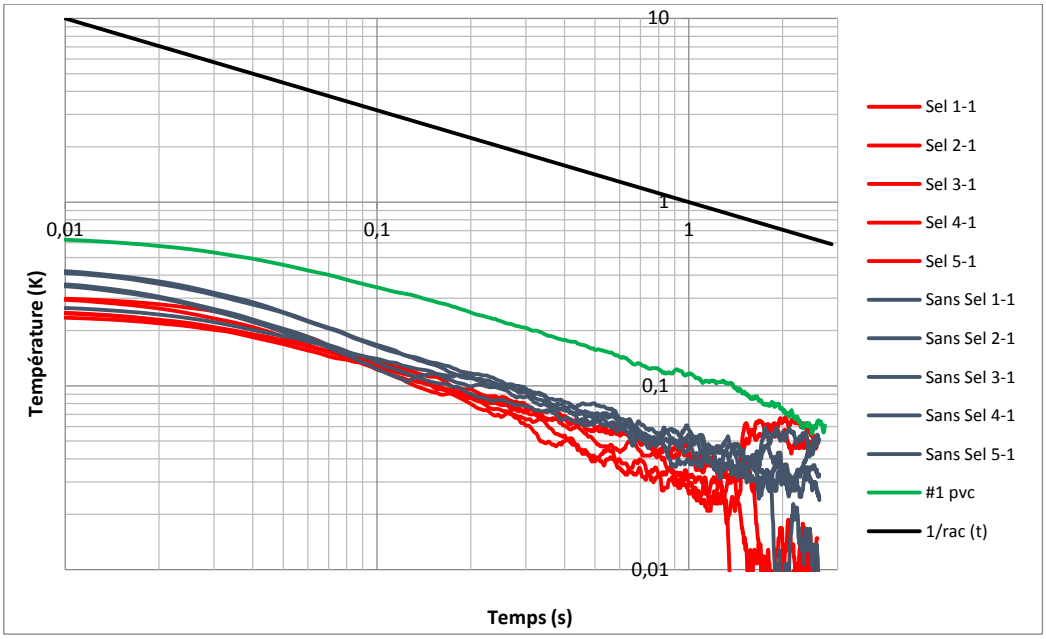


Figure 330 : Réponses en température d'échantillons minces (excitation locale)

20.3.1.2.Résultats

Effusivité thermique

Les tableaux suivants rassemblent les mesures d'effusivité thermique et d'échauffement des échantillons. Le dépouillement a été effectué en prenant la température moyenne sur la surface des échantillons.

Tableau 86 : Estimation de l'effusivité thermique au moyen d'une excitation locale sur des échantillons minces

	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5	Moyenne Sel
Tir 1 (SI)	1449,4	1241,6	1036,8	1053,4	1217,8	**1199,8**
Tir 2 (SI)	1218,5	1283,8	1160,8	1099,6	1125,3	**1177,6**
Tir 3 (SI)	1258,5	973,5	1143,6	1208,0	1065,6	**1129,8**
Moyenne (SI)	**1308,8**	**1166,3**	**1113,7**	**1120,3**	**1136,2**	**1169,1**
Écart type (SI)	**123,4**	**168,3**	**67,2**	**79,3**	**76,7**	**103,0**

	Témoin 1	Témoin 2	Témoin 3	Témoin 4	Témoin 5	Moyenne Témoin
Tir 1 (SI)	1021,1	1028,0	1103,4	977,0	886,4	**1003,2**
Tir 2 (SI)	872,8	1118,6	961,5	923,8	995,8	**974,5**
Tir 3 (SI)	1003,4	1023,4	920,8	1054,5	1109,2	**1022,2**
Moyenne (SI)	**965,8**	**1056,6**	**995,2**	**985,1**	**997,2**	**1000,0**
Écart type (SI)	**81,0**	**53,7**	**95,8**	**65,7**	**111,4**	**81,5**

Écart relatif entre les deux séries	**16.9 %**

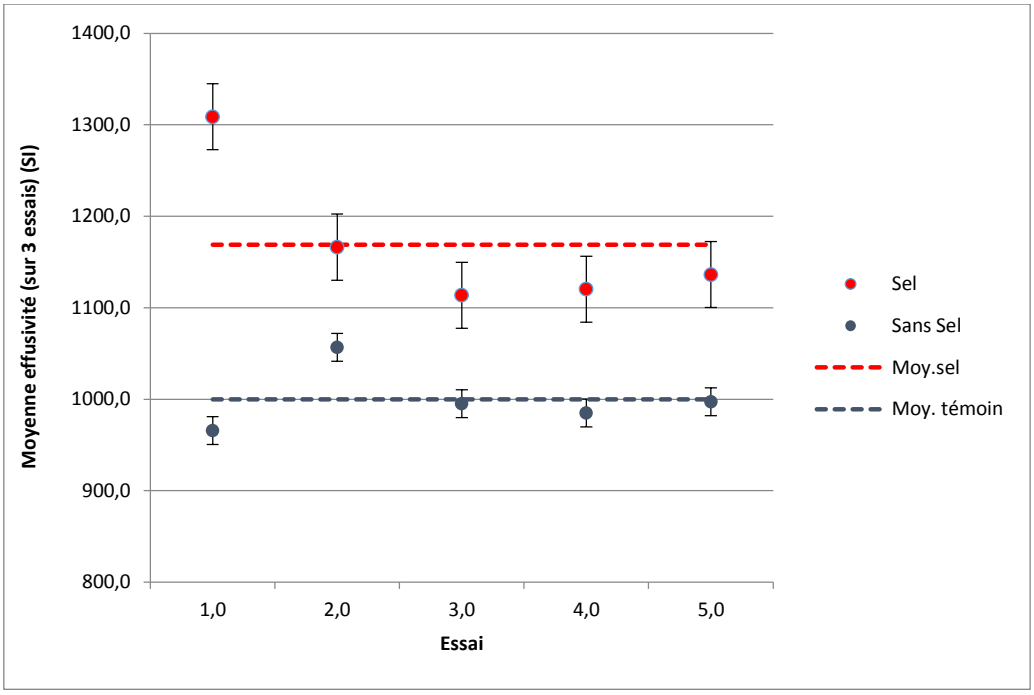


Figure 331 : Mesure d'effusivité thermique sur échantillons minces en local

Les mesures d'effusivité confirment ce qui a été observé en excitation étendue, les échantillons témoins ont une effusivité inférieure à ceux de la série ayant été plongé dans une solution saline. Les ordres de grandeur observés sont proches de ce qui a été observé au Tableau 60 de la page 216.

Échauffement Tmax

Voyons maintenant si les échauffements suivent la tendance observée précédemment, on rappelle que les échantillons de la série témoin présentaient des échauffements supérieurs à ceux de la série avec sel. Le tableau suivant comprend les résultats de ces mesures :

Tableau 87 : Échauffements Tmax sur échantillons minces dans le cadre d'une excitation locale

Série sel	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5	Moyenne Sel
Tir 1	0,29	0,33	0,27	0,30	0,23	**0,28**
Tir 2	0,27	0,31	0,26	0,31	0,24	**0,28**
Tir 3	0,27	0,33	0,27	0,28	0,25	**0,28**
Moyenne	**0,28**	**0,32**	**0,27**	**0,29**	**0,24**	**0,28**
Écart type	**0,02**	**0,01**	**0,00**	**0,01**	**0,01**	**0,01**

Série témoin	**Témoin 1**	**Témoin 2**	**Témoin 3**	**Témoin 4**	**Témoin 5**	**Moyenne Témoin**
Tir 1	0,42	0,42	0,38	0,42	0,30	**0,39**
Tir 2	0,44	0,38	0,37	0,45	0,28	**0,39**
Tir 3	0,40	0,40	0,42	0,39	0,28	**0,38**
Moyenne	**0,42**	**0,40**	**0,39**	**0,42**	**0,29**	**0,38**
Écart type	**0,02**	**0,02**	**0,02**	**0,03**	**0,01**	**0,02**

Écart relatif entre les deux séries	**-26,3 %**

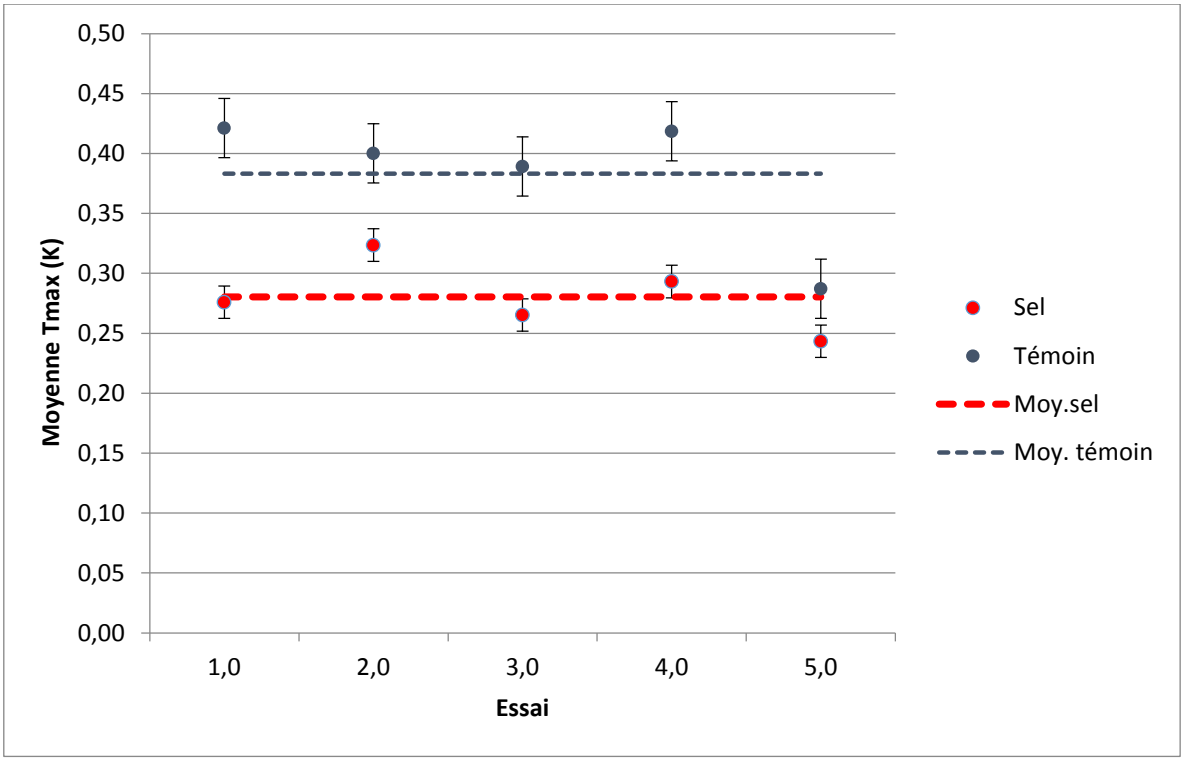


Figure 332 : Échauffement (Tmax) sur échantillons mince (mesure en local)

Les mesures confirment les observations attendues, les é hantillons sel s'é hauffent moins que les échantillons témoins.

255

Diffusivité thermique

Nous présentons des dépouillements effectués à l'aide de la méthode radiale. Deux mesures de diffusivité thermique ont été faites pour chaque échantillon.

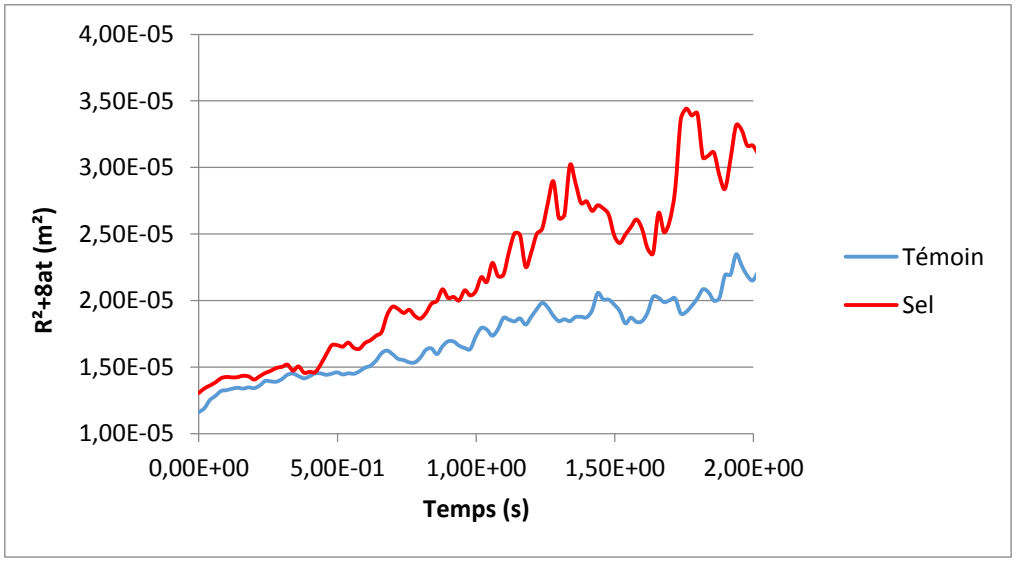


Figure 333 : Exemple de dépouillement d'un échantillon témoins et d'un échantillon sel à l'aide de la méthode radiale

La figure ci-dessous qui représente un résultat de dépouillement sur deux échantillons, une diffé ence de pente entre l'é hantillon de la série té oin et un é hantillon de la série avec sel. Cette observation indique une différence de diffusivité thermique.

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de nos mesures :

Tableau 88: Diffusivité thermique mesurée en local

Sel (m²/s)		Témoin (m²/s)	
Ècha. 1	9,64E-07	**Ècha. 6**	7,56E-07
	8,82E-07		4,00E-07
Ècha. 2	9,71E-07	**Ècha. 7**	7,34E-07
	9,46E-07		8,00E-07
Ècha. 3	7,86E-07	**Ècha. 8**	5,90E-07
	9,49E-07		6,18E-07
Ècha. 4	9,29E-07	**Ècha. 9**	5,77E-07
	9,38E-07		6,49E-07
Ècha. 5	7,58E-07	**Ècha. 10**	7,48E-07
	6,26E-07		9,62E-07
Moyenne	8,75E-07	**Moyenne**	6,83E-07
Écart type	1,15E-07	**Écart type**	1,52E-07
Écart relatif	28,0%		

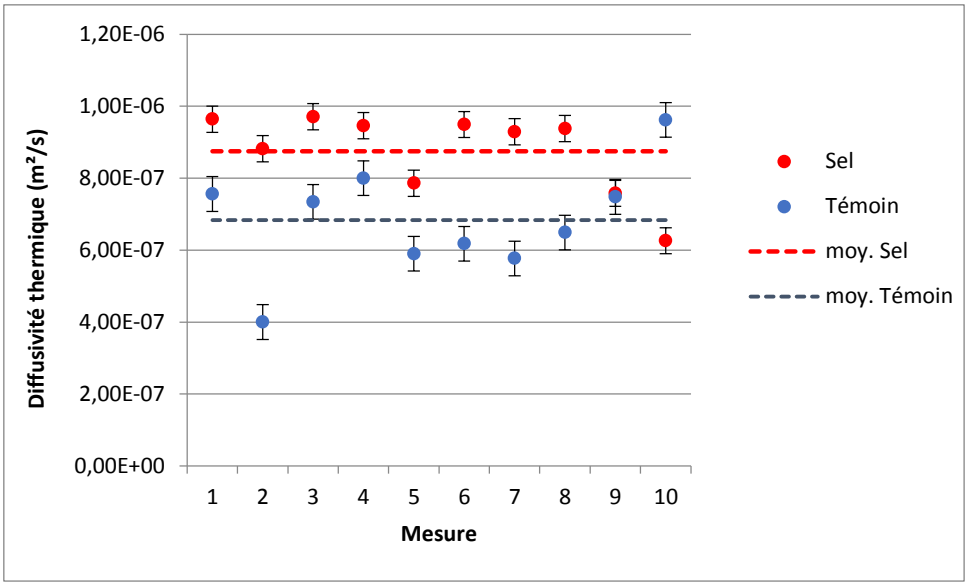


Figure 334 : Comparaison mesure de diffusivité thermique en locale

Comme on pouvait le supposer ces résultats confirment ce qui a été observé en étendu : La diffusivité mesuré sur la sé ie té oin est inférieure à la diffusivité mesuré sur la série sel. L'écart relatif mesuré entre les deux séries est de l'ordre de 28 %. Les valeurs mesurées respectent les ordres de grandeur même si celles-ci présentent des écarts avec les valeurs obtenues avec la méthode flash, de plus on note de forts écarts types, supérieurs à ceux observés en flash étendu. Ce point a été observé sur l'effusivité thermique. Que peut-on en conclure ? Il est vraisemblable que cette dispersion des valeurs s'explique par les variations locales de propriété, comme la pré ence ou pas d'une cristallisation à l'endroit de la mesure, la rugosité, etc. Cet effet n'est pas observé en étendu, car les valeurs extraites de tempé ature sont moyennées avant d'être analysées ce qui a pour effet de lisser ces variations.

20.3.1.3.Validation statistique

Comme cela a déjà été fait en étendu, vérifions que les mesures obtenues sur nos séries d'échantillons ne proviennent pas d'un biais statistique.

Pour le rappel du principe, se reporter à la page 206.

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de cette analyse :

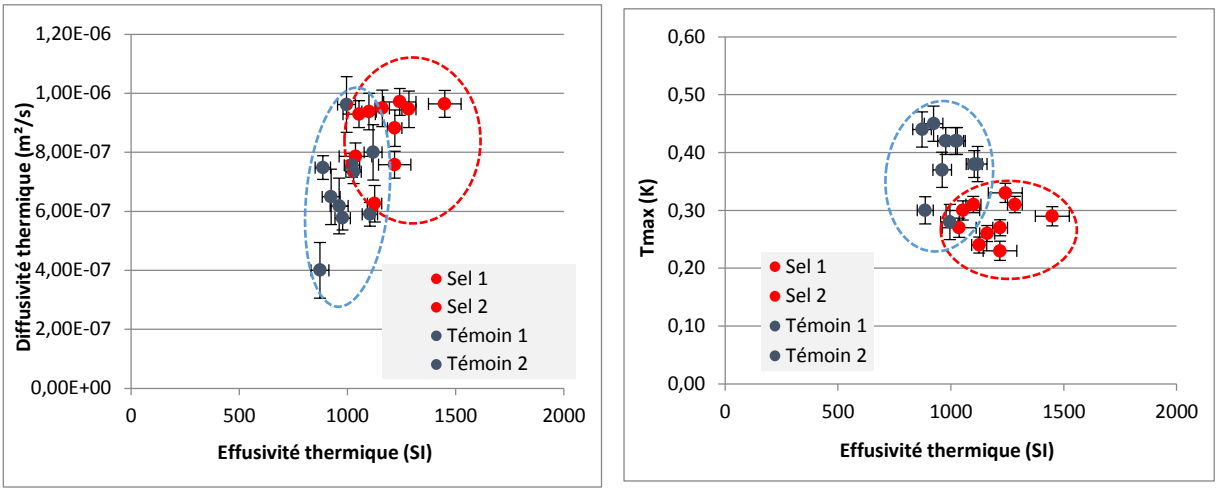
Paramètre	Effusivité thermique b	T_{max}	Diffusivité thermique face avant
Méthode	**Méthodes des comparaisons (approche locale)**	**Mesure directe**	**Méthode radiale**
Référence (Témoin)	1000	0,38	6,83E-07
Échantillonnage	15	15	10
Région d'acceptation	[-2,145…2,145]	[-2,145…2,145]	[-2,262…2,262]
Statistique de test	6,36	-38,7	5,28
Intervalle de confiance ech.sel.	[1112…1226,1]	[0,274…0,286]	$[7{,}97.10^{-7}…9{,}57.10^{-7}]$
Résultat du test	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives	H_0 rejetée ➔ Différences significatives

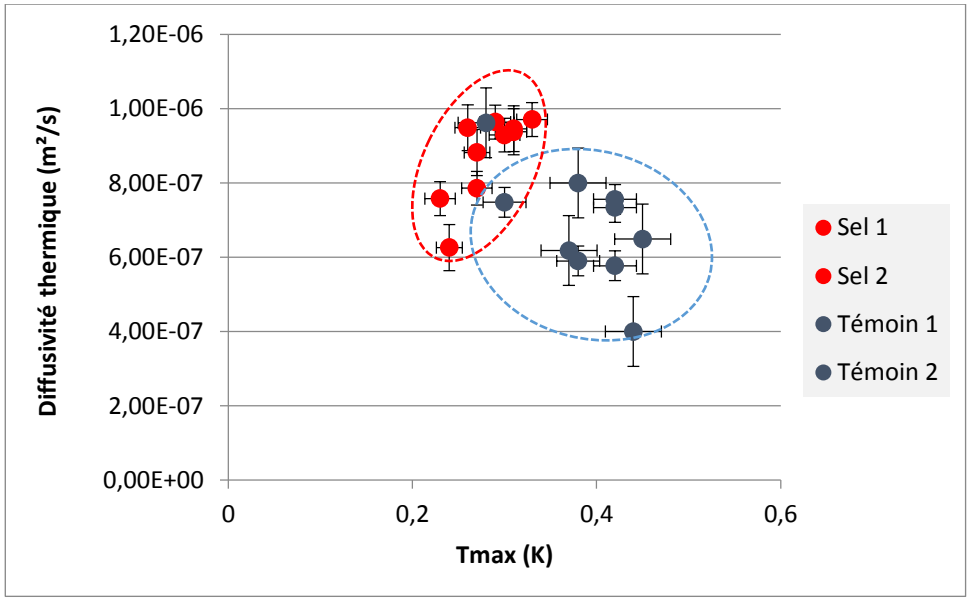
L'analyse statistique sur les mesures obtenues en local montre que les différences observées entre les deux séries d'é hantillons ne relè ent pas d'un biais statistique. On peut donc dire que l'analyse en local permet de bien discriminer les deux séries d'é hantillons.

20.3.1.4.Vue synthétique

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus sous forme graphique du croisement de nos données.

Tableau 89 : Vue synthétique analyse en local d'échantillons minces





Les graphes mettent en évidence des ensembles de points disjoints, on remarquera toutefois la présence de quelques points aberrants.

20.3.1.5. Récapitulatif et comparaison avec les résultats obtenus en flash étendu

Comparons les valeurs obtenues en local avec celles du flash étendu :

Tableau 90 : Comparaison entre une analyse locale et étendue

		Série sel	Série témoin	Écart relatif sel/témoin (%)
Flash étendu	Effusivité thermique b (SI)	1101,1	1030,9	6,8 %
	Écart type b (SI)	18,1	19,3	
	Tmax (K)	9,7	12,2	-20,5 %
	Écart type Tmax (K)	0,9	1,2	
	Diffusivité thermique a (m²/s)	$9,98^{E}$-7	$8,58^{E}$-7	16,3 %
	Écart type a (m²/s)	$4,82^{E}$-8	$6,32^{E}$-8	
Excitation locale	Effusivité thermique b (SI)	1169,1	1000	16,9 %
	Écart type b (SI)	103	81,5	
	Tmax (K)	0,28	0,38	-26,3 %
	Écart type Tmax (K)	0,01	0,02	
	Diffusivité thermique a (m²/s)	$8,75^{E}$-7	6.83^{E}-7	28,1 %
	Écart type a (m²/s)	$1,15^{E}$-7	$1,52^{E}$-7	
Écart relatif local/étendu	**Effusivité thermique b (%)**	**6,17%**	**-2,9%**	
	Tmax (%)	**Non pertinent**		
	Diffusivité thermique	**-12,3%**	**-20,4%**	

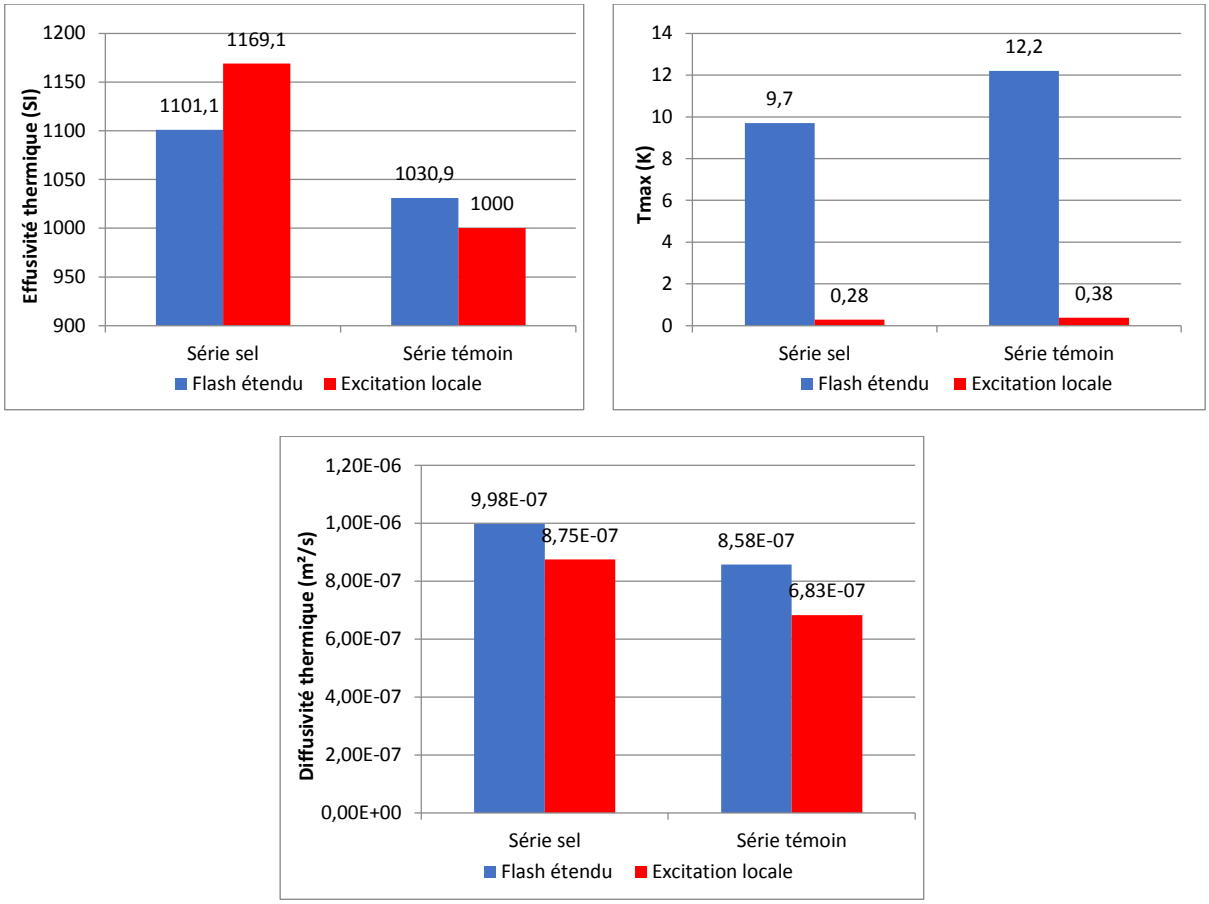


Figure 335: Comparaison flash étendu et local sur l'effusivité thermique, l'échauffement Tmax et la diffusivité thermique

Le tableau ci-dessus regroupe les paramètres estimés en local et en étendue. Tout d'abord l'analyse en local permet de retrouver les ordres de grandeur obtenus en flash étendu avec dans le pire des cas un écart de 20 %. On remarque ensuite des écarts types plus importants en local sur les grandeurs thermo physiques a et b laissant supposer une plus grande dépendance de ces paramètres à l'aspect local de la mesure et aux irré ularité de position. Ces observations de s'appliquent pas aux mesures d'échauffement (Tmax), on remarque que les é hauffements mesuré en é endu ne sont pas identiques à ceux des mesures en local, de plusieurs ordres de grandeur, de même pour les écarts type. Qu'elle en est la raison ? Nous savons que l'é hauffement dép nd du dé ôt d'én rgie et donc des conditions expérimentales (puissance du laser et des flashs, distance, absorptivité de la surface, etc.) ce qui n'est pas le cas des grandeurs thermophysiques telles que l'effusivité thermique et la diffusivité thermique qui ne dépendent que du matériau étudié or les conditions expérimentales de nos expérimentations ont évolué (passage de l'excitation é endue à local)… C'est la raison pour laquelle la comparaison des échauffements ne peut pas être considérée comme pertinente.

20.3.2. Conclusion

Nous venons de dé ontrer la faisabilité d'une dé ection de NaCl dans de la pierre calcaire au moyen d'une excitation locale, ce qui permet d'envisager des mesures in situ sur des é hantillons épais. Les valeurs mesurées de propriétés thermiques (effusivité et diffusivité thermique) respectent les ordres de grandeur obtenus en excitation étendue. Les tendances sont aussi respectées. La présence de sel (NaCl) augmente de façon significative la valeur de ces deux grandeurs.

Voyons maintenant s'il est possible de vé ifier ces observations in situ. Nous pré enterons les résultats de deux campagnes de mesures effectuées pour l'une à l'Abbaye d'Orval (dans les Ardennes Belges) et l'autre à l'Abbaye royale de Chaalis en île de France.

21. Études sur site

21.1. Analyse sur site cas de l'abbaye d'Orval

L'abbaye d'Orval est un monastère cistercien-trappiste situé dans les Ardennes. Fondée par des moines bénédictins au XIe siècle, l'abbaye aura un rayonnement comparable à celui de l'Abbaye de Cluny. Lors de la Révolution française les bâtiments sont détruits et abandonnés et les biens de l'Abbaye confisqués. Le site restera abandonné et en ruine jusqu'en 1926. C'est alors qu'un moine de l'abbaye de la Trappe, **Albert-Marie van der Cruyssen**, lance une entreprise de restauration et de rétablissement de l'abbaye. Une nouvelle abbaye a surgi non loin des ruines médiévales. Le principal matériau employé pour la construction de la partie moderne est une pierre reconstituée d'un ton jaune doré. C'est sur cette pierre reconstitué qu'a été repéré en différents endroits la présence de sel hygroscopique. Nous présentons des éléments du travail mené en collaboration avec le **Gegena²** (***Groupe d'Étude sur les Géomatériaux et les Environnements Naturels Anthropiques et Archéologiques*** de l'Université de Reims), ce travail a fait l'objet d'une publication en 2016 par **Thomachot-Schneider et al** [191].

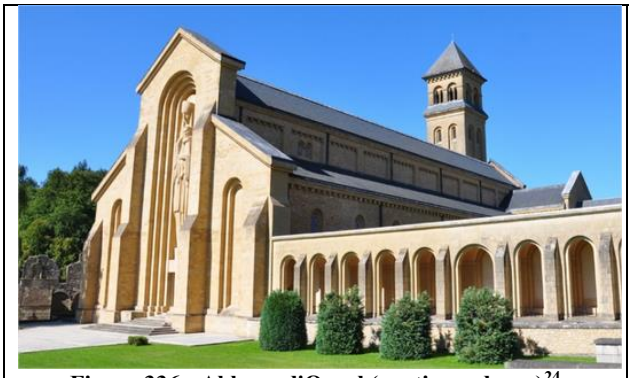


Figure 336 : Abbaye d'Orval (partie moderne)[24]

Figure 337 : Abbaye d'Orval (partie ancienne)

21.1.1. Présentation du site étudié

La zone étudiée est une façade se trouvant dans le cloître de la partie moderne de l'abbaye. À l'arrière de cette façade en pierre reconstituée se trouve un local de stockage du bois. Il est possible que l'humidité contenue dans ce bois soit à l'origine des infiltrations constaté s. Des prélèvements suivis d'analyses chimiques ont démontré que l'essentiel de la pollution par les sels sur cette façade provenait du Na_2SO_4, voir à ce sujet l'étude effectué en 2011 par **Thomachot-Schneider et al**. [192]. Un dosage du soufre le long d'un profil vertical a été effectué avec deux méthodes : tout d'abord de façon directe au moyen d'un dispositif portable de spectrométrie par fluorescence X (pXPRF[25]) puis par analyse de poudres de forage par chromatographie à échange d'ions. Ces deux types d'analyse ont permis d'estimer l'évolution de la concentration de Na_2SO_4 (plus précisément du soufre) sur une hauteur de 40 cm environ (voir Figure 338).

[24] Illustrations tirées de http://www.orval.be

[25] La spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF pour X-ray fluorescence) est une méthode d'analyse chimique utilisant une propriété physique de la matière, la **fluorescence de rayons X**. Cette méthode exploite l'émission secondaire de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de la composition de l'échantillon, l'analyse du spectre permet de déduire la composition élémentaire, c'est-à-dire les concentrations massiques en éléments (source Wikipédia)

Figure 338 : Analyse préliminaire (sondage)

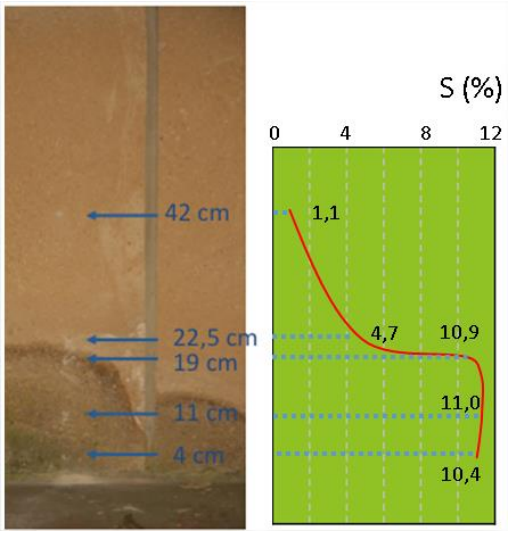


Figure 339 : Profil de concentration de soufre le long d'un axe vertical

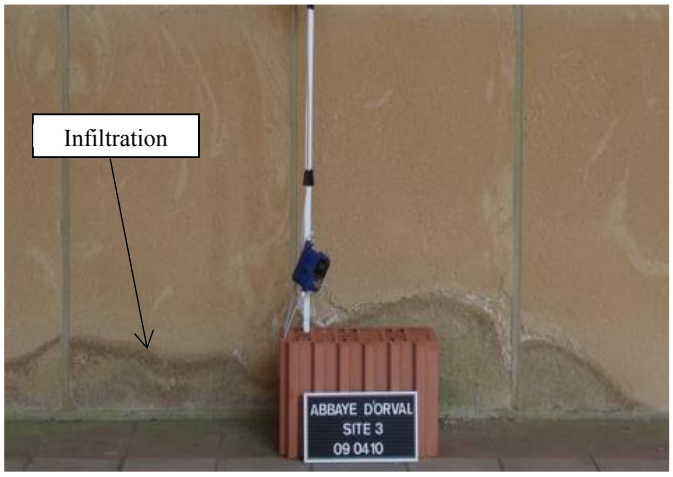


Figure 340 : Image de la zone d'étude

Figure 341 : Dispositif

Pour l'étude de cette zone nous avons procédé à une analyse pulsée au moyen d'un flash

21.1.2. Excitation Flash

21.1.2.1. Descriptions du dispositif

Le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'étude est composé de deux lampes flash distantes de 125 cm et de délivrant une énergie de 2 x 2400 J pendant environs 5 ms. La détection est effectuée au moyen d'une caméra à bolomètres de type **FLIR SC 655** réglée à une fréquence d'acquisition de 50Hz. Le dispositif est enfin composé d'une électronique de synchronisation et d'une informatique d'acquisition et de post traitement.

21.1.2.2. Analyse qualitative

La Figure 342 représente la zone d'analyse. C'est une paroi verticale présentant dans sa partie basse des auréoles d'humidité. À mis hauteur nous avons une limite d'évaporation, au-delà la paroi est saine. Cette zone est intéressante, car elle déjà été étudiée au moyen de deux techniques : une analyse en surface (fluorescence X) et une analyse en profondeur (forage et dosage des poudres par chromatographie). Trois zones ont été définies à partir du dosage du soufre (Figure 339) : basse (riche en sel), intermédiaire au niveau de la limite d'évaporation (riche en sel) et supérieure (pauvre en sel). Les thermogrammes avant et après flash sont représentés aux Figure 343 et Figure 344.

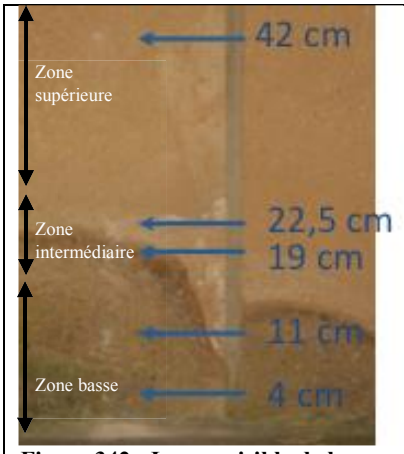


Figure 342 : Image visible de la zone d'étude avec emplacements des sondages.

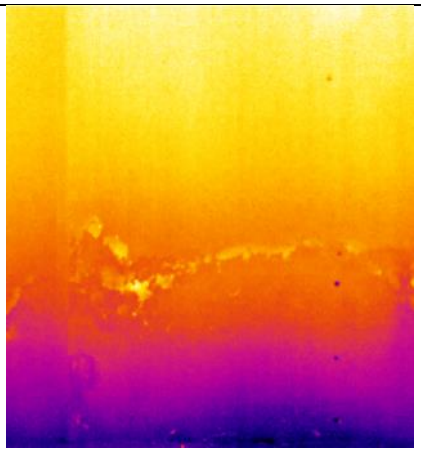


Figure 343 : Image thermique avant flash.

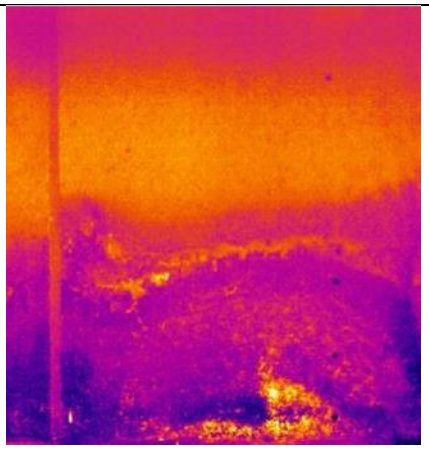
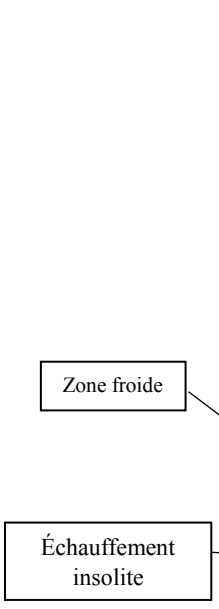


Figure 344 : Image thermique au moment du flash.

La Figure 344 met en évidence un gradient vertical de température déjà observable avant excitation (Figure 343). Ce gradient peut être une manifestation de l'humidité pré ente dans la paroi, ou/et la manifestation de sel. Nous savons que le phénomène de remontées de sels est étroitement associé à la pré ence d'humidité il est donc probable que nous soyons sensibles à la manifestation conjugée de ces deux phénomènes.



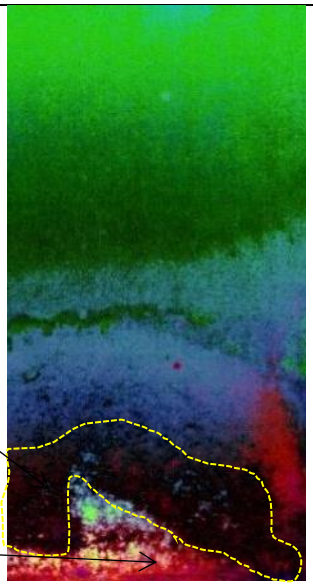


Figure 345 : Image de T_{max}

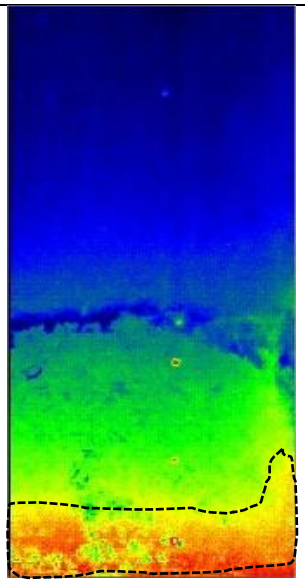


Figure 346 : Post-traitement moyenne effusivité

La Figure 345 permet de visualiser l'é hauffement T_{max}, cette figure fait apparaitre une zone froide qui remonte jusqu'à mi-hauteur. On peut observer au niveau du sol un échauffement insolite pouvant provenir de la pré ence en surface d'un dépôt biologique (mousse ou algue) ou alors d'une structure de maçonnerie.

L'image d'effusivité – voir Figure 346 – fait apparaitre une émissivité croissante partant du sol. Observons de plus prè l'évolution de l'effusivité le long de deux profils tracés de part et d'autre des points de sondage :

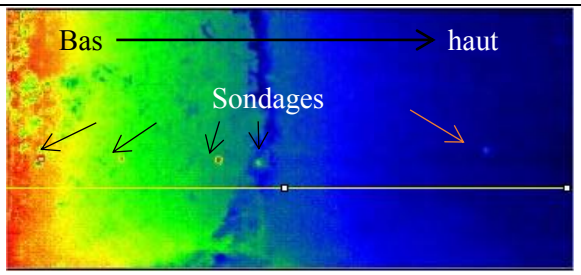


Figure 347 : Profil 1 sur post-traitement effusivité moyenne

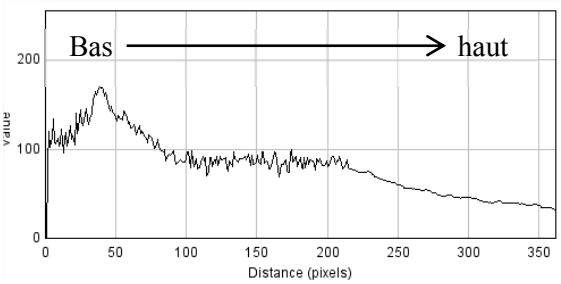


Figure 348 : Profil 1 effusivité

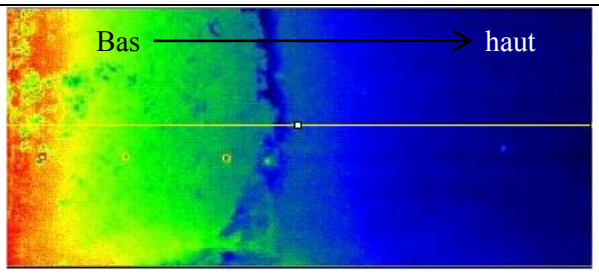


Figure 349 : Profil 2 sur post-traitement effusivité moyenne

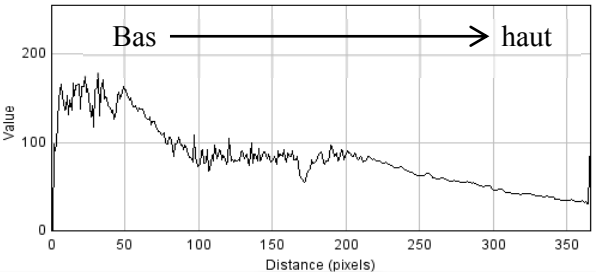


Figure 350 : Profil 2 effusivité

Les profils d'effusivité sont similaires et évoluent verticalement. Donc progression verticale du phénomène, ce qui est compatible avec des remontées de sel hygroscopiques. Le gradient d'effusivité se répartit en 3 zones : une zone de forte effusivité proche du sol, une zone intermédiaire et une zone d'effusivité ré uite, ces 3 zones correspondent au découpage fait précédemment.

263

Analyse spatiale

Deux profils spatiaux de température ont été tracés de part et d'autre de l'axe sur lequel ont été effectués les dosages du soufre.

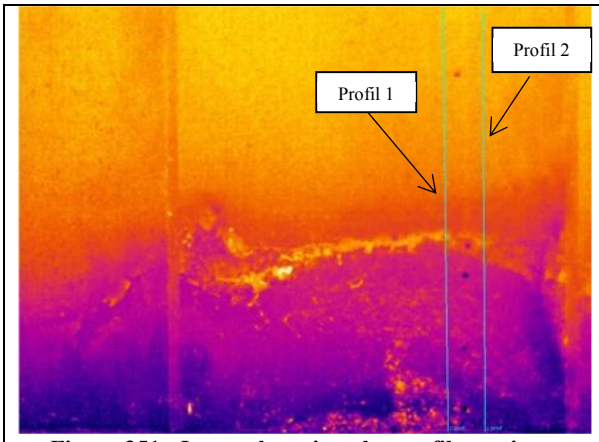


Figure 351 : Image thermique les profils spatiaux

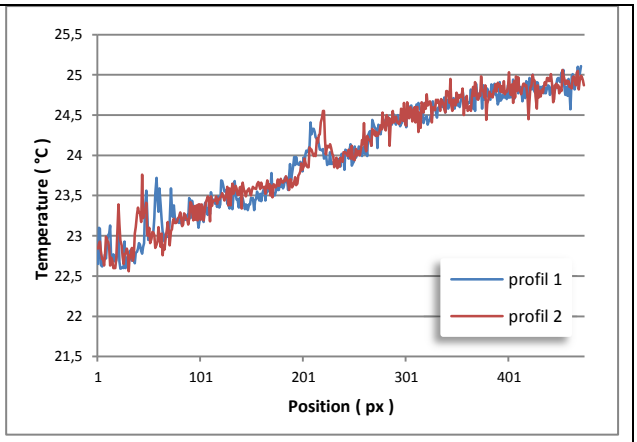


Figure 352 : Profils spatiaux

Comme pour les profils d'effusivité, ceux-ci sont confondus. On observe une zone plus froide à proximité du sol (environ 22,5et 23 °C) puis un échauffement progressif de la température le long de la paroi avec un pic au niveau de la limite d'é aporation..

Analyse temporelle

Nous avons ensuite effectué une analyse des réponses en température en différents points situés le long d'un axe vertical, à proximité des cinq points de prélèvement utilisés pour le dosage du soufre.

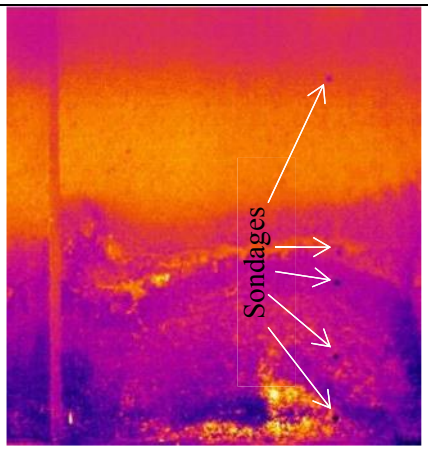


Figure 353 : Image thermique avec positionnement des points de mesure

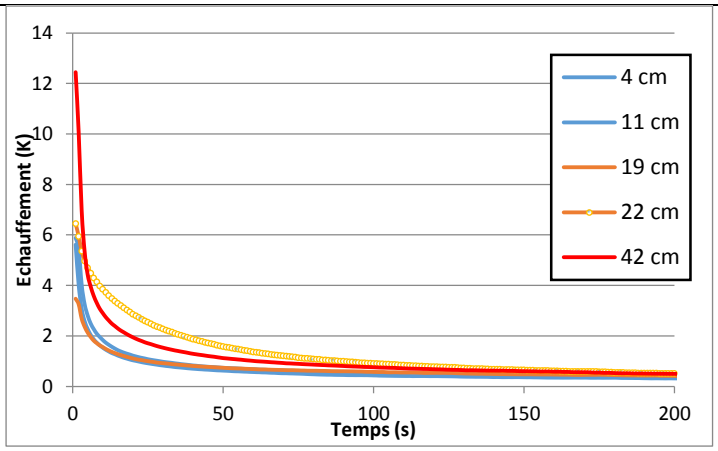


Figure 354 : Réponses en température

Les réponses en température des points à 4 et 11 cm de hauteur mettent en évidence des tempéatures d'é hauffement inféieures dans la **partie basse**. La partie basse de la paroi se comporte donc comme nous pouvons l'attendre d'une zone riche en sels.

La **zone intermédiaire** est plus complexe : nous avons un point à 19 cm de hauteur et un autre point à 22 cm. Le point à 19 cm est comparable aux points de la zone basse, l'échauffement est plus faible que les points positionnés en dessous ce qui laisse supposer une accumulation de sel à cet endroit (compatible avec la préence de la limite d'é aporation et la courbe de dosage du soufre – voir Figure 339). Le point à 22 cm se comporte de façon atypique, ce comportement peut provenir de la préence d'un déaut de type é aillage préent dans cette zone de transition. La préence d'é aillage à cet endroit confirme l'hypothèe d'une accumulation de sel dans cette zone.

La **zone haute** préente l'échauffement le plus important ce qui est conforme à̀ ce qui est observé en absence d'infiltration de sel.

Essayons de confirmer ces supputations à̀ l'aide d'une analyse des propriétés thermiques le long de la paroi.

21.1.2.3.Caractérisation thermophysique

Il est possible de vérifier ce point en mesurant l'échauffement et l'effusivité thermique le long d'un profil vertical composé de 10 points de mesure. Pour les mesures d'effusivité thermique, on l'exprimera en valeur relative (b*), plus adapté à̀ 'analyse des surfaces éendues.

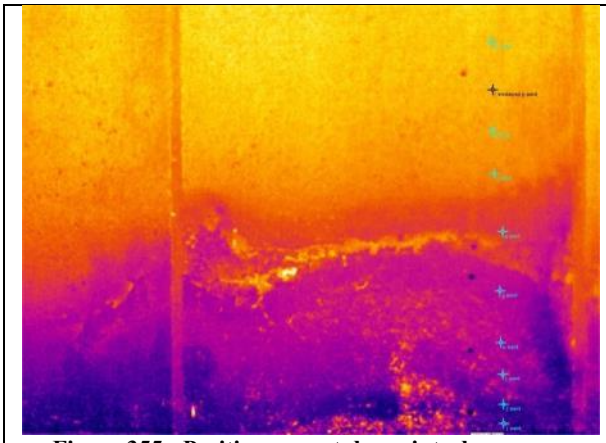


Figure 355 : Positionnement des points de mesures

Résultats

Le tableau suivant regroupe les mesures de l'échauffement (T_{max}) et d'effusivité relative (b*) obtenues le long du profil de points. Dans le tableau suivant, nous avons regroupé les valeurs mesurées en partie basse et intermédiaire.

Tableau 91 : Paramètres thermophysiques mesurés (Orval)

	b*	T_{max}
Moyenne des points zone avec sel (bas et intermédiaire)	1,29	0,73
Moyenne des points zone sans sel (haut)	0,94	1,14

On observe que l'effusivité est supérieure dans la partie basse et intermédiaire alors que l'échauffement est moindre. La situation inverse est observé en partie haute. C'est ce que nous avons toujours observé en présence de sel. L'analyse croisée des paramètres permet de repérer des zones présentant à la fois une effusivité élevée et un échauffement limité, caractéristique de la présence d'une accumulation de sel (repéré en orange sur le graphe ci-après). Ces mesures confirment bien la présence d'infiltration saline dans cette paroi.

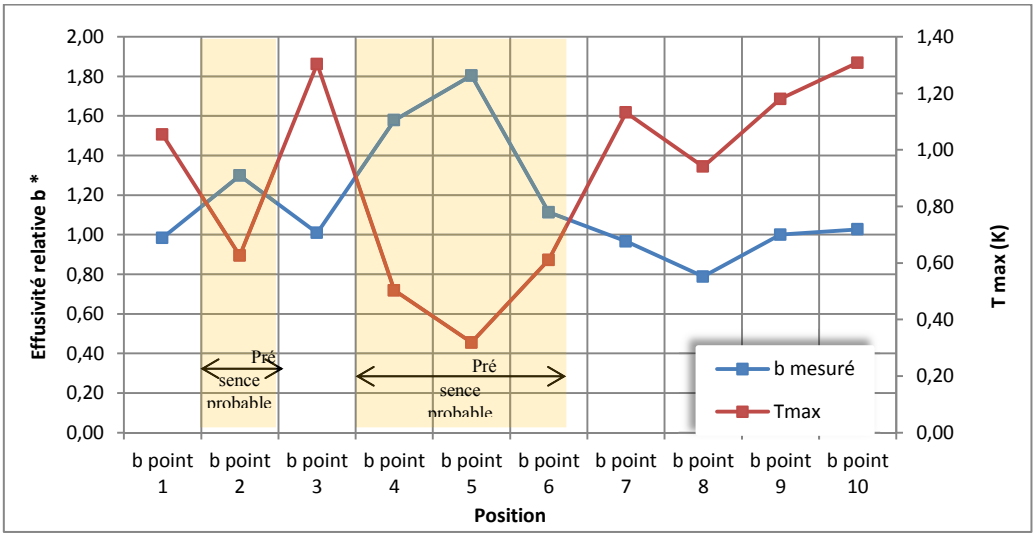


Figure 356 : Évolution des grandeurs thermophysiques le long d'un profil vertical

Nous avons regroupé dans La Figure 357 ces données ainsi que le résultat de l'analyse en surface du soufre effectuée par fluorescence X (Figure 339).

On peut remarquer que le recouvrement des zones repérés n'est pas parfait : l'analyse par fluorescence repère une baisse de la concentration en sel un peu avant la limite d'évaporation alors que nous continuons à repérer la présence de sel au-delà de cette limite, comment expliquer ce décalage ? Ce décalage peut s'expliquer de deux manières :

- ◊ Il s'agit d'un manque d'information : insuffisance du nombre de points de mesure ne permettant pas une analyse fine sur le plan spatial.
- ◊ Nos résultats sont plus sensibles à la présence de sel que les relevés effectués par fluorescence X. Cette méthode d'analyse se limite à la surface (à quelque mm de profondeur) ; il est possible que notre dispositif soit sensible à la présence de sels situés plus en profondeur.

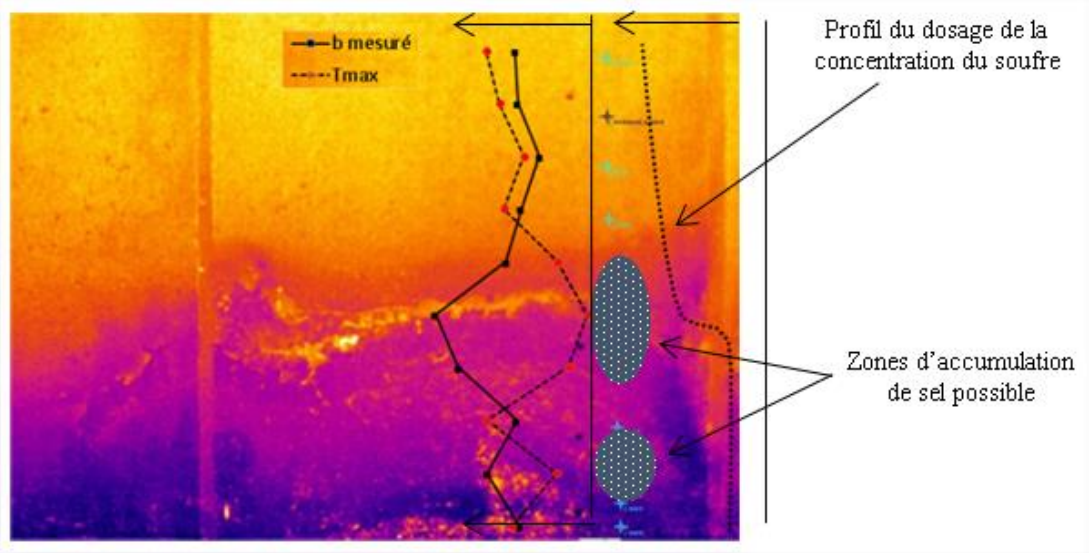


Figure 357 : Graphique de synthèse

La figure suivante illustre l'hypothèse que nous faisons : dans la zone intermédiaire, le sel peut s'accumuler sous la surface et être inaccessible à la mesure directe (fluorescence X), mais continuer à être détectable par une analyse en thermographie infrarouge. Des sondages ont été effectués afin de doser le soufre en profondeur, vérifions si ces résultats d'analyse sont compatibles avec nos mesures ou alors avec les relevés effectués en surface par fluorescence X. Ces données sont tirées de la publication de **Thomachot-Schneider et al** [191] consacrée à l'étude de cette paroi.

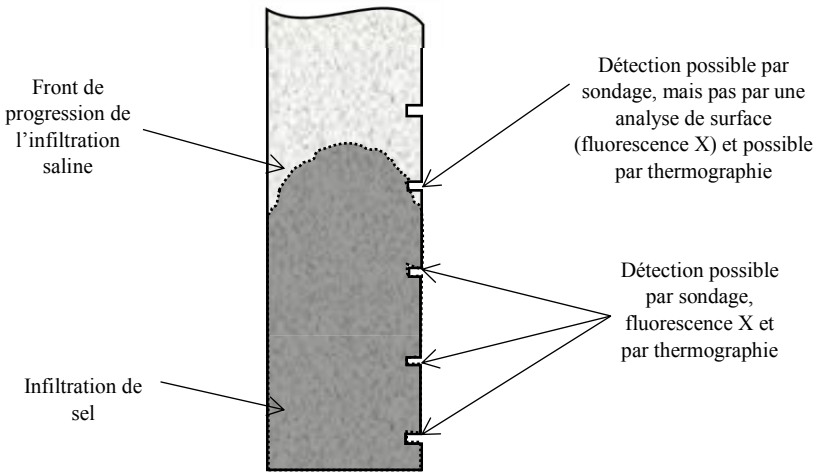


Figure 358 : Illustration d'une hypothèse de travail pouvant expliquer des écarts de détection entre l'analyse en surface et l'analyse par thermographie IR

Le tableau et le graphe ci-dessous reprennent les valeurs mesuré s à l'aide de la chromatographie à é hange d'ions du sulfate à diffé entes hauteurs et profondeurs : de 0 à 2 cm, de 2 à 5 cm et au-delà de 5 cm de profondeur.

Tableau 92 : Dosage du SO_4^{2-} par chromatographie à échange d'ions (en mg/g)

		Profondeur du sondage (cm)			
		0 à 2	**2 à 5**	**> 5**	**Total**
Hauteur (cm)	4	4,2	7,2	4,4	15,8
	11	17,2	1,1	8,2	26,5
	19	22,5	6,2	6,3	35
	22,5	21,5	9,7	5,4	36,6
	42	5,7	4,7	5,1	15,5

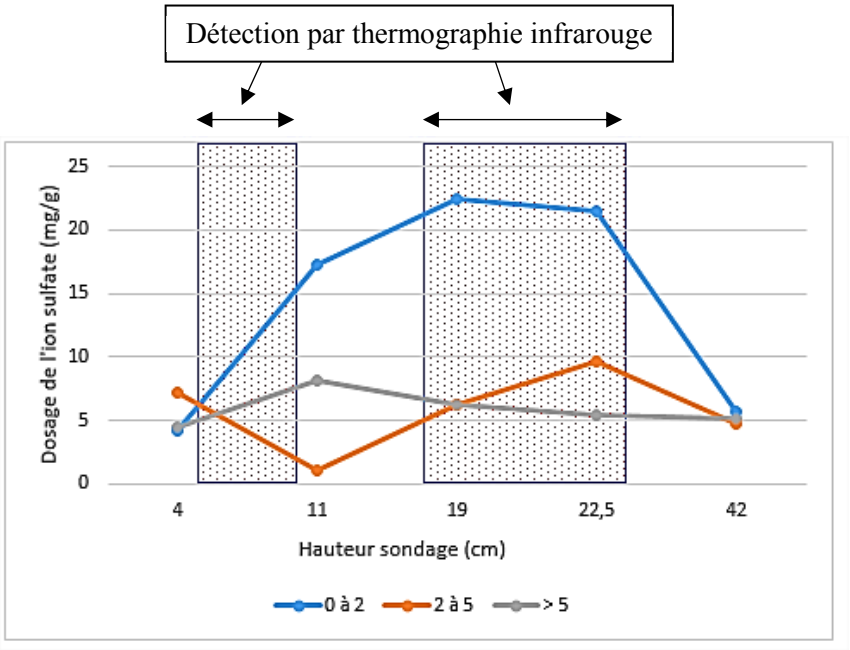


Figure 359 : Dosage du sulfate en fonction de la hauteur pour 3 profondeurs de prélèvement

La Figure 359 représente les trois profils de concentration du sulfate (SO_4^{2-}) à différentes profondeurs : entre 0 et 2 cm, entre 2 et 5 cm et au-delà de 5 cm de profondeur.

Essayons de rapprocher ces courbes des résultats que nous avons obtenus.

Si nous observons la courbe de dosage n° 1 (entre 0 et 2 cm) on remarque que cette courbe n'explique que partiellement nos ré ultats, elle explique l'observation en zone basse, elle n'explique pas le déficit de sels repéré en zone basse au niveau du point de sondage n°2 (à 11 cm de hauteur) et explique ce qui a été observé en zone intermédiaire, par contre cette courbe peut expliquer la courbe de dosage effectué à l'aide de la fluorescence X. La courbe de dosage en profondeur (au-delà de 5 cm) est stable et n'explique pas nos ré ultats ni ceux de la fluorescence X. Il semble que seule la courbe de dosage de 2 à 5 cm se rapproche de nos résultats : présence d'un dé icit de sel au niveau du point 2 et ensuite augmentation progressive jusqu' atteindre un maximum au niveau du point n°4. C'est ce qu'on observe en thermographie, mais pas en fluorescence X.

On peut supposer à partir de ces observations que la thermographie est sensible à la présence de sels situé entre 2 et 5 cm de profondeur en plus d'ê re sensible aux sels présents en surface, ce qui

rendrait cette méthode supérieure à la fluorescence X qui n'est sensible qu'aux sels présents en surface.

Ce point est important, car il permet d'envisager la possibilité d'une détection précoce de ces sels, avant leur migration en surface et les dégâts qu'ils peuvent occasionner sur une peinture murale par exemple.

21.1.2.4. Conclusion

Au cours de l'analyse qualitative, nous avons mis en évidence la présence d'un gradient de température orienté de bas en haut. Un post-traitement a aussi permis de faire apparaitre un gradient d'effusivité orienté du haut vers le bas de la paroi. L'analyse des profils spatiaux et temporels a permis de confirmer ces premières observations. Les réponses en température ont permis de repérer une zone probable d'accumulation de sel en zone intermédiaire pouvant être à l'origine d'une altération structurale des couches superficielles de la façade.

Les variations de paramètres thermophysiques (b et T_{max}) associant une diminution de l'échauffement lors de l'excitation et une augmentation d'une grandeur telle que l'effusivité hermique signent en général la présence d'une infiltration de sel, ce point a été observé à de nombreuses reprises dans ce chapitre. Une analyse plus poussée de l'enregistrement photothermique nous a permis de mesurer l'évolution de l'effusivité thermique relative le long d'un profil vertical, de même nous avons tracé sur le même profil l'évolution de l'échauffement. Ces mesures nous ont permis d'identifier deux zones froides présentant des évolutions d'effusivité thermique, ces zones nous sont apparues comme des zones de présence de sels hygroscopiques. Le rapprochement entre nos mesures et celles obtenue lors d'une analyse de poudre de forage à l'aide de la chromatographie nous a permis de repérer des corrélations intéressantes entre nos observations et ces résultats d'analyse. Ceci nous a permis de confirmer la sensibilité de notre méthode d'analyse par thermographie infrarouge à la présence de sel en surface, mais aussi en profondeur, jusqu'à plusieurs centimètres.

21.2. Cas de l'Abbaye Royale de Chaalis

21.2.1. Présentation du site étudié

L'ancienne l'abbaye cistercienne de Chaalis se dresse au sein de la forêt d'Ermenonville. Fondé par le roi Louis VI le Gros (1081-1137), le bâtiment est richement décoré de fresque datant de la Renaissance (**Sebastiano Serlio** ou **Le Primatice**) et connaitra de nombreux aménagements au cours du XVIIIe siècle. À la Révolution française, le domaine est vendu comme « bien national ». Celui-ci sera restauré au XIXe siècle et accueille de nombreuses collections dans le musée-château, l'abbaye est classée monument historique et fait l'objet de nombreuses manifestations culturelles. Des restaurations des fresques de **Primatice** ont récemment été menées.

Figure 360 : Abbaye Royale de Chaalis

Figure 361 : Plafond orné

Figure 362 : Intérieur de la chapelle

21.2.2. Observation visuelle

La zone étudié est représentée dans la figure suivante :

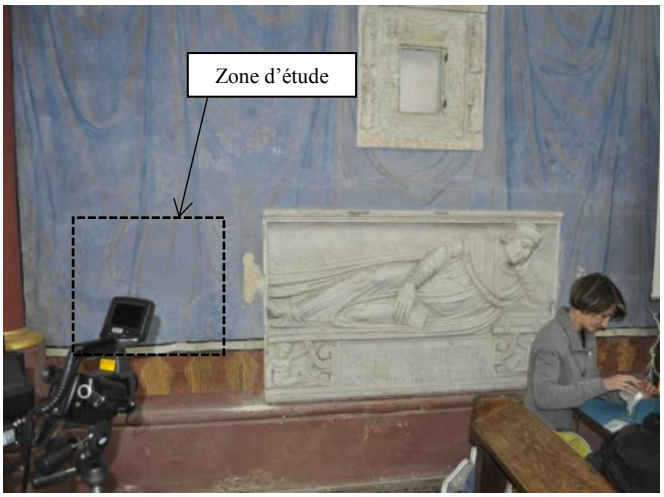


Figure 363 : Positionnement de la zone d'étude

Cette zone a fait l'objet d'une inspection par une restauratrice qui nous a remis les relevé suivants : le relevé n°1 fait apparaitre deux zones différentes (représentée en vert et jaune), ces zones représentent une couche picturale et une zone restaurée laissant apparaitre un enduit.

Figure 364 : Relevé des restaurateurs n° 1

Le relevé n° 2 fait apparaitre 4 zones ayant subi des altérations :

◊ Zone A : décollement et enfoncement de réfection
◊ Zone B : Soulèvements de la couche picturale
◊ Zone C et D: blanchiments

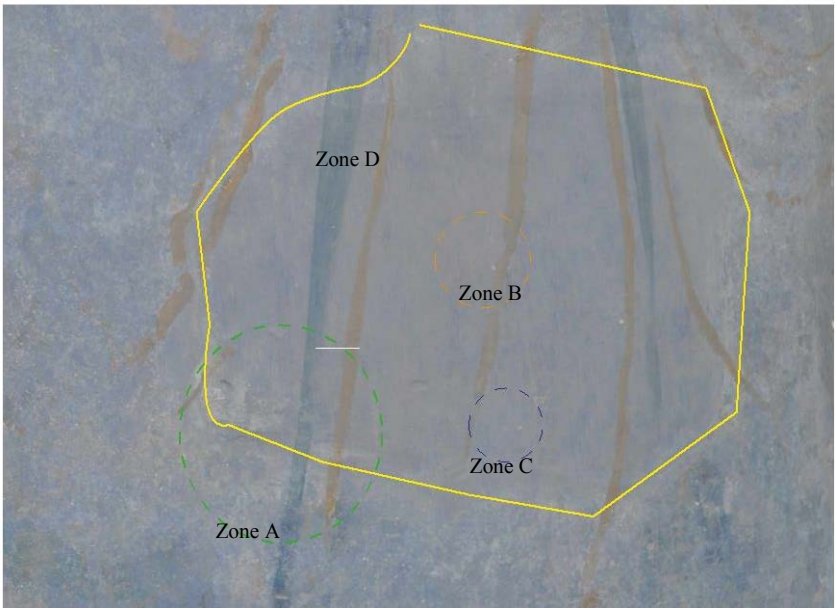


Figure 365 : Relevé des restaurateurs n° 2

21.2.3. Relevé effectué à l'aide du dispositif SUSI

21.2.3.1. Dispositif

Le capteur d'humidité SUSI (*Sensore di Umidità e Salinità Integrato* = capteur d'humidité et de salinité intégré) a été développé par l'Institut appliqué de Physique du Conseil National de Recherche italien.

Le dispositif est un appareil portable permettant de mettre en évidence l'humidité et la présence de sel par émission de micro-onde.

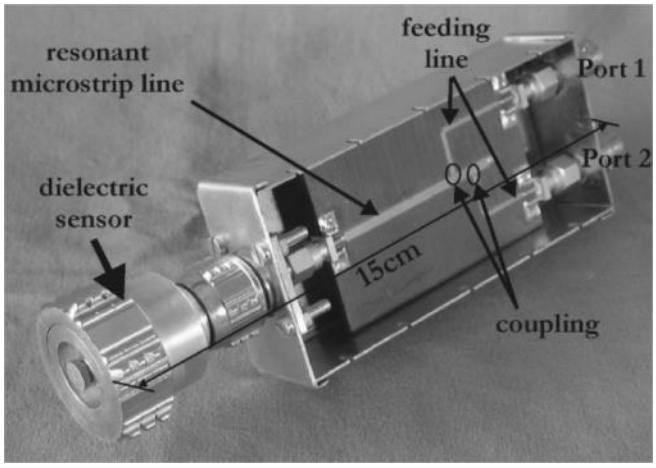


Figure 366 : Instrument de mesure du dispositif SUSI

21.2.3.2. Mesures à l'aide du dispositif

Ces résultats de mesure effectués à l'aide du dispositif SUSI nous ont été fournis par le LRMH.

Figure 367 : Zone d'étude

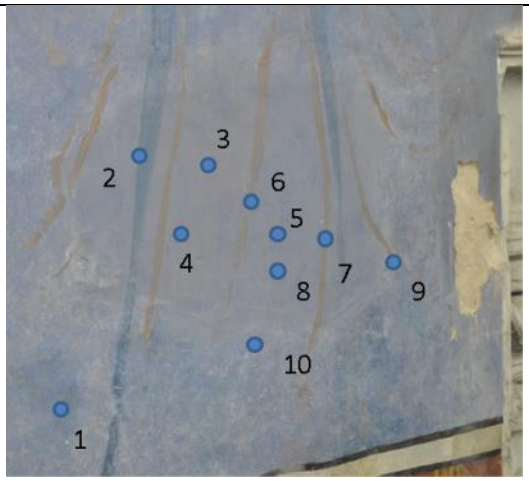


Figure 368 : Zone d'étude avec points de mesure

Tableau 93 : Mesures obtenues à l'aide de SUSI

Position	MC (Index d'humidité)	SI (Index de salinité)
Point 1	1.66	5.05
Point 2	2.24	6.35
Point 3	1.08	4.58
Point 4	0.21	5.62
Point 5	1.95	5.31
Point 6	0.79	5.10
Point 7	-0.07	5.06
Point 8	1.95	1.93
Point 9	2.24	1.91
Point 10	2.53	2.91

Reportons sur une photo de la zone les points du **Tableau 93** en leur appliquant le code couleur suivant :

Index de salinité (SI)	[1,91- 3]	[3-4,73]	[4,73-5]	[5-6,35]
Code couleur				

Le relevé SUSI permet de mettre en évidence 2 zones : une zone 1 pauvre en sel et une zone 2 riche en sel.

Figure 369 : Repérage des zones avec sel et sans sel

21.2.4. Étude expérimentale à l'aide d'une excitation créneau

21.2.4.1. Descriptions dispositif

Le dispositif d'excitation comprend 2 lampes halogènes (2x500W), l'acquisition s'effectue à l'aide d'une caméra thermique *Flir A20* cadencée à 1 Hz. Nous avons fixé la durée d'excitation à 2 mn et la durée totale d'observation à mn.

21.2.4.2. Analyse qualitative

L'inspection visuelle effectuée par la restauratrice a permis de repérer plusieurs types de défauts :

- ◊ En zone A : Décollement et enfoncement d'enduit
- ◊ En zone B : Présence de blanchiments
- ◊ En zone C : Soulèvement de couche picturale
- ◊ Su le pourtour du rebouchage : blanchiments

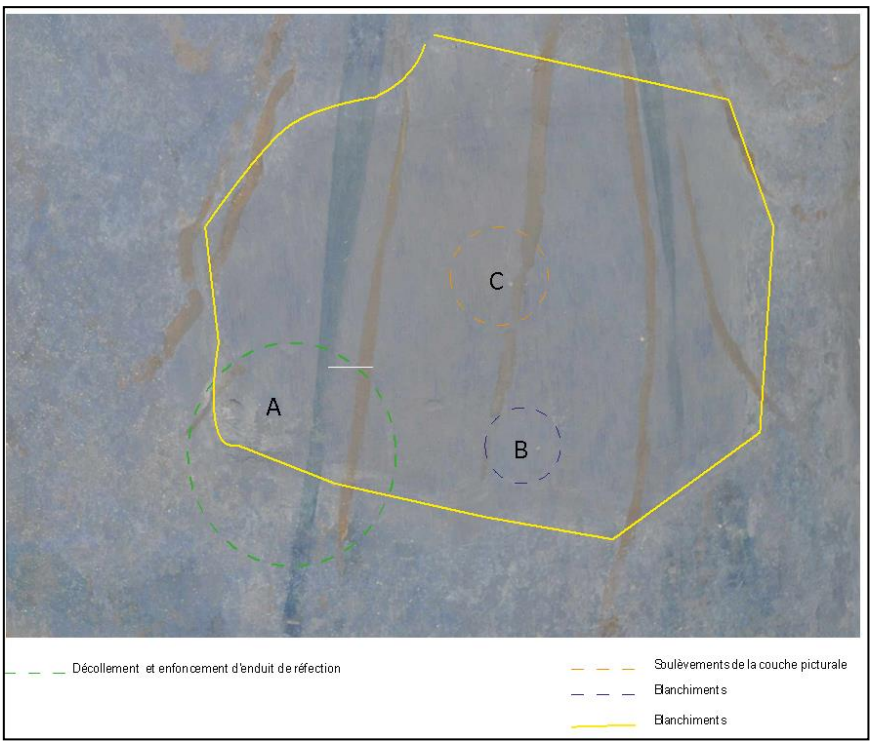


Figure 370 : État des lieux restaurateurs

La question que nous pouvons poser est la suivante : ces défauts proviennent-ils de la présence de sel ?

L'image thermique suivante permet de repérer plusieurs de ces défauts comme le dé ollement (zone A), mais elle ne permet pas de mettre en é idence de façon directe la présence d'infiltrations de sels. Procédons à une analyse des réponses en température.

273

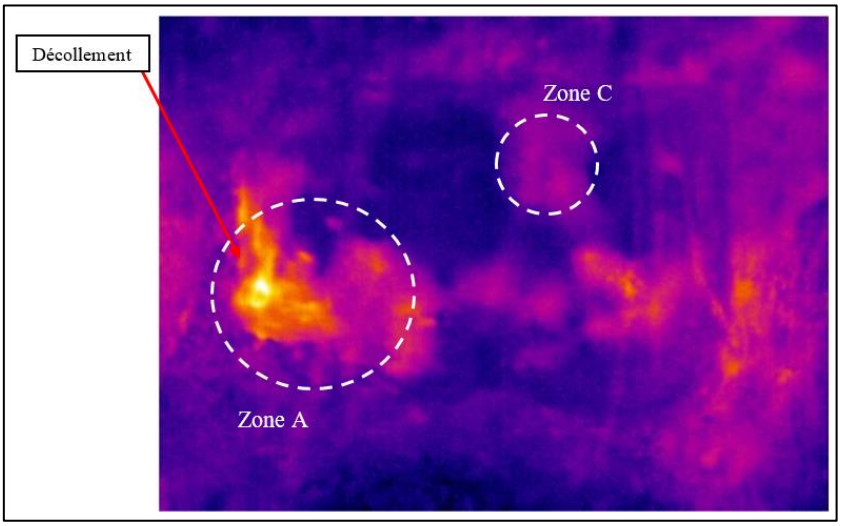


Figure 371 : Image thermique avec défauts

21.2.4.3.Analyse temporelle

Les réponses en température ont été extraites sur dix petites zones circulaires positionnées sur les emplacements analysés par le dispositif SUSI.

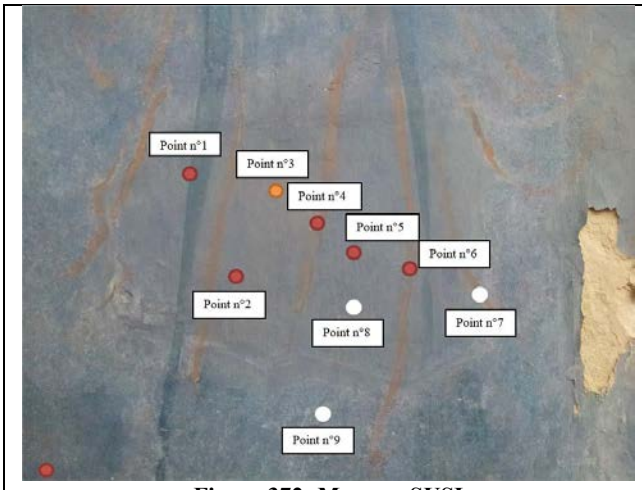


Figure 372: Mesures SUSI

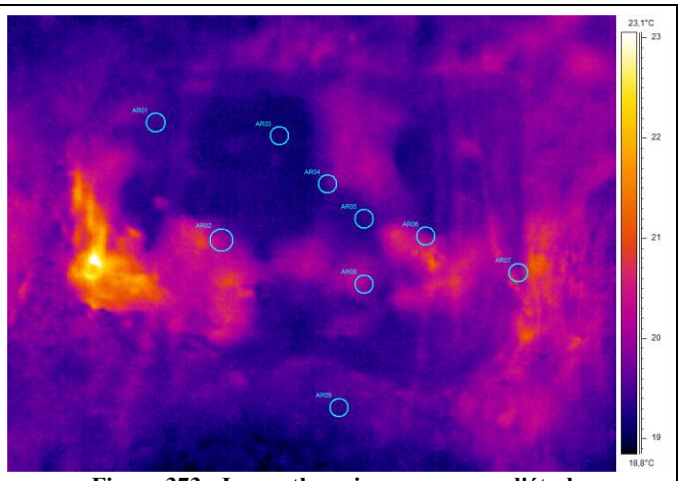


Figure 373 : Image thermique avec zone d'étude

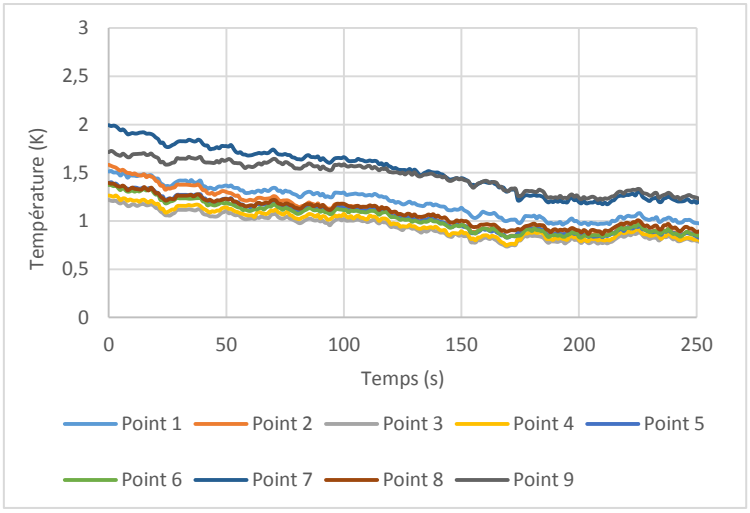


Figure 374 : Évolution temporelle des zones

21.2.4.4.Caractérisation thermophysique

À partir des réponses en température extraites, nous avons estimé b* (effusivité thermique relative) et l'é hauffement Tmax, le point de référence choisi est le point n°8, car il est situé dans une zone faible en sel :

Tableau 94 : Estimations de propriétés thermophysiques (Chaalis)

	b* mesuré	Tmax (K)
Point 1	0,90	1,51
Point 2	1,03	1,58
Point 3	1,16	1,22
Point 4	1,13	1,26
Point 5	1,04	1,39
Point 6	1,05	1,37
Point 7	0,70	2,00
Point 8	1	1,39
Point 9	0,71	1,71

Nous avons représenté dans les deux figures suivantes les points analysés avec un code couleur simple : le point est représenté en rouge lorsque la valeur du paramètre est supérieure à celle du point de référence, sinon il est en bleu. On constate que les points 3, 4, 5, et 6 ont des effusivités relatives supérieures à celle du point de référence et des échauffements inférieurs à ce point. On peut donc supposer que ces points sont positionnés à des endroits riches en sel. De même les points n°7, 8 et 9 réputés pauvres en sels sont effectivement repérés comme tels. Les mesures effectuées par thermographie confirment dons les ré ultats d'analyse obtenus avec SUSI dans 7 cas sur 9. Seuls les points n°1 et 2 y dérogent.

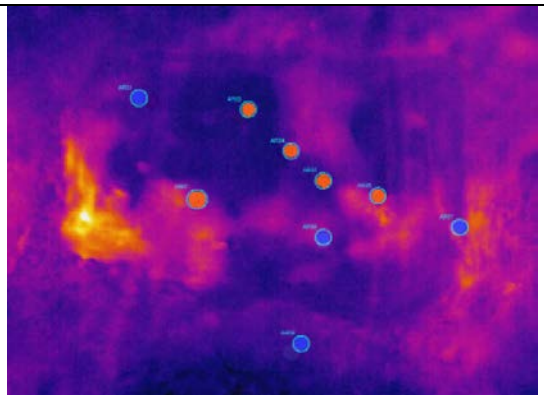


Figure 375 : Estimation de b*

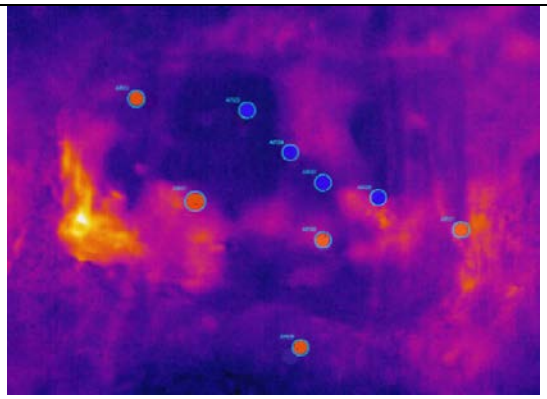


Figure 376 : Mesure de Tmax

21.2.4.5.Conclusion

L'état des lieux effectué par les restaurateurs a permis de repérer différentes zones présentant des alté ations possiblement lié s à la présence d'infiltrations salines : décollement et enfoncement d'enduit, présence de blanchiment et décollement de la couche picturale ayant comme origine possible une contamination par des sels hygroscopiques.

Les mesures de paramètres thermophysiques effectués en thermographie correspondent dans 7 cas sur 9 aux résultats obtenus avec le dispositif SUSI. Ce résultat est encourageant.

22.Conclusion chapitre IV

Ce travail nous a permis de mettre un certain nombre de points en évidence concernant les infiltrations de sel hygroscopiques.

Aprè de rappel de nature théo ique nous avons tout d'abord observé qu'il é ait possible de mettre en évidence des différences mesurables entre des échantillons minces de pierre du Midi plongés dans une solution de NaCl et des échantillons, nous avons pour cela estimé diverses grandeurs mesurables en laboratoire, telles que la chaleur spé ifique (Cp) ou la diffusivité thermique à l'aide d'un diffusivimetre flash. Ces ré ultats nous ont conforté dans l'idée qu'il était possible de repérer les infiltrations de NaCl au moyen de la thermographie infrarouge stimulé et d'une excitation flash et nous avons souhaité le vérifier.

L'approche consistant à exciter à distance un maté iau et à observer sa répo se dans l'infrarouge est une approche qui nous a permis d'obtenir de trè bons résultats dans le repé age de dé auts (voir chapitre II), cette dé arche dans le cas de la dé ection de sel s'est avé é concluante puisqu'elle a permis de repérer efficacement des échantillons soumis à une infiltration saline en mesurant trois paramètres significatifs : l'**élévation de température** au moment du flash (T_{max}), l'**effusivité thermique** et la **diffusivité thermique**. Nous avons noté que l'é hauffement des échantillons était moindre en présence de sel alors que leurs effusivité et diffusivité augmentaient. Nous avons démontré statistiquement que les écarts mesurés étaient significatifs et permettaient de conclure sur un effet mesurable provenant de l'infiltration par le NaCl des échantillons.

Nous avons souhaité vérifier que ces observations étaient valables avec d'autres types de signaux d'excitation tels que le créneau et l'aléatoire. Les résultats observé en flash ont été confirmé en aléatoire et dans une moindre mesure en excitation créneau. Ces résultats nous ont permis d'éliminer la possibilité d'un biais pouvant provenir de la nature du signal d'excitation. De plus la faisabilité de la méthode en excitation créneau nous a permis de nous rapprocher des conditions expérimentales réelles et d'estimer le potentiel de notre méthode d'analyse sur le terrain.

Soucieux de nous rapprocher le plus possible des conditions réelles et de vérifier la faisabilité de notre approche nous nous sommes ensuite intéressés à l'analyse d'échantillons épais de calcaire soumis à une infiltration locale de NaCl en leurs centres. Les observations effectuées sur un bloc de pierre calcaire soumis à une infiltration en face avant nous ont permis de retrouver ce qui avait été mis en évidence sur des échantillons minces.

Nous nous sommes ensuite inspirés de certains résultats obtenus en caractérisation au chapitre III et avons testé la possibilité de vérifier ces résultats à partir d'une excitation locale, est-il possible d'estimer les propriété thermiques localement ? Là encore les observations obtenues sur les échantillons minces en excitation étendue ont été confirmés. Nous avons démontré qu il était possible de mettre en évidence de façon significative l'infiltration de NaCl dans des pierres calcaires à l'aide d'une mesure locale de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique et par la mesure de l'élévation de température Tmax.

Enfin nous avons présenté deux études sur site, l'une à l'**Abbaye d'Orval** et l'autre à l'**Abbaye Royale de Chaalis**. Les résultats obtenus à Orval nous ont permis de mettre en évidence la faisabilité de notre méthode d'analyse par thermographie infrarouge stimulée in situ. Ces résultats ont aussi permis de souligner la possibilité de repérer par thermographie des infiltrations de sel en profondeur. Ce point mérite des investigations plus poussées qui pourraient placer la thermographie comme une méthode d'analyse au moins aussi performante que les méthodes d'analyse par sondage.

Ce chapitre nous a donc permis de mener un travail assez vaste autour de la problématique des infiltrations de sel dans la pierre, bien entendu ce travail devra être complété et étendu aux autres types de sel, à d'autres types de pierre et pourquoi pas à d'autres types de pollutions chimiques pouvant affecter les pierres (pollution métallique par exemple).

Chapitre 5

23. Introduction chapitre V

Le travail que nous avons présenté dans les chapitres précédents nous a permis de mettre en œuvre des améliorations en matière de détection de défauts, dans le chapitre III nous avons décrit de nouvelles méthodes de caractérisation thermique, le dernier chapitre nous a permis de tester ces approches et d'étendre nos possibilité d'analyse aux infiltrations de sel hygroscopiques dans les parois.

Dans ce chapitre V nous proposons et abordons des pistes de recherche intéressantes pour les conservateurs et restaurateurs du patrimoine. Ces ouvertures étaient difficiles à intégrer dans les chapitres précédents c'est pourquoi nous avons préféré les regrouper dans un chapitre dédié, le présent chapitre.

Ces pistes découlent pour une bonne part de collaborations internationales que nous avons eues avec des laboratoires tels que la *Las.E.R. Laboratory* de l'Aquila en Italie, le laboratoire *IDK* de Dresdes ou des échanges avec des industriels comme la société *Visiom* par exemple et de participation diverses à des chantiers de restauration auxquelles nous avons été conviés et à des projets de recherche européens (*Hypérion* et *Charisma*) et des A.N.R. (*Monumentum*).

Nous nous sommes par exemple intéressés au suivi de restauration et avons démontré qu'il était possible de mettre en évidence des **restaurations anciennes** et de les analyser en étudiant leurs caractéristiques. Ce point est particulièrement intéressant pour les restaurateurs.
Dans notre travail nous avons été aussi amenés à analyser des **échantillons non plans,** car nous avons été amenés à travailler à de nombreuses reprises sous des voutes décorées. Nous présenterons les ré ultats de l'une de ces analyses.
L'un des volets importants de ce travail porte sur la possibilité de **différentier différents types de techniques picturales** telles que les peintures murales et les fresques, nous démontrerons qu'il est possible de détecter ces différentes techniques de peinture murales.
Au niveau de la mise en œuvre expérimentale, nous nous sommes intéressés aux possibilité qu'offrait la bande spectrale de l'infrarouge lointain (rayonnement té ahertz) et de la thermo-induction dans la **détection de peinture sous badigeon** (chaux). L'analyse sous badigeon a toujours constitué une difficulté, nous dé ontrerons qu'il est possible de la surmonter partiellement à partir des ré ultats d'une analyse sur une é rouvette de laboratoire. Nous présenterons enfin un projet d'amé ioration de notre dispositif **SAMMTHIR**.

24. Repérage de défauts sur un échantillon non plan

Cette étude porte sur la détection de défaut sur un échantillon non plan qui nous a été fourni par Stefano SFARRA du *Las.E.R. Laboratory* de l'Aquila (Italie), dans le cadre d'une collaboration internationale. L'é hantillon a é é é udié à l'aide de diffé entes mé hodes d'analyse de ce laboratoire (interféromé rie holographique, imagerie ultraviolette…), et nous avons é é sollicité pour l'étudier à l'aide de la thermographie infrarouge stimulé . Ce travail a déjà fait l'objet d'un acte de congrè pour le *13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials* du Mans (mai 2013) [193].

24.1. Objectif

Dans ce travail nous nous intéressons à un échantillon en bois peint de forme cylindrique comportant 19 défauts répartis sur toute sa circonférence. Pour notre étude nous nous sommes limités à une zone comportant 9 défauts baptisée « zone béta ».
Cette étude nous permettra de comparer les gains obtenus sur le plan de la détection de défaut à l'aide de deux types de sources excitatrices (halogène et infrarouge) sur une surface cylindrique. La géométrie de cet échantillon constitue-t-elle un obstacle à la détection des défauts ? Les gains en matière de détection qui ont été relevés au chapitre II concernant les sources infrarouges (céramique) seront-ils observés dans l'analyse cet échantillon ?

24.2. Échantillon

L'échantillon est composé d'un cylindre de bois sur la surface duquel des petits élé ents gé mé riques ont été dé osé figurant des défauts et recouvert d'un enduit d'un millimè re cinquante peint d'une petite scé tte.

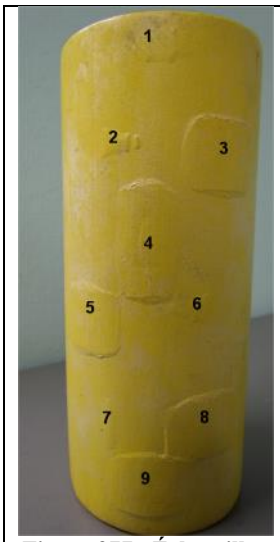


Figure 377 : Échantillon lors de sa fabrication

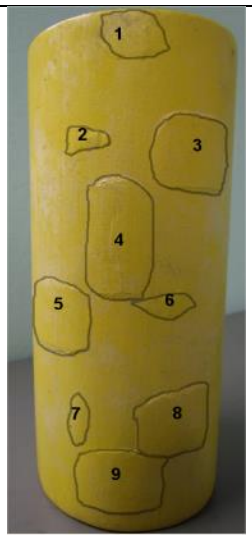


Figure 378 : Positionnement des défauts

Figure 379 : Échantillon (vue latérale)

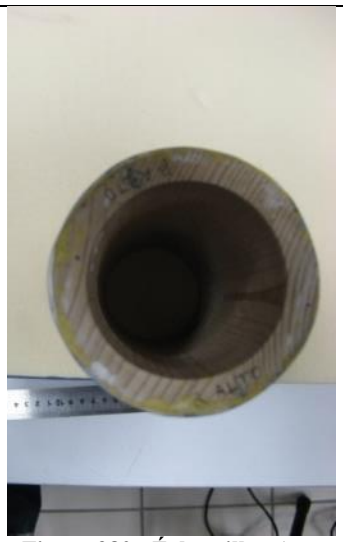


Figure 380 : Échantillon (vue du dessus)

Dimensions

Les dimensions de l'é hantillon ont été regroupées dans le tableau suivant :

Hauteur (mm)	170	Diamètre intérieur (mm)	54
Diamètre extérieur (mm)	74	Épaisseur (mm)	9,5

24.3. Résultats obtenus avec des méthodes alternatives

L'article de **Stefano SFARRA et al** [193] reprend un certain nombre de résultats obtenus avec l'é uipement du laboratoire italien. La publication décrit les résultats obtenus en reflectoragphie proche infrarouge, en ultra-violet et en holographie interférométrique. Observons le résultat obtenu en interférométrie holographique sur la zone béta :

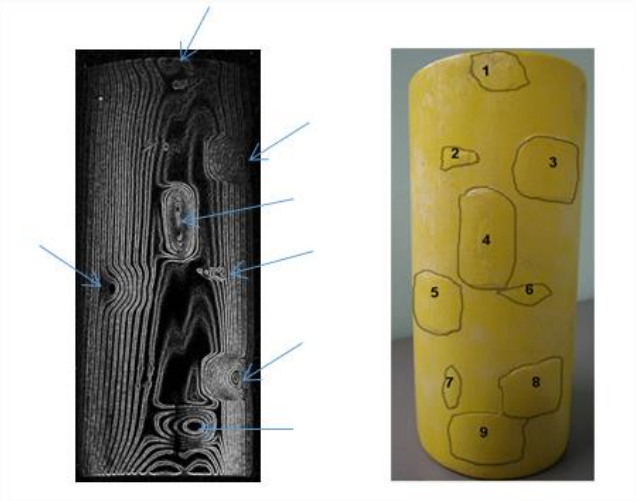


Figure 381 : Comparaison relevé interférométrique et échantillon à nu

Ce résultat met en évidence la présence de plusieurs défauts matérialisés par la présence de franges d'interférences. En peut en dénombrer sept, voyons s'il est possible d'obtenir de meilleurs résultats en thermographie active.

279

24.4. Protocole expérimental

La surface a été excitée pendant 1 mn au moyen de deux lampes halogènes de 500 W chacun émettant dans le visible et le proche infrarouge puis soumis à un éclairage infrarouge au moyen de deux lampes de 250 W chacune (ces lampes ont été présentées au chapitre II). Une caméra Flir SC655 a été utilisée pour cette observation.

Figure 382 : Éclairage halogène

Figure 383 : Éclairage infrarouge

Analyse des résultats

Le tableau suivant met cote à ôté e ré ultat obtenu avec les deux types d'excitation.

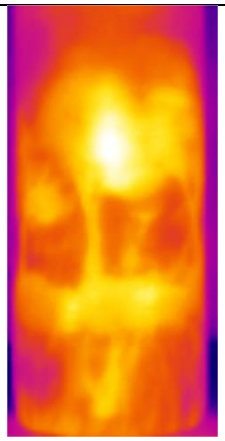


Figure 384 : Image IR avec une excitation halogène

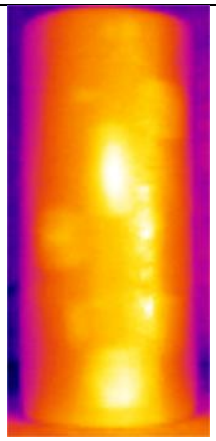


Figure 385 : Image IR avec une excitation infrarouge

La Figure 384 présente un exemple caractéristique de résultat obtenu avec des sources halogènes et met en évidence la forte prévalence de la couche picturale, la Figure 385 présente un exemple de résultat obtenu avec une excitation céramique, elle montre que les défauts sont aisément repérables et correctement délimités.Vérifions leur positionnement et voyons s'il est possible d'amé iorer ce ré ultat à 'aide d'un traitement de l'image.

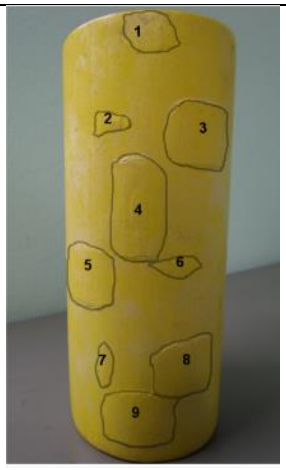


Figure 386 : Positionnement défauts

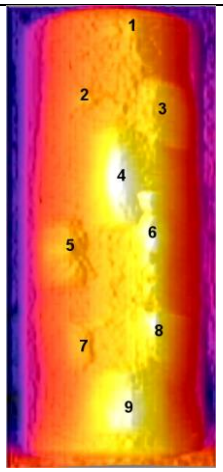


Figure 387 : Image IR en représentation 3D

L'image IR a é é amé iorée grâce à un traitement 3D ce qui permet d'accentuer la signature des défauts (voir Figure 387). On peut remarquer que tous les défauts présents sur cette zone ont été repérés.
Le dispositif nous a donc permis de repérer efficacement tous les défauts de la zone étudiée.

Conclusion

Les sources halogèn s n'ont pas permis de différentier les motifs peints des défauts alors que l'éclairage infrarouge a permis d'atté er de façon importante l'effet de la couche picturale et de repérer correctement la totalité de ces défauts. La Figure 387 représente le thermogramme amélioré au moyen d'une repré entation 3D. Ce ré ultat confirme la supériorité des sources infrarouges – étudiée au chapitre II – sur le plan de la détection de défauts. Nous pouvons aussi noter la supériorité de la thermographie infrarouge qui a permis de repé er tous les dé auts alors que l'interféromé rie holographique n'en a repéré qu sept. Enfin nous n'avons pas noté d difficulté articuliè e relevant de

la géométrie de cet échantillon. Il semble donc que cet aspect au moins ans cet exemple ne soit pas déterminant dans la détection de défauts par thermographie active.

25. Repérage de peintures murales recouvertes de badigeon

Figure 388 : Peinture sous badigeon (Église Saint-Jean à Malines, Belgique)

Un **badigeon** de chaux est un mé ange d'eau, de chaux et de peinture d'un ton unique que l'on passe indistinctement sur les murs afin de dissimuler leur vétusté et les inégalités de couleur de la pierre. Lors de périodes troublé s de l'histoire telles que les guerres ou les ré olutions il arrive que des œuvres d'art disparaissent de la sorte sous d'ép isses couches de badigeon et tombent ainsi dans l'oubli durant des siè les. Des peintures sous badigeon sont ré uliè ement mises à jour lors de restaurations ou de travaux dans des é lises ou dans de vieilles habitations. Prenons l'exemple de l'é lise **Saint-Jean à Malines**[26] en Belgique, dans laquelle un ensemble remarquable bien conservé de peintures murales datant des anné s 1400 fut mise à jour à l'automne 2008. Ces peintures furent recouvertes d'une quinzaine de couches de badigeon et ont pu ré é er de magnifiques représentations de deux saints très populaires au 15e siècle, **Saint Christophe** et **Saint-Georges** (terrassant le dragon).

[26] Pour plus d'information, voir **http://ceroart.revues.org/2822?lang=en#ftn1** et se reporter au rapport de restauration suivant : **https://oar.onroerenderfgoed.be/publicaties/RELT/10/RELT010-003.pdf**

Figure 389 : Dégagement de la grande scène de Saint George terrassant le dragon.
(Photo Kris Vandevorst, Crédit Onroerend Erfgoed)

Figure 390 : Après dégagement (Photo Kris Vandevorst, Crédit Onroerend Erfgoed)

Cet exemple illustre à quel point la détection de ces peintures sous badigeon est essentielle sur le plan scientifique, historique et du point de vue de leur préservation.

De nombreux essais de détection de ces peintures par thermographie infrarouge ont été testés, mais ceux-ci se sont tous révélés inopérants y compris sur des épaisseurs de quelques millimètres de badigeon et ceci pour au moins les raisons suivantes :

- ◊ Le pouvoir peu pénétrant des rayonnements utilisés pour exciter les matériaux
- ◊ Forte réflexion par le badigeon blanc ➔ mauvais rapport signal/bruit.
- ◊ Fugacité de l'information pouvant être ré upé é , en raison de la faible é aisseur de la couche picturale.

Notre dé arche a é é de tester d'autres approches pouvant permettre la visualisation de motifs sous badigeon. Nous avons songé à deux possibilités :

- ◊ l'utilisation d'un rayonnement plus pé ét ant permettant un meilleur rapport signal sur bruit (excitation dans la bande *térahertz*)
- ◊ Utilisation de l'induction comme moyen d'excitation afin de chauffer l'é hantillon en profondeur et de solliciter les pigments conducteurs (métalliques).

Nous avons effectué des tests sur une é rouvette recouverte d'un badigeon blanc, comportant quatre repré entations identiques d'une œuvre appelée « *Chat de Cocteau* », chacune des reproductions a été peinte avec une association de pigments spécifiques, dont certains de nature métallique, ce qui justifie les deux approches.

25.1. Description de l'échantillon

Cette éprouvette a été confectionnée par des restaurateurs professionnels du patrimoine. Le support est constitué de mortier de chaux et de sable coulé dans un cadre en bois de 15 cm de côté. La surface a ensuite été poncée après séchage et peinte. La plaque est divisée en quatre carrés

représentant un motif identique inspiré d'un détail d'une peinture de Jean Cocteau exécutée à la Chapelle de Milly-la-Forêt représentant un chat stylisé. Chaque scénette a été exécutée avec des pigments de différente nature. L'ensemble a ensuite été séché pendant 24h avant d'être recouvert d'un badigeon de chaux.

Figure 391 : Échantillon avant badigeonnage

Figure 392 : Échantillon badigeonné

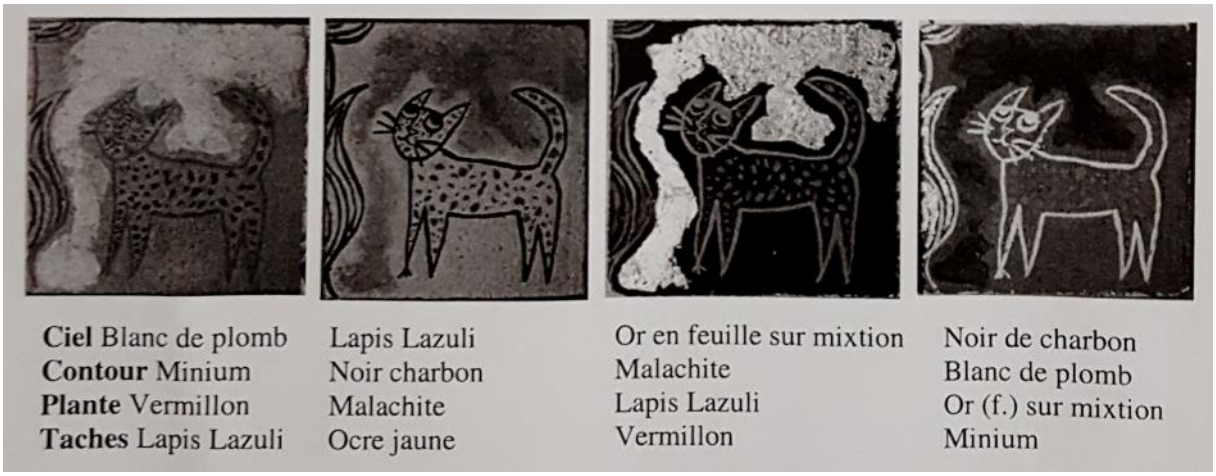


Figure 393 : Détail des 4 scénettes avec type de pigments utilisés

25.1.1. Étude préliminaire

Présentons tout d'abord le résultat obtenu en thermographie IR active sur cet échantillon. Dans cet essai l'échantillon a été soumis à une excitation crénau de 10 s produite par deux sources halogènes d'une puissance totale de 1000 W.

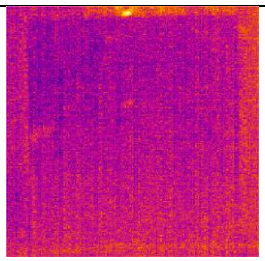


Figure 394 : Image IR avant excitation

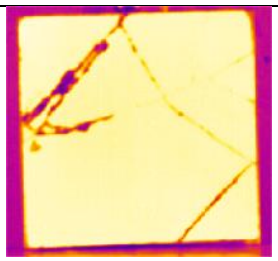


Figure 395 : Image IR début d'excitation

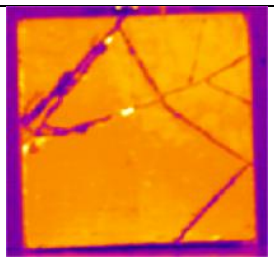


Figure 396 : Image IR début refroidissement

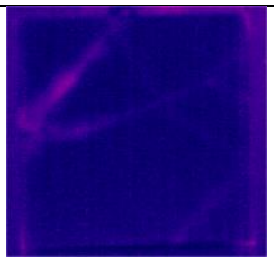


Figure 397 : Image IR fin refroidissement

L'observation dans l'infrarouge ne permet pas de repérer des motifs pouvant se rapprocher d'un motif. De nombreux autres essais ont été effectués au moyen de diverses sources (halogènes, sources

IR, LED) sans donner de résultats. Nous avons aussi songé à couper certaines bandes de l'infrarouge moyen à l'aide de filtres, des observations dans l'infrarouge proche ont aussi été effectuées, mais aucun de ces essais n'a permis de repérer les motifs recherchés. Nous pouvons donc conclure que les observations dans les gammes de l'infrarouge proche et moyen ne permettent pas de traverser le badigeon et de solliciter la couche picturale dissimulée. Voyons maintenant s'il est possible d'obtenir des résultats en travaillant en infrarouge lointain, dans la bande térahertz.

25.2. Possibilités en infrarouge lointain

À l'origine notre intérêt pour cette bande spectrale appelée aussi « ondes T » provient de la possibilité que ces radiations puissent interagir avec la matière en dégageant de la chaleur pouvant être détectée par des caméras infrarouges.

Nous avons expérimenté cette bande de fréquence pour son fort pouvoir pénétrant qui permet potentiellement de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs. Nous savons que ce rayonnement est particulièrement pénétrant et il nous est apparu intéressant d'explorer les possibilités ouvertes par ce type d'analyse émergente dans l'étude des biens culturels (voir à ce propos les publications suivantes sur le sujet [14]–[17]).

25.2.1. Objectifs

Ce travail a été effectué dans les locaux de la société *Visiom*, basée à Antony, qui a accepté de mettre à notre disposition un dispositif d'analyse térahertz, le système ProVision 100. Nous allons vérifier s'il est possible d'observer ou de repérer à l'aide de ces radiations des motifs cachés sous le badigeon.

25.2.2. Les Térahertz

La bande de fréquence des « térahertz » désigne les ondes électromagnétiques s'étendant environ entre 100 GHz et 30 THz (voir figure suivante), soit environ des radiations de longueurs d'onde comprises entre 0,01 mm et 3 mm. Cette bande spectrale historiquement désignée sous la terminologie d'infrarouge lointain est aussi désignée aussi sous l'appellation de rayon « *Térahertz* » ou rayon T. Cette bande est intermédiaire entre les fréquences radioélectriques des micro-ondes et les fréquences optiques de l'infrarouge. Jusqu'ici peu exploré en raison de sources rares (lasers femtoseconde) et de détecteurs (antennes), ce domaine est aujourd'hui en plein essor en raison de la démocratisation des sources (diodes Gunn meilleur marché que les lasers femtoseconde) et de la possibilité de détection par thermographie infrarouge.

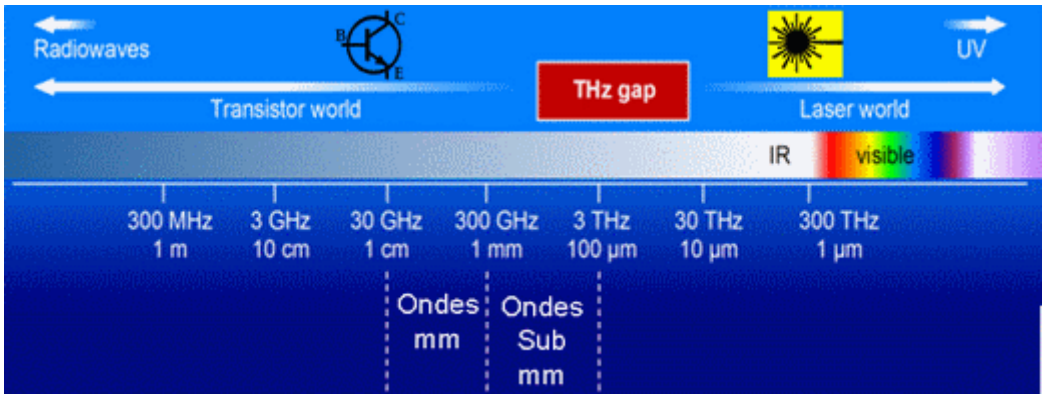


Figure 398 : Infrarouge lointain

Ces radiations traversent de nombreux matériaux isolants et non conducteurs (tels que les vêtements, le papier le bois…). Elles sont réfléchies par les matériaux conducteurs comme les métaux et absorbés par l'eau (matériau polaire). De plus elles sont peu énergétiques et non-ionisantes ce qui les rend particulièrement intéressantes pour l'étude des biens culturels. Est-il possible d'envisager que la couche de badigeon puisse être traversée par ce rayonnement qui serait ensuite réfléchi par les pigments métalliques constituant une œuvre cachée et décelé, c'est ce que nous allons étudier.

25.2.3. Le dispositif et principe

Le dispositif *ProVision 100* est un appareillage de sécurité utilisé dans certains aéroports pour repérer la pré ence d'arme sur les voyageurs. Ce syste e se présente sous la forme d'une enceinte composée d'une cabine pouvant accueillir un individu et dotée de 300 couples émetteurs récepteurs mobiles effectuant une rotation à 360°.
L'acquisition des donné s se fait en moins de deux secondes.
Les donné s constructeur du dispositif indiquent un taux d'exposition avoisinant 70 µW/cm² à 1 cm. Une chaine de détection associée à un outil de traitement et de reconstruction délivre une image holographique recomposée de la personne laissant apparaitre tout objet en surface du corps. Pour les besoins de notre é ude, nous avons utilisé l'un de ces systèmes mis aimablement à notre disposition par la société *Visiom*.

Figure 399: Le portique

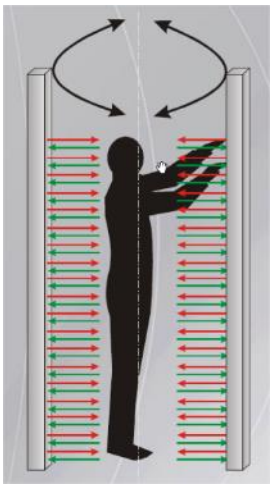


Figure 400 : Exposition

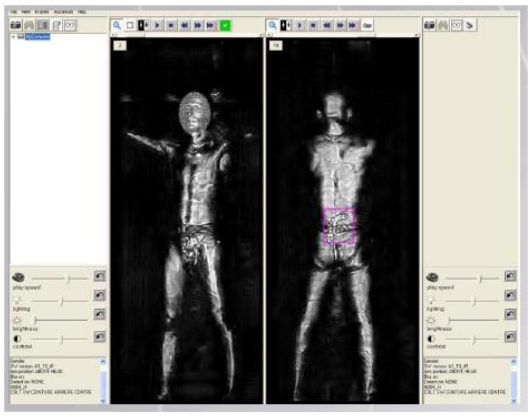


Figure 401 : Console de visualisation après traitement

25.2.4. Étude expérimentale

L'échantillon a été placé dans l'enceinte de l'appareil et a été oumis pendant deux secondes à une émission térahertz. Nous nous sommes intéressés à la partie comportant un motif à base de pigment

mé allique en raison des proprié és connues de l'interaction de ce rayonnement avec les mé aux. Une étude complète aurait été nécessaire (problème de disponibilité du matériel) et sera effectuée ultérieurement.

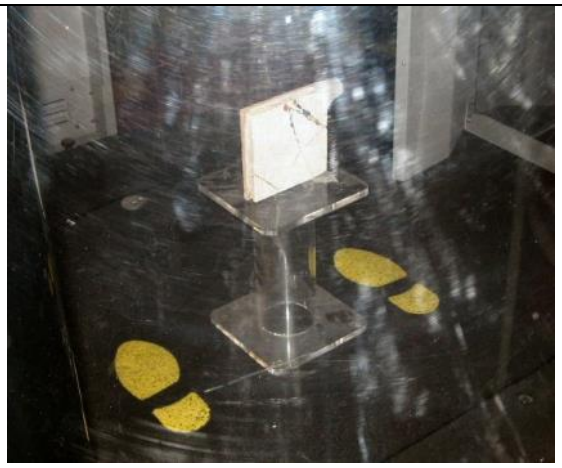


Figure 402 : Échantillon positionné

Figure 403 : Gros plan sur échantillon (face avant)

Résultat

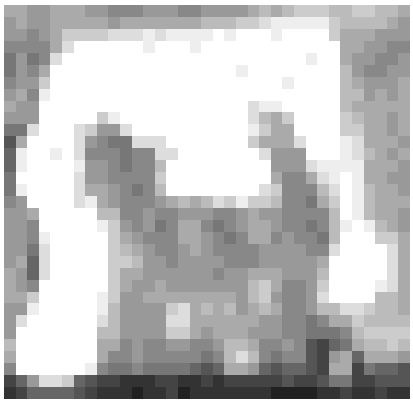


Figure 404 : Cliché face avant térahertz

L'observation de la Figure 404 fait apparaitre un motif. Essayons d'identifier cette forme. La forme détectée correspond au pigment or utilisé pour représenter un décor stylisé entourant le chat de Cocteau (Voir Figure 405& Figure 406).

L'origine de ce contraste s'explique par la réflexion des *térahertz* sur ce pigment métallique or sur mixtion

Comme nous l'avons rappelé, l'analyse en *térahertz* est très sensible aux réflexions métalliques. On note aussi que les autres pigments (malachite, minium, blanc de plomb, noir de charbon, lapis-lazulis, vermillon) ne sont pas détectés.

Nous pouvons ainsi noter que la couche de badigeon est transparente aux *térahertz* et qu'il est possible d'accéder à la couche picturale recouverte. Pour le moment les analyses n'ont permis de repé er qu'un type particulier de pigment, les pigments conducteurs de nature métallique. Il serait intéressant d'approfondir l'apport d'une telle gamme spectrale d'excitation pour la détection de peintures murales recouvertes de badigeon en général.

Figure 405 : Motif sous badigeon

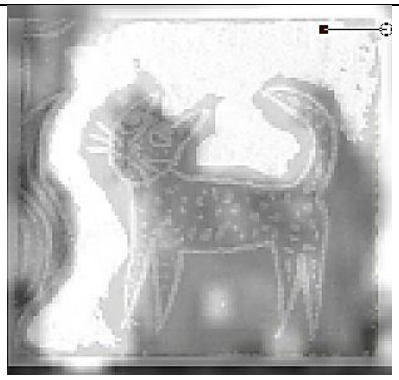


Figure 406 : Superposition semi-transparente du motif et du résultat de détection

Remarquons que la superposition en semi-transparence montre des contours diffus par rapport à la forme originale, ceci s'explique par la limite de ré olution de l'instrument, cette limite dé oule de la physique. Nous savons en effet que cette limite est dé erminé par la longueur d'onde de la lumière transportant l'information mesuré , plus cette longueur d'onde est importante et plus cette limite de ré olution sera importante. Elle est de l'ordre du millimè re s'agissant des té ahertz.

25.3. Excitation au moyen d'un système par induction

Une autre approche nous a semblé pertinente pour essayer de détecter une peinture murale recouverte de badigeon et comportant des pigments mé alliques, il s'agit de la thermo-induction. En effet cette méthode semble permettre un échauffement des pigments métalliques en profondeur, ce qui engendre un échauffement local qui va diffuser en surface et devenir détectable avec nos moyens.

25.3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé est les systèmes de thermo-induction mis aimablement à notre disposition par le CETIM (**CE**ntre **T**echnique des **I**ndustries **M**é aniques) de Senlis. Il est composé d'une camé a *Flir SC6580*, d'un inducteur avec différentes géo é ries (circulaire ou rectangulaire), d'un systè e d'alimentation et de refroidissement de l'inducteur.

25.3.2. Étude expérimentale

Le signal d'excitation est une impulsion trè brè e (de l'ordre de 50 ms) assimilable à une impulsion de *Dirac*. L'acquisition s'effectue à 200 Hz, suivie d'un post traitement de type PPT (*Transformée de Fourier*) en phase.

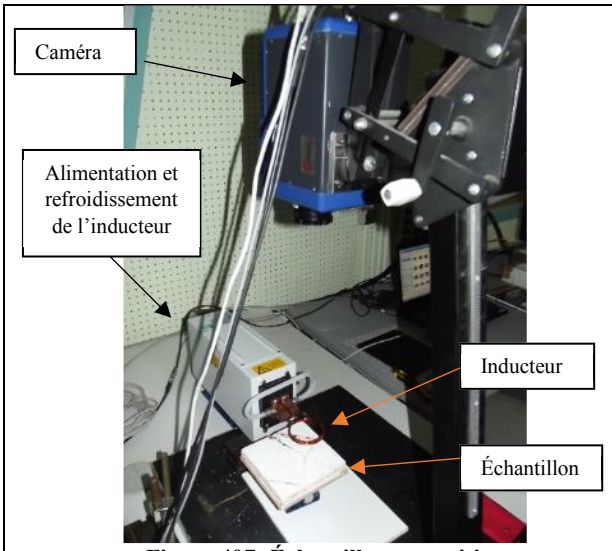


Figure 407: Échantillon en position

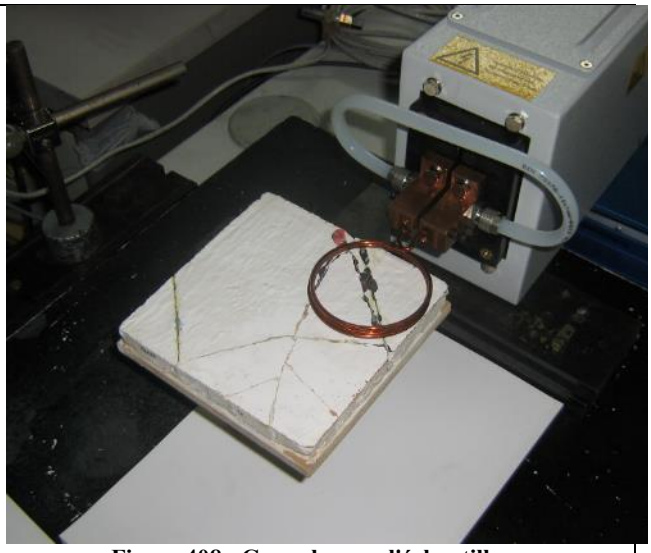


Figure 408 : Gros plan sur l'échantillon

25.3.3. Résultat

La figure Figure 409 montre un exemple de résultat obtenu, elle montre clairement une signature particulière à l'endroit de la peinture métallique (repéré précédemment au moyen des *térahertz*). On note que la délimitation du pigment est beaucoup plus précise que dans l'analyse pré é ente. Ce ré ultat montre l'intérêt de ce type d'approche qu'il serait inté essant d'approfondir.

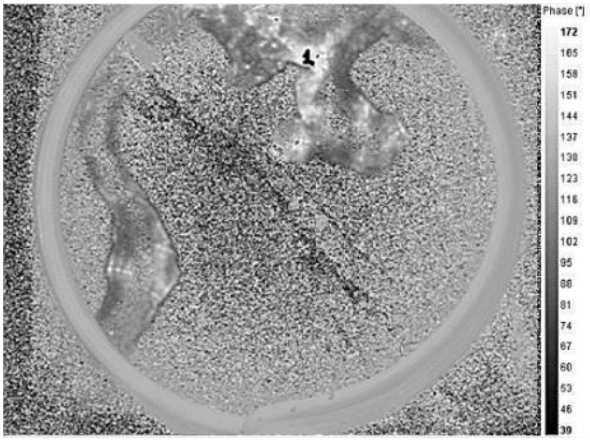


Figure 409 : Image de phase avec inducteur circulaire

Figure 410 : Motifs sous badigeon

Figure 411 : Superposition motif et détection

25.4. Conclusion

La pré-étude montre l'intérêt des des ondes térahertz et de la thermo-induction pour la détection de peintures métalliques recouvertes de badigeon. Il y aurait maintenant à approfondir cette étude pour apprécier les possibilités réelles de ces deux méthodes en matière de détection de peintures murales cachées sous badigeon. Ces deux approches ouvrent des voies nouvelles dans l'étude des œuvres sous badigeon.

26. Caractérisation de couche picturale

26.1. Mise en évidence de techniques de peinture murale

Nous avons vu dans les chapitres précédents (voir chapitre I, page 4) qu'il existait plusieurs types de techniques de peinture murale, la technique de la fresque étant l'une de ces techniques. Sa caractéristique réside dans le fait que les pigments sont déposés sur un enduit frais contrairement aux autres techniques de peinture murale. Ce point met en évidence une propriété intéressante des fresques par rapport aux autres types de peintures murales : les pigments ne sont pas simplement déposés en une couche distincte et facilement identifiable (couche picturale), mais sont assimilés par l'enduit lors du séchage de celui-ci ce qui se traduit par l'absence d'une couche picturale à proprement parler. Une continuité structurale est observée entre l'enduit et la surface sur laquelle ont été déposés les pigments. Nous postulons qu'il était possible de repérer les fresques des autres types de peinture murale en nous appuyant sur cette propriété et sur ce que nous savons des lois de la thermique. En effet les deux types de configuration sont distinctes, sur le plan de la thermique. Le comportement dans le cas d'une peinture murale peut se rattacher thermiquement à un bicouche – ce qui se traduit par une réponse en température en une pente -1/2 suivie d'une rupture de pente. Dans le cas d'un monocouche, la réponse en température est une simple pente -1/2, cette configuration se rapprochera d'une technique à la fresque. En nous appuyant sur ces considérations, il devrait donc être possible d'identifier les deux types de technique par une analyse des réponses en température en surface.

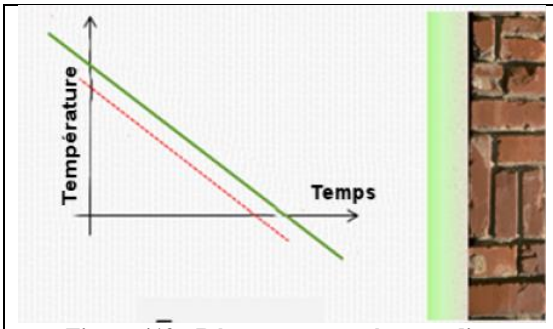


Figure 412 : Réponse en température d'un monocouche

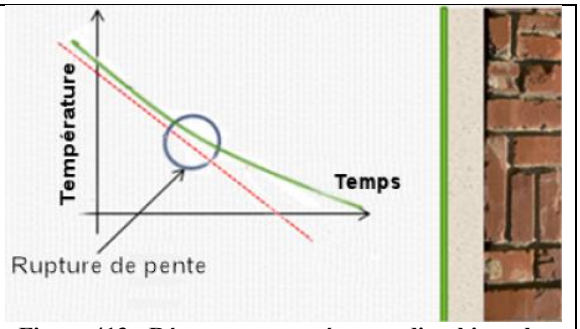


Figure 413 : Réponse en température d'un bicouche

26.2. Simulation

Dans un premier temps, pour nous assurer de la faisabilité de l'étude (compatibilité des temps caractéristiques avec notre instrumentation) nous allons procéder à une série de simulations.

Nous avons considéré un échantillon proche d'une peinture murale composé d'un support en plâtre d'épaisseur 1 cm, recouvert ou non d'une couche picturale d'épaisseur 0,8 mm. Les propriétés des matériaux retenues sont les suivantes :

Tableau 95 : Parametres de simulation (caractérisation des la couche picturale)

Propriété des matériaux	k (W/m.K)	ρ (kg/m^3)	Cp (J/kg.K)	Diffusivité thermique (m²/s)
Plâtre (1cm)	0,4	1100	830	$4{,}38.10^{-7}$
Couche picturale (0,8 mm)	0,4	1930	1330	$1{,}56.10^{-7}$

Nous obtenons les deux courbes suivantes (adimensionnées) :

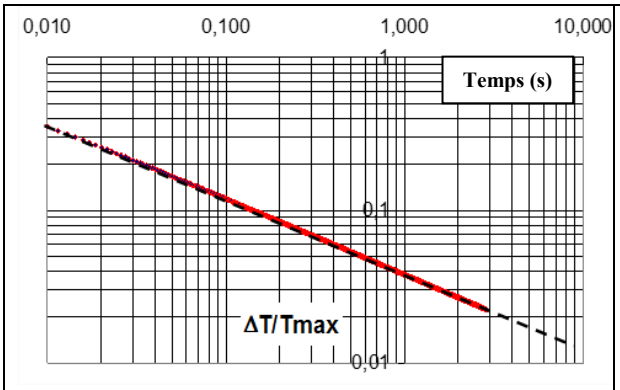


Figure 414 : Réponse théorique d'une fresque

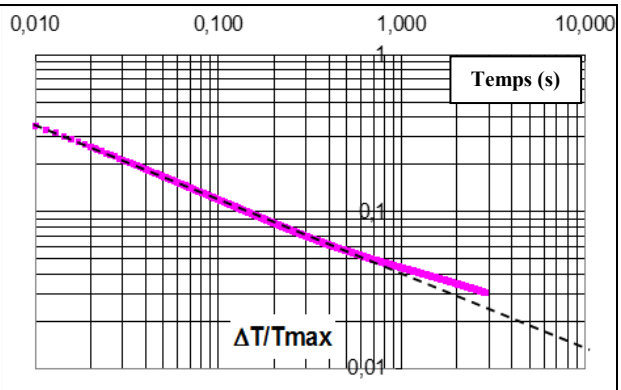


Figure 415 : Réponse théorique d'une peinture murale

Nous constatons que les deux réponses sont distinctes et clairement identifiables par la présence d'une rupture de pente (dans le cas de la peinture murale). Cette rupture de pente s'explique par la présence d'une interface séparant la couche picturale de l'enduit, elle intervient après 1 s, c'est-à-dire une durée compatible avec notre système d'analyse **SAMMTHIR**. Voyons s'il est possible d'observer le même phénomène à partir de deux exemples tirés d'une étude sur site.

26.3. Étude de plaquettes

À la suite de cette étude théorique encourageante, nous sommes passés à une étude expérimentale. Deux peintures murales ont été étudiées. Elles ont toutes les deux été réalisées par une restauratrice professionnelle. Dans les deux cas, le pigment utilisé est de l'oxyde de manganèse. Seul change le mode de dépôt de la couche picturale. Dans un cas il s'agit d'un dépôt à la fresque. Dans le second cas, il s'agit d'un dépôt à la colle d'os. Les dimensions géométriques de ces échantillons sont les suivantes : la peinture murale à la fresque a une longueur de 14,4 cm. Il a une largeur de 12 cm. Enfin son épaisseur est égale à 3 cm. La peinture à la colle a une longueur de 14,6 cm. Il a une largeur de 11,5 cm. Enfin son épaisseur est égale à 2,2 cm. Ces échantillons sont présentés respectivement sur les deux figures suivantes :

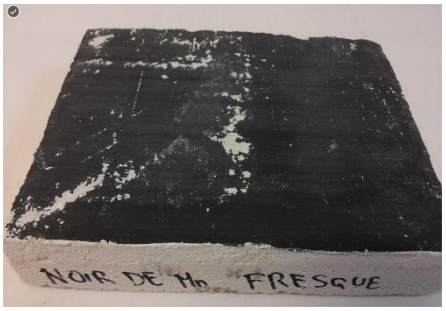


Figure 416: La peinture murale à la fresque analysée

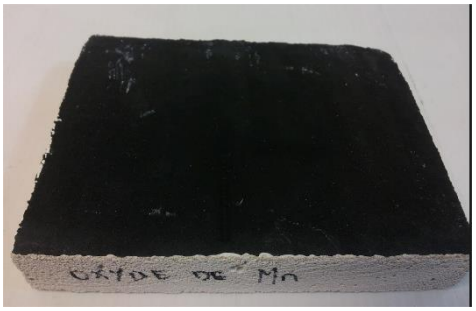


Figure 417 : La peinture murale à la colle d'os analysée

Le dispositif expérimental utilisé est le dispositif flash du laboratoire CERTES (Université de Cré eil). La source d'excitation est composée de 4 flashs de type Balcar. Ils permettent de déposer une énergie égale à 4 x 3200 Joules. La duré d'excitation est d'environ 10 ms. La chaine de dé ection met en œuvre une camé a infrarouge de type FLIR SC7300 LW. C'est une camé a refroidie à dé ecteur quantique. Elle offre un NETD d'environ 20 mK. Enfin le dispositif expérimental mis en œuvre comprend une informatique d'acquisition et de traitement (figure suivante).

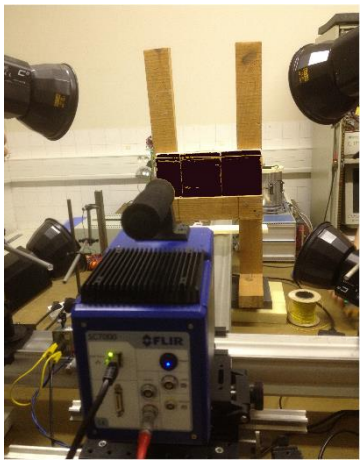


Figure 418 : Le dispositif expérimental mis en œuvre

Les conditions expé imentales mises en œuvre sont les suivantes : La caméra infrarouge est placée à environ 75 cm des peintures murales étudiées. Les flashs sont placés de façon symétrique autour de l'axe camé a – é hantillon. Les é hantillons étudié sont placé l'un à côté de l'autre (voir figure ci-dessus). La fréquence d'analyse est d'environ 697 Hz, la duré d'analyse fixée à environ 2,5 s. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figure 419 et Figure 420. La Figure 419 représente la réponse photothermique de la peinture murale à la fresque étudiée. Elle fait apparaître, comme prévu théoriquement une droite de pente négative.

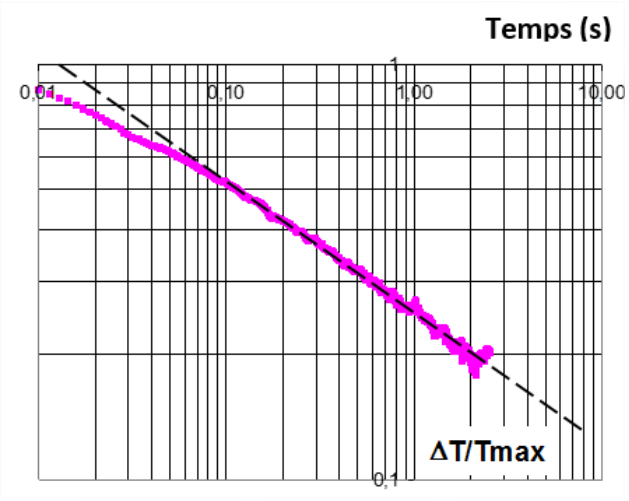


Figure 419 : Réponse photothermique de la peinture murale à la fresque analysée

La figure Figure 420 représente la réponse photothermique de la peinture murale à la colle étudiée. Elle fait apparaître, là aussi le comportement pré u thé riquement. Tout d'abord la réponse photothermique est liné ire et de pente né ative. Ensuite, lorsque l'é ergie déposée passe de la couche de revêtement au support, il y a un changement du comportement de la réponse photothermique. Ce comportement est différent du précédent. Cela montre la possibilité de différencier ces deux types de peinture murale.

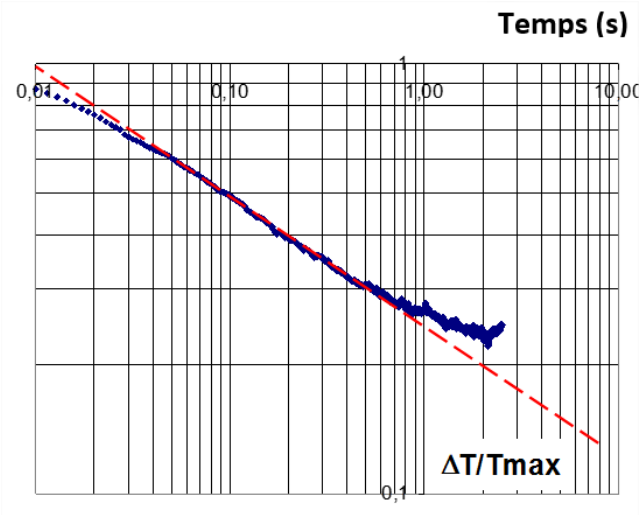


Figure 420 : Réponse photothermique de la peinture murale à la colle d'os analysée

26.4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons approché les possibles de la thermographie infrarouge stimulée en matiè e d'aide à l'identification de technique de peinture murale. À l'aide d'abord d'une é ude thé rique puis d'une é ude expérimentale, nous avons montré que des peintures murales réalisées à la fresque ou à la colle d'os pré ent lors d'une analyse photothermique flash, des comportements photothermique différents. La peinture à la fresque, du fait de la carbonatation des pigments se comporte comme un mono couche thermique. Elle fait donc apparaître une réponse photothermique qui s'approche d'une droite de pente né ative. La peinture à la colle d'os, du fait de la pré ence de deux matériaux différents se comporte comme un bi couche thermique. Elle fait donc apparaître une répo se photothermique changeant rapidement de pente lors d'une analyse flash. La présence ou non de ce changement de courbure permet donc de différencier les deux types de peintures murales. Ces résultats sont intéressants, car semblant ouvrir la voie à la détection de technique à la fresque parmi les différentes techniques de peintures murales. Nous allons maintenant généraliser et confirmer ces résultats sur des analyses in situ.

26.5. Étude sur site : Étude d'une peinture murale de la Chapelle Notre-Dame-des-Fontaines, la Brigue

Après cette étude théorique, nous avons pu tester notre approche lors d'é ude de peintures murales in-situ.

Figure 421 : La Chapelle Notre-Dame-des-Fontaines

26.5.1. Contexte de l'étude

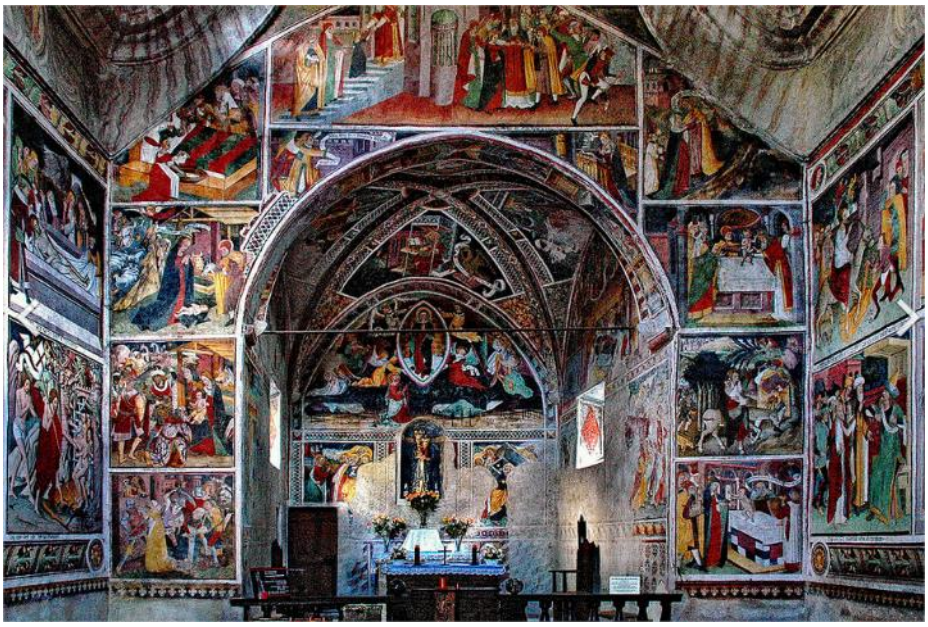


Figure 422 : Décoration de la nef

La Chapelle Notre –Dame-des-Fontaines datant du XIIe siècle est située dans le département des Alpes-Maritimes, sur la commune de La Brigue.
Reconstruite au XVe siècle, elle est magnifiquement décorée de peintures murales (220 m²), ce qui lui a valu d'e re classée monument historique en 1951.
Les peintures du chœur, réalisées à la dé rempe, sont en gén ral attribuées, mais sans preuve, à partir des critères de style, à **Giovanni Baleison**. **Giovanni Baleison** et **Giovanni Canavesio** peintres fresquistes italiens du 15e siècle.

26.5.2. Objectif de la mission

Une mission d'étude a é é organisée fin mars 2016 par le **CICRP de Marseille** pour étudier l'état de conservation de ces œuvres.

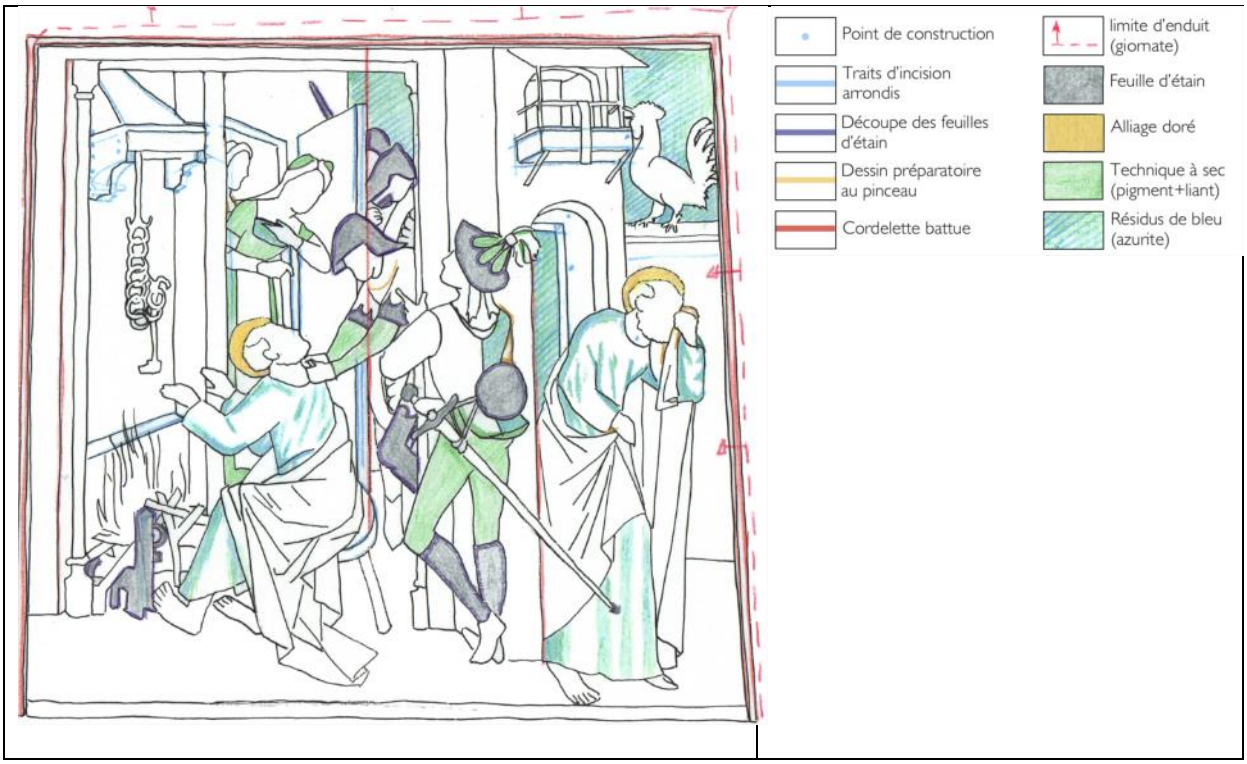
Le **GRESPI de l'Université de Reims** a été associé à ce chantier. Des analyses par thermographie infrarouge stimulée ont été effectuées sur des peintures murales. L'inté ê s'est surtout porté sur une peinture baptisée *Le Reniement de Saint-Pierre* sur laquelle une étude a été menée afin de déterminer la technique de dép t des pigments. S'agit-il d'une fresque ?

Figure 423 : Reniement de Saint-Pierre

26.5.3. Relevés du restaurateur

L'œuvre a été nalysée par Florence Cré er[27], restauratrice, selon les méthodes traditionnelles.

Un relevé portant sur la nature des pigments et la technique artistique a été effectué :



[27] Florence Crémer : http://rhonealpes.ffcr.fr/rhonealpes/Cremer_Florence.html
florence.cremer1@gmail.com

Figure 424 : Analyse de la technique picturale et composition des pigments

26.5.4. Analyse de la technique picturale

Figure 425 : Zone d'étude

26.5.4.1. Résultats

Nous avons tenté de déterminer le type de technique picturale mise en œuvre par l'artiste. Nous avons déjà décrit la mé hode permettant de déterminer ce point. Nous soumettons l'œuvre à une excitation flash et nous observons sa réponse en température au cours du temps. Si celle-ci est en pente -1/2 en représentation log-log alors le point étudié est assimilable thermiquement à un monocouche ce qui revient à dire que la technique utilisée est celle de la fresque (exécutée sur un support frais), dans le cas contraire, si une rupture de pente est observée, alors nous aurons affaire à un bicouche c'est-à-dire à une peinture murale exécutée sur un support à sec.

Cette étude a été effectuée à l'aide de deux flashs de marque *Elinchrom Zoom pro*© associée à des générateurs *Digital 2400 RX* du même fabricant pouvant délivrer jusqu'à 2400 J pendant une fraction de temps de l'ordre de la milliseconde.

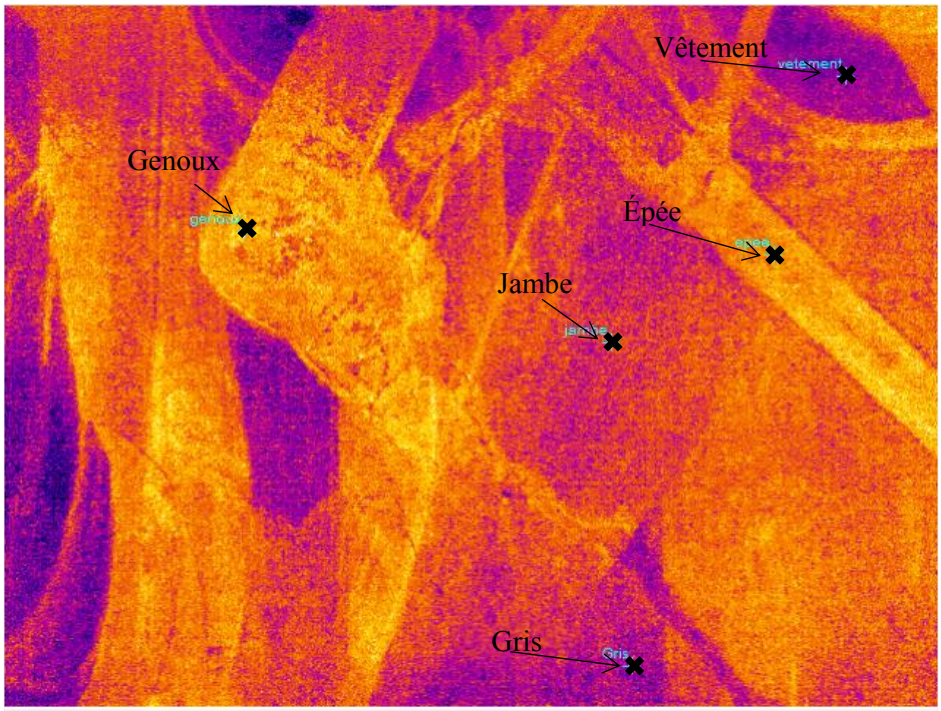


Figure 426 : Localisation des points étudiés

L'œuvre a été soumise à un tir flash et les répon es en tempé ature de 5 points ont é é extraites. La visualisation des réponses en température en log-log permet de repérer de zones avec rupture de pente, ces zones sont des bicouches thermiques.

Tableau 96 : Résultats d'analyse de la couche picturale

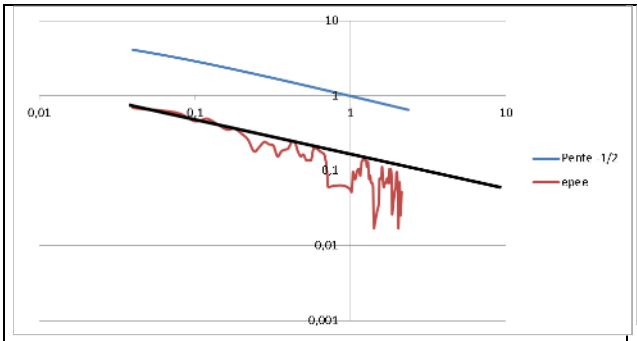


Figure 427 : Réponse en température (log-log) Epée

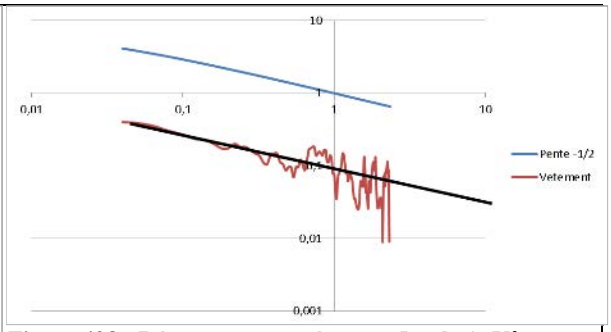


Figure 428 : Réponse en température (log-log) Vêtement

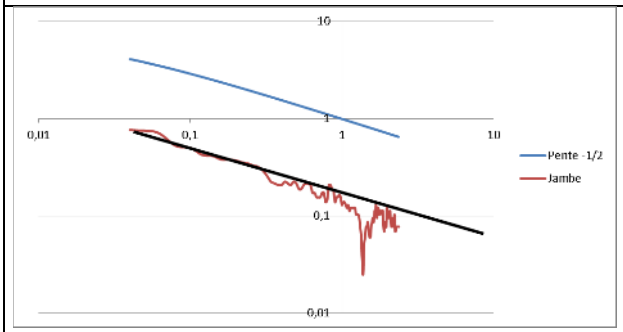


Figure 429 : Réponse en température (log-log) Jambe

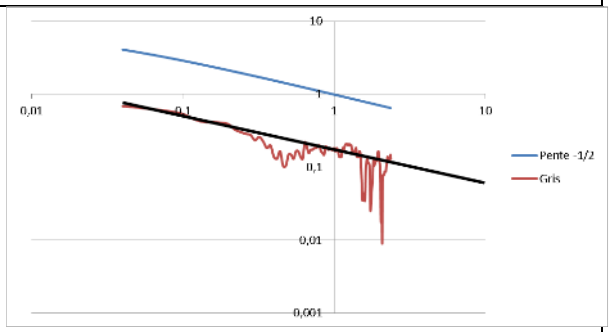


Figure 430 : Réponse en température (log-log) Gris

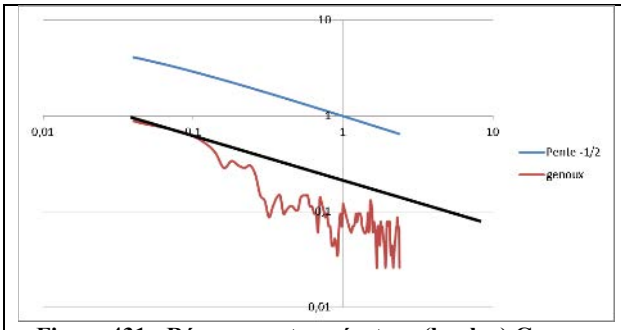


Figure 431 : Réponse en température (log-log) Genoux

Nous avons regroupé dans le tableau suivant l'analyse récapitulative des données collectés :

Tableau 97 : Récapitulatif analyse ND des Fontaines

Point étudié	Rupture de pente observée	Observation restaurateur	Longueur et régularité de la pente	Conclusion
Épée	Oui	Technique à sec	Pente -1/2 courte	Technique à sec
Vêtement (galon)	Non	Fresque	Pente -1/2 longue et irrégulière	Type fresque
Jambe	Oui	Technique à sec (pigment + liant)	Pente -1/2 moyenne avant rupture de pente.	Technique à sec
Gris porte	Non	Fresque	Pente -1/2 longe et irrégulière	Type fresque
Genoux	Oui	Feuille d'étain	Pente -1/2 très courte	Bicouche net.

297

26.5.4.2.Observations

Les analyses effectués concordent avec les conclusions de la restauratrice à l'exception d'une zone se situant à l'arrière du personnage central (au niveau de la fesse gauche). Nous avons correctement identifié la technique employée pour représenter l'épée ainsi que la jambe rouge constituée de rehauts vermillon, comme des techniques à sec. Le gris de la porte a été identifié comme une technique à la fresque. Il a aussi été possible de mettre en évidence un autre type de technique picturale, un dépôt à la feuille d'étain, utilisé pour figurer le genou du personnage penché vers St Pierre.

Notre étude a donc permis de confirmer les constatations effectuées par la restauratrice en plusieurs endroits. Ce travail montre qu'il est possible d'avoir un aperçu complet du type de technique picturale utilisée, elle a permis aussi de repérer une technique originale comme le dépôt à la feuille d'étain. Cette approche démontre qu'il est possible d'accéder à une information détaillée et précise concernant le travail des artistes.

26.6. Étude sur site : Chapelle St Martial Palais des papes – Avignon

Figure 432 : Plafond richement décoré de la Chapelle Saint Martial (Palais des Papes, Avignons)

26.6.1. Contexte de l'étude

Notre laboratoire a été sollicité en 2014 pour analyser des peintures de la Chapelle Saint Martial (Avignon, Palais des Papes) à 'occasion d'un chantier de restauration.
Nous nous sommes intéressés à l'é ude des façades Nord et Est de la voute de cette chapelle du 14e siècle décorée de fresques de Matteo Giovannetti (v. 1322-1368).
Le pape Clément VI employa de 1344 à 1345 ce grand peintre de la Renaissance à la décoration du Palais des Papes d'Avignon, celui-ci dirigea des é uipes d'artistes venus de toute l'Europe.

Cette chapelle a fait l'objet de restaurations dans le passé.

26.6.2. Objectifs

Dé ontrer in situ la faisabilité d'une caractérisation de la technique de dép t de pigment par thermographie infrarouge stimulée. Être en mesure de distinguer une peinture à la fresque d'une peinture murale classique (technique à sec).

Repérer des *sinopies* qui sont des ébauches de fresque réalisées avec un pigment rouge du même nom (sinopia).

26.6.3. Dispositif et protocole expérimental

Pour analyser ces peintures, nous aurons recours à une excitation flash assurée au moyen de deux flashs (voir Chapitre III, page 165) disposé symé riquement de part et d'autre de la zone analysée. La détection se fera au moyen d'une camé a bolomé rique *Flir © SC645* (640× 480 pixels) cadencée à 50 et 100 Hz.

Tableau 98 : Caractéristiques caméra

Distance focale	0,25 m

Résolution spatiale	0,69 mrad
NETD	50 mK

La caméra est positionnée idéalement à environ 40 cm de la zone à étudier afin d'avoir une zone d'étude de 20 x 15 cm environ. Les flashs sont disposés à environ 50 cm de la zone d'étude.

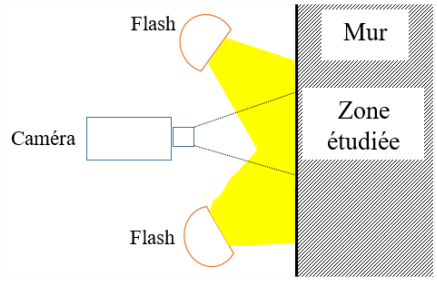


Figure 433 : Dispositif expérimental

Dans un premier temps nous allons essayer de caractériser la technique artistique employée à l'origine, nous étudierons des zones en façade nord non restaurées, ensuite nous étudierons des zones ayant fait l'objet de restauration afin de repérer d'éventuelles différences dans la technique mise en œuvre.

26.6.4. Identification de la technique picturale utilisée

Afin d'avoir un aperçu large de la technique employé par les artistes de la Renaissance nous allons nous intéresser à plusieurs zones du plafond.

Dans un premier temps nous nous intéresserons à la caractérisation de zones proches l'une de l'autre. Nous étudierons dans un premier temps deux zones proches situés en façade Nord. Une zone comportant un décor représentant un chapiteau peint en blanc – zone dite du « Chapiteau blanc » – et un aplat bleu que nous avons baptisé « zone bleue ». Nous ferons des comparaisons des réponses en température des deux parties de ce décor afin d'identifier de possibles différences de comportement thermique pouvant révéler des techniques particulières. Sur le même principe, nous étudierons des pigments bleu et rouge situés en façade Est situés sur une zone baptisée « Bleue-rouge ».

Ensuite nous comparerons des zones éloignées, mais de mêmes couleurs : deux zones de couleur bleue. Il s'agit du bleu étudié en façade Nord et de celui situé en façade Est.

Enfin nous nous intéresserons à la détection des sinopies.

Ce travail nous permettra de mieux comprendre la technique des artistes de l'époque.

26.6.4.1. Identification de parties proches, de couleurs différentes

g) Zone Chapiteau blanc

Cette zone a été étudiée avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz.

Figure 434 : Zone étudiée

Nous avons visualisé en représentation log-log la répon e en tempé ature moyenne d'une zone circulaire.

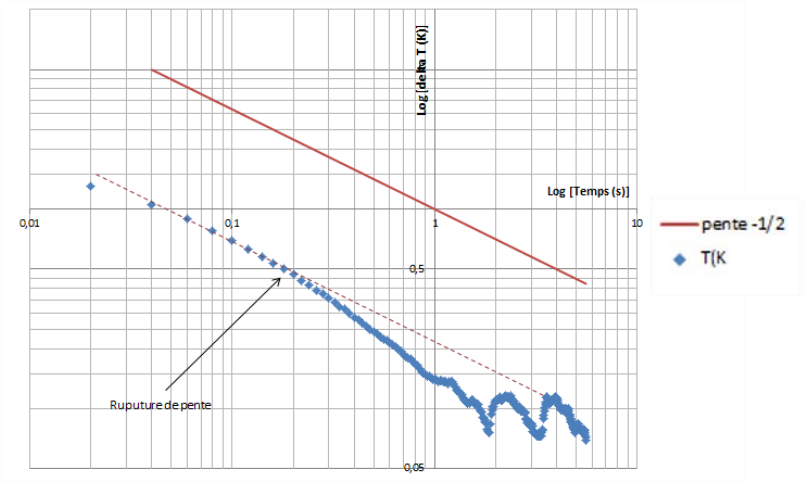


Figure 435 : Réponse en température moyenne (Log-Log)

Nous observons l'apparition d'une rupture de pente marquée qui indique un comportement se rapprochant d'une peinture murale (technique à sec).

h) Zone bleue

Nous nous sommes ensuite intéressé à une zone contiguë. L'étude a été effectué comme pré éd mment avec une fréquence d'acquisition de 50 Hz

Figure 436 : Vue d'ensemble de la zone

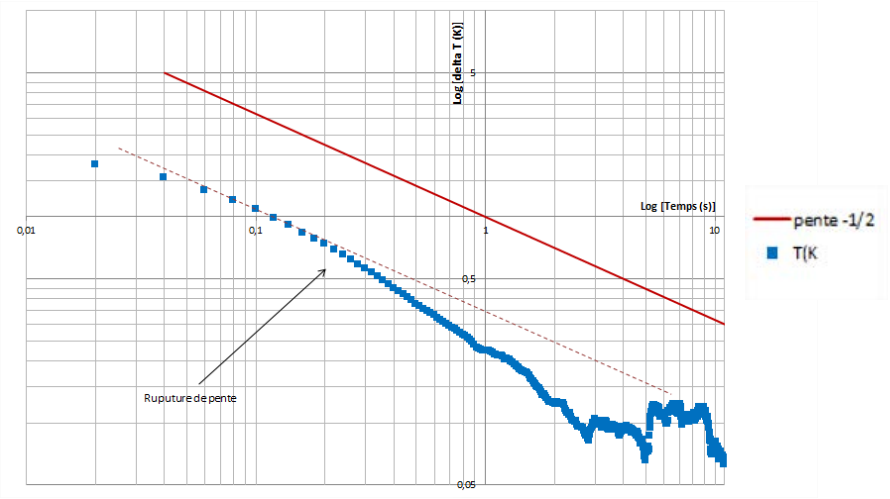


Figure 437 : Représentation Log-Log de la réponse en température de la zone d'étude

Comme précédemment nous observons une rupture de pente caractéristique des peintures murales. Nous pouvons conclure que les deux zones ont été exécutées selon une technique à sec, car les réponses sont très proches.

i) Zone Bleue-rouge

La zone étudiée sur cette façade Est a été baptisée « Bleue-rouge », elle nous permettra de comparer la technique de pose d'un bleu et d'un rouge mitoyen.

Figure 438 : Zone étudiée

Comparons maintenant le rouge et le bleu de la zone non restaurée.

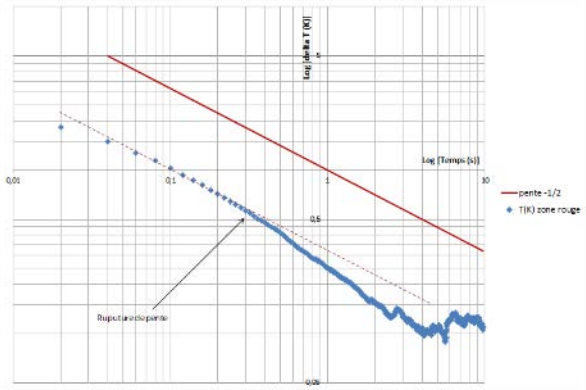


Figure 439 : Représentation Log-Log de la réponse en température de la zone rouge

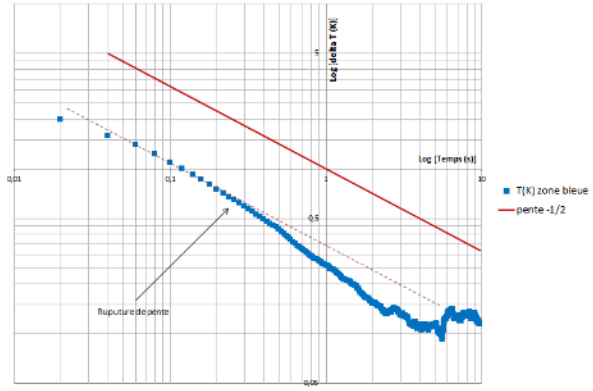


Figure 440 : Représentation Log-Log de la réponse en température de la zone bleue

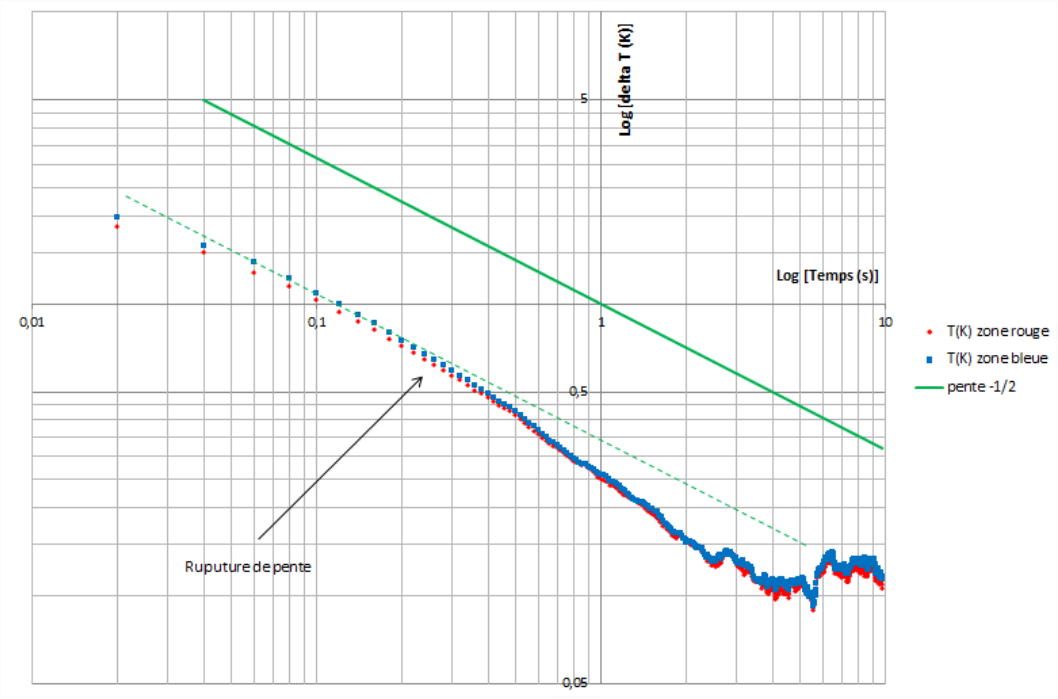


Figure 441 : Comparaison rouge et bleu de la façade est

Le comportement observé est sans surprise celui d'une peinture murale. Les ré onses respectives et des temps de décrochage similaires indiquent une technique de dépôt similaire pour ces deux pigments. Les artistes ont travaillé sur un support sec.

26.6.4.2. Identification de parties éloignées de même couleur

Comparons maintenant les bleus situés en façade Nord et Est.

Fréquence d'acquisition : 50 Hz

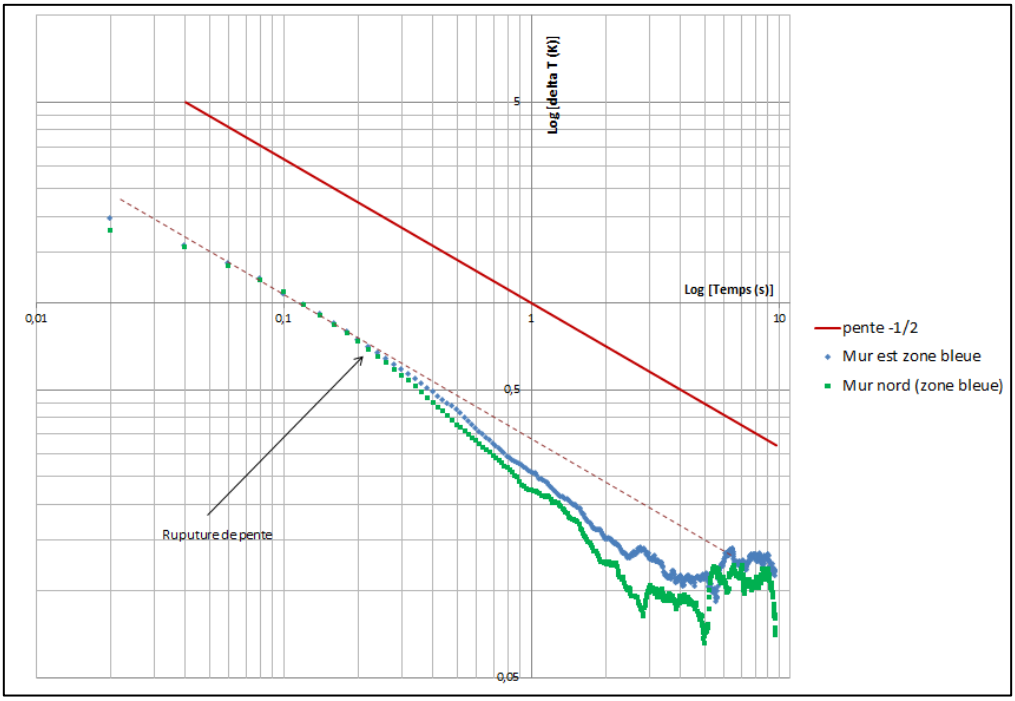


Figure 442 : Comparaison bleu façade Nord et Est

La comparaison du bleu des deux façades indique un comportement similaire, de type peinture murale. Les temps de décrochage similaires dans les deux cas ce qui indique une technique de dépôt identique entre les 2 façades.

26.6.4.3. Identification de sinopia

La sinopia (au pluriel italien sinopie) est le nom d'un pigment de couleur rouge composé d'oxyde de fer. On appelle aussi sinopia une ébauche de fresque réalisée avec ce pigment rouge.

Figure 443 : Vue d'ensemble de la zone étudiée

Fréquence d'acquisition : 50 Hz.

Figure 444 : Zone d'intérêt

Comparons une zone recouverte de sinopie et une zone sans sinopie.

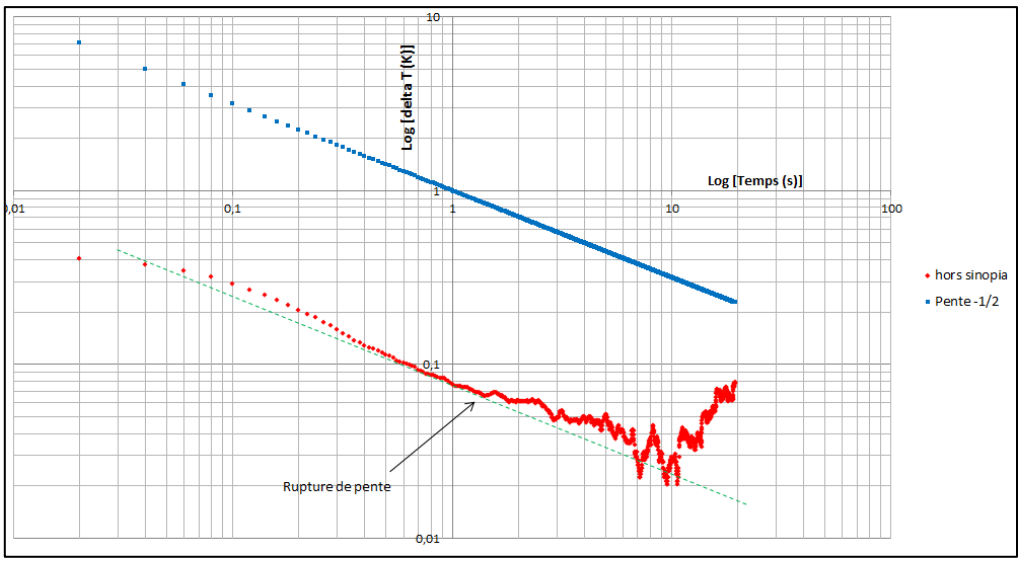


Figure 445 : Hors sinopia

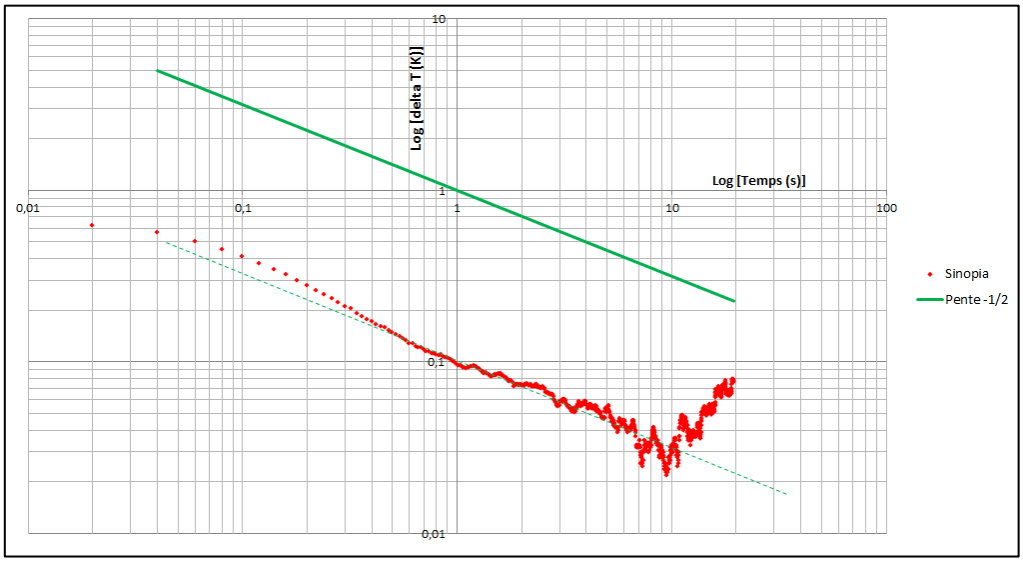


Figure 446 : Sinopia

Observation : On remarque que les réponses en température des zones avec sinopie ne présentent pas de rupture de pente, ce comportement est assimilable à une technique de type fresque, ce comportement n'est pas observé dans la zone hors sinopie. Ce constat nous pousse à supposer que les ébauches ont été dessinées sur un support encore frais ce qui expliquerait ce comportement de type fresque, les artistes ont ensuite recouvert leurs essais, le support déjà sec, de leur œuvre. Cette chronologie semble cohérente et est compatible avec les observations effectuées.

26.7. Conclusion

Cette étude sur l'analyse et la caractérisation de la couche picturale nous a permis de tirer un certain nombre d'enseignements.

Dans un premier temps nous avons postulé qu'il était possible d'avoir des informations pouvant pré iser la technique picturale d'un artiste en analysant les réponses en température de la surface peinte lorsque celle-ci est soumise à une excitation de type flash. La réponse en température pouvant permettre de distinguer un dépô de pigment effectué selon une technique à la fresque d'un dépô de pigment effectué à sec, relevant de la peinture murale classique.

Ce point a été vérifié théoriquement au moyen d'une simulation numérique. Nous avons observé que les fresques se comportaient thermiquement comme des monocouches et avaient de ce fait un comportement thermique en pente -1/2 en phase de refroidissement, les peintures murales ont-elles aussi une décroissance en pente -1/2 rapidement écourtée par une rupture de pente signant la présence de l'interface enduit/couche picturale. De plus cette simulation à permis d'estimer l'ordre de grandeur des temps d'observation de ces ruptures de pente pour le type de matériaux composant des peintures murales. Il a donc ainsi été possible de vérifier qu'il était possible de les repérer avec notre dispositif.

Ces résultats de simulation ont été validés par une étude sur des éprouvettes de laboratoire.

Nous avons ensuite souhaité vérifier ce point, nous avons eu l'occasion de le faire lors de deux chantiers de restauration, celui de Notre Dame des Fontaine (La Brigue) et la Chapelle Saint Martial du Palais des Papes (Avignon). Il a été possible de vérifier à partir d'un relevé effectué par un restaurateur qu'il était possible de repérer des zones décorées selon la technique à sec (peinture murale) ou alors au moyen d'une technique de revêtement métallique. L'étude de la Chapelle Saint Martial nous a permis de mettre en évidence la technique à sec utilisée par les artistes historiques de la chapelle. Nous avons observé que les restaurateurs n'ont pas utilisé le même type de technique lors des restaurations récentes : les rebouchages ont été peints alors qu'ils étaient encore frais ce qui se traduit par un comportement que nous identifions comme celui d'une fresque. Nous nous sommes aussi intéressés aux ébauches de dessin appelées sinopies. Les analyses ont montré que ces sinopies étaient assimilables d'un point de vue thermique à des fresques ce qui laisse supposer que ces ébauches ont probablement été effectués par les artistes de l'époque sur un enduit encore frais. L'œuvre a ensuite été peinte par-dessus une fois l'enduit sec.

Ce travail nous a permis de démontrer que notre dispositif d'analyse par thermographie infrarouge permettait de mieux comprendre la technique picturale des artistes. Elle permet aussi d'avoir un suivi plus précis du travail de restauration. Bien entendu ces deux études demandent à être complétées de relevé de restaurateurs plus complets et d'analyses plus poussées.

27.Suivi de restauration

Au cours des nombreux chantiers de restauration auxquels nous avons été amenés à participer, nous nous sommes interrogés sur la possibilité de repérer les restaurations anciennes et éventuellement caractériser la technique de restauration utilisée. Nous avons découvert que cette possibilité pouvait intéresser les équipes en charge de la restauration, car les données à leur disposition concernant des restaurations anciennes peuvent être incomplètes, de plus ces restaurations lorsqu'elles ne prennent pas en compte les matériaux d'origine constituant l'œuvre, peuvent être à l'origine d'altérations comme nous le verrons dans une étude que nous avons effectuée au Palais du Luxembourg (Sénat). Nous présenterons dans cette section une étude menée sur une éprouvette de laboratoire afin de vérifier la possibilité de repérer avec notre dispositif différents types de matériaux de colmatage assez proches. Ensuite nous présenterons des résultats d'analyses effectuées in situ lors de deux chantiers de restauration différents qui démontrent la possibilité de repérer ces zones restaurées, mais aussi de caractériser le type de technique picturale utilisée par les restaurateurs.

27.1. Étude préliminaire sur un échantillon composé de 3 types de plâtres.

Nous avons souhaité vérifier préalablement s'il était possible de repérer à l'aide de notre dispositif des plâtres de nature différente mis cote à côté. Nous avons pour cela préparé une éprouvette de plâtre standard rectangulaire, creusée en son centre et colmaté à l'aide de 2 bouchons de plâtres (Plâtre à modeler et MAP[28]). La surface du bloc a été peinte en noir sur une moitié afin d'homogénéiser l'absorption et laissé telle quelle sur l'autre moitié. L'échantillon a été soumis à une excitation de

[28] MAP : Mortier Adhésif Placoplâtre

type crénau d'une durée de 1 mn et d'une puissance de 1000 W. L'acquisition a été effectuée à l'aide du dispositif SAMMTHIR.

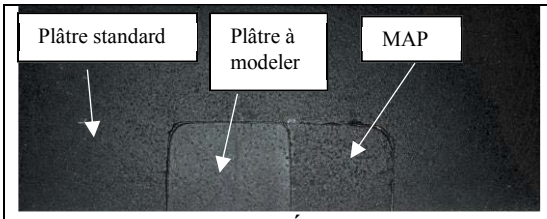


Figure 447 : Éprouvette

Figure 448 : Image thermique (avec profil)

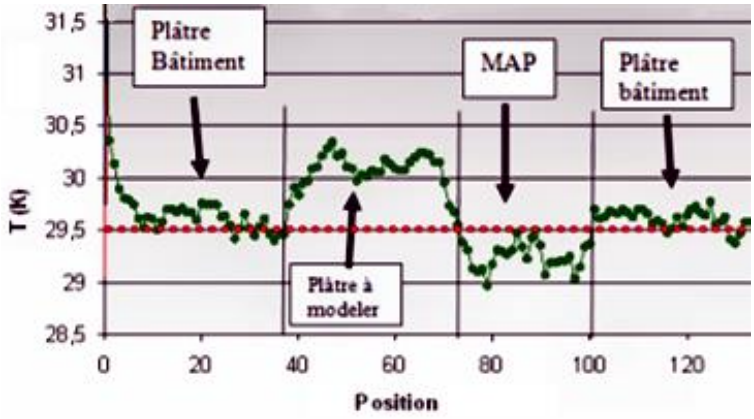


Figure 449 : Profil spatial de température

La Figure 449 montre l'évolution de la température mesurée le long d'un profil tracé sur la partie peinte. Les variations de température correspondant aux différents types de plâtre sont observées autour d'une ligne de base correspondant au plâtre standard (plâtre du bâtiment) constituant l'éprouvette. Le plâtre à modeler présente une température moyenne supérieure de 0,5 °C alors que le MAP présente une température moyenne inférieure de 0,25 °C par rapport au plâtre standard.

Il est donc possible de repérer à l'aide de SAMMTHIR des variations de température induites par les différents constituants composant une surface. Vérifions s'il est possible de repérer in situ des restaurations anciennes telles que des rebouchages en procédant ainsi.

27.2. Études in situ portant sur des restaurations

27.2.1. Détection et caractérisation de restaurations anciennes

Les restaurations que nous étudierons sont des rebouchages.

Le **rebouchage** est une opération consistant à colmater un creux ou des fissures présentes à la surface des murs ou à corriger des défauts de planéité. Cette restauration se fait au moyen d'enduits. Il existe plusieurs techniques et plusieurs matériaux permettant d'effectuer le rebouchage en fonction du support, de la surface à reboucher, mais aussi du niveau de finition nécessaire. Le rebouchage est généralement suivi d'un ponçage, d'un lissage et parfois d'une retouche picturale.

27.2.1.1. Détection autour de fissures débouchantes

Cette étude a été effectuée sur le plafond de l'annexe de la bibliothèque du Palais du Luxembourg (Sénat). La voute, richement décorée d'une série de peintures acquises par le Sénat en 1803, représentant les Douze signes du Zodiaque, œuvre de *Jacob Jordaens* (élève de *Rubens*).

Figure 450 : Voute décorée de l'annexe de la bibliothèque du Sénat.

La voute de l'é ifice, située à plus de 10 m de hauteur, a fait l'objet de travaux de restauration au débu des anné s 80, mais le vieillissement conjoint de la structure et des restaurations s'est ré é é problématique (chute de fragments, apparition de fissures). Le dé artement d'architecture du Palais du Luxembourg a fait appel à une équipe de restauration et à sollicité l'expertise de notre laboratoire (Grespi) pour comprendre l'origine de ces problè es.

Nous nous sommes intéressés à une zone présentant des fissures (voir Figure 452), vé ifions s'il est possible de la mettre en évidence des restaurations à cet endroit.

j) Dispositif et protocole expérimental

Le dispositif se compose d'une camé a *Flir A20* et de deux spots halogènes de 500 W chacun. La zone a é é soumise à une excitation crén au d'une duré de 35 s, l'observation a é é effectué pendant 65 s.

Figure 451 : Dispositif en place

Figure 452 : Zone étudiée

k) Résultat

Nous nous sommes intéressés à différentes zones présentant des défauts visibles en surface. Nous avons supposé que ces défauts pouvaient être consécutifs à la présence de restaurations anciennes ayant mal évoluées.

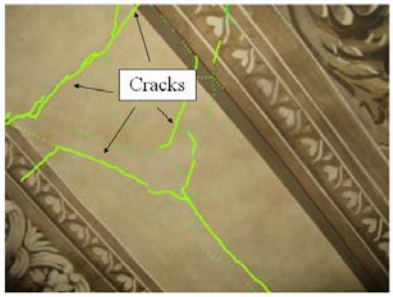


Figure 453 : Fissures repérées

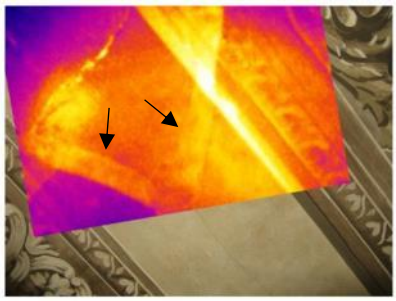


Figure 454 : Superposition visible/IR

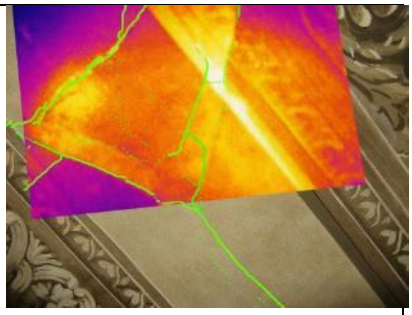


Figure 455 : Superposition visible/IR + fissures

Notre étude a permis de mettre en évidence des signatures caractéristiques qui pourraient être liées à des maté iaux de natures diffé entes. L'architecte en chef du Sén t a confirmé ce point en nous indiquant que ce plafond avait fait l'objet d'une restauration dans les anné s 80. L'observation en image IR met en évidence la présence de 2 rebouchages (voir Figure 454). Ces différences de nature de maté iaux sont à l'origine de l'apparition de nombreuses fissures observé s au cours de cette étude. Des fissures parcourent les bords de ces rebouchages (Figure 455), ce qui indique une fragilité à la jonction entre le rebouchage et le support.

27.2.1.2.Caractérisation d'une zone restaurée

Nous avons présenté en 26.5 (voir page 293) des analyses effectuées à la **Chapelle St Martial du Palais des Papes** d'Avignon, à cette occasion nous avons eu l'occasion de nous inté esser à une zone présentant un rebouchage que nous appellerons «lacune rouge ». Nous avons remarqué qu'il é ait possible de repérer différentes techniques picturales en observant leurs réponses en température – en représentation log-log (voir 26.1 page 289). Ce type de repré entation nous a permis d'identifier le type de technique picturale utilisé . On peut supposer que les ré onses en tempé ature d'une zone restauré et d'une zone originale diffè ent en raison d'une diffé ence de technique dans la mise en œuvre de la restauration (diffé ence de maté iau, différence de technique picturale, etc.). Voyons s'il est possible de mettre en évidence de telles différences par cette méthode.

I) Dispositif et protocole

Le dispositif est identique à celui présenté en page 298, la fréq ence d'acquisition est de 50 images/s (50 Hz). Comparons les répo ses thermiques de la zone restaurée et d'une zone non restaurée.

Figure 456 : Restauration « Lacune rouge »

Figure 457 : Zone étudiée

m) Résultat

Nous avons extrait les réponses moyennes en température des deux zones représentées sur la figure ci-dessous.

Le graphe ci-dessous représente les réponses en température moyennes en représentation Log-Log :

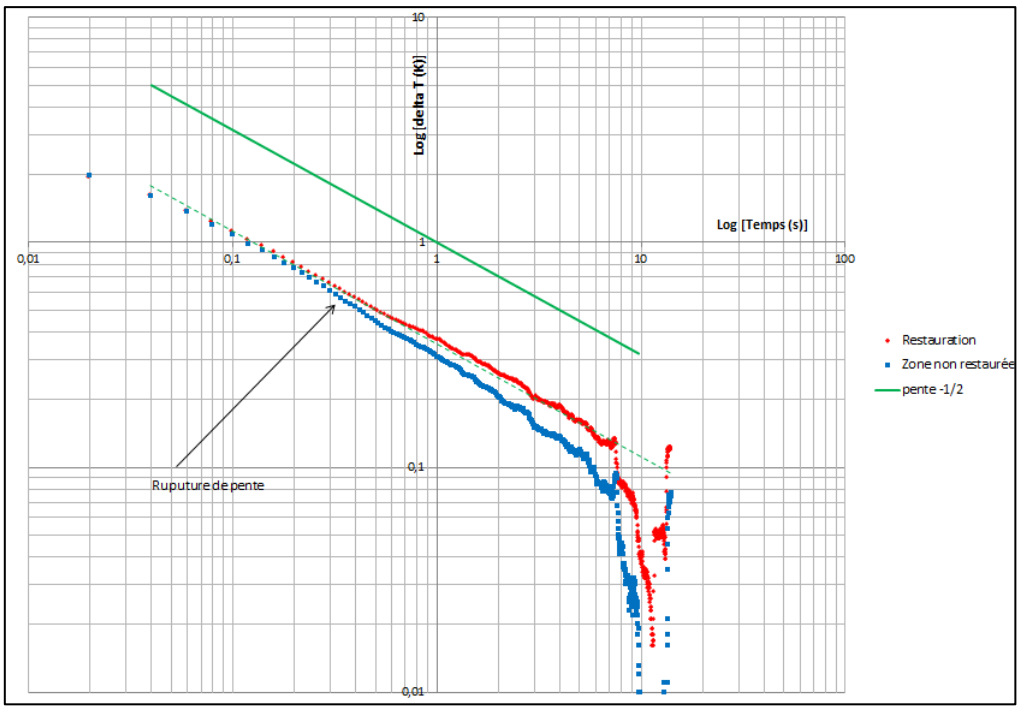


Figure 458 : Comparaison zone restaurée et non restaurée

Observation : Nous pouvons remarquer que les réponses en températures sont distinctes : la zone restauré (en rouge sur le graphe) n'a pas la même ciné ique de refroidissement que la zone non restaurée. La restauration est assimilable à une technique de type fresque alors qu'on observe un décrochage sur la zone non restaurée ce qui indique une technique à sec de type peinture murale. Cette observation laisse supposer que les restaurateurs n'ont pas utilisé a technique historique des artistes de l'é oque.

27.3. Conclusion

Ce travail nous a permis de confirmer plusieurs points. Tout d'abord la possibilité de mettre en é idence des restaurations anciennes. Nous nous sommes inté essé à la faisabilité d'une telle **détection** en étudiant une éprouvette de laboratoire constituée de différents enduits. Cette analyse nous a permis de conclure à cette possibilité au moyen de la thermographie IR stimulée. Ensuite nous avons pré enté e résultat d'une analyse sur une zone restauré d'un plafond de la bibliothèque du Sénat. Cette étude nous a permis de constater que cette mise en évidence ne pose pas de difficulté. Elle nous a aussi permis de mieux appréhender les causes des altérations observées sur ce plafond (fissures), de les relier à la nature des matériaux de colmatage utilisé lors d'une restauration ancienne et à un mauvais respect de la part des restaurateurs des techniques d'origine. Ce point a été confirmé par des restaurateurs professionnels. Enfin nous sommes allés plus loin en effectuant cette fois-ci un travail de **caractérisation** de ces zones restaurées. Nous nous sommes penchés sur une zone restaurée du plafond de la Chapelle St-Martial du Palais des Papes. Nous avons pour cela analysé les réponses en tempé atures d'une zone restauré et d'une zone non restaurée. Cette analyse nous permis de remarquer que les comportements thermiques des deux zones étaient distincts ce qui nous amené à conclure à u e diffé ence de technique de travail entre les restaurateurs et les artistes d'origine.

28. Projet de perfectionnement du dispositif

Comme nous l'avons vu au cours de ces chapitres, notre dispositif de mesure et d'analyse par thermographie infrarouge stimulée semble d'un emploi inté essant pour l'aide à la conservation des œuvres d'art. Nous avons pu grâce à cet outil améliorer la détection des défauts, caractériser thermiquement les matériaux de façon plus précise et complète. Nous avons pu repérer de nouveaux types de défauts tels que les infiltrations de sel, caractériser les couches picturales des peintures étudiées, avoir un meilleur suivi des restaurations, etc. Nous sommes fiers de toutes les possibilités offertes par cet outil, mais nous connaissons aussi ses limites et c'est la raison pour laquelle nous avons engagé un ravail d'amé ioration de ce dispositif.

Nous avons à partir de janvier 2015 engagé avec le soutien de la SATT Nord un projet de transfert de technologie concernant notre dispositif SAMMTHIR de contrôle non destructif par thermographie infrarouge stimulé. L'objectif de la SATT Nord est de repérer des projets innovants dans le monde de la recherche pouvant faire l'objet d'un dé eloppement industriel, nous projetons pour cela de mettre au point un démonstrateur opérationnel pouvant évoluer vers une solution industrielle.

28.1. Un système performant, mais perfectible

Le système développé par notre laboratoire, le GRESPI, présente un certain nombre de points faibles en terme de robustesse dans le fonctionnement, sur le plan de l'ergonomie et de la fiabilité, c'est la raison pour laquelle notre attention s'est porté sur un certain nombre de points prioritaires, parmi lesquels :

- ◊ La robustesse du système
- ◊ L'ergonomie
- ◊ La fiabilité

28.1.1. Renforcer la robustesse

Les améliorations envisagées concernent essentiellement le débogage de la partie logicielle du dispositif. L'ensemble a été dé eloppé sous *Labview*, mais présente des insuffisances en terme de gestion des ressources machine ce qui occasionne des dysfonctionnements. Une analyse du code a été entreprise à cet effet afin d'opé er des amé iorations et une optimisation.

28.1.2. Améliorer l'ergonomie

Le syste e actuel n'est pas optimisé pour une utilisation sur site, les branchements sont nombreux et mal disposés, l'interface logicielle est parfois confuse et manque d'intuitivité. Une ré lexion sur la disposition des différents élé ents et la manière de les assembler efficacement a é é menée, l'interface a été epensé (voir plus bas le projet de conception d'inté ration).

28.1.3. Augmenter la fiabilité

Des problèmes de synchronisation de quelques millisecondes entre la caméra et les sources ont par exemple été observés, cet aspect est négligeable en détection, mais il peut se révéler problématique en caractérisation des matériaux.
Il est indispensable d'é iminer les facteurs pouvant affecter la pré ision des mesures effectué s à l'aide du dispositif, des corrections ont été imaginées.

28.2. Mise en œuvre

28.2.1. Projet de conception d'intégration :

Le but de ce projet de conception est d'offrir un maximum de facilité aux utilisateurs lors de la mise en place des éléments mobiles et de rendre le dispositif portable, compact et ergonomique.

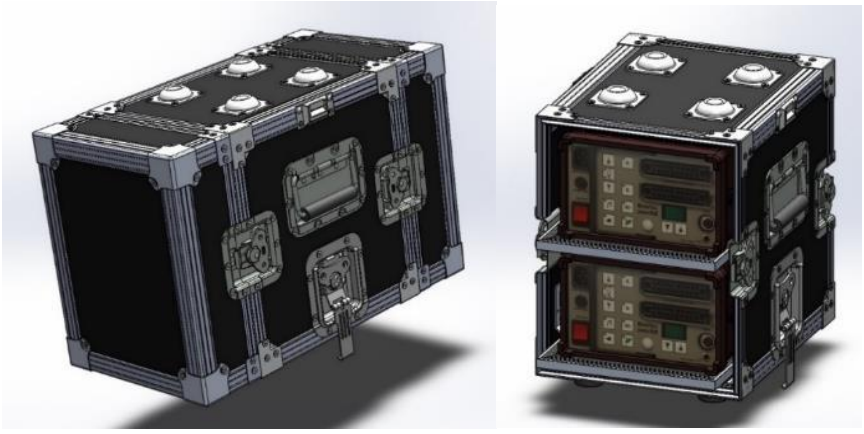
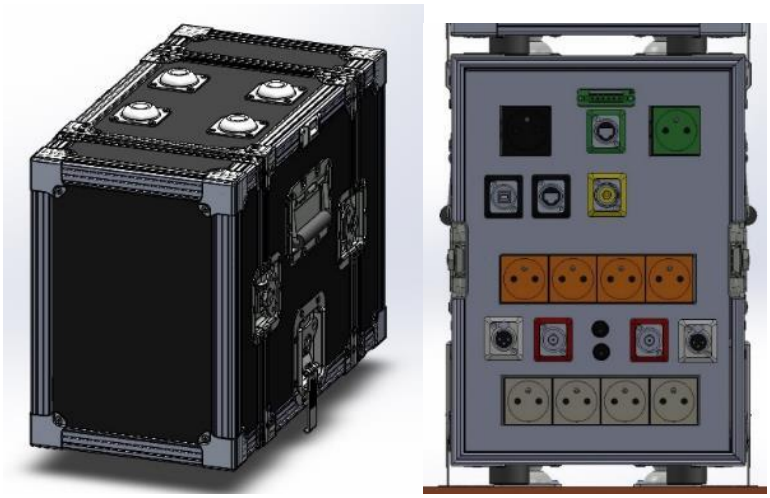


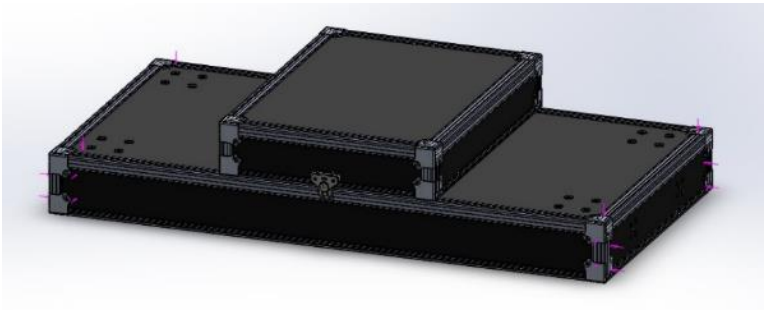
Figure 459 : Caisson avec connectique

n) Un boitier dans lequel est intégrée toute l'électronique de commande

Ce boitier regroupera tous les composants de puissance et de commande.



o) Une table équipée qui facilite la mise en place de l'équipement informatique



Un capot amovible protège le support d'aliment du PC portable lors du transport, et le transformateur d'alimentation est inté ré sous la table.

Pour limiter, les manipulations de câblage informatique, toutes les liaisons au support PC sont effectué s et les branchements vers le boitier d'inté ration sont centralisés sur l'arriè e de la table :

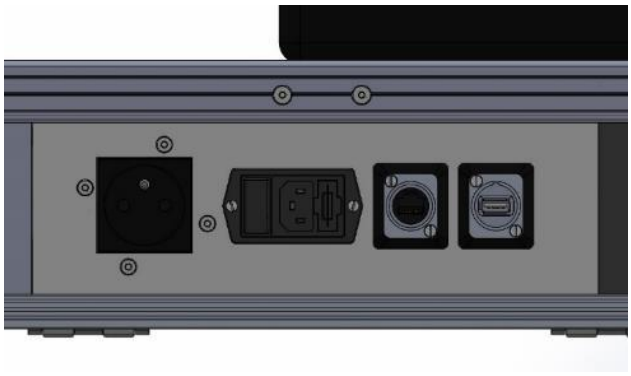


Figure 460 : Connectiques plateau

Le dispositif est pleinement opérationnel lorsque le PC est fixé sur le socle. Grâce à cette disposition et à la modification de la gestion de la synchronisation utilisée dans le programme LabVIEW, le nombre de câbles entre le PC et le Hub est réduit à trois : alimentation, USB et Ethernet.

Grâce aux différents systèmes de fixations disponibles sur ces 3 éléments indépendants, lors de l'arrivé sur le site de travail, l'opérateur pourra disposer d'un ensemble mobile facilitant le déplacement sur site :

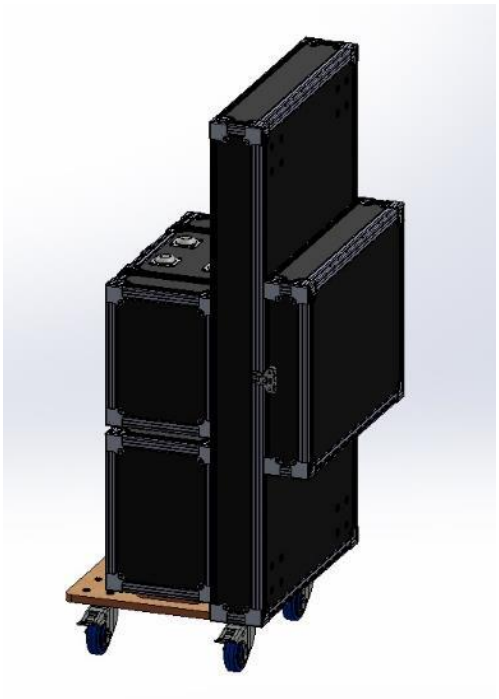


Figure 461 : Système en position compacte

L'équipement déploye e pré entera de la façon suivante :

Figure 462 : Système SAMTTHIR complètement déployé

28.3. Conclusion

313

À ce stade nous pouvons être très optimiste quant à la possibilité de mettre au point un démonstrateur performant pouvant par la suite se décliner en différentes versions industrielles : une version de base permettant de faire de la détection, une version plus élaborée comprenant un module de caractérisation thermophysique ou à un module dédié au post-traitement ou les trois à la fois, destine à une utilisation plus avancée (usage spécifique, recherche, etc.) et enfin une ouverture vers des domaines plus spécifiques comme le médical par exemple.

Le démonstrateur sera assemblé progressivement.

29. Conclusion chapitre V

Nous avons montré qu'il était possible d'é udier des objets présentant des géo é ries non planes comme sur un é hantillon que nous avons é udié, prêté dans le cadre d'une collaboration internationale avec un laboratoire de l'Aquilla (Italie). Après avoir étudié dans le chapitre II les difficultés découlant de la couche picturale sur la détection des défauts et leur repérage, nous souhaitions estimer l'influence de la géo é rie sur la détection des défauts. Nous avons observé que la gé mé rie n'est pas un obstacle aussi difficile à surmonter pour le repérage de dé auts que les problè es relevant des variations d'absorptivité ou d'homogén ité du dépô d'énergie. Cet é é ent nous semble plus impactant. Nous avons à cette occasion confirmé les conclusions du chapitre II concernant l'inté êt des sources infrarouge dans l'atté uation des effets radiatifs sur la détection.

Autre thématique étudiée, la détection de motifs sous badigeon. Ce type d'analyse a toujours été pour nous un obstacle majeur. Nous avons testé de nombreux moyens comme la bande spectrale du proche infrarouge, différents types de sources, d'excitation et de dé ection, mais ces tentatives se sont toutes soldées par des échecs. L'analyse dans la bande de l'infrarouge lointain appelé aussi Terahertz nous a permis d'entrevoir la possibilité de repé er des choses sous une couche de badigeon. Nous avons ainsi été en mesure de repérer un type particulier de pigment, un pigment métallique à b se d'or.

L'excitation par induction a aussi donné de bons résultats concernant la détection de ce pigment de nature métallique. Nous avons noté une supériorité de l'induction en matière de précision dans la résolution spatiale, mais le térahertz peut être plus prometteur en matière de pouvoir pénétrant. Ce travail fera l'objet de développements ultérieurs.

La caractérisation des couches picturales constitue un débouché important pour notre thématique de recherche. Nous avons postulé qu'il était possible de parvenir à une connaissance des techniques picturales utilisés en analysant la réponse en température d'une surface sollicité à l'aide d'un flash. Cette réponse est riche en information. Il a été possible de démontrer la validité de cette intuition à l'aide d'une simulation numérique dans un premier temps et ensuite sur plusieurs exemples de manipulations effectuées in situ. Ainsi il a été possible de distinguer différentes techniques de dépôt de pigment comme la technique à la fraiche caractéristique de la fresque ou la technique à sec associée aux autres types de peintures murales. Nous avons aussi été capables de repérer une technique particulière : le dépôt de feuille d'étain. Ce type d'information peut-être très intéressant pour les équipes en charge de la restauration des biens culturels.

Concernant le suivi de restauration, nous avons montré que celui-ci était parfaitement possible et que la thermographie infrarouge stimulée constitue un outil précieux dans ce travail. Nous avons été capables de détecter sur une éprouvette différents types de matériaux de colmatage utilisés par les restaurateurs. Nous avons été en mesure de mettre en évidence sur un plafond du Sénat, le rôle problématique sur un bien culturel que pouvaient avoir des restaurations non respectueuses des techniques d'origine. Enfin nous avons démontré qu'il était possible de comprendre de façon plus fine le type de technique utilisée par les restaurateurs et les artistes en analysant les réponses en température obtenues après une excitation flash.

Au sujet de notre dispositif SAMMTHIR nous avons souhaité présenter quelques éléments de réflexion concernant son amélioration. Nous travaillons actuellement dans le cadre d'une collaboration avec la SATT Nord sur un prototype qui reprendra un grand nombre d'améliorations tirés de nos expériences sur le terrain. Ce prototype débouchera sur un démonstrateur polyvalent, transportable et plus ergonomique. La possibilité d un transfert de technologie avec un industriel est envisagé

Comme on peut le voir, un grand nombre de pistes évoquées au cours de ce chapitre demandent à être complétées dans le futur. Elles feront probablement l'objet des développements ultérieurs à l'occasion d'une thèse ou d'un travail de recherche et ce travail sera appuyé par un dispositif SAMMTHIR encore plus polyvalent, plus précis, plus fonctionnel et mieux adapté au terrain.

Conclusion générale

Au cours de ces années consacrées à ce travail, beaucoup de points ont été abordés et étudiés dans les cinq chapitres de cette thèse.

Le premier chapitre a été pour nous l'occasion de faire un état des lieux de la recherche en matière de détection et de caractérisation de défauts dans les œuvres d'art par thermographie infrarouge. Après un historique de la technique, un rappel théorique de certaines notions de thermiques nous nous sommes intéressés à un certain nombre de développements dans le domaine. De nouvelles approches très intéressantes ont été présentées comme le Partial Least Square (PLS) ou les statistiques d'ordre supérieures appliqués à la thermographie IR stimulé. Ce travail n'est pas exhaustif, mais il a permis de cerner un certain nombre de possibilités, mais aussi les limites auxquelles nous sommes pour le moment confrontés.

La détection des défauts a bien entendu constitué l'armature centrale de ce travail de recherche. Les travaux précédents nous ont inspirés et motivés. Nous pensons avoir contribué à améliorer les possibilités de détection de ces défauts au moyen de la thermographie IR. Au cours du chapitre II nous avons mis en évidence la difficulté pratique de mettre en évidence des défauts dans des œuvres en raison des propriétés optiques des divers pigments constituant la couche picturale. Ces fluctuations d'absorptivité provoquent l'apparition d'artefacts qui dégradent l'analyse des thermogrammes et le repérage des défauts. Autre difficulté, la répartition du dépôt d'énergie, là encore c'est une difficulté connue de l'analyse pulsée, qui s'ajoute à la première difficulté. Pour traiter ces difficultés, nous avons d'abord étudié la disposition des sources et proposé des configurations optimales afin d'y pallier. Ensuite concernant les problèmes de nature optiques nous avons exploré deux approches distinctes, la première est de type fonctionnel et s'intéresse exclusivement à la nature des sources excitatrices. Nous avons démontré à l'aide d'un spectroradiometre à large bande que les pigments les plus communs voyaient leur propriétés radiatives converger dans l'infrarouge moyen, à partir de 2 µm. Ce constat nous a permis de comprendre que les problèmes de variation d'absorptivité pouvaient se régler en travaillant avec des sources émettant dans la bande de l'infrarouge moyen. Cette intuition s'est révélée fructueuse puisque nous avons pu constater que ces problèmes étaient fortement atténués lorsque l'excitation se faisait avec des sources infrarouges émettant autour de 5 µm. L'autre approche repose sur les post-traitements, nous nous sommes interrogés sur les post-traitements les plus performants en matière d'atténuation de ces effets. Une large palette de traitement a été testée et nous avons réussi à identifier les plus intéressants. Ensuite nous avons combiné les deux types d'approches et nous avons obtenu des résultats accrus en matière d'atténuation des effets optiques et en matière de repérage des défauts.

Dans le chapitre III nous avons souhaité présenter de nouvelles méthodes de caractérisation thermique. Nous nous sommes intéressés à la mesure de la diffusivité thermique et à celle de l'effusivité thermique. Ces paramètres thermiques doivent est connus avec précision afin de déterminer la profondeur de défauts ou de pouvoir identifier la présence de défauts par les effets qu'ils induisent sur ces grandeurs. Comme nous l'avons expliqué, cette analyse s'effectue au moyen d'un tir laser bref et très localisé. Le modèle théorique permet de remonter à la diffusivité thermique au moyen d'un dépouillement des données tirés de l'analyse de l'évolution spatio-temporelle d'un profil de température. Trois modes de dépouillement nouveau ont été présentés dans ce chapitre : le premier mode appelé « méthode radiale » repose sur la mesure de l'évolution au cours du temps d'une longueur caractéristique de ce profil, sur le même principe il a été possible de déduire la diffusivité thermique à partir de l'analyse de l'évolution du maximum de tempéature et de l'analyse du moment de ce profil. Concernant l'effusivité thermique il a été possible en analysant l'équation du modèle de déterminer les conditions optimales du faisceau permettant d'extraire ce paramètre à partir d'une excitation locale. Habituellement cette grandeur était obtenue en excitant de façon étendue

l'échantillon. À notre connaissance ce travail est totalement nouveau et il nous a permis d'estimer avec une bonne pré ision cette grandeur. Ainsi il est possible d'envisager de pourvoir obtenir les deux grandeurs à partir d'un tir unique correctement configuré. Ce ravail a permis d'enrichir les possibilités de notre outil sur le plan de la caractérisation.

Le chapitre IV a é é pour nous l'occasion d'introduire dans notre champ d'é ude un nouveau type d'altération : la pollution des pierres par les remontées de sels hygroscopiques. Les spécialistes de la pierre nous ont sensibilisés à ce problème qui menace l'inté rité d'un grand nombre de biens culturels aussi ce travail a constitué un volet très important, au point de constituer un chapitre à lui tout seul. Les remonté s de sels ont des causes multiples que nous avons dé rites et tenté d'expliquer. Nous avons ensuite démontré la grande sensibilité de certains paramètres thermo physiques à la présence de ces sels. Nous en avons dénombré trois : la diffusivité thermique, l'effusivité thermique et l'é é ation de tempé ature à l'instant du flash (paramètre directement accessible). Le chapitre précédent nous a permis de pré enter des mé hodes permettant d'estimer ces grandeurs. Nous avons été en mesure de dé ontrer qu'il était possible de mettre en é idence la pré ence de chlorure de sodium (NaCl) dans des échantillons de pierres calcaires en observant la distorsion de ces grandeurs par rapport à des valeurs de référence. D'autres types de configurations expérimentales telles que l'ép isseur des é hantillons ou d'autres types de moyen d'excitation (créneau, aléatoire) ont permis de confirmer la pertinence de notre approche et d'é acuer un possible biais de mesure ré ultant du contexte expérimental. Des post traitements ont été testés et nous ont apporté la confirmation qu'il était possible de mettre en évidence de façon directe (visuelle) la présence du NaCl à partir d'un simple post-traitement. Enfin nous avons présenté des résultats de manipulation effectués sur différents sites qui ont confirmé notre approche expérimentale.

Enfin nous avons décidé de consacrer notre dernier chapitre (le chapitre V) aux ouvertures, car nos contacts tout au long de ses années avec des restaurateurs, des spécialistes du patrimoine, des physiciens et des industriels nous ont amenés à explorer une grande quantité de pistes de recherche qu'il n'a pas é é possible d'inclure dans les pré édents chapitres. Il nous a semblé toutefois nécessaire de réserver à ce travail prospectif une place dans ce manuscrit de thèse. Ce chapitre a été découpé en cinq parties. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté un travail de mise en é idence de défauts sur un é hantillon non plan constitué d'un cylindre en bois dé oré en surface et contenant plusieurs défauts dans son épaisseur. Nous avons effectué ce travail, car nous souhaitions connaitre l'influence que pouvait avoir la géo é rie d'une surface sur la détection. À notre grande surprise, cette influence s'est ré é é limitée en comparaison des aspects radiatifs de la couche picturale. L'utilisation de sources infrarouge nous a permis de détecter sans difficulté tous les défauts, confirmant ainsi les observations du chapitre II. Nous avons ensuite présenté un travail portant sur la dé ection de motif sous badigeon (chaux). Les œuvres sous badigeon sont trè nombreuses d'aprè les spécialistes, mais difficiles à repérer. Toutes nos tentatives de mise en évidences des motifs sous badigeon s'é aient jusqu'alors soldé s par des é hecs jusqu'au moment où nous avons songé à utiliser des sources é ettant dans l'infrarouge lointain, appelé aussi térahertz. Ces radiations sont connues pour leur fort pouvoir pénétrant. Il a ainsi été possible de repérer un pigment métallique sous badigeon. Nous avons ensuite testé une autre approche, l'excitation par induction (courants de Foucault), une nouvelle fois il a été possible de mettre en évidence le même motif à base de pigment mé allique, avec une ré olution spatiale amé iorée. Ce travail nous a dé ontré qu'il é ait possible d'accéder à des informations sous une couche de badigeon. C'est un ré ultat très encourageant. Nous nous sommes ensuite intéressés à la caractérisation de couche picturale. Les restaurateurs distinguent un grand nombre de types de peintures murales et l'un des types particuliers de peinture murale appelée fresque. La caractéristique de la fresque ré ide dans le mode d'application des pigments sur un enduit frais contrairement aux autres formes artistiques de peintures murales. Les pigments d'une fresque subissent lors du séchage de l'enduit une carbonatation ce qui donne à la fresque ses caracté istiques remarquables en terme de résistance. Thermiquement parlant nous avons postulé qu'il était possible de mettre en évidence les deux types de peinture en analysant leur réponse en température, car la fresque est assimilable à un monocouche thermique contrairement aux peintures murales qui se rapprochent d'un bicouche. Leurs rép nses doivent être distinctes et c'est ce que nous

avons dé ontré théoriquement et ensuite au moyen d'études sur site. Nous nous sommes aussi intéressés au suivi de restauration et avons dé ontré qu'il était possible de repérer différents types d'enduits de rebouchage et nous avons été capables de caractériser la technique employée en analysant le comportement thermique de la surface lors d'une excitation flash. Nous avons observé que lorsque les restaurations ne respectent pas les techniques employées originellement elles peuvent être à la source d'altérations, c'est ce que nous avons mis en évidence et expliqué dans un cas concret, celui d'un plafond décoré de la bibliothèque du Sénat. Pour finir, nous avons, forts de ses enseignements, présenté un projet d'amélioration de notre dispositif SAMMTHIR. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un transfert de technologie.

Comme nous pouvons le voir, ce travail de recherche est dense et nous a fortement mobilisé et passionné. Il est toujours frustrant de devoir conclure un travail de recherche, mais c'est avec beaucoup de confiance que nous mettons ce travail à la disposition des équipes désireuses de le poursuivre et de le compléter.

Bibliographie

[1] « EwaGlos ». HoRnEmann InSTITuTE, Edited by angela Weyer.

[2] M. Stefanaggi, « Les techniques de la peinture murale », *Matière Picturale Fresque Peint. Murale Cours Intensif Ravello*, vol. 2001, p. 29–45, 1997.

[3] G. Reille-Taillefert, *Conservation-restauration des peintures murales: De l'Antiquité à nos jours*. Editions Eyrolles, 2010.

[4] Cherfaoui, Mohammed. 2006. Essais non Destructifs (CND). Ed. Techniques Ingénieur

[5] J. Dumont-Fillon, *Contrôle non destructif (CND)*. Ed. Techniques Ingénieur, 1996.

[6] V. Tornari *et al.*, « Laser-based systems for the structural diagnostic of artwork: an application to XVII-century Byzantine icons », 2001, vol. 4402, p. 172‑183.

[7] T. Fricke-Begemann, G. Gülker, K. D. Hinsch, et H. Joost, « Remote localization of debonded areas in historical murals by TV-holography », *Non-Destr. Test. Microanal. Diagn. Conserv. Cult. Environ. Herit. Proc. Art*, vol. 99, p. 247–255.

[8] V. Tornari, A. Bonarou, V. Zafiropulos, C. Fotakis, N. Smyrnakis, et S. Stassinopulos, « Structural evaluation of restoration processes with holographic diagnostic inspection », *J. Cult. Herit.*, vol. 4, p. 347–354, 2003.

[9] J.-P. Chambard et A. Roche, « Defect detection of wall paintings in the Chateau de Versailles using TV-holography and IR thermography », in *Optical Metrology*, 2007, p. 66180Y–66180Y.

[10] K. D. Hinsch, K. Zehnder, H. Joost, et G. Gülker, « Monitoring detaching murals in the Convent of Müstair (Switzerland) by optical metrology », *J. Cult. Herit.*, vol. 10, n° 1, p. 94‑105, janv. 2009.

[11] E. Grinzato, P. Bison, S. Marinetti, et V. Vavilov, « Nondestructive evaluation of delaminations in fresco plaster using transient infrared thermography », *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 5, n° 4, p. 257‑274, déc. 1994.

[12] V. Vavilov, « Thermal non destructive testing : short history and state of art ».

[13] J.-L. Bodnar, « Crack detection by stimulated infrared thermography », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 65, n° 3, p. 31001, 2014.

[14] J.-L. Bodnar, J.-J. Metayer, K. Mouhoubi, et V. Detalle, « Non destructive testing of works of art by terahertz analysis », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 64, n° 2, p. 21001, 2013.

[15] E. Abraham et K. Fukunaga, « Terahertz imaging applied to the examination of artistic objects », *Stud. Conserv.*, 2014.

[16] K. Fukunaga et M. Picollo, « Terahertz time domain imaging for cultural heritage », *Insight-Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 56, n° 3, p. 142–146, 2014.

[17] J. Labaune et E. Abraham, « Le rayonnement térahertz pour l'analyse des matériaux du patrimoine culturel ». Techniques de l'ingénieur, 2014.

[18] K. Janssens, J. Dik, M. Cotte, et J. Susini, « Photon-based techniques for nondestructive subsurface analysis of painted cultural heritage artifacts », *Acc. Chem. Res.*, vol. 43, n° 6, p. 814–825, 2010.

[19] D. C. Creagh et D. A. Bradley, *Radiation in Art and Archeometry*. Elsevier, 2000.

[20] G. Zenzinger, J. Bamberg, W. Satzger, et V. Carl, « Thermographic crack detection by eddy current excitation », *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 22, n° 2‑3, p. 101–111, 2007.

[21] L. Cheng et G. Y. Tian, « Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current thermography », *Sens. J. IEEE*, vol. 11, n° 12, p. 3261–3268, 2011.

[22] L. Beck, « L'art à l'epreuve des rayons ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.reseau-canope.fr/tdc/fileadmin/docs/tdc_1030_radioactivite/article.pdf. [Consulté le: 05-déc-2014].

[23] L. Beck, « X, UV et particules au service du Patrimoine Culturel », 2011, p. 11‑17.
[24] V. Detalle, Q. Glorieux, R. Bruder, D. L'Hermite, et A. Semerok, « Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS): A new analytical technique for in situ study of painted artworks », *Actual. Chim.*, n° 312‑313, p. 98‑104, 2007.
[25] W. S. Beller, « Navy sees promise in infrared thermography for solid case checking », *Missiles Rockets*, vol. 16, n° 22, p. 1234–1241, 1965.
[26] F. E. Alzofon, « An infrared nondestructive testing system for rocket motors(IR nondestructive testing system for usability analysis in production line inspection of Polaris A-3 motors) », *Mater. Eval.*, vol. 23, p. 537–539, 1965.
[27] D. R. Green, « Principles and applications of emittance-independent infrared non-destructive testing », *Appl Opt*, vol. 7, n° 9, p. 1779‑1786, 1968.
[28] S. Merhib et R. Taylor, *Rep. Guide Therm. Test. Lit.*, 1972.
[29] J. Fourier, *Theorie analytique de la chaleur, par M. Fourier*. Chez Firmin Didot, père et fils, 1822.
[30] H. S. Carslaw et J. C. Jaeger, *Heat in solids*, vol. 19591. Clarendon Press, Oxford, 1959.
[31] M. N. Özışık, *Heat conduction*. New York: Wiley, 1993.
[32] J.-P. Monchau et J.-P. Monchau, « Mesure d'émissivité pour la thermographie infrarouge appliquée au diagnostic quantitatif des structures », phdthesis, Université Paris-Est, 2013.
[33] D. Pajani et L. Audaire, « Thermographie - Technologies et applications », *Techniques de l'ingénieur*, vol. r2741. 2013.
[34] C. Meola et G. M. Carlomagno, « Recent advances in the use of infrared thermography », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, n° 9, p. R27, 2004.
[35] R. D. H. Jr, *Infrared System Engineering*. Wiley, 2006.
[36] X. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley, 2001.

[37] S. Aze, J.-M. Vallet, A. Baronnet, et O. Grauby, « The fading of red lead pigment in wall paintings: tracking the physico-chemical transformations by means of complementary micro-analysis techniques », *Eur. J. Mineral.*, vol. 18, n° 6, p. 835‑843, janv. 2006.
[38] J. Désarnaud, O. Grauby, P. Bromblet, J.-M. Vallet, et A. Baronnet, « Growth and Dissolution of Crystal under Load: New Experimental Results on KCl », *Cryst. Growth Des.*, vol. 13, n° 3, p. 1067‑1074, mars 2013.
[39] J. M. Vallet, C. Gosselin, P. Bromblet, O. Rolland, V. Vergès-Belmin, et W. Kloppmann, « Origin of salts in stone monument degradation using sulphur and oxygen isotopes: First results of the Bourges cathedral (France) », *J. Geochem. Explor.*, vol. 88, n° 1–3, p. 358‑362, janv. 2006.
[40] D. Camuffo, M. Del Monte, C. Sabbioni, et O. Vittori, « Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area », *Atmospheric Environ. 1967*, vol. 16, n° 9, p. 2253‑2259, 1982.
[41] D. Camuffo, M. Del Monte, et C. Sabbioni, « Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 19, n° 4, p. 351–359, 1983.
[42] D. Camuffo, « The influence of run-off on weathering of monuments », *Atmospheric Environ. 1967*, vol. 18, n° 10, p. 2273‑2275, 1984.
[43] D. Camuffo et G. Sturaro, « Microclimate in churches during winter heating and risks to artwork conservation », *Proc Microelectron. Cult. Herit. Madess II*, p. 32‑44, 2002.
[44] D. Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage*. Elsevier, 1998.
[45] D. Gavrilov, R. G. Maev, et D. P. Almond, « A review of imaging methods in analysis of works of art: Thermographic imaging method in art analysis », *Can. J. Phys.*, vol. 92, n° 4, p. 341‑364, avr. 2014.

[46] B. F. Miller, « The feasibility of using thermography to detect subsurface voids in painted wooden panels », *J. Am. Inst. Conserv.*, vol. 16, n° 2, p. 27–35, 1977.
[47] G. Accardo, D. Camuffo, et G. Ferrari, « A micrometeorological study of the air inside the Scrovegni Chapel in Padua: results after the first two experimental campaigns », in *Deterioramento e conservazione della pietra: atti del 3° Congresso internazionale= Deterioration and preservation of stones: proceedings of the 3rd International Congress= La Déterioration et la préservation de la pierre: actes du 3ème Congrès international, Venezia, 24-27 octobre 1979*, 1982, p. 665–676.
[48] W. Esposti, S. Levrero, et G. Stella, « Analisi delle irregolarita de strati superficiali di murature portanti opere d'arte tramite termografia infrarossa e auscultazione dinamica », in *Atti 1a Conferenza Internazionale le Prove non Distruttive nella Conservazione delle Opere d'Arte= Proceedings of the 1st International Conference on Non-Distructive Testing in Conservation of Works of Art*, 1983, p. I–11.
[49] W. Esposti et I. Meroni, « Nondestructive testing: use of IR and acoustics methods in buildings pathology », in *SPIE's 1995 Symposium on OE/Aerospace Sensing and Dual Use Photonics*, 1995, p. 374–383.
[50] P. Baratono, F. Cardellini, M. Diana, C. Trombetta, et G. Venturini, « Termografia e analisi di immagine, ultime applicazioni su strutture architettoniche », in *2nd international conference on non-destructive testing, microanalytical methods and environment evaluation for study and conservation of works of art, Perugia 17-20 April 1988*, 1988, p. 9–1.
[51] O. Casazza et S. Giovannoni, « Preliminary Research for the Conservation of the Brancacci Chapel, Florence », *Conserv. Wall Paint.*, p. 13, 1991.
[52] G. S. Spagnolo, G. Guattari, E. Grinzato, P. G. Bison, D. Paoletti, et D. Ambrosini, « Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography », in *6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environnemental Heritage, Rome*, 1999, p. 385–398.
[53] E. Grinzato, C. Bressan, S. Marinetti, P. G. Bison, et C. Bonacina, « Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, n° 3, p. 165–169, 2002.
[54] J. L. Bodnar, J. C. Candore, J. L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, et J. M. Vallet, « Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings », *NDT E Int.*, vol. 49, p. 40–46, 2012.
[55] J. L. Bodnar, J. L. Nicolas, K. Mouhoubi, J. C. Candore, et V. Detalle, « Characterization of an Inclusion of Plastazote Located in an Academic Fresco by Photothermal Thermography », *Int. J. Thermophys.*, vol. 34, n° 8‑9, p. 1633–1637, 2013.
[56] J. L. Bodnar, K. Mouhoubi, G. Szatanik-Perrier, J. M. Vallet, et V. Detalle, « Photothermal thermography applied to the non-destructive testing of different types of works of art », *Int. J. Thermophys.*, vol. 33, n° 10‑11, p. 1996–2000, 2012.
[57] G. Szatanik, « Étude et restauration d'une peinture murale représentant Saint Christophe (collection Campana, Louvre): essai d'application de la thermographie infrarouge stimulée pour l'examen du support », 2004.
[58] D. Sidiropoulou-Velidou, A. Georgopoulos, et J. L. Lerma, « Exploitation of thermal imagery for the detection of pathologies in monuments », in *Progress in Cultural Heritage Preservation*, Springer, 2012, p. 97–108.
[59] N. Ludwig et E. Rosina, « Moisture detection through thermographic measurements of transpiration », 1997, vol. 3056, p. 78‑86.
[60] M. Milazzo, N. Ludwig, et G. Poldi, « Moisture detection in walls trough measurement of temperature », 1999. [En ligne]. Disponible sur: http://www.qirt.org/archives/qirt1998/papers/013.pdf.

[61] M. Milazzo, N. Ludwig, et V. Redaelli, « Evaluation of evaporation flux in building materials by infrared thermography », *Proc. QIRT02 Dubrov. Croat.*, p. 150–155, 2002.
[62] E. Grinzato, P. G. Bison, et S. Marinetti, « Monitoring of ancient buildings by the thermal method », *J. Cult. Herit.*, vol. 3, n° 1, p. 21‑29, avr. 2002.
[63] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, et G. L. Abbott, « Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity », *J. Appl. Phys.*, vol. 32, n° 9, p. 1679–1684, 1961.
[64] Y. H. Jo et C. H. Lee, « Quantitative modeling of blistering zones by active thermography for deterioration evaluation of stone monuments », *J. Cult. Herit.*, vol. 15, n° 6, p. 621‑627, nov. 2014.
[24] C. Daffara, L. Pezzati, D. Ambrosini, D. Paoletti, R. Di Biase, P. I. Mariotti, et C. Frosinini, « Wide-band IR imaging in the NIR-MIR-FIR regions for in situ analysis of frescoes»;, 2011, p. 808406‑808406‑12.
[66] C. Meola, G. M. Carlomagno, et L. Giorleo, « The use of infrared thermography for materials characterization », *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 155–156, p. 1132‑1137, nov. 2004.
[67] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, et G. Giorleo, « Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, n° 10, p. 1583, 2002.
[68] J.-C. Candoré, J.-L. Bodnar, F. Depasse, V. Detalle, et P. Grossel, « Approach of the characterization of delamination in mural paintings », *EJ Non-Destr Test*, p. 9, 2009.
[69] J. C. Candoré, J. L. Bodnar, V. Detalle, et P. Grossel, « Caractérisation de défaut situé dans une fresque par thermographie infrarouge stimulée ».
[70] J. M. Milne et W. N. Reynolds, « The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography », in *1984 Cambridge Symposium*, 1985, p. 119–122.

[71] W. N. Reynolds, « Thermographic methods applied to industrial materials », *Can. J. Phys.*, vol. 64, n° 9, p. 1150–1154, 1986.
[72] W. N. Reynolds, « Inspection of laminates and adhesive bonds by pulse-video thermography », *NDT Int.*, vol. 21, n° 4, p. 229–232, 1988.
[73] S. D. Cowell, D. D. Burleigh, et T. J. Murray, « Flash lamp heat flux requirements for thermographic inspection of fiber composite laminates », in *1989 Orlando Symposium*, 1989, p. 182–187.
[74] K. Blessley, C. Young, J. Nunn, J. Coddington, et S. Shepard, « The feasibility of flash thermography for the examination and conservation of works of art », *Stud. Conserv.*, vol. 55, n° 2, p. 107–120, 2010.
[75] V. P. Vavilov et R. Taylor, « Theoretical and practical aspects of the thermal nondestructive testing of bonded structures », *Acad. Press Res. Tech. Nondestruct. Test.*, vol. 5, p. 239–279, 1982.
[76] E. Grinzato, P. G. Bison, C. Bressan, et A. Mazzoldi, « NDE of frescoes by infrared thermography and lateral heating », in *Eurotherm Seminar*, 1998, vol. 60, p. 64–67.
[77] J. L. Bodnar *et al.*, « Cracks detection by a moving photothermal probe », *J. Phys. IV*, vol. 4, n° C7, p. C7–591, 1994.
[78] G. M. Carlomagno et C. Meola, « Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT », *NDT E Int.*, vol. 35, n° 8, p. 559–565, 2002.
[79] J.-C. Krapez et P. Cielo, « Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part I: 1-D Analysis », *J. Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 3, n° 2, p. 81–100, 1991.
[80] J.-C. Krapez, X. Maldague, et P. Cielo, « Thermographic Nondestructive Evaluation: Data Inversion Procedures Part II: 2-D Analysis and Experimental Results », *Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 3, n° 2, p. 101–124, 1991.

[81] K. Levenberg, « A method for the solution of certain non–linear problems in least squares », 1944.
[82] D. W. Marquardt, « An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters », *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 11, n° 2, p. 431–441, 1963.
[83] P. E. Gill et W. Murray, « Algorithms for the solution of the nonlinear least-squares problem », *SIAM J. Numer. Anal.*, vol. 15, n° 5, p. 977–992, 1978.
[84] C. Maierhofer, A. Brink, M. Röllig, et H. Wiggenhauser, « Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations », *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, n° 10, p. 731‑737, déc. 2005.
[85] R. E. Martin, A. L. Gyekenyesi, et S. M. Shepard, « Interpreting the results of pulsed thermography data », *Mater. Eval.*, vol. 61, n° 5, p. 611–616, 2003.
[86] J.-C. Candoré, J.-L. Bodnar, V. Detalle, G. Szatanik, et P. Grossel, « Radiométrie photothermique appliquée à la caractérisation de défauts situés dans des fresques ».
[87] D. BALAGEAS, « Défense et illustration de la thermographie stimulée impulsionnelle en évaluation non destructive ».
[88] J.-C. Krapez, F. Lepoutre, et D. Balageas, « Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated thermography », *J. Phys. IV*, vol. 4, n° C7, p. C7–47, 1994.
[89] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague, et A. Salerno, « New absolute contrast for pulsed thermography », in *Proceedings of QIRT*, 2002, p. 53–58.
[90] D. Gonzalez, Ibarra-Castanedo, M. Pilla, M. Klein, et X. MALDAGUE, « Automated differential absolute contrast », présenté à Quantitative Infrared Thermography, 2004.
[91] C. Ibarra-Castanedo *et al.*, « Thermographic nondestructive evaluation: overview of recent progress », in *AeroSense 2003*, 2003, p. 450–459.
[92] H. D. Benítez, C. Ibarra-Castanedo, A. Bendada, X. Maldague, H. Loaiza, et E. Caicedo, « Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 51, n° 3, p. 160‑167, janv. 2008.
[93] P. M. Delpech, D. Boscher, F. Lepoutre, A. Deom, et D. Balageas, « Time-resolved pulsed stimulated infrared thermography applied to carbon/carbon non destructive evaluation' », *Proc QIRT*, vol. 92, p. 201–206, 1992.
[94] M. Omar, M. I. Hassan, K. Saito, et R. Alloo, « IR self-referencing thermography for detection of in-depth defects », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 46, n° 4, p. 283‑289, avr. 2005.
[95] S. Shepard et R. J. Ducar, « Quantitative infrared defect detection in composite aerospace structures », *Soc. Adv. Mater. Process Eng. Bridg. Centuries SAMPEs Mater. Process. Technol.*, vol. 45, p. 1282–1290, 2000.
[96] S. M. Shepard, D. Wang, J. R. Lhota, B. A. Rubadeux, et T. Ahmed, « Reconstruction and enhancement of thermographic sequence data », 2002, vol. 4704, p. 74‑77.
[97] S. Shepard, Y. Hou, et J. Lhota, « Quantitative characterization of thermographic sequence data », in *Proc of 16th World Conference on NDT*, 2004.
[98] S. M. Shepard, « Flash thermography of aerospace composites », in *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires*, 2007.
[99] S. M. Shepard, J. Hou, J. R. Lhota, et J. M. Golden, « Automated processing of thermographic derivatives for quality assurance », *Opt. Eng.*, vol. 46, n° 5, p. 51008–51008, 2007.
[100] D. Balageas, B. Chapuis, G. Deban, et F. Passilly, « Evaluation quantitative de l'amélior tion apportée par la méthod TSR à la détection de défauts par thermographie stimulée impulsionnelle. Cas d'un patch composite instrumenté », *Congrès Fr. Therm. Energ. Transp. Durables*, 2010.
[101] J. M. Roche, F. H. Leroy, et D. Balageas, « Information condensation in defect detection using TSR coefficients images », *QIRT 2014 Bordx.*, p. 7–11.

[102] D. L. Balageas, B. Chapuis, G. Deban, et F. Passilly, « Thickness or diffusivity measurements from front-face flash experiments using the TSR (thermographic signal reconstruction) approach. », 2010.
[103] S. Sfarra *et al.*, « Importance of integrated results of different non-destructive techniques in order to evaluate defects in panel paintings: the contribution of infrared, optical and ultrasonic techniques », 2011, vol. 8084, p. 80840R‑80840R‑13.
[104] S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, D. Ambrosini, D. Paoletti, A. Bendada, et X. Maldague, « Defects detection and non-destructive testing (NDT) techniques in paintings: a unified approach through measurements of deformation », in *SPIE Optical Metrology 2013*, 2013, p. 87900G–87900G.
[105] P. Theodorakeas *et al.*, « The use of Pulsed Thermography for the investigation of art and cultural heritage objects ».
[106] X. Maldague et S. Marinetti, « Pulse phase infrared thermography », *J. Appl. Phys.*, vol. 79, n° 5, p. 2694–2698, 1996.
[107] C. I. Castanedo, « Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase », Université Laval, 2005.
[108] V. Vavilov, T. Kauppinen, et E. Grinzato, « Thermal characterization of defects in building envelopes using long square pulse and slow thermal wave techniques », *J. Res. Nondestruct. Eval.*, vol. 9, n° 4, p. 181–200, 1997.
[109] R. W. Arndt, « Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 53, n° 4, p. 246‑253, juill. 2010.
[110] P. Cotič, Z. Jagličić, et V. Bosiljkov, « Validation of non-destructive characterization of the structure and seismic damage propagation of plaster and texture in multi-leaf stone masonry walls of cultural-artistic value », *J. Cult. Herit.*, vol. 15, n° 5, p. 490‑498, sept. 2014.

[111] G. M. Carlomagno et P. G. Berardi, « Unsteady thermotopography in non-destructive testing », in *Proc. 3rd Biannual Exchange, St. Louis/USA*, 1976, vol. 24, p. 26.
[112] G. Busse, « Optoacoustic and photothermal material inspection techniques », *Appl. Opt.*, vol. 21, n° 1, p. 107–110, 1982.
[113] G. Busse, D. Wu, et W. Karpen, « Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography », *J. Appl. Phys.*, vol. 71, n° 8, p. 3962–3965, 1992.
[114] D. Wu et G. Busse, « Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials », *Rev. Générale Therm.*, vol. 37, n° 8, p. 693–703, 1998.
[115] J. L. Beaudoin, E. Merienne, R. Danjoux, M. Egee, L. R. Baker, et A. Masson, « Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry », in *1985 International Technical Symposium/Europe*, 1986, p. 285–292.
[116] P. K. Kuo, Z. J. Feng, T. Ahmed, L. D. Favro, R. L. Thomas, et J. Hartikainen, « Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique », in *Photoacoustic and Photothermal Phenomena*, Springer, 1988, p. 415–418.
[117] N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbinson, B. Hawtin, C. Ibarra-Castanedo, et X. Maldague, « Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT », *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 40, n° 3, p. 143–162, 2004.
[118] T. Sakagami et S. Kubo, « Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative nondestructive evaluations », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 43, n° 3–5, p. 211‑218, juin 2002.
[119] M. Choi, K. Kang, J. Park, W. Kim, et K. Kim, « Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography », *NDT E Int.*, vol. 41, n° 2, p. 119‑124, mars 2008.

[120] D. Wu, « Lockin thermography for defect characterization in veneered wood », *Proc. Quant. Infrared Thermogr.*, vol. 94, p. 298ą302, 1994.
[121] S. Guibert, « La thermographie infrarouge à détection synchrone appliquée aux matériaux composites », Citeseer, 2007.
[122] K. HAKEM, *Radiometrie Photothermique Sous Excitation Aleatoire. Application a La Caracterisation De Materiaux Semi-Transparents*. S.l.: s.n., 1994.
[123] C. Delebecq et J. L. Bodnar, « Approche théorique des possibilités de la radiométrie photothermique aléatoire face arrière en matière de mesure de diffusivité thermique », in *Colloque annuel-SFT*, 2000, p. 667–672.
[124] S. Oblin et J. L. Bodnar, « Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire et analyse paramétrique: Approche théorique des possibilités de la méthode en matière d'identification de système thermique », in *Société française des thermiciens. Congrès annuel*, 1999, p. 303–308.
[125] J. L. Bodnar, B. Lannoy, et L. Durville, « Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire par analyses corrélatoire et paramétrique », *Congrès Société Fr. Thermiciens*, p. 637–642, 1996.
[126] L. Durville, J. L. Bodnar, et Y. Gillet, « Parametric analysis applied to photothermal radiometry under random excitation », in *Proceedings of the 10th international conference on photoacoustic and photothermal phenomena*, 1999, vol. 463, p. 108–110.
[127] A. S. Brahim Djelloul et Université de Reims Champagne-Ardenne, *Radiométrie Photothermique Sous Excitation Aléatoire: Application À La Mesure De Propriétés Thermophysiques*. Reims: S.C.D. de l'Université, 2008.
[128] J. L. Bodnar, S. Brahim, P. Grossel, et V. Detalle, « Rear-Face Photothermal Analysis Under Random Excitation and Parametric Analysis: Application to Thermal-Diffusivity Measurement », *Int. J. Thermophys.*, vol. 33, n° 10‑11, p. 1976–1981, 2012.
[129] J. L. Bodnar, J. L. Nicolas, J. C. Candoré, et V. Detalle, « Non-destructive testing by infrared thermography under random excitation and ARMA analysis », *Int. J. Thermophys.*, vol. 33, n° 10‑11, p. 2011–2015, 2012.
[130] R. G. Gatto, « Estimation of instantaneous heart rate using video infrared thermography and ARMA models », University of Illinois at Chicago, 2009.
[131] H. Hotelling, « Analysis of a complex of statistical variables into principal components. », *J. Educ. Psychol.*, vol. 24, n° 6, p. 417, 1933.
[132] S. Hermosilla-Lara, P.-Y. Joubert, D. Placko, F. Lepoutre, et M. Piriou, « Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing », *Off. Natl. ETUDES Rech. Aerosp. ONERA-Publ.-TP*, n° 186, 2002.
[133] N. Rajic, « Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures », *Compos. Struct.*, vol. 58, n° 4, p. 521–528, 2002.
[134] S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, D. Ambrosini, D. Paoletti, A. Bendada, et X. Maldague, « Integrated approach between pulsed thermography, near-infrared reflectography and sandwich holography for wooden panel paintings advanced monitoring », *Russ. J. Nondestruct. Test.*, vol. 47, n° 4, p. 284‑293, avr. 2011.
[135] S. Marinetti *et al.*, « Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 46, n° 1‑2, p. 85–91, 2004.
[136] S. Wold, M. Sjöström, et L. Eriksson, « PLS-regression: a basic tool of chemometrics », *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 58, n° 2, p. 109–130, 2001.
[137] F. LÓPEZ, V. NICOLAU, X. MALDAGUE, et C. IBARRA-CASTANEDO, « Multivariate Infrared Signal Processing by Partial Least-Squares Thermography », *Qué. Can.*, 2013.

[138] F. Lopez, C. Ibarra-Castanedo, V. de Paulo Nicolau, et X. Maldague, « Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression », *NDT E Int.*, vol. 66, p. 128–138, 2014.
[139] P. Bison *et al.*, « Evaluation of frescoes detachments by partial least square thermography ».
[140] F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. M. Conde, J. M. Lopez-Higuera, et X. P. Maldague, « Automatic data processing based on the skewness statistic parameter for subsurface defect detection by active infrared thermography », in *Proc. QIRT*, 2008, vol. 9.
[141] F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. M. Conde, X. P. Maldague, et J. M. López-Higuera, « Enhanced contrast detection of subsurface defects by pulsed infrared thermography based on the fourth order statistic moment, kurtosis », in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, 2009, p. 72990U–72990U.
[142] F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. M. Conde, J. M. López-Higuera, et X. Maldague, « Infrared thermography processing based on higher-order statistics », *NDT E Int.*, vol. 43, n° 8, p. 661‑666, nov. 2010.
[143] V. Vrabie, E. Perrin, J. Bodnar, K. Mouhoubi, et V. Detalle, « Active IR thermography processing based on Higher Order Statistics for nondestructive evaluation », in *Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2012 Proceedings of the 20th European*, 2012, p. 894–898.
[144] J. L. Bodnar, V. Vrabie, E. Perrin, K. Mouhoubi, et V. Detalle, « Defect detection in mural painting by random infrared thermography associated with singular value decomposition and higher orders statistics », *Proc 11th Quant. InfraRed Thermogr. QIRT*.
[145] F. Galmiche, X. Maldague, S. Valler, et J.-P. Couturier, « Pulsed phased thermography with the wavelet transform », in *AIP Conference Proceedings*, 2000, vol. 509, p. 609‑616.
[146] X. Maldague, Y. Largouet, et J.-P. Couturier, « A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments », *Rev. Générale Therm.*, vol. 37, n° 8, p. 704–717, 1998.
[147] A. Darabi et X. Maldague, « Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE », *NDT E Int.*, vol. 35, n° 3, p. 165–175, 2002.
[148] T. D'Orazio, C. Guaragnella, M. Leo, et P. Spagnolo, « Defect detection in aircraft composites by using a neural approach in the analysis of thermographic images », *NDT E Int.*, vol. 38, n° 8, p. 665–673, 2005.
[149] X. Maldague, J. Cote, D. Poussart, et V. Vavilov, « Thermal Tomography for NDT of industrial materials », *CSNDT JournalCanada*, vol. 13, n° 3, p. 22–32, 1992.
[150] V. P. Vavilov, S. Marinetti, E. G. Grinzato, et P. G. Bison, « Thermal tomography characterization and pulse-phase thermography of impact damage in CFRP, or why end users are still reluctant about practical use of transient IR thermography », in *Proceedings of SPIE*, 1998, vol. 3361, p. 275.
[151] J. C. Candoré, « Détection et caractérisation des défauts par thermographie infrarouge stimulé : application au contrôle d'oeuvres d'art. », Université Reims Champagne-Ardenne, 2010.
[152] A. Bendada, S. Sfarra, D. Ambrosini, D. Paoletti, C. Ibarra-Castanedo, et X. P. V. Maldague, « Active thermography data processing for the NDT&E of frescoes », *QIRT 10*.
[153] G. T. Herman et G. T. Herman, *Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography*, vol. 21. Academic Press New York, 1980.
[154] C. Ibarra-Castanedo, D. Gonzalez, M. Klein, M. Pilla, S. Vallerand, et X. Maldague, « Infrared image processing and data analysis », *Infrared Phys. Technol.*, vol. 46, n° 1, p. 75–83, 2004.

[155] C. P. Naveira-Cotta, H. R. Orlande, R. M. Cotta, et J. S. Nunes, « Integral transforms, bayesian inference, and infrared thermography in the simultaneous identification of variable thermal conductivity and diffusivity in heterogeneous media », in *2010 14th International Heat Transfer Conference*, 2010, p. 341–350.
[156] D. Balageas, J.-M. Roche, et F.-H. Leroy, « Les images de coefficients de la méthode TSR (Ther-mographic Signal Reconstruction): un moyen simple et efficace de détecter et imager les défauts », 2013.
[157] D. BALAGEAS, « Mesure de diffusivité ou d'épaisseur par expérience flash en face-avant en utilisant l'approche TSR (thermographic signal reconstruction) ».
[158] R. Hidalgo-Gato, J. R. Andrés, J. M. López-Higuera, et F. J. Madruga, « Quantification by Signal to Noise Ratio of Active Infrared Thermography Data Processing Techniques », *Opt. Photonics J.*, vol. 3, n° 4, p. 20‑26, 2013.
[159] K. Baker, « Singular value decomposition tutorial », *Ohio State Univ.*, 2005.
[160] A. S. B. Djelloul, « Radiométrie photothermique sous excitation aléatoire: application à la mesure de propriétés thermophysiques », Thèse de doctorat, Université de Reims, 07-2008, 2008.
[161] J.-L. Bodnar et A. S. Brahim Djelloul, « CONTRÔLE NON DESTRUCTIF PAR RADIOMÉTRIE PHOTOTHERMIQUE ALÉATOIRE », présenté à Thermogram' 2003, Sénart.
[162] F. Cernuschi, A. Russo, L. Lorenzoni, et A. Figari, « In-plane thermal diffusivity evaluation by infrared thermography », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, p. 3988, 2001.
[163] J.-C. Krapez, *Mesure de l'effusivité thermique*. 2006.
[164] J. C. Batsale, D. Maillet, et A. Degiovanni, « Extension de la méthode des quadripôles thermiques à l'aide de transformations intégrales, calcul du transfert thermique au travers d'un défaut plan bidimensionnel. », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 37, n° 1, p. 111‑127, janv. 1994.
[165] D. Maillet, *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. Wiley, 2000.
[166] A. Chabas, D. Jeannette, et R. A. Lefèvre, « Crystallization and dissolution of airborne sea-salts on weathered marble in a coastal environment at Delos (Cyclades–Greece) », *Atmos. Environ.*, vol. 34, n° 2, p. 219‑224, janv. 2000.
[167] C. Hammecker, « Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en ø euvre », 1993.
[168] D. Benavente, M. G. del Cura, R. Fort, et S. Ordóñez, « Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone », *J. Cryst. Growth*, vol. 204, n° 1, p. 168–178, 1999.
[169] G. W. Scherer, « Crystallization in pores », *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, n° 8, p. 1347–1358, 1999.
[170] R. J. Flatt et G. W. Scherer, « Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: a critical review », in *MRS Proceedings*, 2002, vol. 712, p. II2–2.
[171] M. Steiger et S. Asmussen, « Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na2SO4–H2O and the generation of stress », *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 72, n° 17, p. 4291‑4306, sept. 2008.
[172] E. WINKLER, *Stone in Architecture. Properties, Durability.-313 pp., 219 figs., 63 tables*. Berlin/Heidelberg/New York (Springer), 1994.
[173] T. A. Cartwright, V. Vergès-Belmin, et International Scientific Committee for Stone, Éd., *Illustrated glossary on stone deterioration. Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre*. Paris: ICOMOS, 2008.
[174] P. Vázquez *et al.*, « Study of NaCl crystallization using infrared thermography », in *SWBSS 3rd International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, Brussels*, 2014.

[175] P. Vázquez *et al.*, « Infrared Thermography monitoring of the NaCl crystallisation process », *Infrared Phys. Technol.*, 2015.
[176] H. de Thury, « Sur le procédé proposé par M. Brard pour reconnaître immédiatement les pierres qui ne peuvent pas résister a la gelé (…)(On the procedure proposed by M. Brard for recognizing immediately the stones that cannot resist icing (…)) », in *Annales de Chimie et de Physique*, 1828, vol. 38, p. 160–192.
[177] J. Lavalle, « Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire », *Compte Rend Acad SciParis*, vol. 36, p. 493–495, 1853.
[178] S. Taber, « The growth of crystals under external pressure », *Am. J. Sci.*, n° 246, p. 532–556, 1916.
[179] C. W. Correns, « Growth and dissolution of crystals under linear pressure », *Discuss. Faraday Soc.*, vol. 5, p. 267–271, 1949.
[180] J. Desarnaud, F. Bertrand, et N. Shahidzadeh-Bonn, « Impact of the kinetics of salt crystallization on stone damage during rewetting/drying and humidity cycling », *J. Appl. Mech.*, vol. 80, n° 2, p. 20911, 2013.
[181] J. Desarnaud, « Mécanisme de croissance et dissolution de cristaux de KCl sous charge: Apport dans la connaissance des mé anismes d'altération des pierres par les sels », Université Paul Cézanne-Aix-Marseille III, 2009.
[182] H. Mortensen, « Die Salzsprengung und ihre Bedeutung für die regionalklimatische Gliederung der Wüsten », *Petermans Mitteilungen Aus Justus Perthes Geogr. Anst.*, vol. 79, p. 130–135, 1933.
[183] R. U. Cooke et I. J. Smalley, « Salt weathering in deserts », 1968.
[184] J. Philippon, D. Jeannette, et R.-A. Lefèvre, *La conservation de la pierre monumentale en France.* Presses du CNRS, 1992.
[185] S. Lorusso, M. Marabelli, et G. Viviano, *Pollution de l'environnement et impact sur les biens culturels*. EREC, 1999.

[186] M. Rautureau, « Tendre comme la pierre. », 1991.
[187] J.-P. Bigas, G. Martinet, A.-C. PERROT, et others, *Pierre et patrimoine: Connaissance et conservation*. Actes sud, 2009.
[188] B. Kévin, « Étude des propriétés hydriques et des mé anismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité », Thèse Université d Orléans, 2006.
[189] M. Denecker, « Le rôle des sulfates de sodium dans l'altération des pierres du patrimoine bâti : métho es indirectes d'identification pour l'approche expérimentale. », Université de Cergy-Pontoise, 2014.
[190] J. Berthonneau, « Le rôle des minéraux argileux dans la dégradation de la pierre : application à la conservation de la "Pierre du MIdi" en termes de durabilité et compatibilité des matériaux en oeuvre », Thèse Université Aix-Marseille, 2013.
[191] C. Thomachot-Schneider *et al.*, « Relationship between Na2SO4 concentration and thermal response of reconstituted stone in the laboratory and on site », *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, n° 9, mai 2016.
[192] C. Thomachot-Schneider, M. Gommeaux, G. Fronteau, C. T. Oguchi, S. Eyssautier, et B. Kartheuser, « A comparison of the properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium) », *Environ. Earth Sci.*, vol. 63, n° 7‑8, p. 1447‑1461, août 2011.
[193] S. SFARRA, J.-L. BODNAR, D. AMBROSINI, K. MOUHOUBI, et D. PAOLETTI, « Edge Detection Combined with Optical and Infrared NDT Techniques: an Aid for Wooden Samples with Complex Surface and Subsurface Defects ».
[194] M. H. A. L. Youcef, V. Feuillet, L. Ibos, Y. Candau, P. Balcon, et A. Filloux, « Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography », *Quant. InfraRed Thermogr. J.*, vol. 8, n° 1, p. 65‑87, juin 2011.

Annexes

A. Annexe chapitre I

29.1. Exemple de résolution d'un problème de conduction

Cet exemple a au moins deux objectifs, il permet tout d'abord de ré oudre une configuration expérimentale que nous rencontrerons régulièrement, celle du mur plan soumis à une impulsion de Dirac. Il permet d'introduire une autre grandeur thermophysique trè inté essante sur laquelle nous reviendrons abondamment dans les prochains chapitres, l'**effusivité thermique b** et enfin il est informatif, car il permet d'avoir un exemple de ré olution.

Soit un échantillon plan, parallélépipédique, semi-infini latéralement (en x et y), d'ép isseur L, adiabatique (convection nulle sur toutes les parois), de surface unité et excité en face avant, en x=L par une impulsion de Dirac surfacique Q.δ(t). Initialement l'é hantillon est en éq ilibre thermique avec l'environnement à un tempé ature de 0 °C.

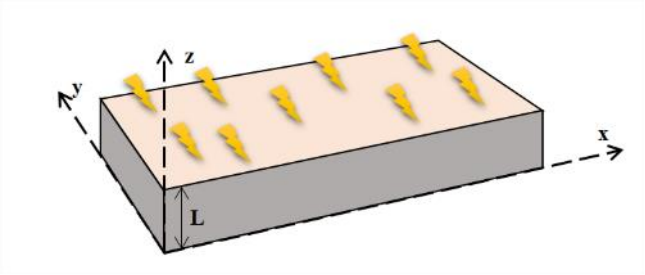


Figure 463 : Échantillon soumis à un Dirac surfacique

Le système différentiel à résoudre est donc :

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \dfrac{1}{a}\dfrac{\partial T}{\partial t} = -\dfrac{\mathrm{P}(x,t)}{\lambda} \\ \left.\dfrac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \quad \text{en x=0, pour t>0} \\ \left.\dfrac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L} = 0 \quad \text{en x=L, pour t>0} \\ T(x,0) = 0 \end{cases}$$

Pour ré oudre ce syste e gén ral, nous avons mis en œuvre le formalisme de **Green**. Il consiste d'abord à trouver une solution au syste e diffé entiel homogè pré éd nt.

Les bibliothèques de fonctions de Green donnent pour une série de configurations géométriques des solutions à ces systèmes homogènes, dans notre cas la solution est :

$$G(x,t \mid x',\tau) = \frac{1}{L}\left[1 + 2\sum_{m=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{am^2\pi^2}{L^2}(t-\tau)\right).\cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right).\cos\left(\frac{m\pi x'}{L}\right)\right]$$

Dans le cas où la température initiale est égale à la température extérieure = 0°C

Dans le cas où le syste e n'est soumis à aucune perte thermique, le formalisme des quadripôles indique que la distribution de tempé ature dans l'échantillon est donné par :

$$T(x,t)=\frac{a}{\lambda}\int_{\tau=0}^{t} a\tau\int_{L} G(x,t\mid x',\tau).g(x',\tau).dx'$$

Comme la source excitatrice est localisé en x'=L, on a :

$$\cos\left(\frac{m\pi x'}{L}\right)=\cos\left(\frac{m\pi L}{L}\right)=\cos(m\pi)=(-1)^m$$

Cas de l'analyse en face avant :

Plaçons-nous dans le cas où l'observation x se fait du côté de l'excitation, donc en x=L, on a donc :

$$\cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)=\cos\left(\frac{m\pi L}{L}\right)=\cos(m\pi)=(-1)^m$$

D'où l'expression de la température :

$$T(L,t)=\frac{a}{\lambda}\int_{0}^{t}\frac{1}{L}\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}(-1)^m.(-1)^m.\exp\left[-\frac{am^2\pi^2}{L^2}(t-\tau)\right].Q.\delta(t-\tau)\right)$$

$$T(L,t)=\frac{aQ}{\lambda L}\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\exp\left[-\frac{am^2\pi^2}{L^2}.t\right]\right)$$

Avec $a=\dfrac{\lambda}{\rho C_p}\Rightarrow\dfrac{a}{\lambda}=\dfrac{1}{\rho C_p}$ d'où la formule de Parker en face avant :

$$\boxed{T(L,t)=\frac{Q}{\rho C_p L}\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty}\exp\left[-\frac{m^2\pi^2at}{L^2}\right]\right)}$$

Étude du comportement limite de cette équation :

Quand $t\to\infty$, on a $\exp(-\infty)\to 0$, d'où :

$$T_{\text{temps long}}\sim\frac{Q}{\rho C_p L}$$

Lorsque $t\to 0$, l'échantillon s'apparente à un mur semi-infini, dans ce cas la fonction de Green à prendre en compte est :

$$G(x,t\mid x',\tau)=\frac{1}{\sqrt{4\pi a\tau}}\exp\left[\frac{(x-x')^2}{4a(t-\tau)}\right]$$

D'où l'expression de la température en supposant l'échantillon initialement à l'équilibre thermique avec son environnement et à une température de 0 °C :

$$T(0,t)=\frac{a}{\lambda}\int_{0}^{t} a\tau\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{1}{\sqrt{4\pi a\tau}}\exp\left[\frac{(x-x')^2}{4a(t-\tau)}\right].2Q.\delta(x',\tau)\,dx'$$

Dans notre cas d'étude l'excitation se fait du côté de la mesure, elle est de durée nulle (fonction de Dirac) et elle dépose son énergie 2Q, car l'intégrale va de -∞ à +∞ alors que dans cas de figure nous considérons un milieu semi-infini avec une densité d'énergie déposée Q, d'où :

$$T(t) = \frac{a}{\lambda}\frac{1}{\sqrt{\cancel{4}\pi a t}}.\cancel{2}Q$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$T(t) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda}\frac{Q}{\sqrt{\pi t}}$$

On a : $$\left.\begin{array}{l} a = \dfrac{\lambda}{\rho C_p} \Rightarrow \mu C_p = \dfrac{\lambda}{a} \\ b = \sqrt{\lambda \rho C_p} \end{array}\right\} \Rightarrow b = \sqrt{\frac{\lambda^2}{a}} = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$$

D'où aux temps courts :

$$\boxed{T(t) = \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}}}$$

On voit apparaitre une autre grandeur importante : l'**effusivité thermique b.** L'effusivité est une grandeur qui se manifeste toujours aux temps courts (voir Figure 464), elle détermine la capacité d'un matériau à échanger rapidement de l'énergie avec son environnement, elle s'exprime en [$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$] alors que la **diffusivité thermique a** gouverne la conduction au sein du matériau. Cette effusivité peut se mesurer de différentes manières comme nous le verrons dans les prochains chapitres.

Représentation graphique

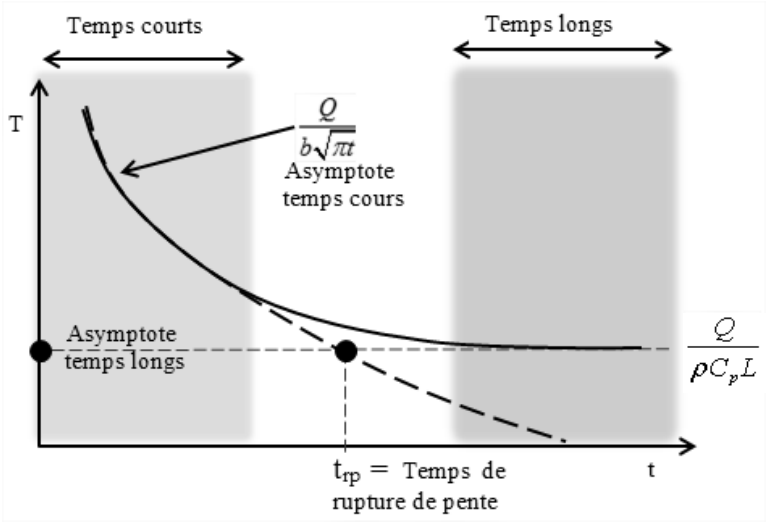


Figure 464 : Réponse impulsionnelle 1D d'un mur

Ce graphique montre clairement que les asymptotes de la réponse de **Parker** se croisent en t_{rp} (temps de rupture de pente). On a alors en ce point :

$$\frac{\cancel{\Phi}}{\rho C_p L} = \frac{\cancel{\Phi}}{b\sqrt{\pi t_{rp}}} \text{ avec } b = \sqrt{\lambda \rho C_p} \text{ d'où :}$$

$$\frac{1}{\rho C_p L} = \frac{1}{\sqrt{\lambda \rho C_p \pi t_{rp}}} \quad \text{d'où : } \mu C_p L = \sqrt{\lambda \rho C_p \pi t_{rp}}$$

Après simplification on obtient :

$$t_{rp} = \frac{L^2}{\pi . a}$$

Ce qui donne finalement :

$$a = \frac{L^2}{\pi . t_{rp}}$$

Cette méthode permet ainsi d'estimer **a** à partir du temps de rupture de pente. Il faut toutefois garder à l'esprit que cette méthode ne prend pas en compte les pertes ce qui a pour effet de surestimer légèrement la valeur de a et de b.

B. Annexes du chapitre II

29.2. Résultats Analyse d'un résultat de simulation sous excitation créneau à l'aide de post-traitements (9.2.1)

a) Analyse à l'aide d'un filtre « passe-bas »

Les trois résultats ci-dessous ont été obtenus en appliquant un filtre passe bas. Ce traitement effectue une intégration sur un intervalle de temps ; les trois résultats correspondent à trois durées d'intégration différentes : courte, moyenne et longue.

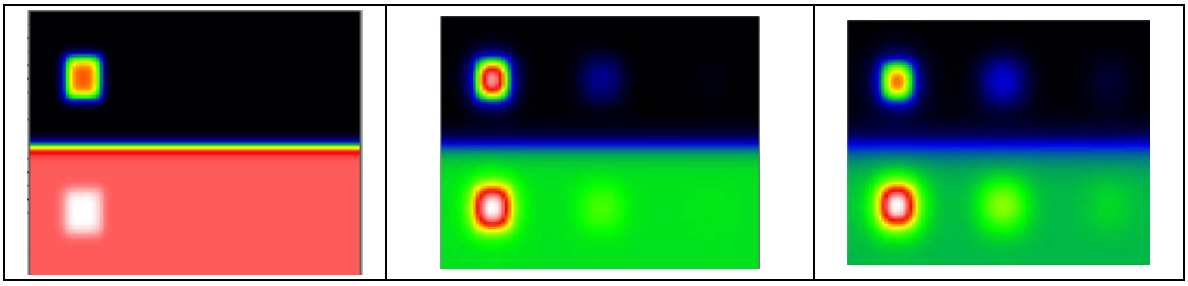


Figure 465 : Résultats obtenus après application d'un filtre "passe-bas".

Nous n'observons pas d'atténuation des effets radiatifs, les deux zones d'absorptivité différentes sont marquées par des fonds de couleurs différentes.

b) Analyse par étude de contraste et moyenne effusivité

Observons s'il est possible d'obtenir un meilleur résultat avec l'exploitation du contraste thermique absolu.

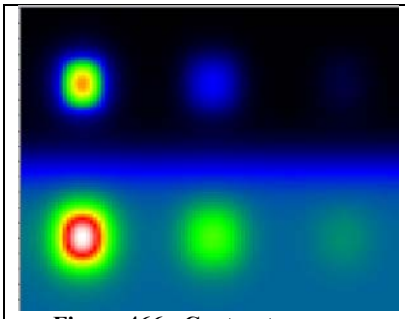


Figure 466 : Contraste somme

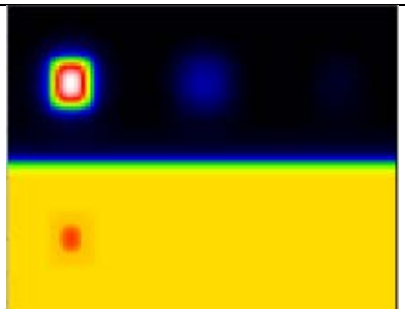


Figure 467 : Contraste temps du max

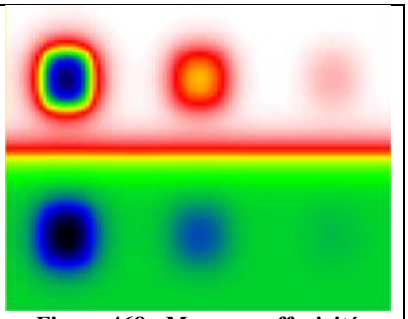
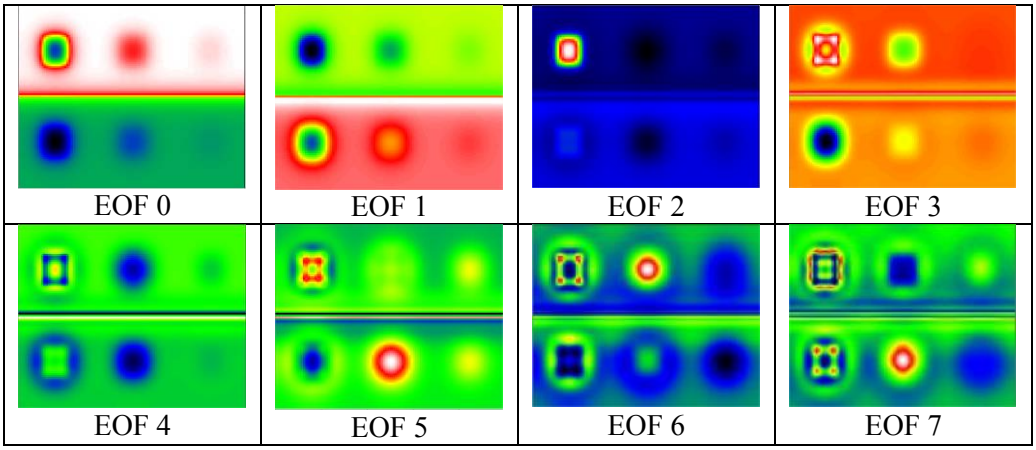


Figure 468 : Moyenne effusivité

Les résultats obtenus à partir de ces traitements ne sont pas satisfaisants, car on n'observe pas d'atténuation des effets radiatifs.

c) Décomposition SVD

Les résultats suivant ont été obtenue en appliquant à la simulation une décomposition SVD, les images correspondent aux 8 premières EOF (composantes de la décomposition).

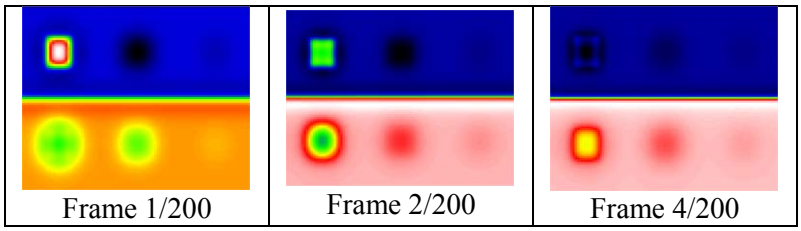


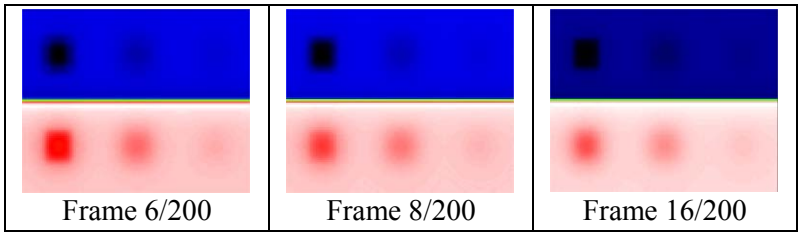
La décomposition SVD permet de mettre en évidence tous les défauts et de réduire significativement les effets radiatifs à partir de l'EOF 4, on observe néanmoins la présence d'artefacts numériques lies probablement au maillage utilisé pour la simulation.

d) PPT (Analyse de Fourier temporelle)

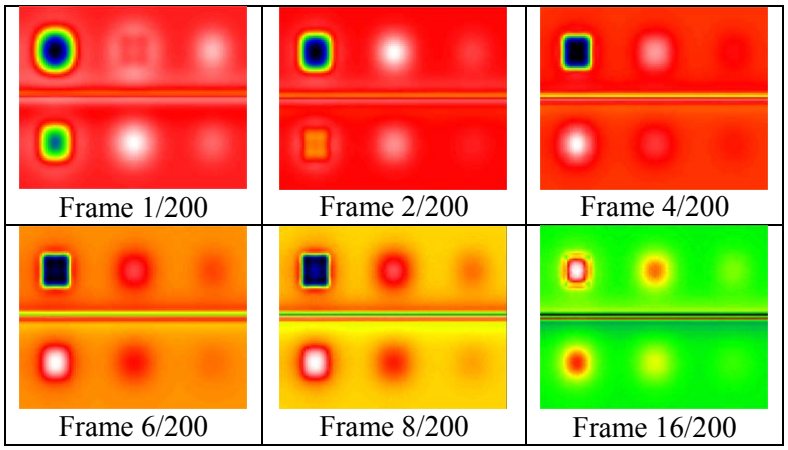
Deux analyses ont été effectuées en PPT : une analyse en module et une analyse en phase. Les différentes images correspondent au balayage en fréquence.

Analyse en module





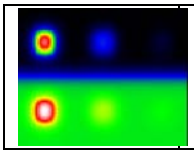
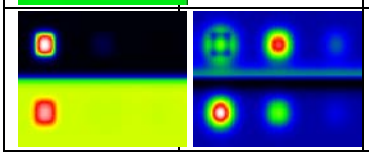
Analyse en phase



L'analyse en module ne donne aucun résultat satisfaisant alors que l'analyse en phase permet d'atté uer fortement l'é art de contraste entre les deux zones de l'échantillon.

e) TSR

Nous avons ensuite étudié les possibilités du TSR. Le tableau suivant regroupe tous les résultats obtenus de l'ordre 0 à 6. Tous les coefficients ont é é repré enté à chaque ordre.

							Ordre 0
							Ordre 1

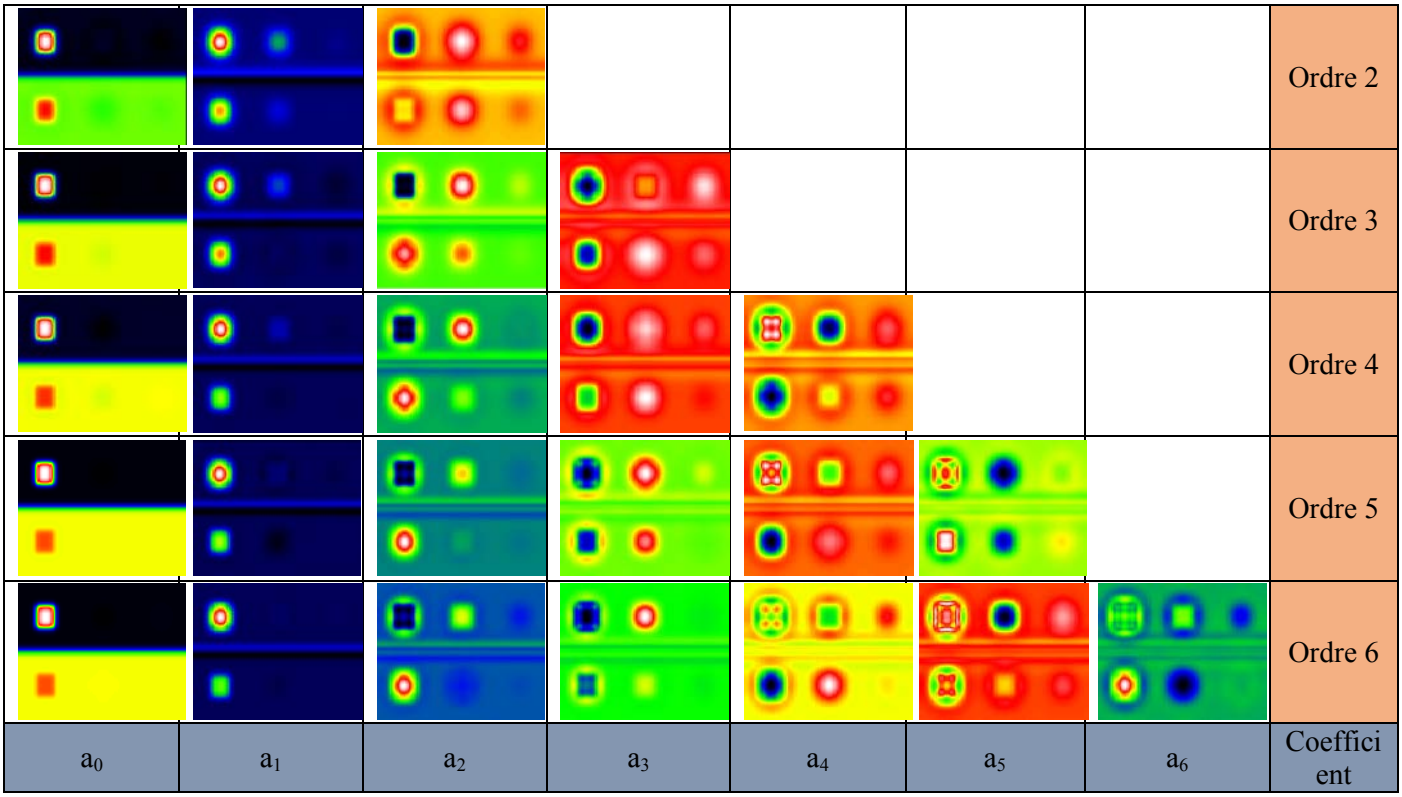
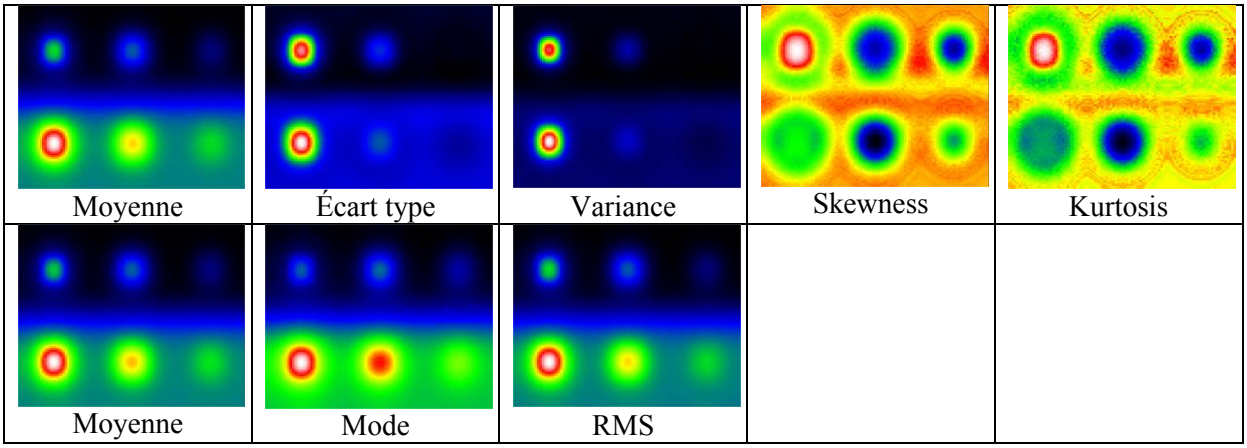


Figure 469 : Résultat TSR sur modélisation d'un échantillon de plâtre avec défauts

Les résultats obtenus sont très encourageants puisque le TSR permet non seulement de mettre en évidence les six défauts, mais aussi de réduire les effets radiatifs à partir de la première composante, quel que soit l'ordre du polynôme. Des artefacts numériques sont présents.

f) HOS et autres statistiques

Les HOS recouvrent des statistiques d'ordre 3 (*Skewness*) et 4 (*Kurtosis*), mais comme indiqué en page 91 nous exploitons aussi des statistiques d'ordre 2 comme la variance.

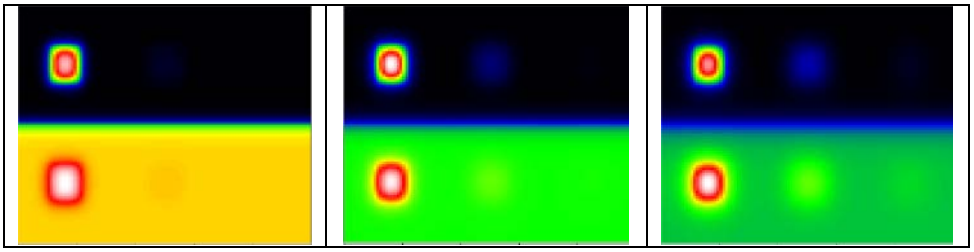


L'observation des résultats nous montre qu'aucun traitement ne donne de bons résultats en termes d'atténuation des effets radiatifs à l'exception du *Skewness* et du *Kurtosis*. Ce résultat montre bien l'intérêt des statistiques d'ordre supérieur. On peut faire remarquer que tous les défauts sont correctement repérés, mais que la finesse de détection (forme, taille) n'est pas satisfaisante pour ces deux traitement.

29.3. Résultats Analyse d'un résultat de simulation sous excitation PRBS à l'aide de post-traitements (9.2.2)

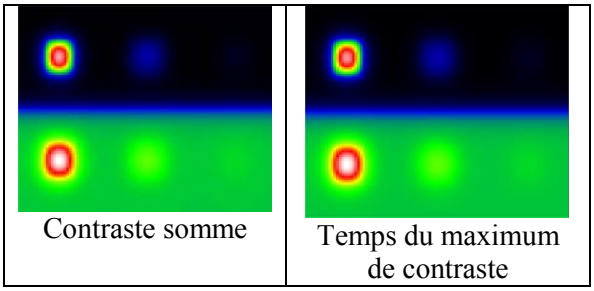
g) Analyse à l'aide d'un filtre « passe-bas »

Les trois images correspondent à des durées variables d'intégration.



Ce type de traitement ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants.

h) Analyse par étude de contraste

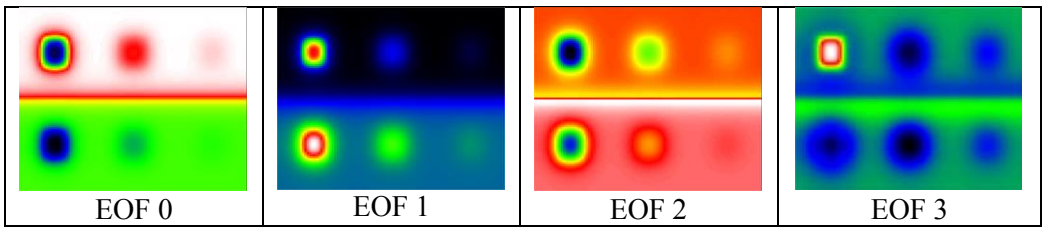


Contraste somme | Temps du maximum de contraste

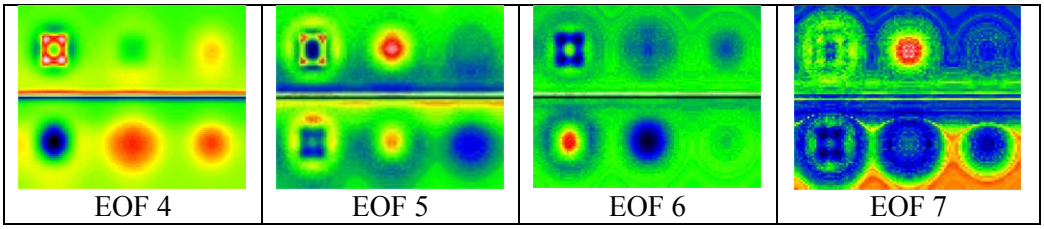
335

Les deux zones d'émissivité sont aisément repérables, on peut conclure que les traitements à base de contraste n'apportent pas de bénéfice avec en terme d'atténuation de la couche picturale.

i) Décomposition SVD



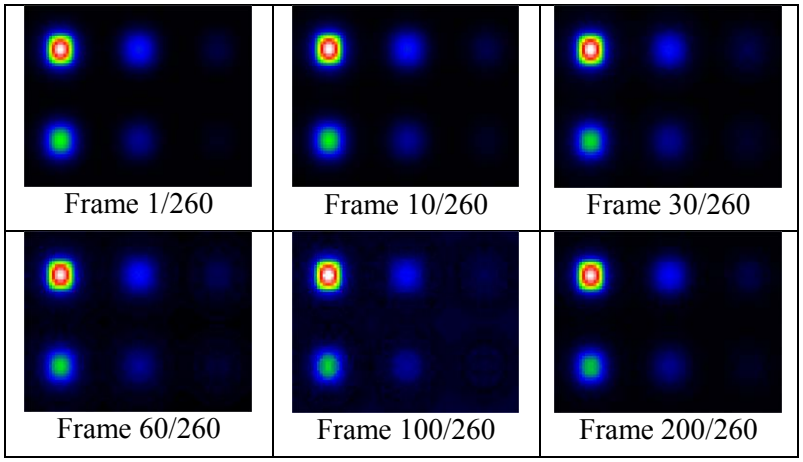
EOF 0 | EOF 1 | EOF 2 | EOF 3



On observe une bonne atténuation de la couche picturale et une bonne détection des défauts à partir de l'EOF 2.

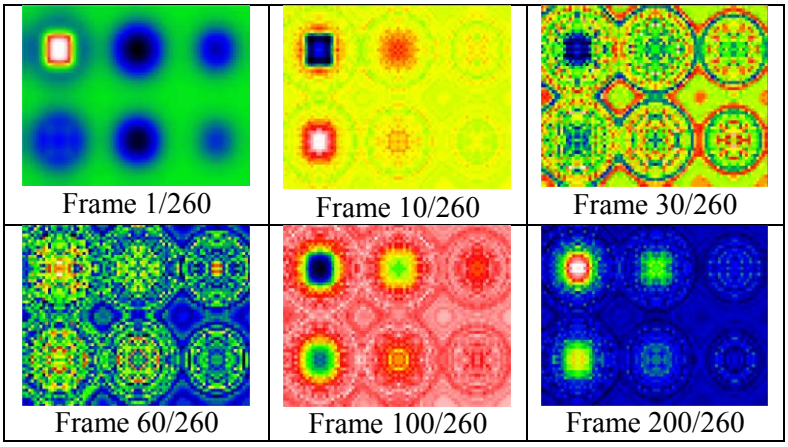
j) PPT (analyse de Fourier temporelle)

Analyse en module



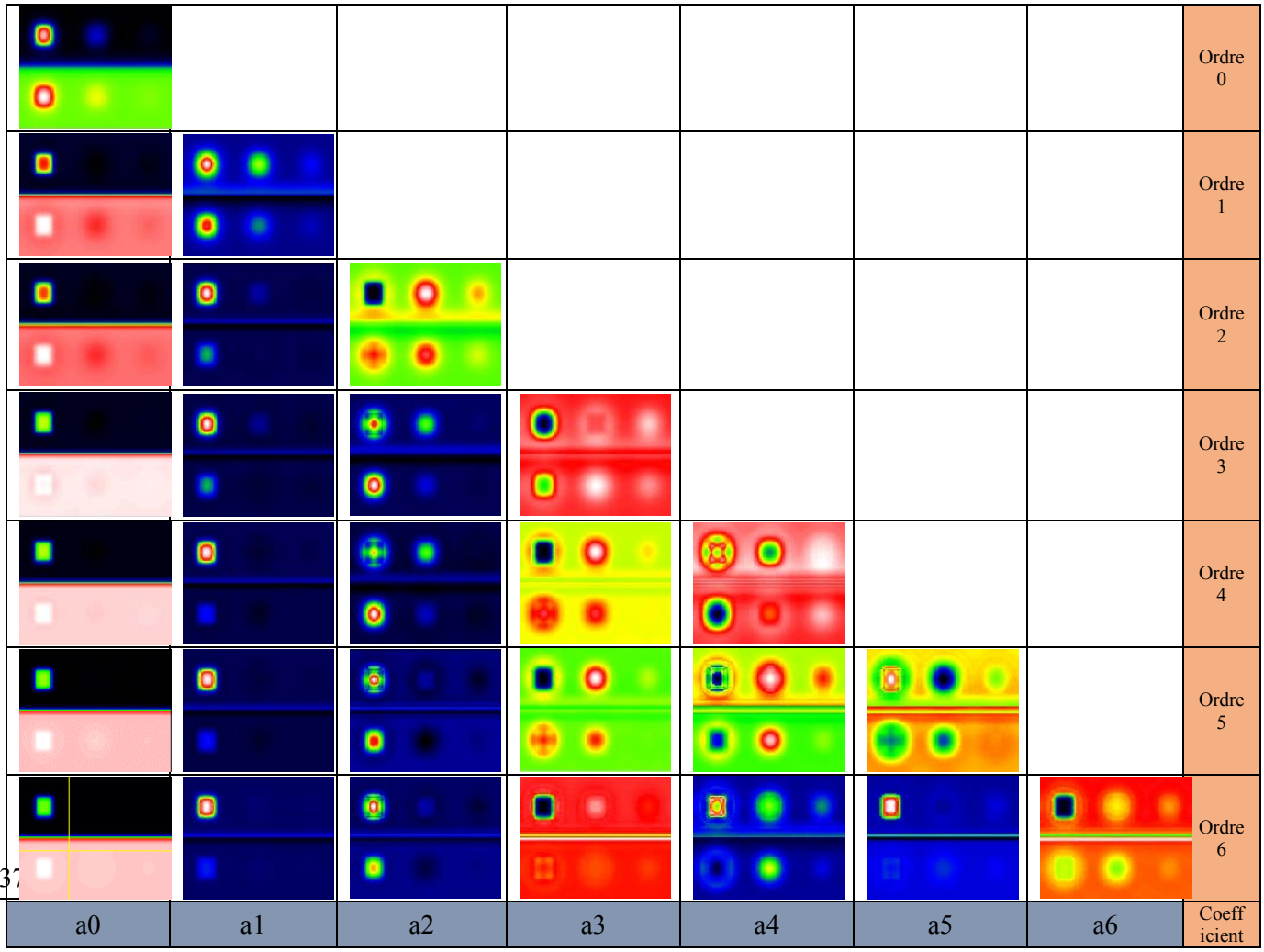
L'analyse en module donne de bons résultats contrairement à ce qui a été observé en dans le cas d'une excitation créneau (voir page 332), nous verrons si ce résultat est confirmé par la suite. En matière de détection les défauts les plus profonds se devinent, autre point intéressant : on peut remarquer que les signatures sont classées selon la profondeur.

Analyse en phase



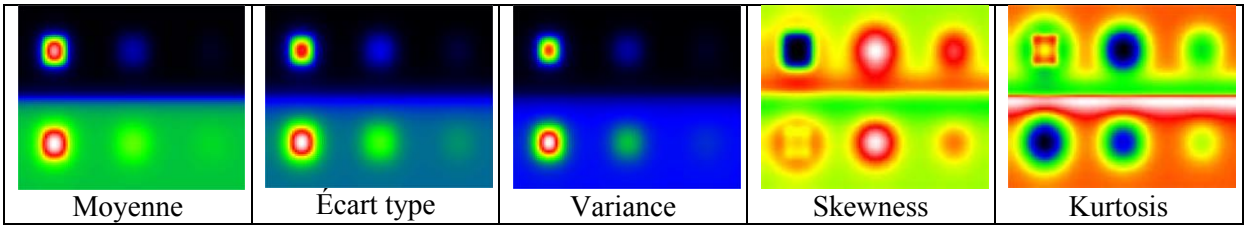
L'atténuation des effets radiatifs est bonne, tous les défauts sont mis en évidence, mais on remarque la présence de nombreux artefacts numériques liés au maillage utilisé.

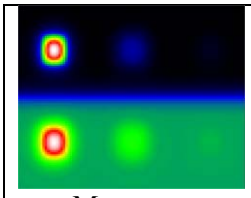
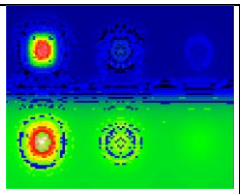
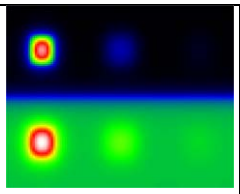
k) TSR



Le TSR donne de bons ré ultats aussi bien en détection que sur le plan de l'atténuation des effets radiatifs. Nous obtenons de bons résultats à partir du coefficient 1 quel que soit l'ordre de la décomposition polynomiale, de plus les défauts sont correctement détectés et classés selon leurs profondeurs.

I) HOS et autres statistiques



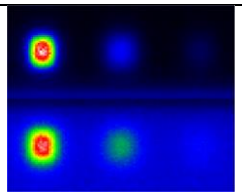
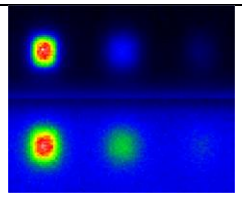
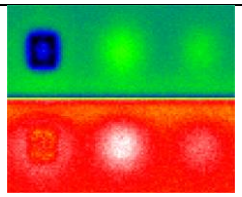
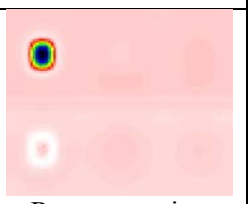
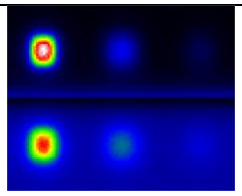
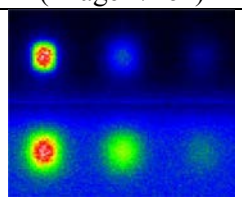
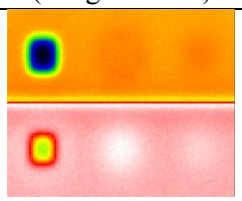
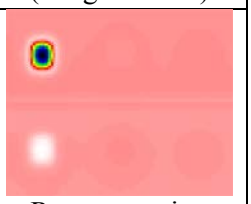
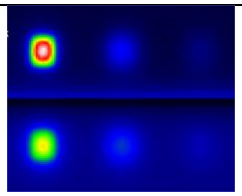
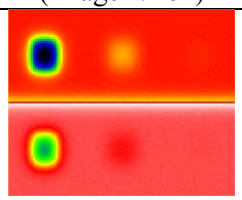
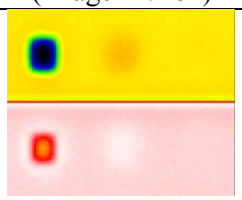
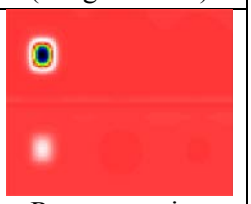
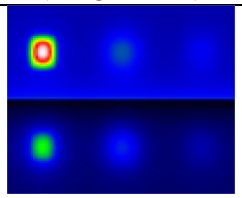
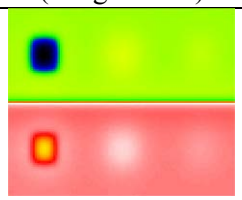
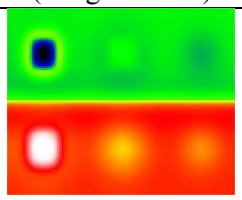
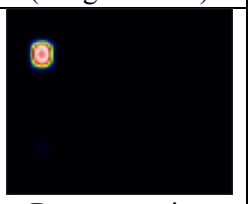
 Moyenne	 Mode	 RMS		

Le Skewness et le Kurtosis permettent d'atténuer les effets radiatifs, la détection des défauts est bonne, mais présente des artefacts sur le plan de la forme. On note que les défauts sont correctement classés.

m) Reconstruction paramétrique ARMA

Nous avons appliqué une reconstruction paramétrique en faisant varier le nombre de paramètres n_a et n_b fixés à 8, 6, 4 et 2. La succession des images sur chacune des lignes du tableau correspond à la progression temporelle de la réponse impulsionnelle reconstruite.

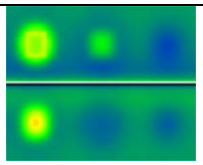
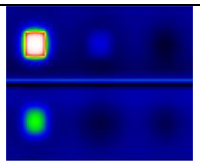
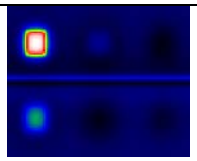
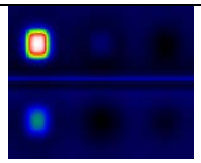
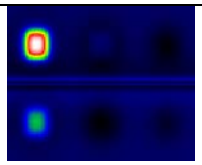
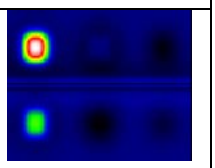
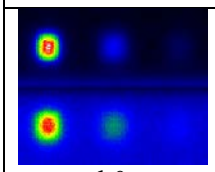
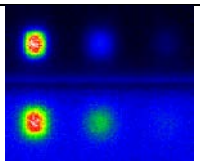
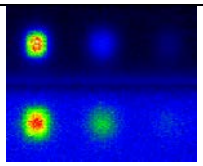
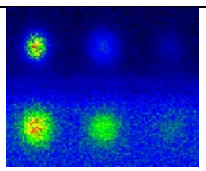
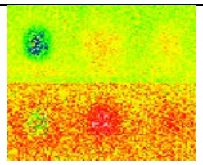
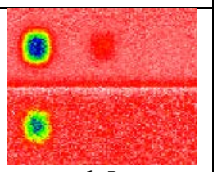
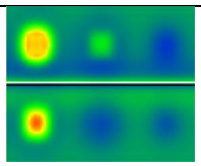
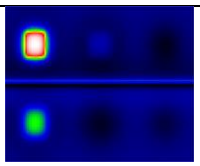
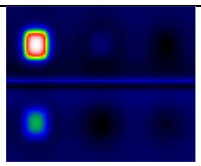
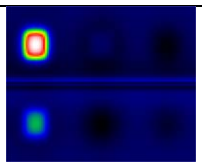
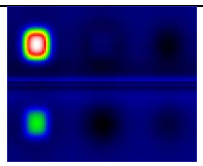
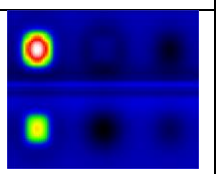
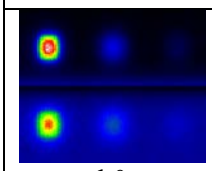
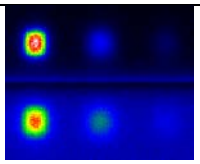
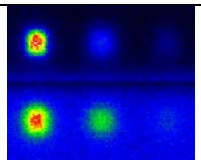
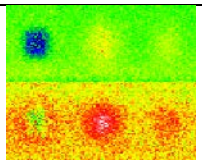
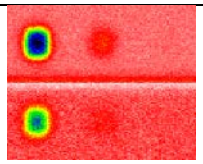
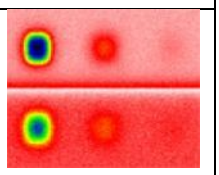
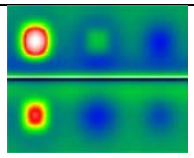
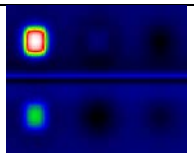
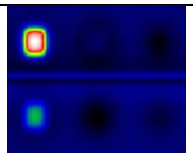
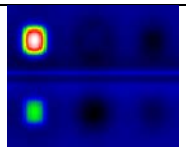
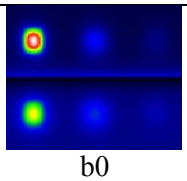
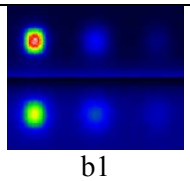
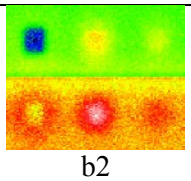
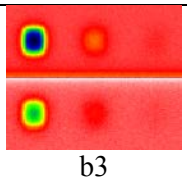
Analyse de la réponse impulsionnelle à différents instants

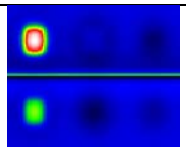
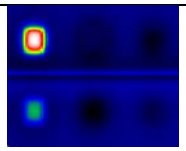
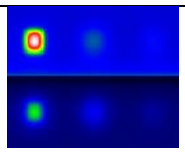
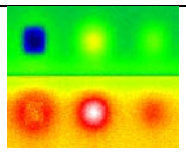
Nombre de paramètres				
ARMA 8 8	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 1/261)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 4/261)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 11/261)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 82/261)
ARMA 6 6	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 1/261)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 4/261)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 11/261)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 82/261)
ARMA 4 4	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 1/261)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 4/261)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 11/261)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 82/261)
ARMA 2 2	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 1/261)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 4/261)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 4/261)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 4/261)

Nous avons une bonne réduction des effets radiatifs comme on peut le constater par exemple pour la reconstruction à 6 paramètres (image 4). Les défauts sont correctement localisés, leurs formes sont respecté s et l'intensité de leur signature est corrélé à leur profondeur. On peut s'interroger sur ce qui est à l'origine de cette observation. Ce ré ultat est-il reproductible sur d'autre é hantillon ? Nous vérifierons ce point.

Images de paramètres

Les images de paramètres sont constituées des valeurs de chacun des paramètres n_a et n_b de la reconstruction

Nombre de paramètres						
ARMA 8 8	 a0	 a1	 a2	 a3	 a4	 a5
	 b0	 b1	 b2	 b3	 b4	 b5
339						
ARMA 6 6	 a0	 a1	 a2	 a3	 a4	 a5
	 b0	 b1	 b2	 b3	 b4	 b5
ARMA 4 4	 a0	 a1	 a2	 a3		
	 b0	 b1	 b2	 b3		

ARMA 2 2	 a0	 a1
	 b0	 b1

Les images de paramè res permettent d'obtenir des ré ultats trè encourageants. Les effets radiatifs sont fortement réduits, la détection est correcte puisque tous les défauts sont repérés dans la plupart des cas, leur géométrie est respectée et sont généralement correctement classés.

29.4. Résultats Étude de l'éprouvette de laboratoire, « Le Picasso » (9.3.1)

a) Analyse à l'aide d'un filtre « passe-bas »

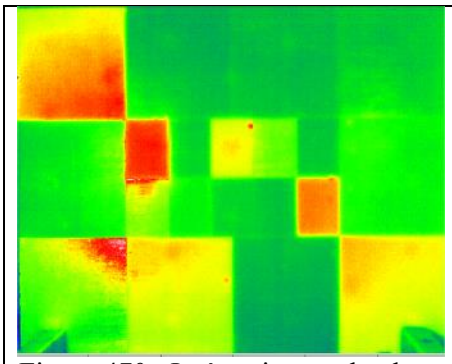


Figure 470 : Intégration sur la phase d'échauffement

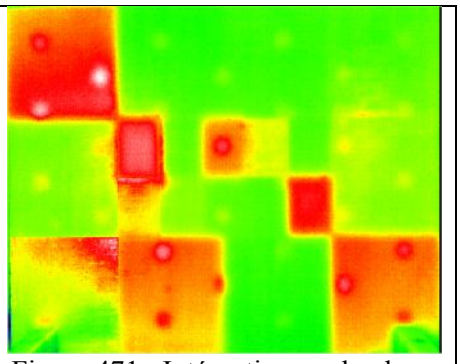
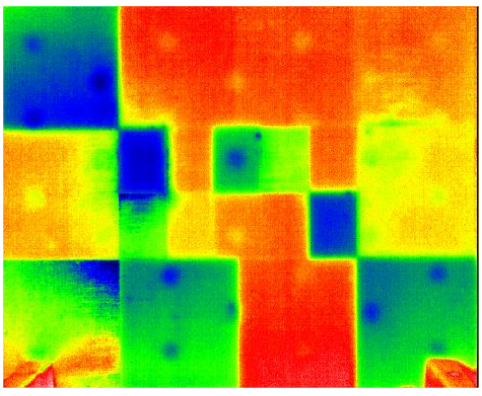


Figure 471 : Intégration sur la phase de refroidissement

Nous avons appliqué le filtre en phase de monté et de descente sans constater d'amé ioration sur le plan de la détection. Ceci confirme les résultats de simulation.

b) Contraste d'effusivité

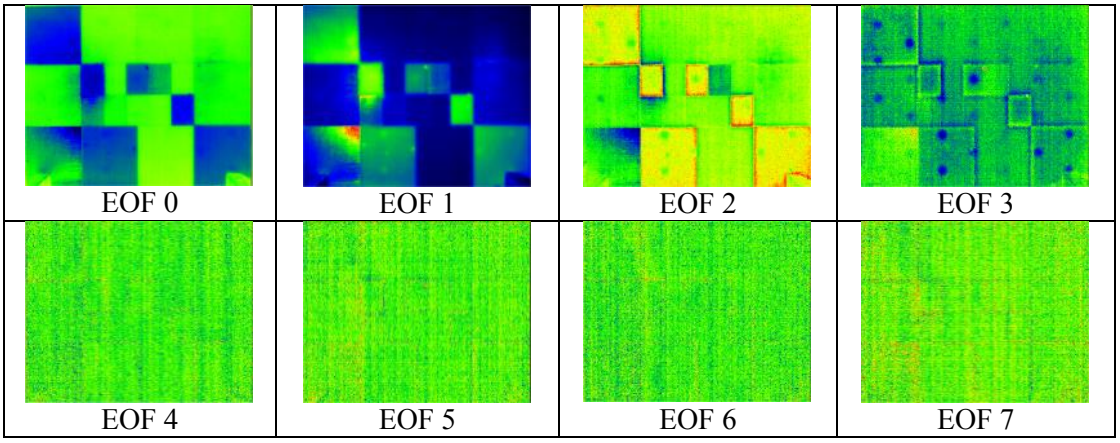


Ce traitement n'apporte pas d'amé ioration significative.

c) SVD

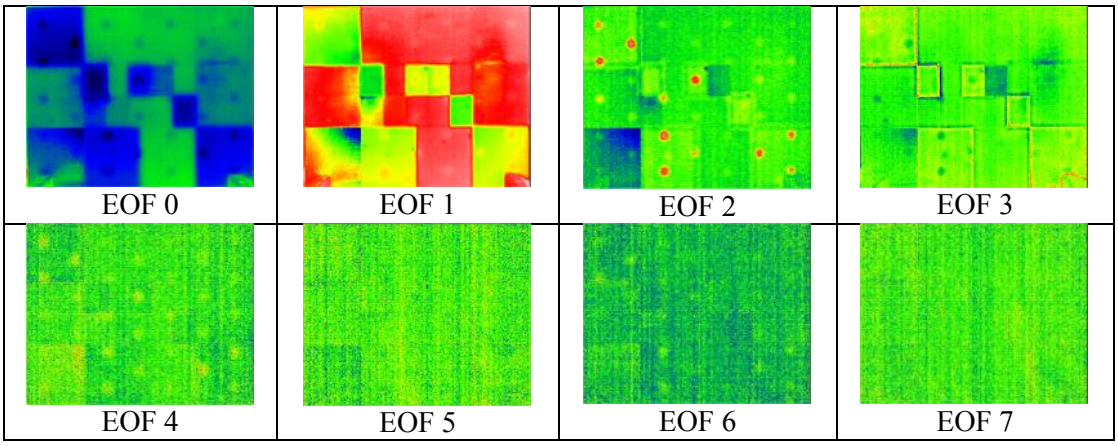
Nous avons appliqué un SVD sur la phase d'échauffement et ensuite sur la phase de refroidissement puis sur la totalité d l'expérience.

Phase de montée



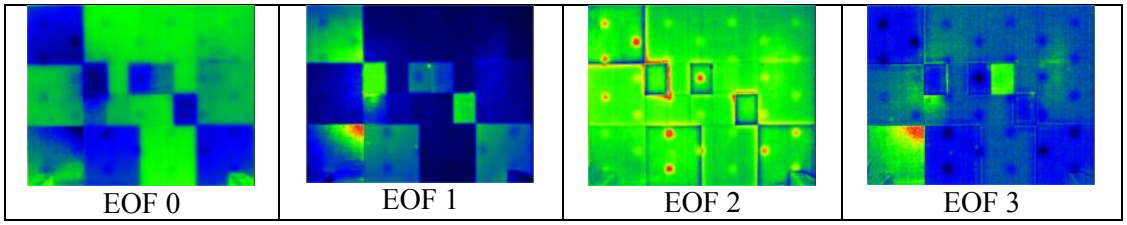
L'EOF 3 apporte une amé ioration significative en termes d'atténuation des effets radiatifs. Les défauts apparaissent de façon contrastée.

Refroidissement



Les EOF 2, 3 et 4 donnent de bons résultats, on note toutefois que la montée dans les ordres de la décomposition de traduit aussi par une baisse du rapport signal sur bruit.

Échauffement et refroidissement



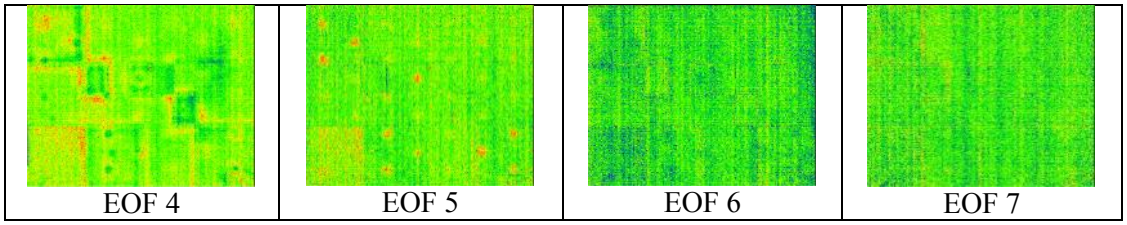


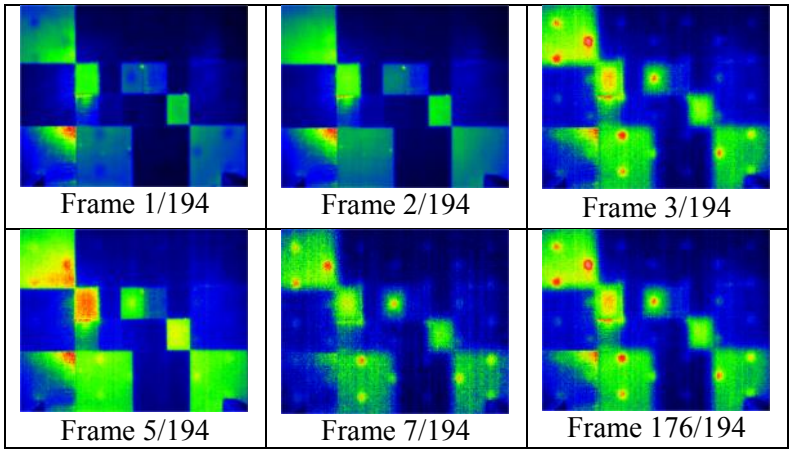
Figure 472 : Résultats SVD (éprouvette "Picasso")

On observe que les EOF 2 et 3 donnent des résultats satisfaisants, les EOF supérieures ne permettent pas de repé er correctement les défauts en raison d'un rapport signal sur bruit dé avorable.

d) PPT (analyse de Fourier temporelle)

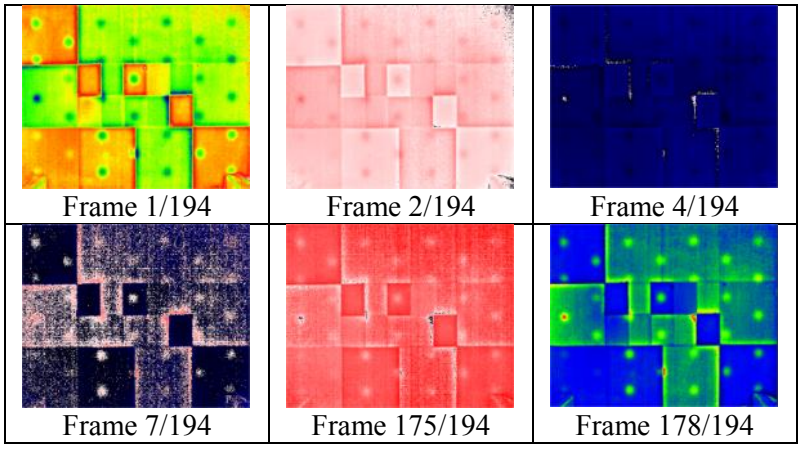
Nous avons ensuite appliqué le PPT, une analyse en module et en phase ont été effectuées.

Analyse en module



Aucun gain observé par rapport à une analyse sans post-traitement.

Analyse en phase



L'analyse de Fourier en phase donne de bons résultats sur certaines harmoniques.

e) TSR

Tous les cas de figure de l'analyse en TSR jusqu'à l'ordre 6 ont été regroupées dans le tableau suivant :

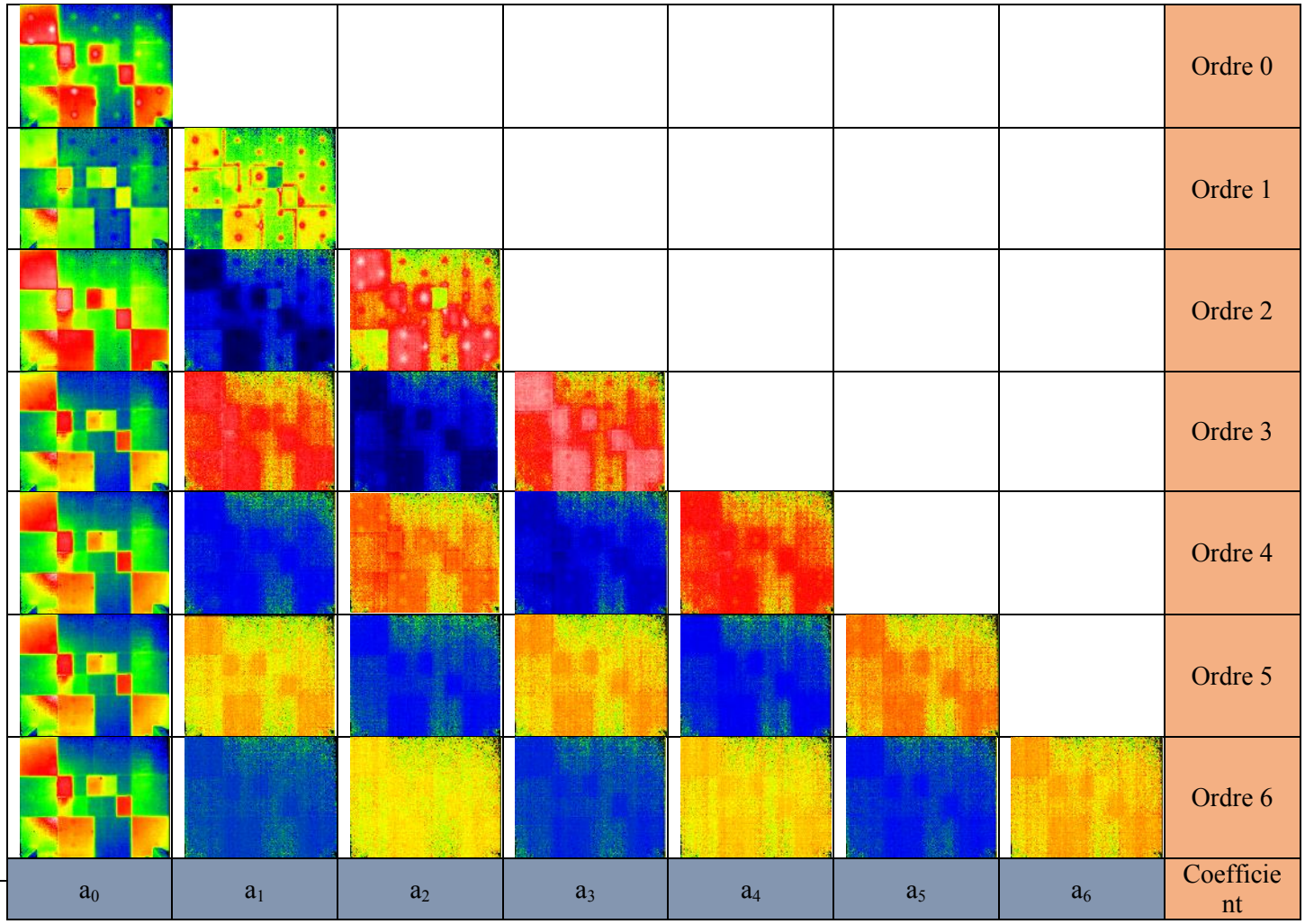


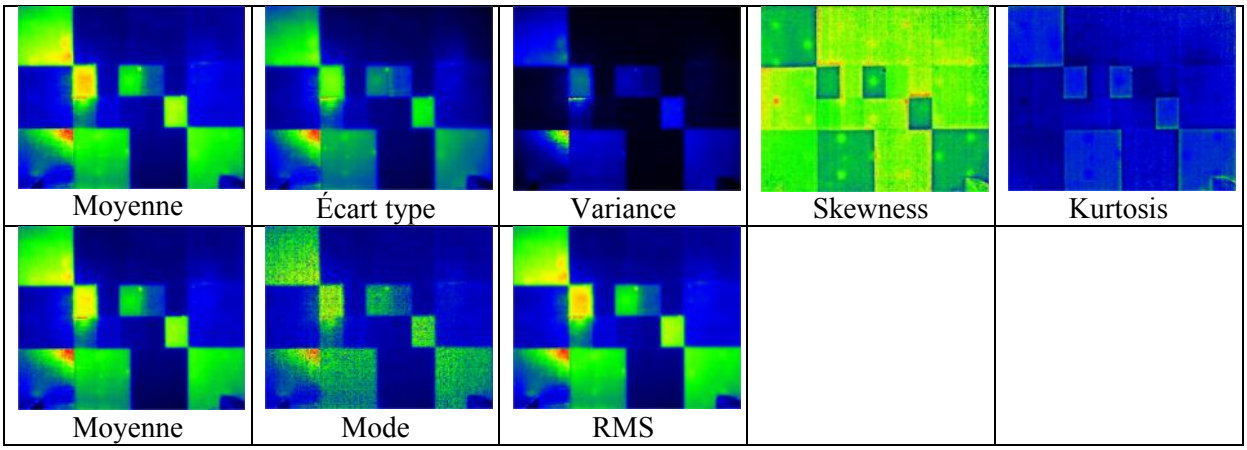
Figure 473 : Résultats TSR (éprouvette "Picasso")

Comme précédemment, en simulation, on observe de bons résultats en termes d'atténuation des effets radiatifs, quel que soit l'ordre de la décomposition polynomiale à partir de la composante 2. Le rapport signal sur bruit se dégrade rapidement au-delà des coefficients 2 et 3.

f) HOS et autres statistiques

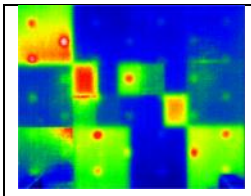
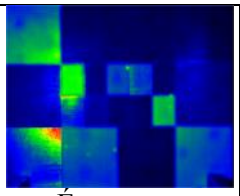
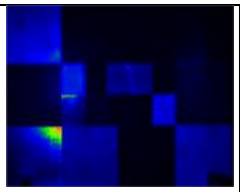
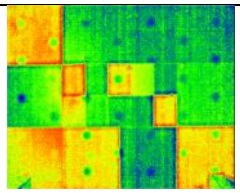
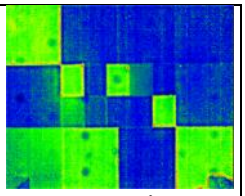
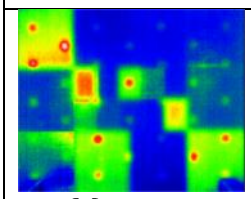
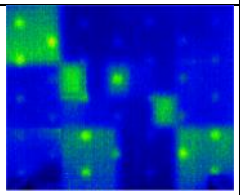
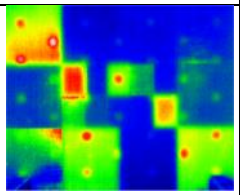
Nous avons appliqué des traitements statistique sur la phase d'échauffement, de refroidissement et sur toute la réponse de l'échantillon.

Échauffement



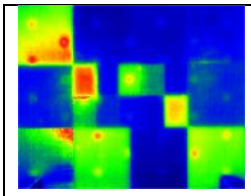
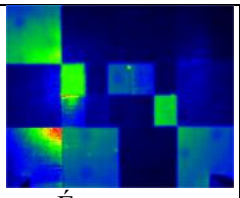
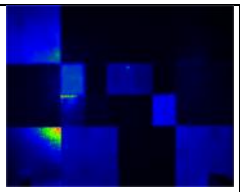
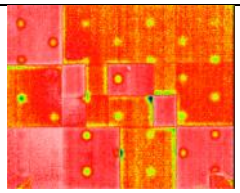
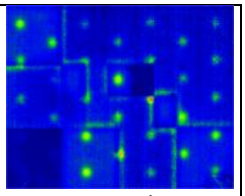
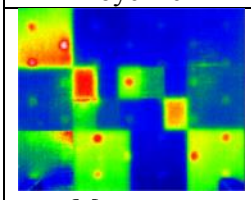
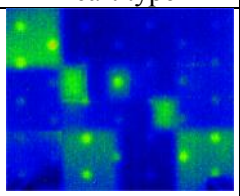
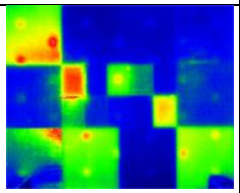
Résultats encourageants pour le *skewness* et le *kurtosis*.

Refroidissement

 Moyenne	 Écart type	 Variance	 Skewness	 Kurtosis
 Moyenne	 Mode	 RMS		

Les résultats sont plus décevants sur la phase de refroidissement.

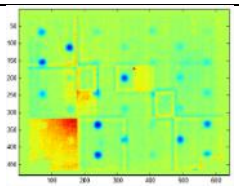
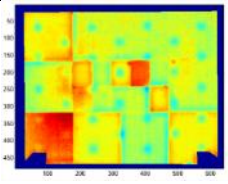
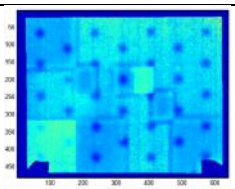
Échauffement et refroidissement

 Moyenne	 Écart type	 Variance	 Skewness	 Kurtosis
 Moyenne	 Mode	 RMS		

Le *Skewness* et le *Kurtosis* donnent de très bons résultats en termes d'atténuation des effets radiatifs et en termes de détection. On peut néanmoins observer que les défauts du coin bas gauche ne sont pas repérés.

g) PLS et PLSRT

Expérimentons le PLS et l'une de ses variantes, le PLSRT :

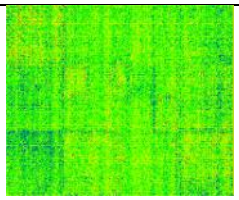
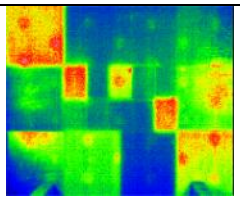
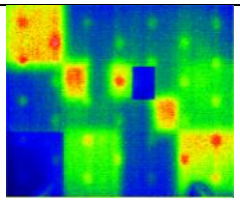
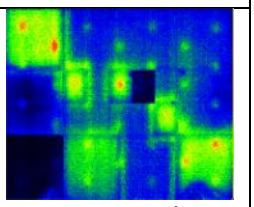
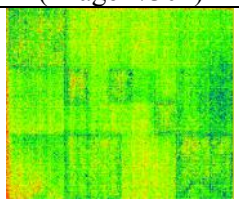
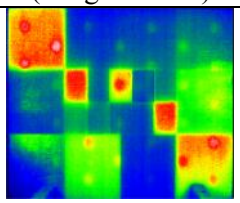
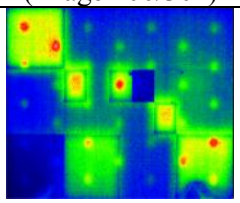
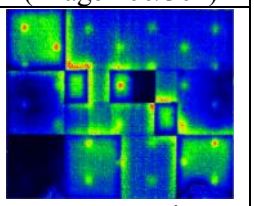
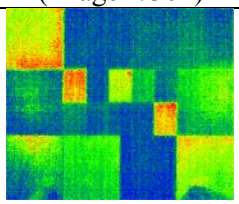
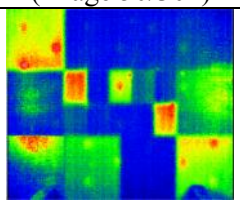
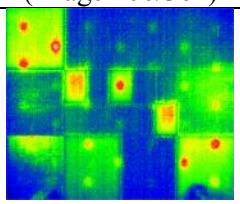
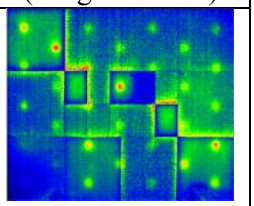
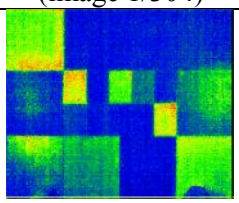
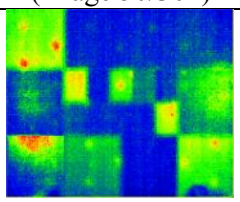
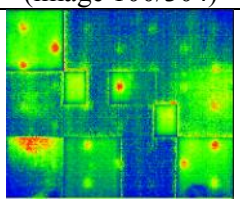
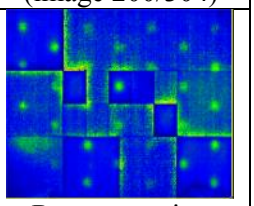
 PLS sur éprouvette "Picasso", 2nd composante, Xloadings	 PLSRT sur éprouvette "Picasso", 1ère composante, Yloadings	 PLSRT sur éprouvette "Picasso", 3ème composante, Yloadings

Bons ré ultats pour les PLS et le PLSRT en termes d'atténu tion des effets radiatifs. Les traitements permettent de localiser efficacement les dé auts mê e s'ils ne sont pas tous dé ecté , en particulier dans la zone argentée en bas à gauche de l'échantillon.

h) Reconstruction paramétrique ARMA

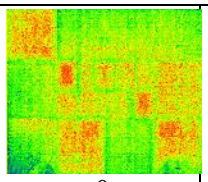
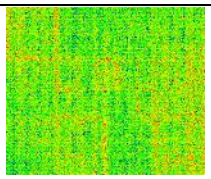
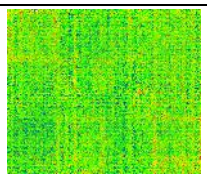
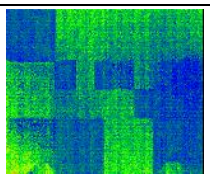
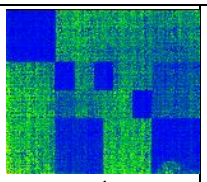
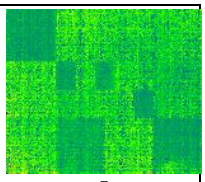
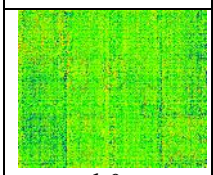
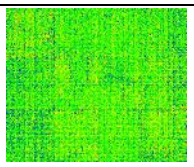
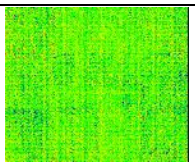
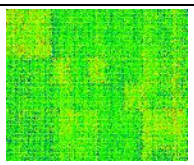
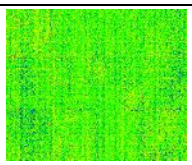
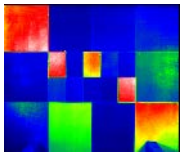
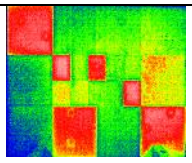
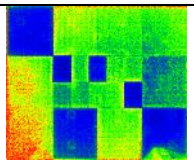
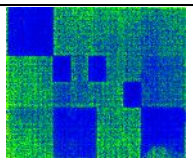
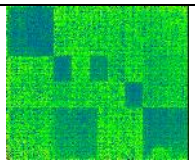
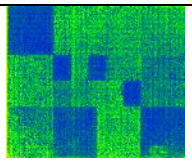
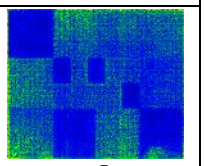
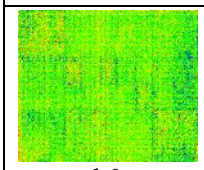
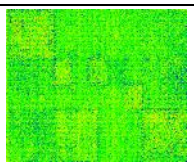
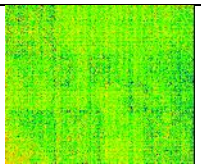
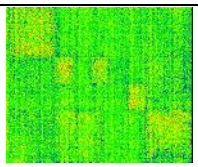
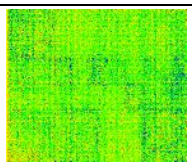
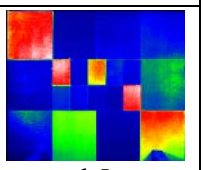
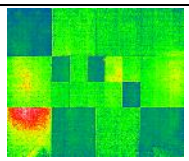
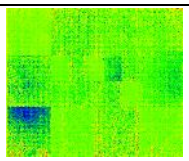
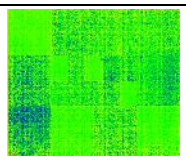
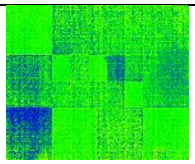
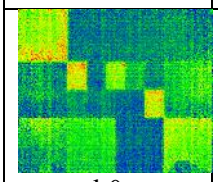
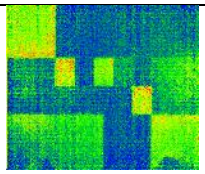
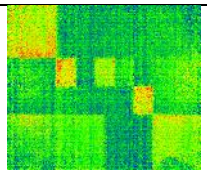
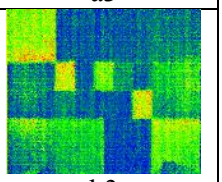
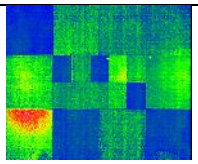
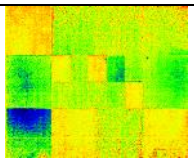
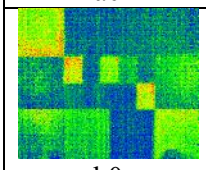
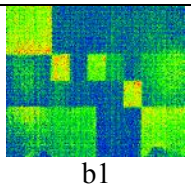
Un signal aléatoire de type PRBS à 256 termes a été appliqué à l'é hantillon. Le tableau suivant regroupe les résultats des différentes reconstructions paramétriques

Analyse de la réponse impulsionnelle à différents instants

Type de reconstruction				
ARMA 8 8	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 1/304)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 50/304)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 100/304)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 200/304)
ARMA 6 6	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 1/304)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 50/304)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 100/304)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 200/304)
ARMA 4 4	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 1/304)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 50/304)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 100/304)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 200/304)
ARMA 2 2	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 1/304)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 50/304)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 100/304)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 190/304)

La reconstruction paramétrique offre de bons résultats en atténuation et en détection, exemple l'image 190 obtenue avec de l'ARMA 2 2.

Images de paramètres

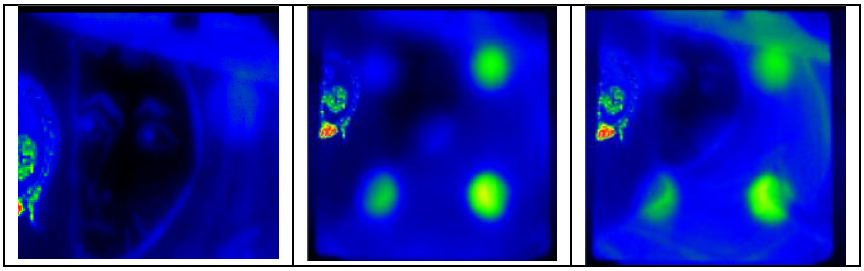
ARMA 8 8	 a0	 a1	 a2	 a3	 a4	 a5
	 b0	 b1	 b2	 b3	 b4	 b5
ARMA 6 6	 a0	 a1	 a2	 a3	 a4	 a5
	 b0	 b1	 b2	 b3	 b4	 b5
ARMA 4 4	 a0	 a1	 a2	 a3		
	 b0	 b1	 b2	 b3		
ARMA 2 2	 a0	 a1				
	 b0	 b1				

Les images de paramè res permettre de réd ire l'influence des effets radiatifs de façon significative, mais ne laissent pas apparaitre les défauts quel que soit le jeu de paramètres, cela peut s'expliquer par un rapport signal sur bruit insuffisant.

29.5. Résultats Étude de l'éprouvette dite « St Savin » (9.3.2)

a) Analyse à l'aide d'un filtre « passe-bas »

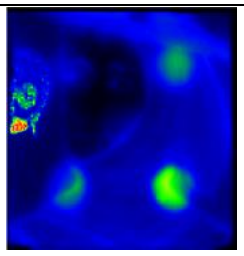
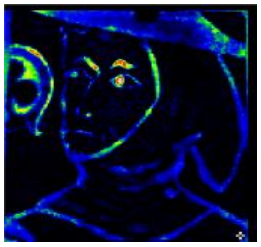
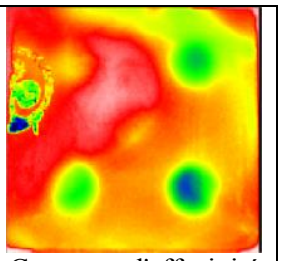
Le filtre a été appliqué en phase d'échauffement puis en début de refroidissement et enfin sur toute la durée de l'observation.



Nous avons appliqué le traitement sur différentes étendues temporelles sans constater d'apport en matière d'atténuation des effets radiatifs.

b) Analyse par étude de contraste

Nous faisons figurer dans le tableau suivant les résultats obtenus avec les différente déclinaisons du contraste thermique et ensuite nous avons applique le post-traitement moyenne effusivité.

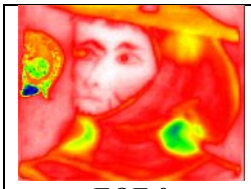
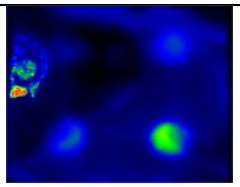
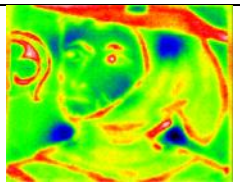
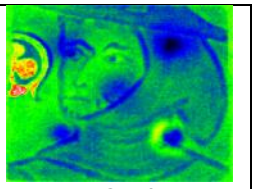
			
Contraste somme	Contraste valeur maxi	Contraste temps du maxi	Contraste d'effusivité

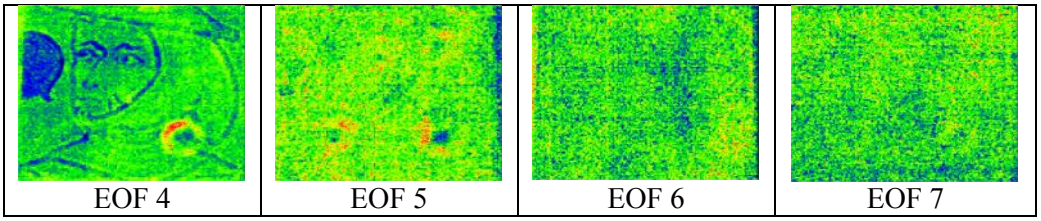
Les traitements à base de contraste n'apportent aucun apport significatif en matière d'atténuation des effets radiatifs.

c) Décomposition SVD

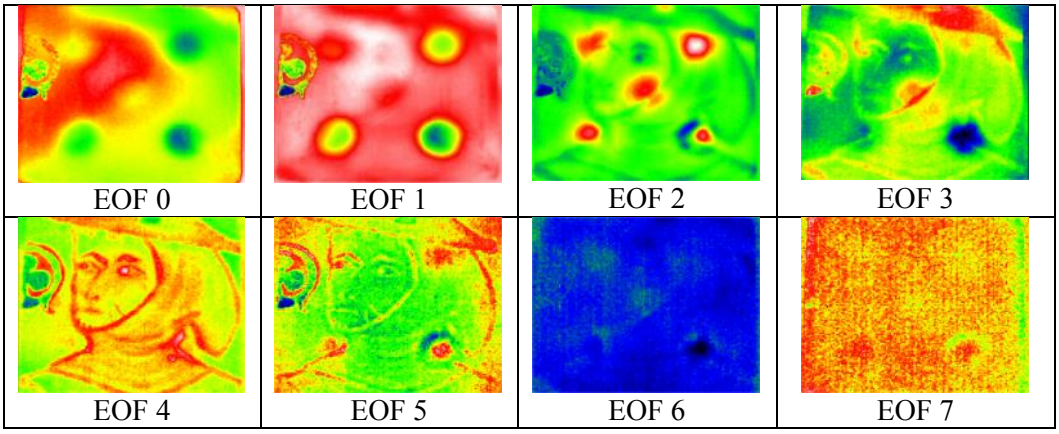
Comme précédemment nous appliquons le SVD à la phase d'échauffement, puis à la phase de refroidissement.

Phase d'échauffement.

			
EOF 0	EOF 1	EOF 2	EOF 3



Sur phase de refroidissement

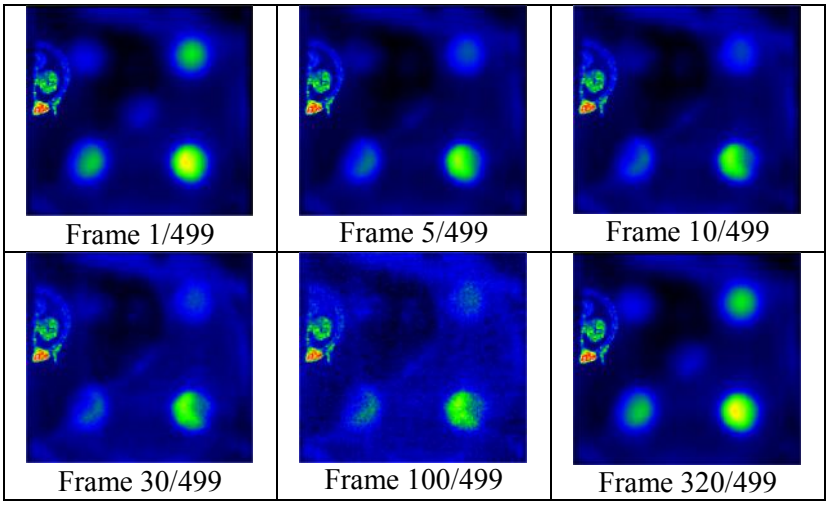


La décomposition SVD est intéressante en phase de refroidissement, lorsque le matériau est suffisamment chaud pour transmettre une information exploitable sur sa structure. Dans ce cas nous observons que l'EOF 2 donne un bon ré ultat en terme d'atténuation de la couche picturale et de détection des défauts, la position des défauts est respectée, mais pas leur géométrie.

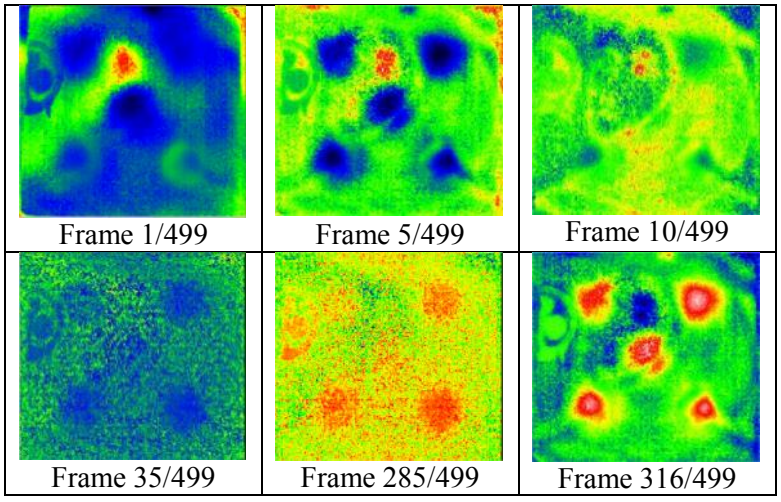
d) PPT (Analyse de Fourier temporelle)

Les deux tableaux suivants regroupent les ré ultats d'analyse du PPT en module et en phase.

Analyse en module

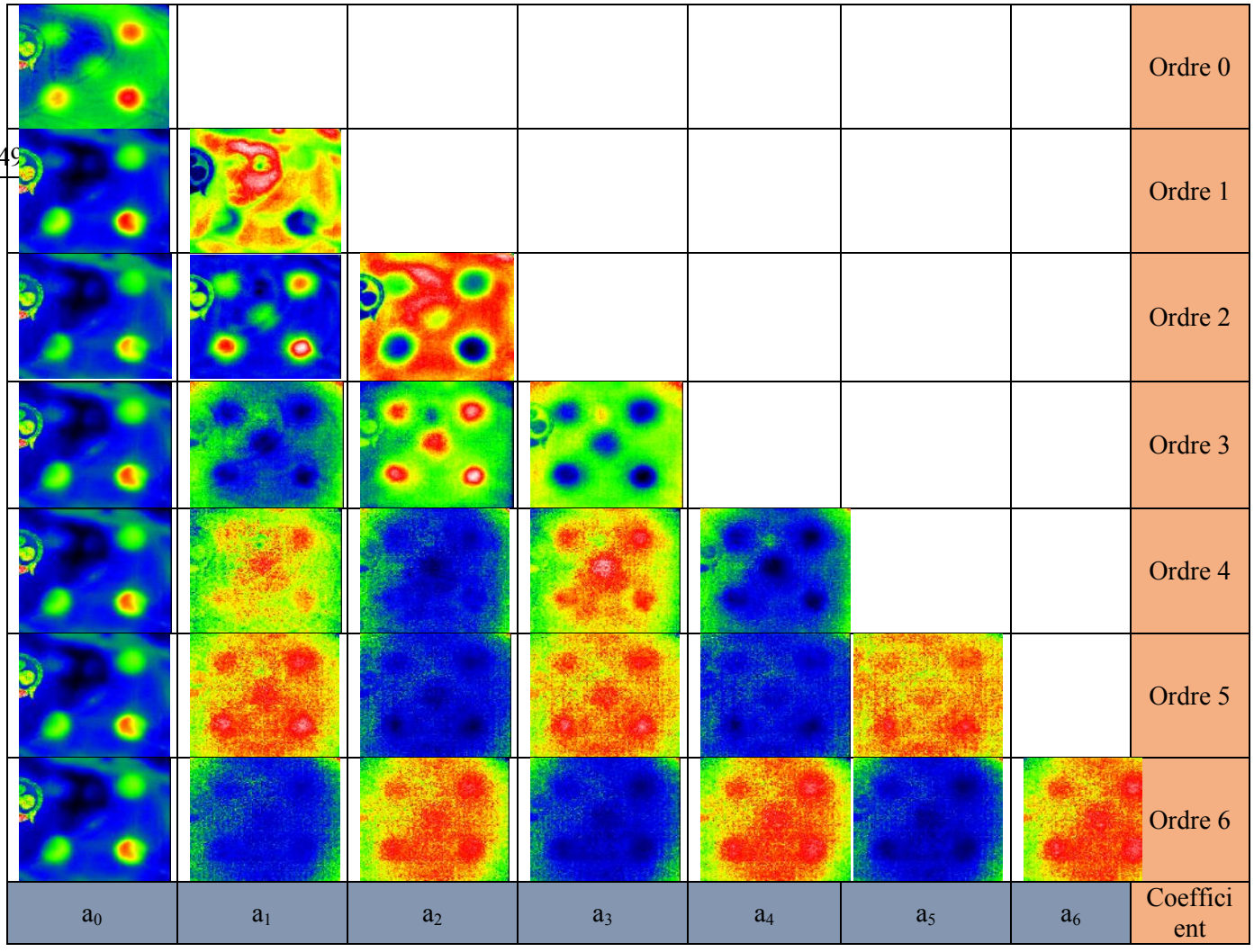


Analyse en phase



Comme observé précédemment l'analyse de Fourier donne de très bons résultats en phase, car le déphasage est une notion temporelle qui s'affranchit des considérations énergétiques et donc de l'absorptivité du matériau.

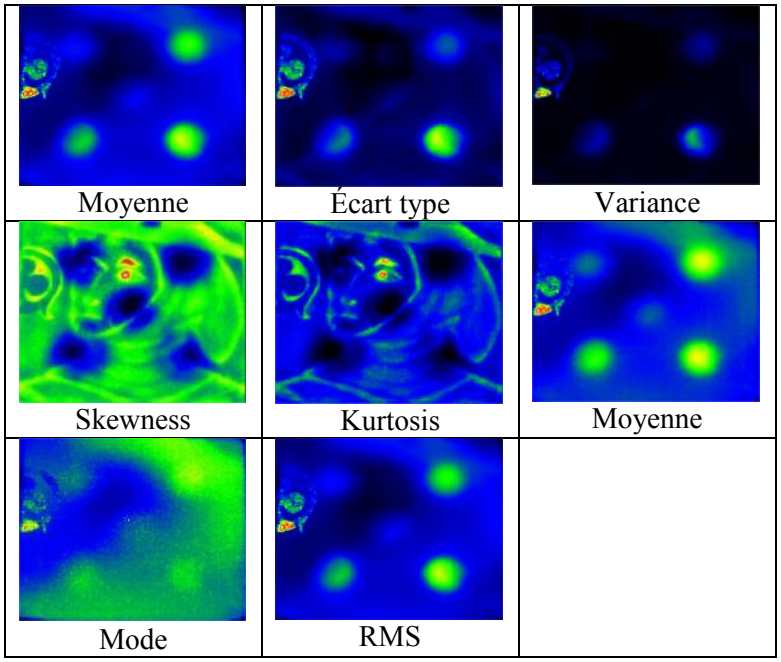
e) TSR



On peut remarquer que le TSR donne de très bons résultats que ce soit en termes de repérage des défauts ou sur le plan de l'atténuation des effets radiatifs. Les coefficients 2 et 3 de la décomposition à l'ordre 3 donnent des résultats très satisfaisants de ce point de vue.

f) HOS et autres statistiques

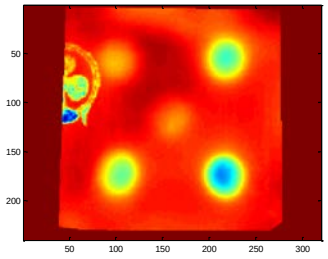
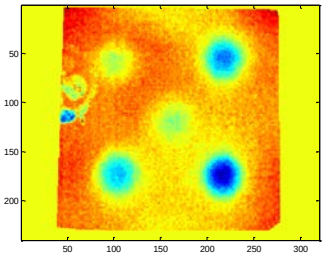
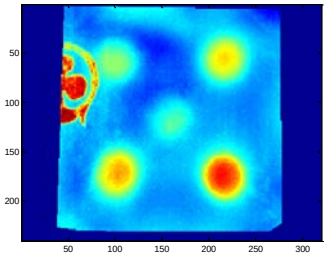
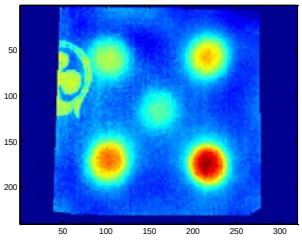
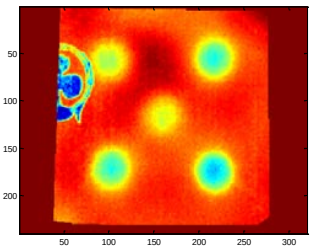
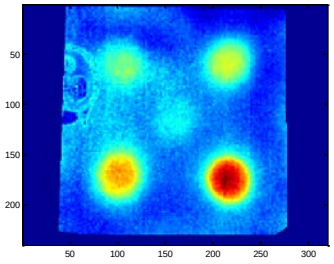
Les traitements statistiques ont été appliqués sur le début du refroidissement, car sur cet intervalle de temps que les défauts sont les plus apparents.



Les résultats obtenus avec le *Skewness* et le *Kurtosis* sont décevants sur le plan de l'atténuation pour cet exemple même si les défauts sont correctement repérés et mis en évidence.

g) PLS et PLSRT

Appliquons le PLS et sa variante le PLSRT.

 Xloadings PLST 1st component	 Xloadings PLST 4th component	 Yloadings PLSRT 1st component
 Yloadings PLSRT 3rd component	 Beta PLSRT 3rd component	 Beta PLSRT 4th component

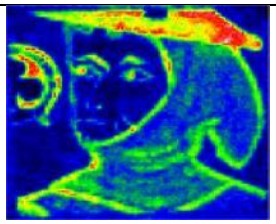
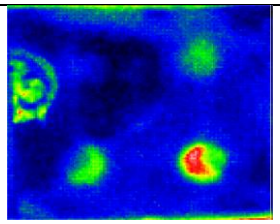
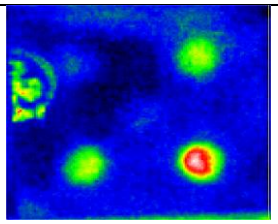
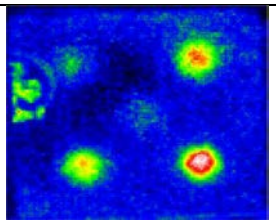
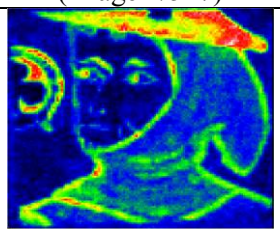
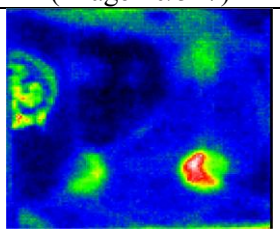
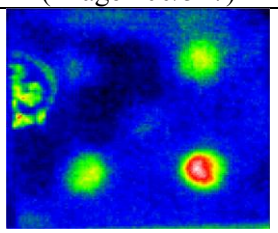
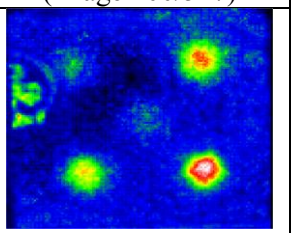
Les PLS et ses variantes permettent un gain véritablement significatif en matière de détection et d'atté uation des effets radiatifs. On remarque que la forme des défauts ainsi que leur position sont respecté, autre point très intéressant : les signatures des défauts sont classées en fonction de leurs profondeurs.

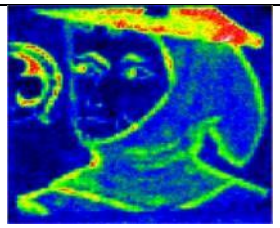
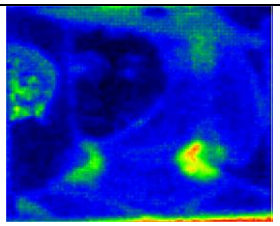
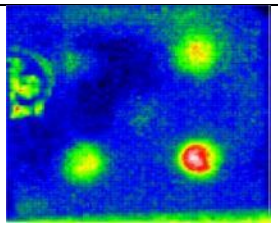
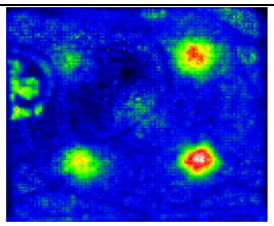
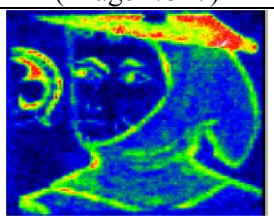
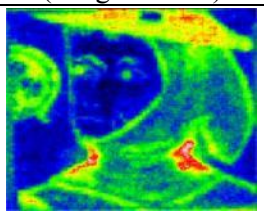
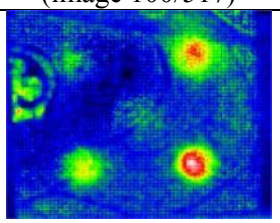
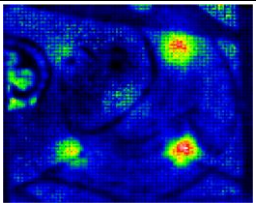
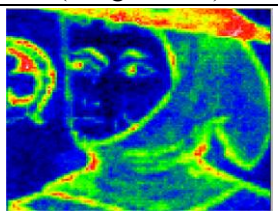
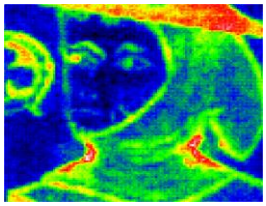
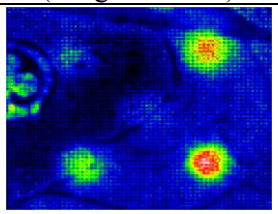
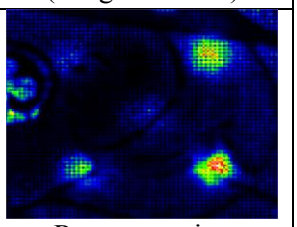
351

h) Reconstruction paramétrique ARMA

L'échantillon a été oumis à un signal d'excitation de type PRBS 256.

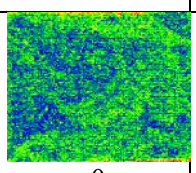
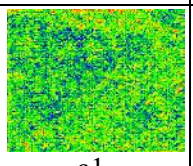
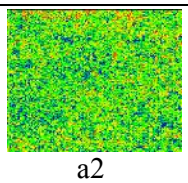
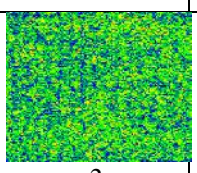
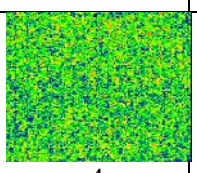
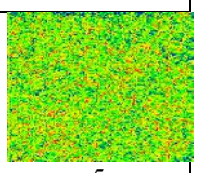
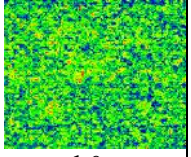
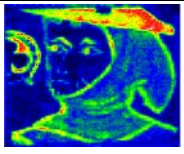
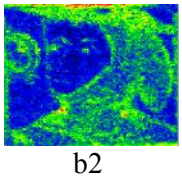
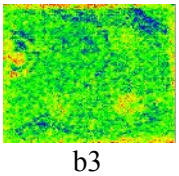
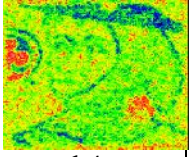
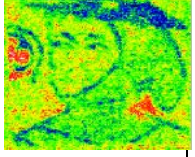
Analyse de la réponse impulsionnelle à différents instants

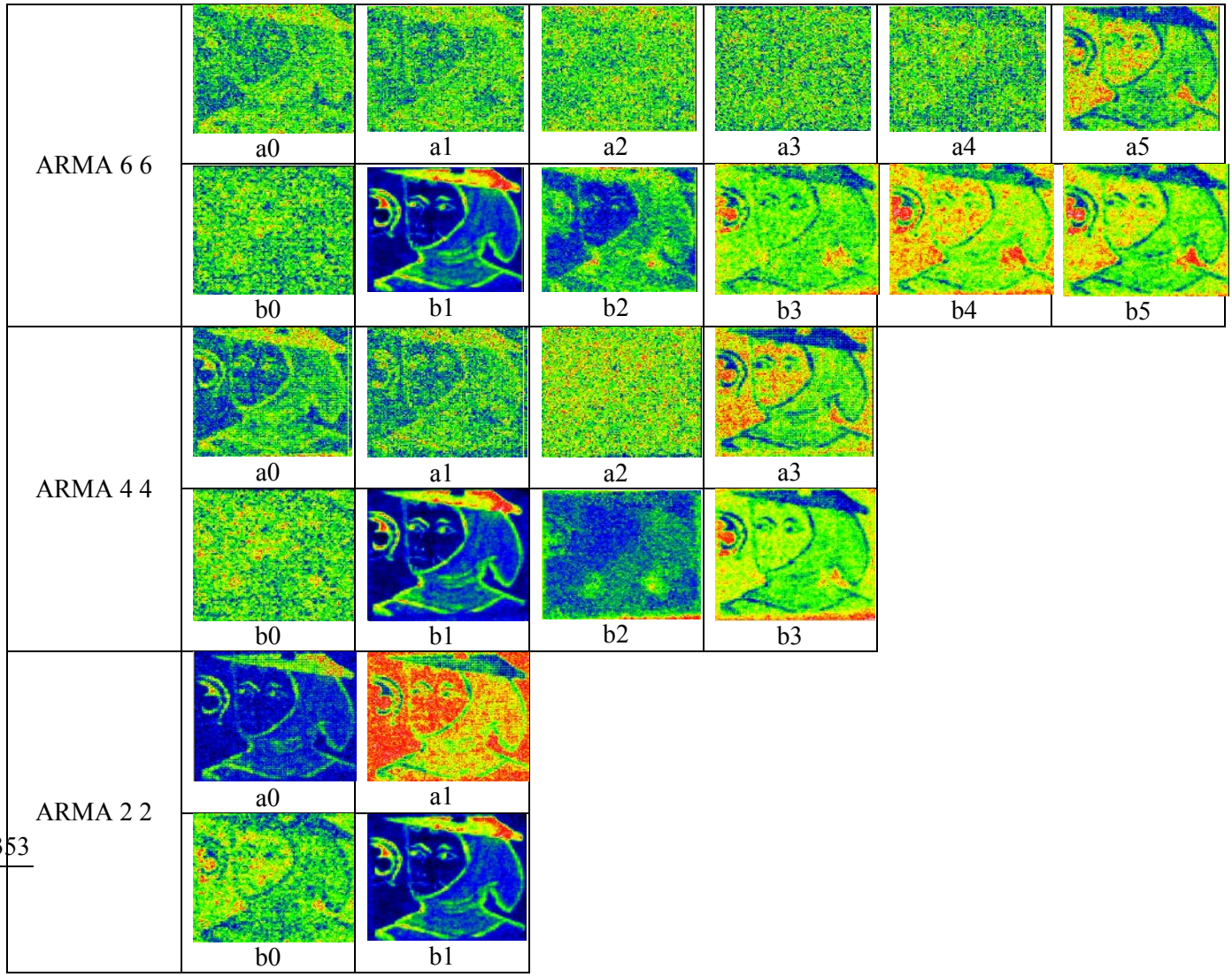
Type de reconstruction				
ARMA 8 8	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 1/517)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 10/517)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 100/517)	 Reconstruction paramétrique 8 8 (image 200/517)
ARMA 6 6	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 1/517)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 10/517)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 100/517)	 Reconstruction paramétrique 6 6 (image 200/517)

ARMA 4 4	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 1/517)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 10/517)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 100/517)	 Reconstruction paramétrique 4 4 (image 200/517)
ARMA 2 2	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 1/517)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 10/517)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 100/517)	 Reconstruction paramétrique 2 2 (image 200/517)
ARMA 1 1	 Reconstruction paramétrique 1 1 (image 1/517)	 Reconstruction paramétrique 1 1 (image 10/517)	 Reconstruction paramétrique 1 1 (image 100/517)	 Reconstruction paramétrique 1 1 (image 200/517)

Les détails de la couche picturale sont atténués, les résultats sont satisfaisants (voir par exemple l'image 200 de l'ARMA 4 4). Il semble que la durée de persistance de la couche picturale se réduit quand on monte dans les degrés de la reconstruction : observons par exemple le contour du personnage, celui-ci est très visible à l'image 10 de l'ARMA 1 1 alors qu'il n'est déjà presque plus apparent à 'image 10 de l'ARMA 8 8.

Images de paramètres

Jeu de paramètres						
ARMA 8 8	 a0	 a1	 a2	 a3	 a4	 a5
	 b0	 b1	 b2	 b3	 b4	 b5



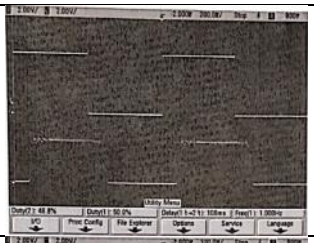
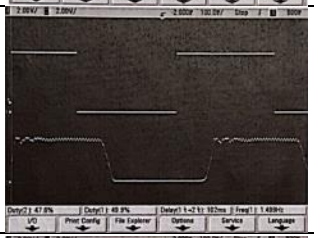
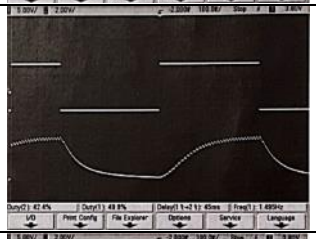
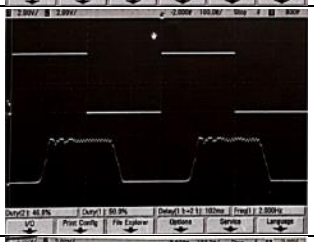
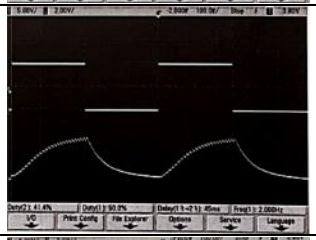
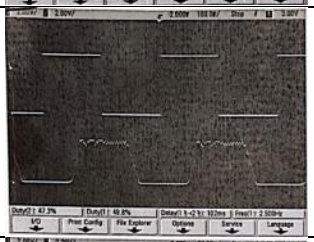
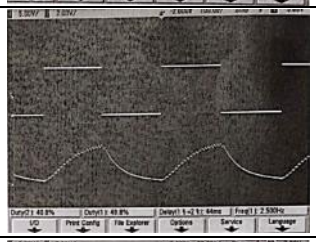
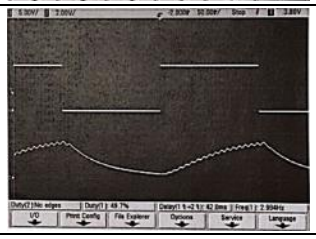
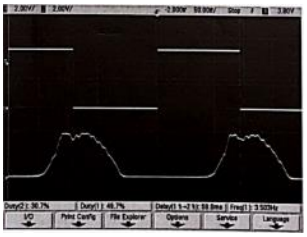
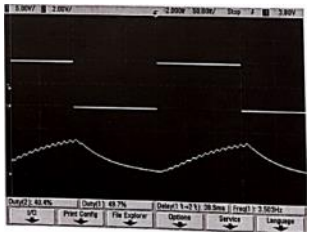
Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants. L'analyse semble souffrir d'un rapport signal sur bruit défavorable.

29.6. Perfectionnement des sources infrarouges

La combinaison de sources performantes comme des sources infrarouges à base de résistance à céramique avec des post-traitements évolués ne suffit pas. Nous savons que ces sources ont une constante de temps plus longue que les sources halogène s ce qui nécessite d'adapter la fréquence de modulation afin d'obtenir une restitution du signal des sources fidèle au signal d'excitation. Nous avons effectué une étude allant dans ce sens afin de franchir un niveau dans l'optimisation de notre système. L'objectif est de déterminer la fréquence de modulation permettant la meilleure synchronisation des sources au signal d'excitation choisi. Nous avons pour cela comparé la restitution du signal de modulation avec le système d'origine équipé de source halogène ainsi que la restitution par des sources halogène s modulées à l'aide d'un système mécanique à volets.

Tableau 99: Comparaison des dispositifs de modulation en fonction de la fréquence

Fréquence de modulation (Hz)	Lampes halogènes modulées par volets.	Lampes halogènes modulées par relais Celduc.

1		
1,5		
2		
2,5		
3		
3,5		

On peut remarquer qu'à 1 Hz le signal restitué par la source lorsqu'elle est modulé par le système que nous avons mis au point – système à volet – apporte un gain par rapport à la modulation par relais statique. Le signal mesuré est identique au signal d'excitation et ne présente qu'un léger déphasage Δt.

Fréquence de modulation (Hz)	Lampe halogènes modulées par volets.	Lampe halogènes modulées par relais Celduc.

1

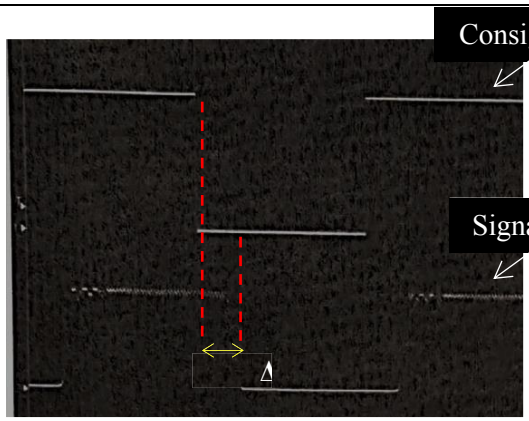


Figure 474 : déphasage par rapport à la consigne

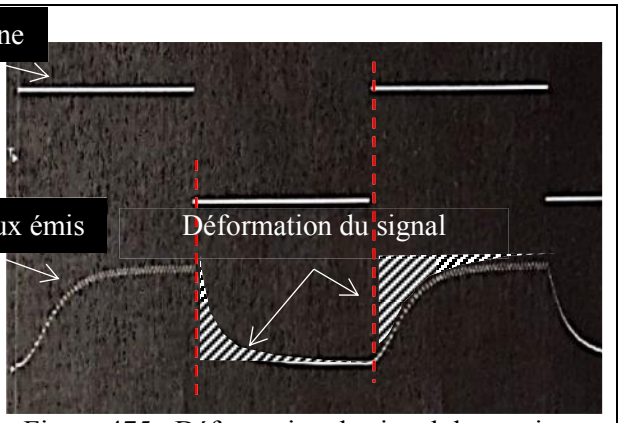


Figure 475 : Déformation du signal de consigne

Au-delà de 1 Hz le signal se déforme fortement et se déphase de manière croissante, il est donc déconseillé de moduler le signal au-delà de 1 Hz.

29.7. Publications

a) Journal of Thermophysics, 2013

355

Characterization of an inclusion of plastazote located in an academic fresco by photothermal thermography

Bodnar, J.L.[a], Nicolas, J.L.[a], Mouhoubi, K.[a], Candore, J.C.[a], Detalle, V.[b]

[a] GRESPI/ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims Cedex 02, France
[b] Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 avenue du Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France

International Journal of Thermophysics, 2013 | journal-article
DOI: 10.1007/s10765-012-1335-5
EID: 2-s2.0-84886722647
URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84886722647&partnerID=MN8TOARS

Abstract

The aim of this study is to approach the possibilities of stimulated infrared thermography in dimensional characterization of defects situated in mural paintings. For this purpose, it is suggested to proceed in two stages. First, an in situ longitudinal thermal-diffusivity measurement is developed. Then the characterization of the depth of the studied defect by means of an extended photothermal analysis and a comparison between theory and experiment is carried out. In this article is shown that this approach allows a good estimate of the depth of a plastazote inclusion in a partial copy of the "Saint Christophe" of the Campana collection in the Louvre Museum. © Springer Science+Business Media New York 2012.

b) EPJ Applied Physics, 2013

Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography

Bodnar, J.-L.[a], Mouhoubi, K.[a], Pallo, L.D.[b], Detalle, V.[c], Vallet, J.-M.[d], Duvaut, T.[a]

[a] GRESPI/ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039 51687, Reims Cedex 02, France
[b] Measurement Control Department, Arcelor Mittal BP 30320 57283, MaiziÃres-lÃs-Metz, France
[c] LRMH, 29 avenue du Paris 77420, Champs-sur-Marne, France

EPJ Applied Physics, 2013 | journal-article
DOI: 10.1051/epjap/2013130234

EID: 2-s2.0-84885612450
URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885612450&partnerID=MN8TOARS

Abstract

Non-destructive testing of heritage mural paintings by means of stimulated infrared thermography has now become rather efficient [1â€"14]. However, pigments, which form a pictorial layer, have contrasting radiative properties possibly leading to artifact detection. In this paper, attempts to alleviate this difficulty are presented. Based on the spectroscopic study of different paint layers, one can argue that, in the medium infrared field, this radiative disparity decreases significantly. Then, with similar settings, it can be shown that ceramic radiative sources allow reaching this wavelength band. Finally, on the basis of a study carried out on an academic sample and a partial copy of a fresco from the cathedral of Angers, combining ceramic heat sources with a laboratory SAMMTHIR experimental setup enables to make real headway in terms of defectsâ€™ detection. © EDP Sciences, 2013.

c) International Journal of Thermophysics, 2012

Photothermal thermography applied to the non-destructive testing of different types of works of art

Bodnar, J.L.[a], Mouhoubi, K.[a], Szatanik-Perrier, G.[b], Vallet, J.M.[c], Detalle, V.[d]

[a] GRESPI/ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims Cedex 02, France
[b] Restauratrice de Peintures 60, Avenue Jean Jaurès, Bâtiment 9, 92190 Meudon, France
[c] CICRP, 21 rue Guibal, 13003 Marseille, France
[d] LRMH, Avenue de Paris, Marne-La-Vallée

International Journal of Thermophysics, 2012 | journal-article
DOI: 10.1007/s10765-012-1301-2
EID: 2-s2.0-84885650519
URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885650519&partnerID=MN8TOARS

Abstract

In this article, various cases in helping to restore works of art by stimulated infrared thermography are presented. First, the method allows detecting old restorations found on a mural painting in the French senate. Then, it is demonstrated how the photothermal method enables determination of the underlying structure of the mural painting "The Apotheosis of Saint Bruno" in the Charterhouse of Villeneuve-lez-Avignon. Finally, the method allows locating separate canvas paintings on "Avenant de l'aurore" in the "Luxembourg" French Senate building. © 2012 Springer Science+Business Media New York.

29.8. Congrès

a) QIRT 2014

Non destructive testing of works of art by stimulated infra-red thermography: Study of the contribution of SVD decomposition to the reduction of the optical effects induced by the pictorial layer

By K. Mouhoubi*, J.L Bodnar*, J.L. Nicolas*, E. Perrin**, V. Vrabie**, V. Detalle***, J.M. Vallet****, T. Duvaut*

Abstract

The non destructive testing of the murals paintings of the inheritance by stimulated infra-red thermography is already relatively efficient [1-30]. However, the different radiative properties of the pigments constituting the pictorial layer, can lead to artefacts of detection. In this work, we try to reduce this disadvantage by associating SVD decomposition and stimulated infrared thermography. We show theoretically and in experiments that this association makes it possible to improve detection of delaminations located in works of art.

b) SFT

Contrôle non destructif des oeuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée : Étude de l'apport d'un post traitement fréquentiel à la réduction des effets optiques induits par la couche picturale

K. Mouhoubi[1] , J.L Bodnar[1] , V. Detalle[2] , J.M. Vallet[3] , T. Duvaut[1]

[1] GRESPI/ CATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02
[2] LRMH, 29 avenue du Paris, 77420 Champs-sur-Marne
[3] CICRP, 21 rue Guibal, 13003 Marseille

Résumé

Dans le cadre de la conservation et de l'aide à la restauration des biens culturels, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), le Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine (CICRP) et Le Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI) de l'Université de Reims développent de nouvelles méthodes d'aide à la restauration du patrimoine culturel. Cette collaboration a déjà montré, à l'aide de la thermographie infrarouge stimulée, la possibilité de détecter des déplacages situés dans de nombreuses peintures murales du patrimoine culturel [1-9]. L'un des problèmes rencontré au cours de ces études était toutefois, la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé. Cette différence de sensibilité pouvait, dans certains cas défavorables, conduire à des artefacts de détection. Dans le travail que nous présentons ici, nous montrons théoriquement puis expérimentalement que l'association d'une analyse fréquentielle de type PPT (Pulse Phase Thermography [10-11]) à la thermographie infrarouge pulsée permet une réduction notable de cet effet optique perturbateur.

c) ESPC

Active IR thermography processing based on Higher Order Statistics for nondestructive evaluation

European Signal Processing Conference, 2012 | conference-paper
EID: 2-s2.0-84869793879
URL: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84869793879&partnerID=MN8TOARS

Abstract

Active infrared thermography is a nondestructive method for evaluating defects in artworks. A conventional excitation radiation heats the sample and the photothermal response is recorded by an infrared (IR) camera. Classical pulsed excitation has shown the feasibility of such a detection system, but the energy deposition for a long period of time can alter samples. Random excitations can prevent such problem, but signal processing methods should be implemented to extract the useful information. We propose a processing method that combines Singular Value Decomposition (SVD) and Higher Order Statistics (HOS). The former decomposes the dataset in several subspaces, allowing to remove the influence of the acquisition environment and system. The latter is used to build up from the useful information one or two images for diagnostic. We show on a mural-type "laboratory" and on a in situ artwork that this method allows good identification of defects, providing a complementary detector to classical analysis. © 2012 EURASIP.

C. Annexes du chapitre III

29.9. Publications

a) The European Physical Journal Applied Physics, 2012

Stimulated infrared thermography applied to thermophysical characterization of cultural heritage mural paintings

Auteurs : Jean-Luc Bodnar, Jean-Louis Nicolas, Kamel Mouhoubi, Vincent Detalle

Date de publication : 2012/11/1

Revue : The European Physical Journal Applied Physics, volume : 60, Numéro : 02, Pages : 21003

Éditeur : EDP Sciences

DOI: http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2012120280

URL : http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8735305&fileId=S1286004212302802

Abstract

The purpose of this paper is to approach stimulated infrared thermography possibilities in terms of measuring longitudinal thermal diffusivity of mural paintings in situ. The measuring method principle is first submitted. It is based on temporal analysis of changes in the characteristic radius beams of spatial profiles of the photothermal signal, measured on the spot of the laser excitation. The feasibility of the method is demonstrated, thanks to a series of simulations. Lastly, the method enables to correctly estimate **...**

b) International Journal of Thermophysics, 2013

Characterization of an inclusion of plastazote located in an academic fresco by photothermal thermography

Auteurs : JL Bodnar, JL Nicolas, K Mouhoubi, JC Candore, V Detalle

Date de publication : 2013/9/1

Revue : International Journal of Thermophysics, Pages : 1-5

Éditeur : Springer Netherlands

DOI : 10.1007/s10765-012-1335-5

URL : http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10765-012-1335-5?LI=true

Abstract

The aim of this study is to approach the possibilities of stimulated infrared thermography in dimensional characterization of defects situated in mural paintings. For this purpose, it is suggested to proceed in two stages. First, an in situ longitudinal thermal-diffusivity measurement is developed. Then the characterization of the depth of the studied defect by means of an extended photothermal analysis and a comparison between theory and experiment is carried out. In this article is shown that this approach allows a good **...**

c) Mechanics & Industry, 2014

Local thermal characterization of metal sample by stimulated infra-red thermography

Auteurs : K Mouhoubi, JL Bodnar, S Ousseni, JL Nicolas, D Caron

Date de publication : 2014/7/1

Revue : Mechanics & Industry, Volume : 15, Numéro : 4, Pages : 307

Éditeur : Cambridge University Press

DOI : http://dx.doi.org/10.1051/meca/2014037

URL : http://www.mechanics-industry.org/articles/meca/abs/2014/04/mi140005/mi140005.html

Abstract

In this paper, we consider the possibilities of the stimulated infra-red thermography for local metallic sample thermal characterization. At first we introduce the measurement principle, which is based on the local measurement of the thermal diffusivity parameter. Then, using simulations, we demonstrate the feasibility of the method. We then present the experimental device implemented for the study. Finally, we show that this approach allows a good estimation of the thermal diffusivity of a metal sample.

29.10. Congrès

a) Société Française de thermique, 2011

Mesure de diffusivité thermique longitudinale de peinture murale par radiométrie photothermique

Auteurs : JL Bodnar, JL Nicolas, K Mouhoubi, JC Candoré, V Detalle

Url : http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/20.pdf

Résumé Dans cet article, nous présentons une méthode de mesure, in situ, de diffusivité thermique longitudinale d'œuvre d'art. Nous prés ntons d'abord le principe de la mé hode de mesure, basée sur l'analyse temporelle de l'évolution du rayon caractéristique des profils spatiaux du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser. Nous montrons ensuite la faisabilité de la méthode à l'aide de simulations numériques. Nous présentons dans une troisième étape, le dispositif expérimental développé pour l'étude ainsi que l' **...**

b) QIRT, 2012

Thermal diffusivity measurement of mural painting by simulated infra-red thermography

Auteurs : JL Bodnar, JL Nicolas, K Mouhoubi, V Detalle

URL : https://www.researchgate.net/profile/Jean_Luc_Bodnar/publication/271801247_Thermal_diffusivity_measurement_of_mural_painting_by_simulated_infra-red_thermography/links/54d1d7600cf28959aa7ba372.pdf

Abstract

In this work, we present a method of in situ measurement, of longitudinal thermal diffusivity of work of art. We present first the principle of this measurement method. It is based on the temporal analysis of the characteristic radius of the photothermal signature of a laser excitation. We present then the experimental device developed for the study. We show finally, experimentally, that the method allows a good estimation of the longitudinal thermal diffusivity of a sample test and of a partial copy of the “Saint Christophe” of the “Campana” **...**

c) Société Française de thermique, 2013

Caractérisation thermophysique locale d’œuvres d’art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée

Auteurs : K Mouhoubi, JL Bodnar, JL Nicolas, V Detalle, JM Vallet, T Duvaut

Date de publication : 2013/5

URL : http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2013/articles/6204.pdf

Résumé

L'objet du travail que nous présentons ici, est d'approcher les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de mesure in situ, de diffusivité thermique longitudinale de peinture murale du patrimoine. Nous présentons d'abord le principe de la méthode de mesure. Elle est basée sur l'analyse temporelle de l'évolution de la valeur maximale du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser locale. Nous montrons ensuite la faisabilité de la méthode à l'aide d'une série de simulations. Nous **...**

d) 3ième Congrès International sur l'Ingénierie des Risques Industriels, 2013

Caractérisation thermique locale d'échantillon métallique par thermographie infrarouge stimulée

Auteurs : K Mouhoubi, JL Bodnar, S Ousseni, JL Nicolas, D Caron

Date de publication : 2013

URL : https://www.researchgate.net/profile/Jean_Luc_Bodnar/publication/271162373_Caractrisation_thermique_locale_d'chantillon_mtallique_par_thermographie_infrarouge_stimule/links/54bf59e80cf2f6bf4e04e607.pdf

Résumé

Dans ce travail, nous approchons les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de caractérisation thermique locale d'échantillon métallique. Nous présentons d'abord le principe de la mesure. Elle est basée sur la mesure locale du paramètre diffusivité thermique. Nous montrons ensuite à l'aide de simulations, la faisabilité de la méthode. Nous prése tons alors le dispositif expé imental mis en œuvre pour l'é ude. Nous montrons enfin que l'approche permet une bonne estimation de la diffusivité **...**

e) Thermogram, 2013

Thermographie infrarouge stimulée appliquée à la caractérisation thermophysique in situ de matériaux du bâtiment

Auteurs : Jean Luc Bodnar, Kamel Mouhoubi, Laurent Ibos

URL : https://www.researchgate.net/profile/Jean_Luc_Bodnar/publication/270567815_Thermographie_infrarouge_stimule_applique__la_caractrisation_thermophysique_in_situ_de_matriaux_du_btiment/links/54ad526d0cf2213c5fe3b559.pdf

Résumé

L'objet de ce travail est de présenter deux techniques de caractérisation thermophysique de matériaux du bâtiment, utilisables in situ. La première vise à estimer la diffusivité thermique du matériau étudié. Elle est basée sur l'analyse temporelle de l'évolution du rayon caractéristique des profils spatiaux du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser. La seconde vise à estimer l'effusivité thermique du matériau étudié. Elle est basée sur l'analyse, aux temps courts, de l'évolution temporelle du signal **...**

f) Société Française de Thermique, 2014

Estimation de la diffusivité thermique locale de peintures murales du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée

Auteurs : K Mouhoubi, JL Bodnar, JL Nicolas, V Detalle, JM Vallet, T Duvaut

URL :http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2014/Communications/8547.pdf

Résumé

Dans ce travail, nous présentons une nouvelle méthode d'estimation de la diffusivité thermique locale de peintures murales du patrimoine. Cette méthode repose sur l'analyse temporelle de la ré onse thermique d'une œuvre d'art soumise à une excitation laser locale. Nous présentons d'abord le principe de la méthode d'estimation. Nous montrons ensuite, théoriquement, à l'aide de simulations numériques, la faisabilité de la méthode. Nous montrons enfin expérimentalement, que la méthode permet une bonne **...**

g) QIRT, 2014

Contribution to the local thermophysical characterization of murals paintings of the inheritance by stimulated infra-red thermography

Auteurs : K Mouhoubi, JL Bodnar, JL Nicolas, V Detalle, JM Vallet, T Duvaut

URL : http://www.ndt.net/article/qirt2014/papers/QIRT-2014-123.pdf

361

Abstract

The object of this work is to approach the possibilities of stimulated infrared thermography for in situ measurement of thermal diffusivity of mural paintings of the inheritance. We present first the principle of the method. We show then the feasibility of the measurement, using theoretical simulations.

29.11. Comparaison des méthodes : calcul d'incertitude et sensibilité aux paramètres.

Nous avons vu que les trois mé hodes de dépo illement dé rites reposaient sur l'analyse d'un parame re tiré de l'analyse de l'é olution temporelle d'un profil de température et que dans chaque chaque cas cela revenait à mesurer la pente d'une droite, ainsi nous avons :

Méthode de dépouillement	Détermination de a
Méthode radiale	$a = \frac{pente(R^2 + 8at)}{8}$
Méthode du T_{max}	$a = \frac{pente.R^2}{8.K} = \frac{pente.R^2}{8.ordonnée}$
Méthode des moments	$a = \frac{pente(R^2 + 8at)}{8}$

Essayons de déterminer les incertitudes sur la valeur de a pour les trois méthodes à partir des expressions du tableau ci-dessus. Utilisons pour cela la méthode de la dérivée logarithmique.

Calcul d'incertitude

a) Méthode radiale :

$$a = \frac{pente(R^2 + 8at)}{8}$$

$$Log(a) = Log\left(\frac{Pente}{8}\right)$$

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + \frac{\cancel{\Delta 8}}{\cancel{8}}$$

$$\Delta a = a.\frac{\Delta(pente)}{pente}$$

Ce résultat nous permet de dire que l'incertitude sur la valeur de a dépend de l'incertitude du la valeur de la pente. Une erreur de 10 % sur la pente se traduira pas une erreur de 10 % sur la valeur de a, en est-il de même pour la seconde méthode ?

b) Méthode du Tmax

Procédons au même type de calcul :

$$a = \frac{pente.R^2}{8.K} = \frac{pente.R^2}{8.ordonnée}$$

$$Log(a) = Log\left(\frac{pente.R^2}{8.ordonnée}\right)$$

$$Log(a) = Log\left(pente.R^2\right) - Log\left(8.ordonnée\right)$$

$$Log(a) = Log\left(pente\right) + 2Log\left(R\right) - Log8 - Log\left(ordonnée\right)$$

Les incertitudes s'ajoutent :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{\cancel{\Delta 8}}{\cancel{8}} + \frac{\Delta ordonnée}{ordonnée}$$

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta K}{K}$$

Or nous savons que $K = \frac{bR^2\sqrt{\pi^3}}{2Q}$

Calculons $\frac{\Delta K}{K}$

$$Log\left(K\right) = Log\left(b\right) + 2Log\left(R\right) + \frac{3}{2}Log\left(\pi\right) - Log\left(2\right) - Log\left(Q\right)$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta b}{b} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{3}{2}\frac{\cancel{\Delta\pi}}{\cancel{\pi}} + \frac{\cancel{\Delta 2}}{\cancel{2}} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

Nous obtenons :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta b}{b} + 2\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

Ce qui donne :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + 4\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\Delta a = a\left(\frac{\Delta(pente)}{pente} + 4\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta Q}{Q}\right)$$

Ce calcul dé ontre que l'incertitude sur a dé end des incertitudes sur le Rayon R, l'effusivité thermique b et l'én rgie Q. En supposant parfaitement connus b et Q nous avons :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + 4\frac{\Delta R}{R}$$

Nous avons ainsi une très forte dépendance de notre résultat final par rapport à R, cette dép ndance est quatre fois supérieure à la dé endance que nous avons par rapport à l'estimation de la pente, cette mé hode exige donc une bonne connaissance du rayon R du faisceau d'excitation, cette grandeur n'est pas toujours connue avec la précision souhaité .

c) Méthode des moments

L'obtention de a avec cette mé hode s'obtient comme pour la mé hode radiale : on divise la pente par 8, on a donc :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta(pente)}{pente} + \frac{\cancel{\Delta 8}}{\cancel{8}}$$

$$\Delta a = a.\frac{\Delta(pente)}{pente}$$

La méthode radiale et la méthode des moments semblent avoir des sensibilités identiques aux parame res expérimentaux, ce qui n'est pas le cas de la mé hode du Tmax. Nous avons montré qu'une incertitude sur la valeur du rayon d'excitation R peut fortement impacter la pré ision du ré ultat obtenu à 'aide de la mé hode du Tmax.

Le Rayon d'excitation est important nous venons de le voir mais d'autres parametres sont susceptible d'influencer l'estimation de la diffusivité thermique. A ce stade il serait né essaire d'effectuer une étude de sensibilité. Nous avons débuté une étude de ce type que nous avons choisi de ne pas faire figurer dans ce document car c'est un travail de metrologie qui dépasse le sujet de cette thèse. Nous réservons ce travail pour de futurs dévellopements. Voici les quelques parametres pouvant faire l'objet d'une é ude selon nous :

- ◊ **Facteurs directionnels** (effet sur la forme du spot et donc sur la quantité d'énergie déposée et da propagation)
  - Angle d'incidence et d'azimuth du faisceau
- ◊ **Bruit** (lié aux instruments et à l'état de surface de l'echantillon ét dié .
- ◊ **Durée d'excitation, type de signal** (quel impact ?)
- ◊ **Présence de défauts non visibles**
- ◊ **Rayon d'excitation du faisceau**
- ◊ **Pertes thermiques…**

Bien entendu d'autres paramè res interviennent dans l'erreur sur a, tel que le matériel (fonction appareil), l'expérimentateur qui procède au dép uillement etc.

29.12. Analyse de faisceau

La sensibilité de la mé hode du Tmax au rayon d'excitation R nous a poussé à faire une é ude de faisceau afin de déterminer l'é olution de ce rayon caractéristique avec la distance à la surface étudiée.

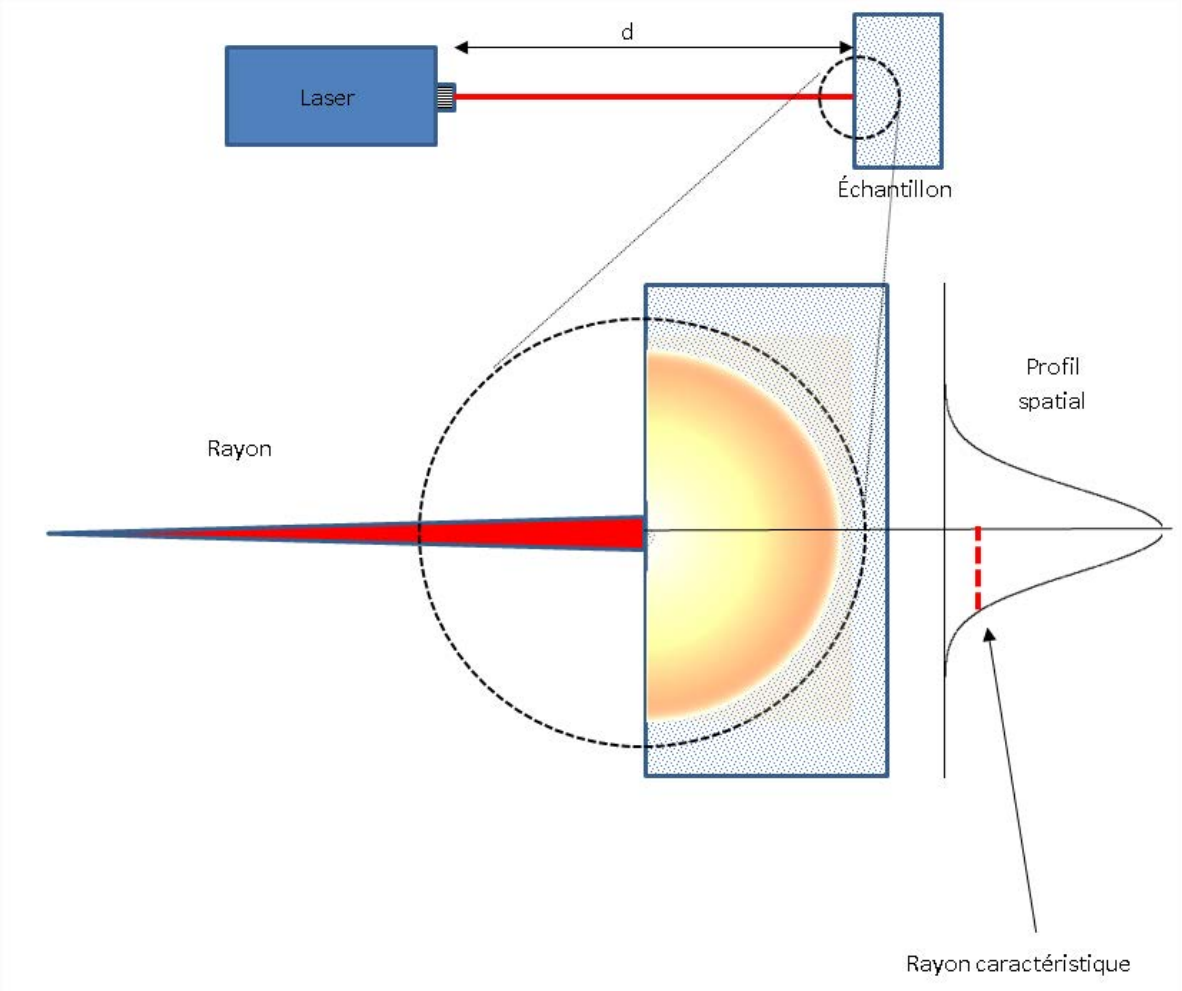


Figure 476 : Principe

Protocole

Le laser a été réglé pour émettre une puissance de 2 W (tension à 2.5 V).
Pour mener cette analyse de faisceau, nous avons eu recours à un analyseur de faisceau optique. Le laser et la sonde de l'analyseur ont été disposé sur un banc optique afin de mesurer pré isément la distance entre l'optique de focalisation du laser et le capteur. Une mesure a été effectué en faisant varier la distance d de 0 à 26 cm par pas de 1 cm.

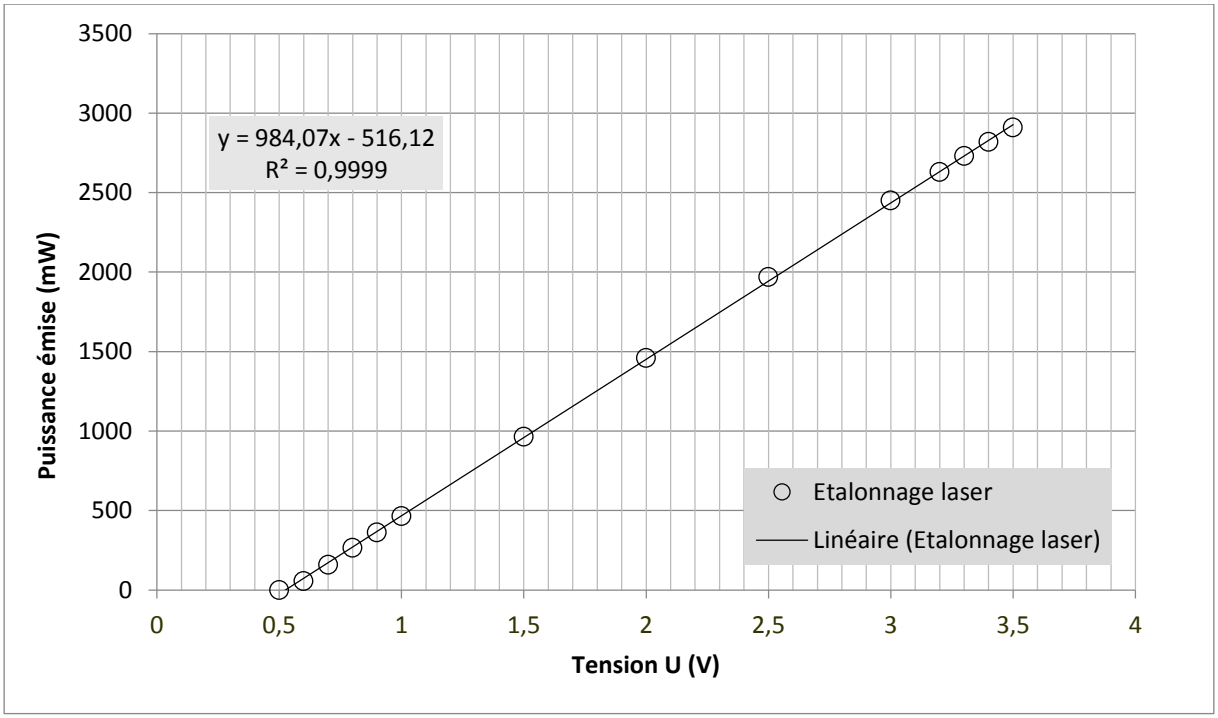


Figure 477 : Courbe d'étalonnage du laser

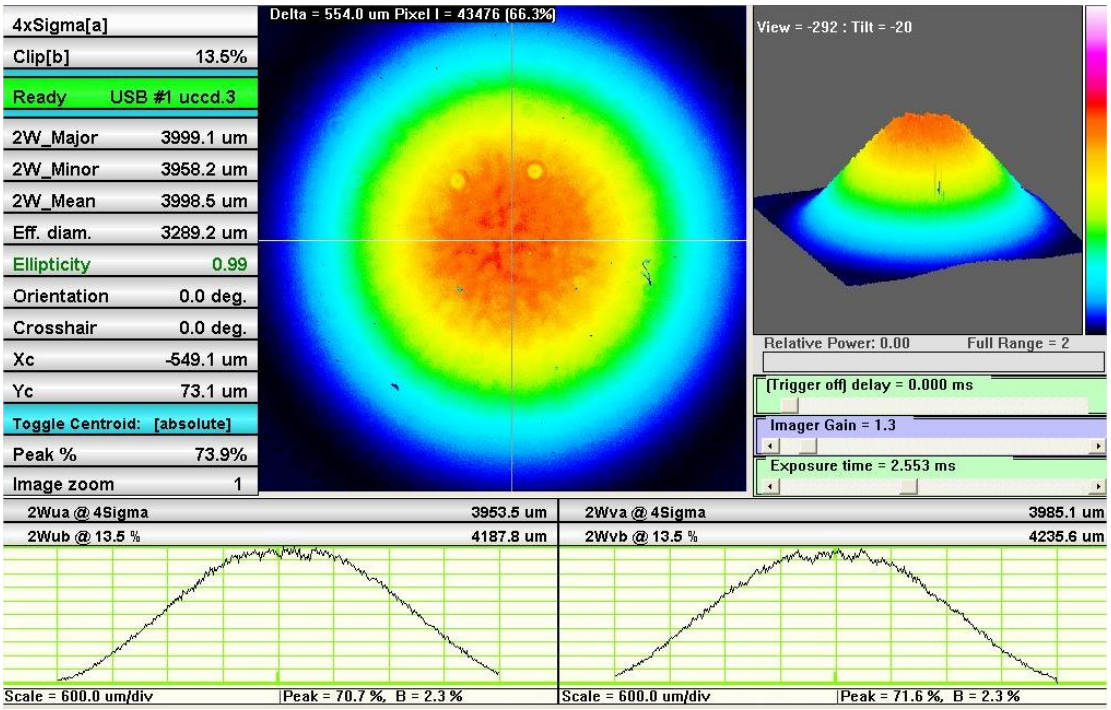


Figure 478 : Exemple de mesure à d = 19 cm

Résultat

Le ré ultat comprend plusieurs courbes, mais nous ne nous inté esserons qu'à la courbe à 13,5 %, cette courbe correspond au diamètre du faisceau à T_{max}/e^2 , c'est cette grandeur caractéristique qu'il faut retenir.

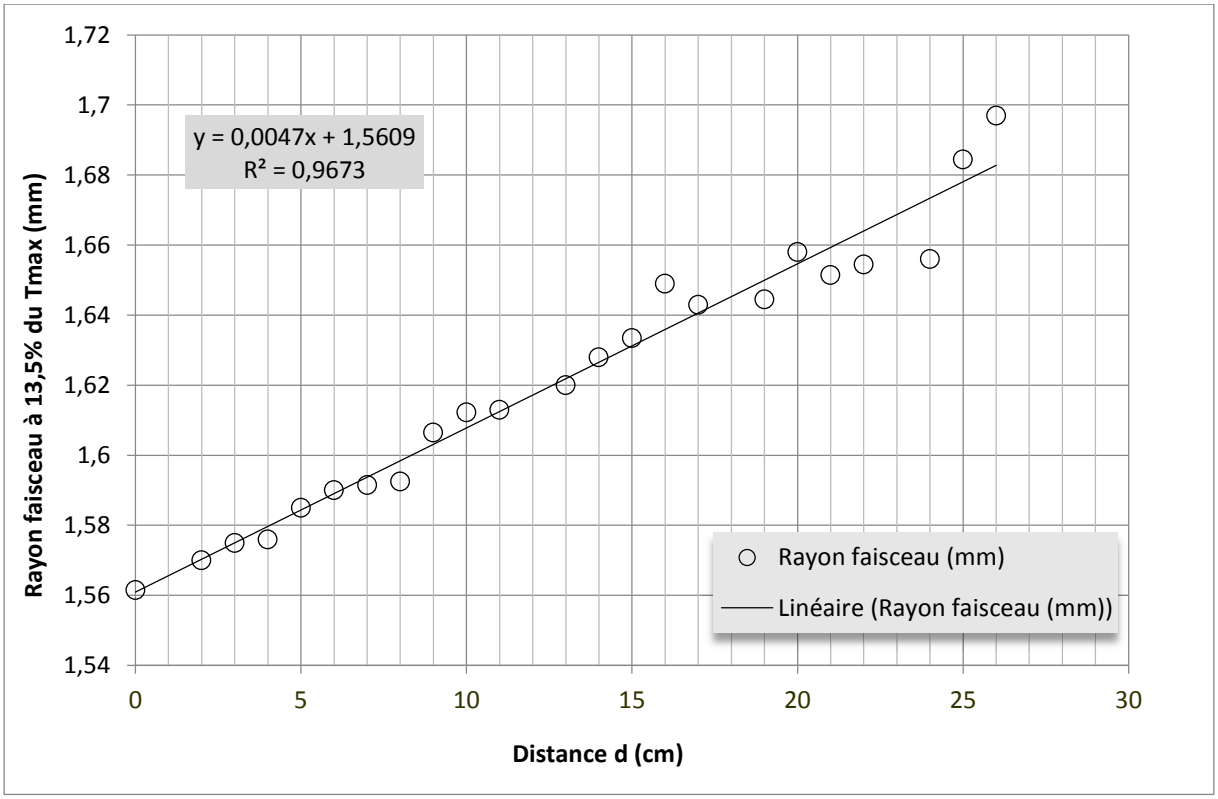


Figure 479 : Évolution du rayon caractéristique du faisceau en fonction de la distance

Ainsi l'observation de la figure ci-dessus nous permet d'estimer facilement le rayon R à prendre en compte pour notre dépouillement avec la méthode du Tmax lorsque le laser est placé par exemple à 20 cm de la surface à analyser (distance couramment retenue), nous estimons ce rayon R ≈ 1,66 mm.

29.13. Le dispositif DICO

DICO est un dispositif de caractérisation thermophysique du CERTES de l'Université de Paris Est Créteil.

Dispositif

Le dispositif de mesure permet la caractérisation de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la chaleur spécifique des matériaux à température ambiante. Ce dispositif a été mis en œuvre au sein du laboratoire CERTES de l'Université de Créteil et a pour avantage d'étudier l'ensemble des propriété thermiques de l'é hantillon en une seule mesure. La méthode est basée sur une excitation thermique en régime périodique. La **Figure 480** présente le banc expérimental. L'échantillon sous forme de plaque de 44 mm de côté et de quelques millimè res d'é aisseur est positionné entre deux plaques métalliques dans une enceinte sous vide. Deux thermocouples insérés dans ces plaques permettent de mesurer l'évolution de la température sur les faces avant et arrière de l'échantillon. L'excitation est de forme sinusoïdale et imposée par un module à effet Peltier positionné sous le porte-échantillon.

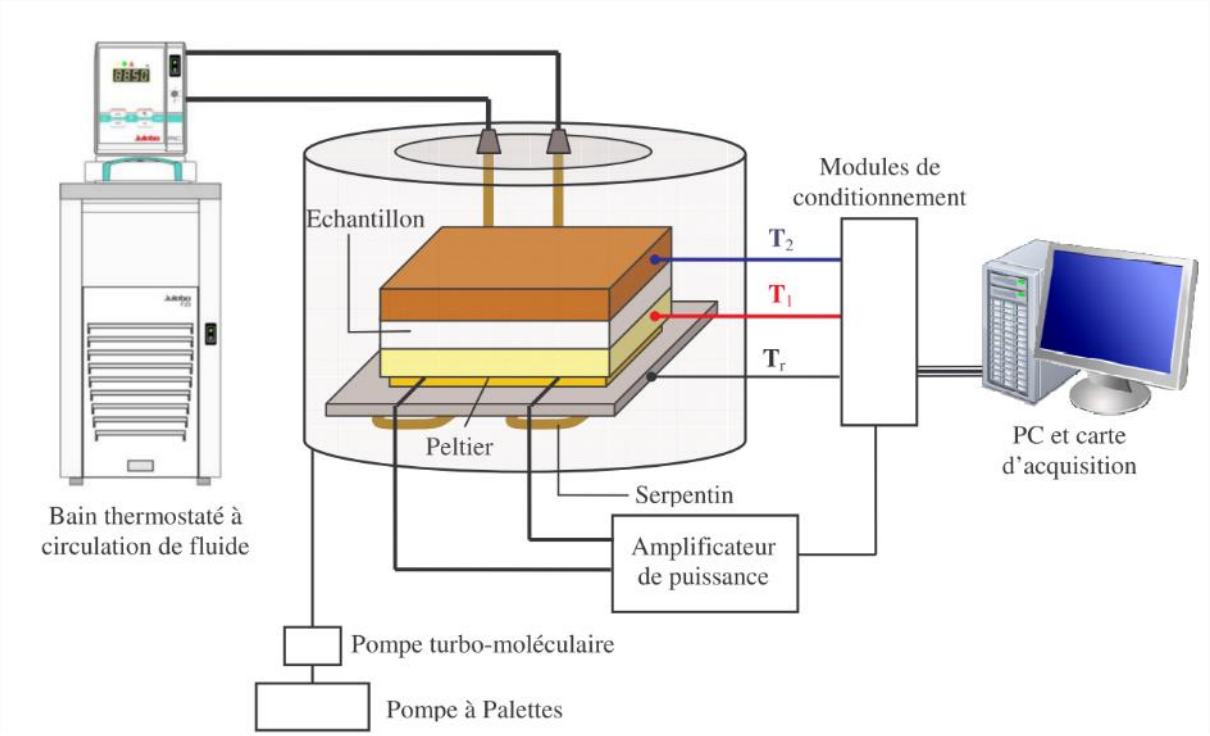


Figure 480 : Dispositif DICO

Principe

367

Le principe d'une analyse thermophysique à l'aide du système DICO est le suivant : tout d'abord, l'échantillon étudié est placé entre un bloc de cuivre et un bloc de laiton. L'ensemble est ensuite placé sur un module à effet Peltier qui permet d'imposer un flux thermique en régime sinusoïdal (à différentes fréquences) à travers le tricouche cuivre / échantillon / laiton (**Figure 481**). Une mesure des températures de deux faces de l'échantillon étudié est alors effectuée à l'aide de thermocouples insérés dans les deux plaques conductrices. De ces mesures est déduite la fonction de transfert du système. Enfin, un ajustement théorie/expérience permet l'estimation de la conductivité thermique k et de la diffusivité thermique a de l'échantillon étudié. L'effusivité thermique b recherchée est alors obtenue à l'aide de la formule $= b\sqrt{a}$.

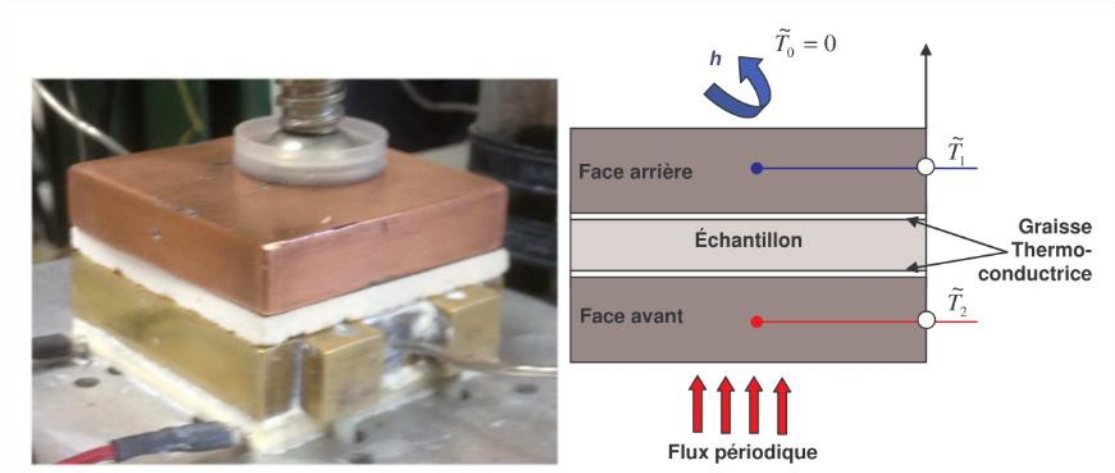


Figure 481 : Principe du dispositif

Figure 482 : Bloc de PVC

Un bloc de PVC recouvert d'une fine couche de peinture noire a été étudié à l'aide de ce dispositif.
Les dimensions de cet échantillon sont les suivantes : 4cm de côté et 10 mm d'épaisseur. L'estimation fournie par le système **DICO** conduit alors à une effusivité thermique d'environ 408 ± 22 J.K-1.m^{-2}.s$^{-1/2}$ et une conductivité de 0,16 W/m.K, voir la publication de **Youcef et al (2011)** [194]**.**

Avec ces deux paramètres on peut déduire la diffusivité thermique (b) et le groupement ρC_p à l'aide des expressions suivantes :

$$b = \frac{k}{\sqrt{a}} \quad \text{et} \quad \rho C_p = \frac{b}{\sqrt{a}}$$

Ainsi l'échantillon de PVC servant de référence metrologique est parfaitement connu :

Tableau 100 : Résultats étalonnage CERTES

	k (W/m.K)	ρ (kg/m3)	C_p (J/kg.K)	ρC_p (J/m^3.K)	b (J/m².K.s$^{1/2}$)	a (m²/s
PVC	0.16	1101	960	1.057^{E}6	408	1.49^{E}-7

29.14. Logiciels de traitement développés

a) Outil pour la détermination de la diffusivité thermique en excitation locale

Actuellement nous en sommes à la version 4.15 de l'outil d'analyse développé au moment de la thèse de **Jean-Charle Candoré**. Cet outil a été mis au point à l'aide du langage de programmation filaire *Labview*, celui-ci a été mis au point avec l'aide de notre ingénieur **Mr Jean-Louis Nicolas**.

Chaque nouvelle méthode a été implémentée dans cet outil. Nous réfléchissons à le faire encore évoluer afin d'étendre ses possibilité en terme d'exploitation de thermogrammes issus de différentes caméras.

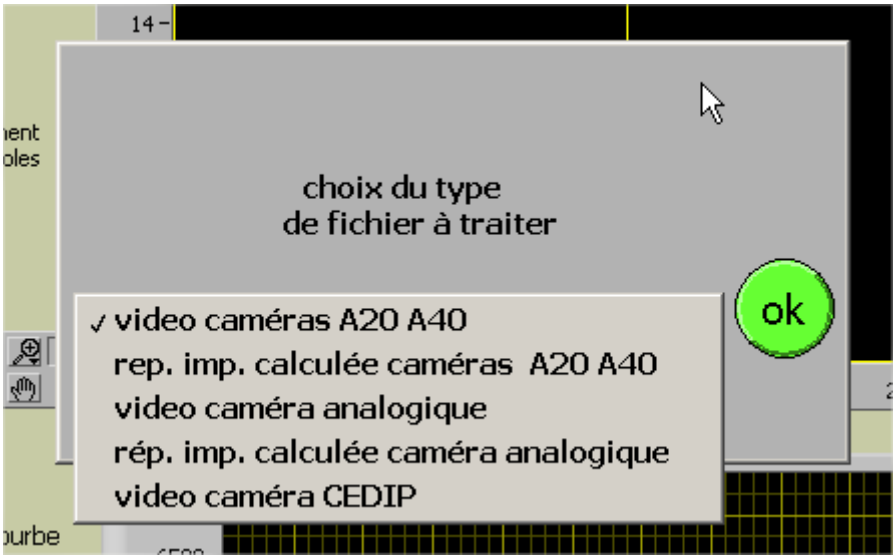


Figure 483: Choix du type de thermogramme

La figure ci-dessus montre qu'il est possible de traiter des films issus de simulation, ce point est un atout non négligeable.

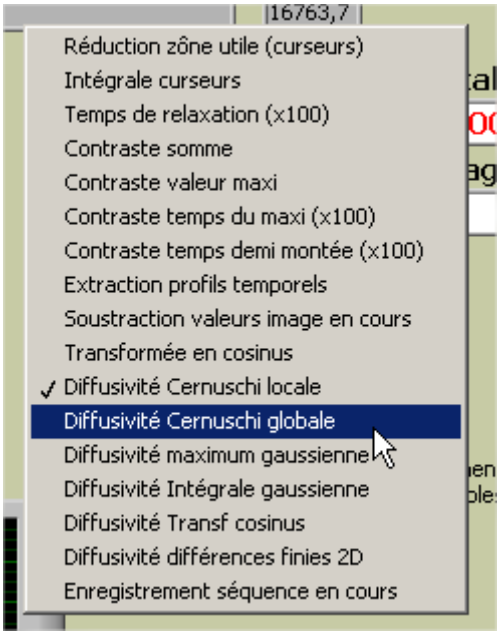


Figure 484 : Liste de choix des modes de dépouillement

La **Figure 484** pré ente les différents modes de dépo illement pris en charge par cet outil d'analyse. On notera que certains traitements présents dans cette liste de choix ne concernent pas la caractérisation thermophysique.

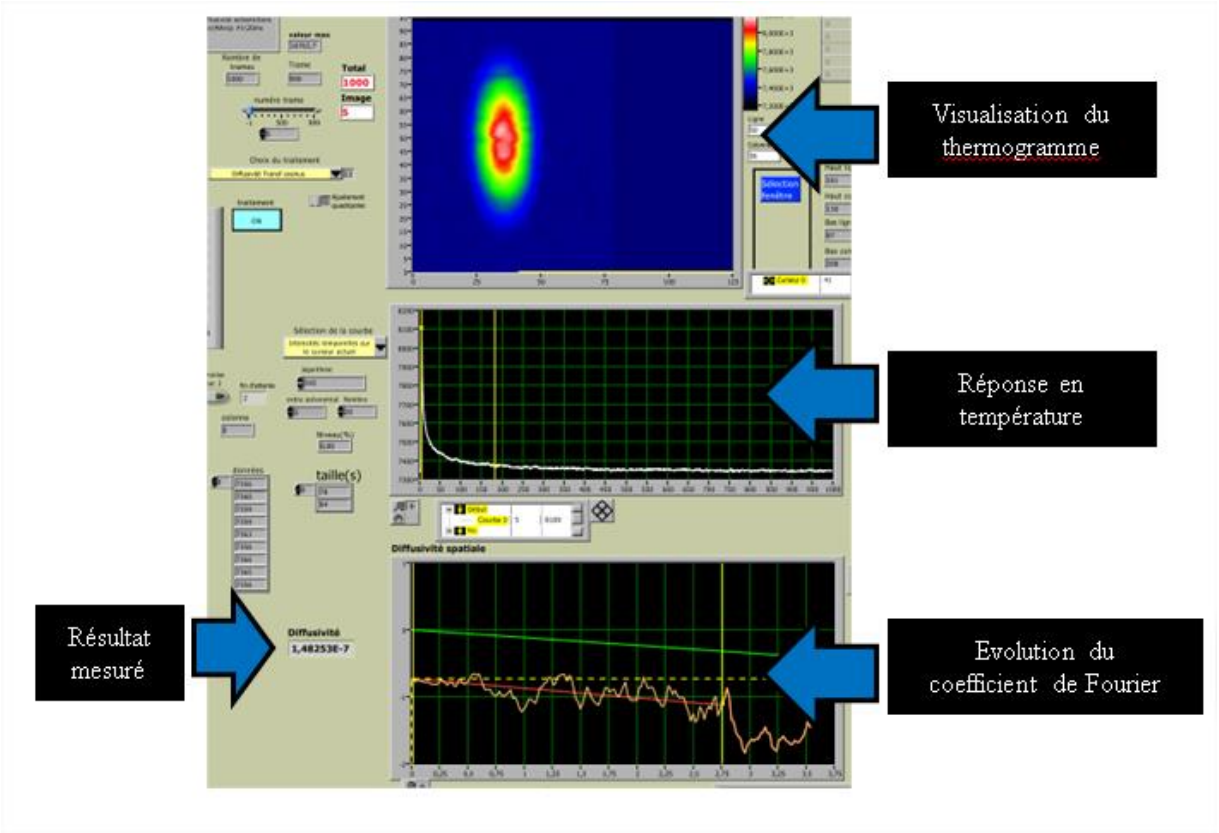


Figure 485 : Interface

b) Outil pour la détermination de la diffusivité thermique par estimation de paramètres

L'outil suivant permet d'estimer un ou plusieurs parametres (diffusivité thermique, é aisseur d'un matériau, conductivité thermique) par inversion d'un modè e théo ique à base de quadripôles thermiques. Ce modèle permet de dé erminer la répo se en tempé ature d'un echantillon soumis à une excitation flash à partir de divers parametres expérimenataux. Ce modèle est plus complet que le modèle de **Parker** car il peut prendre en compte les pertes face avant, face arrière ainsi que trois types de matériaux différents superposés (modèle tricouche). Le logiciel peut à partir d'une répon e en tempé ature inverser le modè e et remonter au parametres d'entré . Cet outil comporte une zone de saisie des parametres connus, une entré fichier permettant d'injecter les donné e expé imentales mise en forme au format .txt. L'inversion du modè e s'effectue à l'aide d'un algorithme de *Levenberg marquardt.*

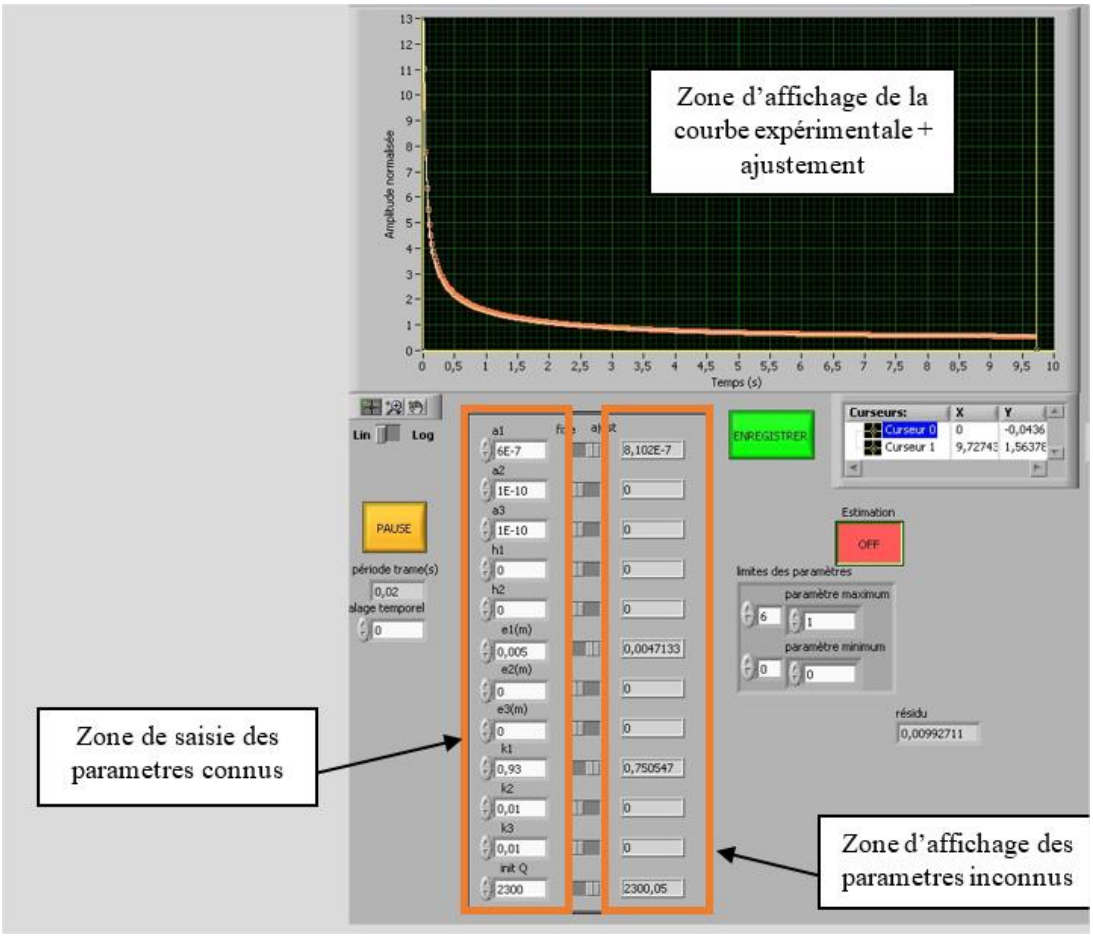


Figure 486 : Interface de l'outil d'estimation de parametres

c) Outils de simulation tricouche

Présentons maintenant notre outil de simulation **Réponse modèle tricouche perte convolué** en version 2.

Nous utilisons régulièrement cet outil de simulation 1D tricouche. Cet outil permet à partir d'une excitation prédéfinie ou d'une entrée fichier (voir **Figure 489**) de modéliser à l'aide des quadripôles thermiques le comportement en face arrière ou avant d'un échantillon. Il est possible d'augmenter le réalisme de la simulation en ajoutant du bruit, cet élément est important, car il permet d'en estimer l'impact. Le modèle est capable de prendre en compte les pertes thermiques.

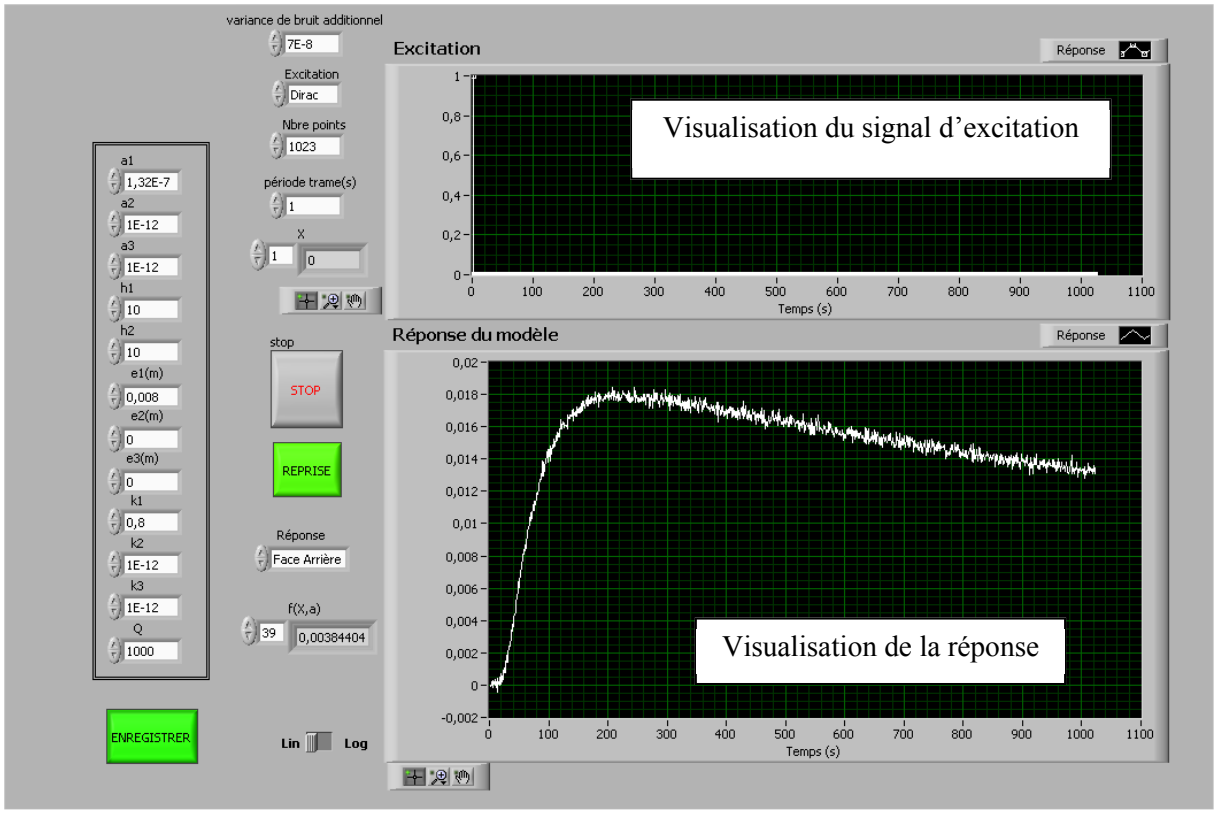


Figure 487 : Interface

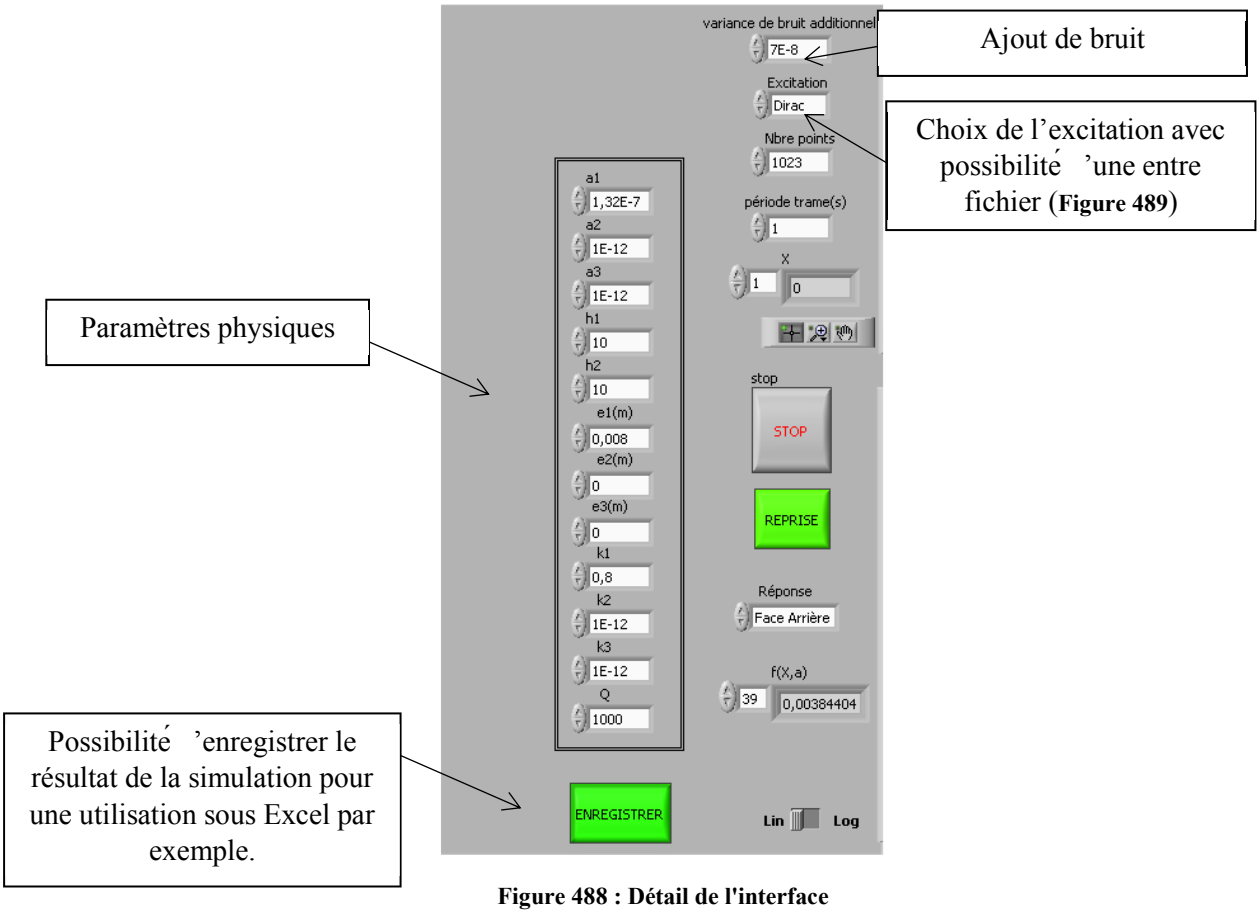


Figure 488 : Détail de l'interface

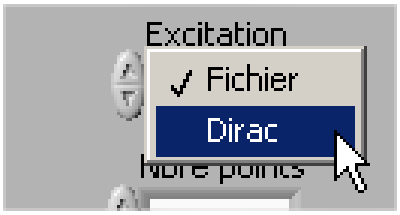


Figure 489 : Choix de l'excitation

D. Annexe du chapitre IV

29.15. Publications

2016

Relationship between Na2SO4 concentration and thermal response of reconstituted stone in the laboratory and on site

Article (PDF Available) *in* Environmental Earth Sciences 75(9) · May 2016
DOI: 10.1007/s12665-016-5388-9

C. Thomachot-Schneider, Maxime Gommeaux, Norman Lelarge, Alexandra Conreux, Mouhoubi Kamel, Jean luc Bodnar, Patricia Vázquez

Abstract

The reconstituted stone used in the Orval Abbey is highly susceptible to salt weathering. It was produced from debris of natural stones (which were at that time in short supply) by craftsmen working in the Abbey and its composition is highly variable. The major salt involved in weathering is sodium sulfate (Na2SO4). This study focused on the thermal behavior of a reconstituted stone with various degrees of weathering observed on-site and it was studied by passive and active infrared thermography (IRT), and on the evolution of reconstituted-stone samples in a salt uptake experiment in the laboratory. On-site, the thermal responses of salt-weathered and unweathered zones were different. IRT allowed to detect unweathered though highly salt-laden zones, although correlations between thermal response and salt concentration are difficult to establish due to the influence of surface properties (color and roughness). In the laboratory, samples of the reconstituted stone were submitted to successive immersion-drying cycles in solutions of Na2SO4 with 7, 14 and 26 % concentration and characterized by weighing, surface colorimetry and active IRT. Results showed that the thermal response (increase in surface temperature due to flash excitation: T max) increased with salt concentration and with the number of cycles, as long as sample disintegration had not started. Then, it decreased and stabilized, whatever the salt concentration. Those results indicated that an increase in the thermal response of building materials (in active IRT) can be interpreted as an indicator of salt accumulation, possibly leading to damage. IRT proved to be an interesting non-destructive technique in this respect.

2015

Infrared Thermography monitoring of the NaCl crystallisation process

Article (PDF Available) *in* Infrared Physics & Technology 71 · April 2015
DOI: 10.1016/j.infrared.2015.03.013

Patricia Vázquez, C. Thomachot-Schneider, Mouhoubi Kamel, Jean luc Bodnar

Abstract

In this work, we describe the growth of NaCl crystals by evaporating droplets of aqueous solution while monitoring them with infrared thermography. Over the course of the evaporation experiments, variations in the recorded signal were observed and interpreted as being the result of evaporation and crystallisation. In particular, we observed sharp and transient decreases in the thermosignal during the later stages of high-concentration drop evaporation. The number of such events per experiment, referred to as “pop-cold events”, varied from 1 to over 100 and had durations from 1 to 15 seconds. These events are interpreted as a consequence from the top-supplied creeping (TSC) of the solution feeding the growth of efflorescence-like crystals. This phenomenon occurred when the solution was no longer macroscopically visible. In this case, efflorescence-like crystals with a spherulite shape grew around previously formed cubic crystals. Other crystal morphologies were also observed but were likely fed by mass diffusion or bottom-supplied creeping (BSC) and were not associated with “pop-cold events”; these morphologies included the cubic crystals at the centre, ring-shaped at the edge of droplets and fan-shaped crystals. After complete evaporation, an analysis of the numbers and sizes of the different types of crystals was performed using image processing. Clear differences in their sizes and distribution were observed in relation to the salt concentration. Infrared thermography permitted a level of quantification that previously was only possible using other techniques. As example, the intermittent efflorescence growth process was clearly observed and measured for the first time using infrared thermography.

29.16. Conférence et congrès

2015

Infrared thermography as a tool to assess salt crystallization

Conference Paper (PDF Available) · September 2015, Conference: WMESS 2015, At Prague

Patricia Vázquez, C. Thomachot-Schneider, Mouhoubi Kamel, Jean luc Bodnar

Abstract

Infrared thermography is a non-destructive and non-invasive technique that allows to detect temperature or emissivity changes. Thus, it is widely used in the moisture detection or in the evaluation of structural problems in buildings. In the field of cultural heritage, the use of infrared thermography goes from the detection of humidity and moisture transfer to the differentiation of materials and restoration phases. Last researches focused on weathering processes detection, such as salt crystallization. IRT is already very useful in the salt detection but not in salt identification. Because infrared thermography detects temperature variations, it can be expected that the thermodynamic processes such as crystallization (exothermic process) or evaporation (endothermic process) should be detected. The aim of this research is to study with infrared thermography the crystallization kinetics and thermodynamics of the main salts found in building walls in order to be able to identify them in situ. Evaporation of salt droplets was recorded with passive infrared thermography. Several salt types were studied: NaCl, MgSO4, KNO, Ca(NO3) 2 and Na2SO4.These salts were chosen since they are commonly found in weathered parts of buildings. All these salts were studied in different volumes, concentrations and temperatures, depending on their crystallization thermodynamics. The droplets were placed on black adhesive tape (3M), which served as a reference material and was stuck to a glass slide. Its emissivity was determined to be 0.96 in the wavelength analysed by the camera. The glass slides with the solution droplets were placed on a cooling plate that could keep stable temperatures from-30 to 80ºC. In addition to entire image observation, variations in the TS were recorded throughout the study in several points of the droplets and compared to the black tape reference. Heat released by crystallization was not always observed. However, the different shapes of crystals and crystallization processes were recorded. Some spectacular processes that were

identified with IRT were the dendritic growth of KNO, the crystallization and fusion of Ca(NO3) 2 due to its low fusion point when tetrahydrated, the creeping phenomenon of NaCl efflorescence growth or the increase of temperature of Na2SO4 during crystallization. In some cases, the difference of emissivity between solid and liquid or simply the crystal shape were the determinant parameters to observe the crystallization phenomena.

Thermographie infrarouge stimulée appliquée à la détection de sel de type chlorure de sodium dans des peintures murales du patrimoine

Conference Paper (PDF Available) · May 2015, Conférence: SFT 2015, At La Rochelle

Mouhoubi Kamel, Jean luc Bodnar, Jean-Marc Vallet, C. Thomachot-Schneider

Abstract

Marseille (CICRP) mènent depuis plus de 10 ans des recherches conjointes en vue de détecter et de caractériser des défauts dans des peintures murales du patrimoine. Pour cela, ils mettent en oeuvre la thermographie infrarouge stimulée. Au cours de ces années, ces trois équipes se sont principalement intéressées, avec succès, aux défauts de nature structurelle, tels que des déplacages. Mais il existe un autre type de défaut, qui est aussi critique en matière de conservation des oeuvres d'art. Il s'agit de l'infiltration puis de la cristallisation de sels hygroscopiques dans les oeuvres d'art. En effet, les sels au cours de la phase de cristallisation, augmentent de volume et peuvent donc faire éclater la partie de l'oeuvre d'art les entourant. Dans ce travail, nous avons alors approché les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection d'un sel particulier, le chlorure de sodium, dans des pierres calcaires d'Avignon. Nous montrons, expérimentalement, que la présence de sels conduit à une élévation locale du paramètre effusivité thermique, à une baisse locale de l'échauffement maximal induit par l'analyse flash, et donc que la mesure de ces paramètres thermiques permet la détection de ce type de sel.

2014

Study of NaCl crystallization with passive infrared thermography

Conference Paper (PDF Available) · October 2014

Conference: SWBSS2014 3rd International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures 14-16 October 2014, At Brussels

Patricia Vázquez, C. Thomachot-Schneider, Mouhoubi Kamel, Jean luc Bodnar

Thermal behaviour of building stones submitted to salt solutions

Conference Paper (PDF Available) · October 2014

Conference: SWBSS2014, At Bruxelles

Jean luc Bodnar, C. Thomachot-Schneider, Patricia Vázquez, Mouhoubi Kamel

Détection de sels situés dans des œuvres d'art par thermographie infrarouge stimulée.

Conference Paper (PDF Available) · September 2014

Conference: ENOVA 2014, At Paris

Jean luc Bodnar, Mouhoubi Kamel

Detection of hygroscopic salts before the apparition of degradation patterns: experimental approach on limestones using the stimulated infrared thermography

Conference Paper (PDF Available) · May 2014

Conference: ICOMOS-ISCS 2014, At Gongju

Mouhoubi Kamel, Jean-Marc Vallet, V. Detalle,

29.17. Résultats mesure de la diffusivité sur échantillons minces à l'aide de la méthode flash

Tableau 101 : Résultats mesure de diffusivité thermique par methode flash (diffusivimetre) sur echantillons minces

Epaisseurc Echantillon N°	#1	#2	#3	#4	
Avignon saturé 4%	5.20 mm	5.08 mm	5.33 mm	5.13 mm	
Avignon brut	5.15 mm	5.20 mm	5.06 mm	5.08 mm	

		Méthode de dépouillement			
		Parker	P time	Moments	OLS
Avignon saturé 4% 04 mars 2013	Ech #1 Essai #1	1,04E-06	9,46E-07	9,60E-07	9,52E-07
	Ech #1 Essai #2	1,04E-06	9,52E-07	9,71E-07	9,57E-07
	Ech #1 Essai #3	1,02E-06	9,43E-07	9,69E-07	9,52E-07
	Ech #1 Essai #4	1,00E-06	9,00E-07	9,13E-07	9,06E-07
	Ecart type Ech #1	1,91E-08	2,38E-08	2,73E-08	2,39E-08
	Moyenne Ech #1	1,03E-06	9,35E-07	9,53E-07	9,42E-07
	Ech #2 Essai #1	1,00E-06	9,13E-07	9,39E-07	9,24E-07
	Ech #2 Essai #2	1,00E-06	9,25E-07	9,50E-07	9,34E-07
	Ech #2 Essai #3	1,00E-06	9,07E-07	9,27E-07	9,15E-07
	Ech #2 Essai #4	9,90E-07	9,17E-07	9,47E-07	9,29E-07
	Ecart type Ech #2	5,00E-09	7,55E-09	1,03E-08	8,10E-09
	Moyenne Ech #2	9,98E-07	9,16E-07	9,41E-07	9,26E-07
	Ech #3 Essai #1	9,77E-07	9,07E-07	9,28E-07	9,13E-07
	Ech #3 Essai #2	9,56E-07	8,89E-07	9,19E-07	9,03E-07
	Ech #3 Essai #3	9,61E-07	8,96E-07	9,24E-07	9,08E-07
	Ech #3 Essai #4	9,58E-07	8,90E-07	9,15E-07	8,98E-07
	Ecart type Ech #3	9,56E-09	8,27E-09	5,69E-09	6,45E-09
	Moyenne Ech #3	9,63E-07	8,96E-07	9,22E-07	9,06E-07
	Ech #4 Essai #1	9,75E-07	9,08E-07	9,29E-07	9,11E-07
	Ech #4 Essai #2	9,28E-07	8,46E-07	8,70E-07	8,55E-07
	Ech #4 Essai #3	9,60E-07	8,57E-07	8,69E-07	8,60E-07
	Ech #4 Essai #4	9,68E-07	8,88E-07	9,16E-07	9,02E-07
	Ecart type Ech #4	2,08E-08	2,84E-08	3,11E-08	2,86E-08
	Moyenne Ech #4	9,58E-07	8,75E-07	8,96E-07	8,82E-07
Avignon saturé 4% 11 décembre 2012	Essai 1	9,24E-07	8,68E-07	8,88E-07	8,68E-07
	Essai 2	9,30E-07	9,84E-07	9,13E-07	8,92E-07
	Essai 3	9,42E-07	9,00E-07	8,98E-07	8,93E-07
	Essai 4	8,89E-07	8,50E-07	8,72E-07	8,52E-07
	Écart type	2,28E-08	5,94E-08	1,72E-08	1,99E-08
	Moyenne	9,21E-07	9,01E-07	8,93E-07	8,76E-07
Avignon saturé 4%	Essai 6	9,91E-07	9,06E-07	9,25E-07	9,11E-07

18 décembre 2012	Essai 7	9,64E-07	8,83E-07	9,00E-07	8,80E-07
	Écart type	1,91E-08	1,63E-08	1,77E-08	2,19E-08
	Moyenne	9,78E-07	8,95E-07	9,13E-07	8,96E-07
Avignon saturé 4% 20 décembre 2012	Essai 8	9,81E-07	8,90E-07	9,10E-07	8,94E-07
	Essai 9	9,35E-07	8,75E-07	8,97E-07	8,84E-07
	Essai 10	9,79E-07	9,08E-07	9,36E-07	9,15E-07
	Écart type	2,60E-08	1,65E-08	1,99E-08	1,58E-08
	Moyenne	9,65E-07	8,91E-07	9,14E-07	8,98E-07
	Écart type général	3,62E-08	3,21E-08	2,83E-08	2,85E-08
	Moyenne générale	9,72E-07	9,02E-07	9,19E-07	9,04E-07

Avignon brut 04 mars 2013	Ech #1 Essai #1	9,00E-07	8,18E-07	8,33E-07	8,23E-07
	Ech #1 Essai #2	9,08E-07	8,20E-07	8,34E-07	8,25E-07
	Ech #1 Essai #3	9,08E-07	8,18E-07	8,40E-07	8,29E-07
	Ech #1 Essai #4	9,17E-07	8,23E-07	8,41E-07	8,31E-07
	Ecart type Ech #1	6,95E-09	2,36E-09	4,08E-09	3,65E-09
	Moyenne Ech #1	9,08E-07	8,20E-07	8,37E-07	8,27E-07
	Ech #2 Essai #1	8,95E-07	8,00E-07	8,11E-07	8,07E-07
	Ech #2 Essai #2	8,95E-07	8,01E-07	8,11E-07	8,05E-07
	Ech #2 Essai #3	9,19E-07	8,26E-07	8,40E-07	8,32E-07
	Ech #2 Essai #4	8,93E-07	8,14E-07	8,30E-07	8,21E-07
	Ecart type Ech #2	1,24E-08	1,23E-08	1,44E-08	1,27E-08
	Moyenne Ech #2	9,01E-07	8,10E-07	8,23E-07	8,16E-07
	Ech #3 Essai #1	8,90E-07	8,01E-07	8,16E-07	8,07E-07
	Ech #3 Essai #2	8,72E-07	8,37E-07	8,31E-07	8,22E-07
	Ech #3 Essai #3	8,39E-07	7,52E-07	7,46E-07	7,49E-07
	Ech #3 Essai #4	8,58E-07	7,82E-07	7,97E-07	7,89E-07
	Ecart type Ech #3	2,16E-08	3,56E-08	3,70E-08	3,15E-08
	Moyenne Ech #3	8,65E-07	7,93E-07	7,98E-07	7,92E-07
	Ech #4 Essai #1	9,17E-07	8,23E-07	8,37E-07	8,27E-07
	Ech #4 Essai #2	9,15E-07	8,29E-07	8,42E-07	8,33E-07
	Ech #4 Essai #3	9,10E-07	8,23E-07	8,39E-07	8,30E-07
	Ech #4 Essai #4	9,15E-07	8,33E-07	8,49E-07	8,39E-07
	Ecart type Ech #4	2,99E-09	4,90E-09	5,25E-09	5,12E-09
	Moyenne Ech #4	9,14E-07	8,27E-07	8,42E-07	8,32E-07
Avignon brut 11 décembre 2012	Essai 1	8,60E-07	7,99E-07	8,09E-07	8,03E-07
	Essai 2	8,74E-07	8,28E-07	8,66E-07	8,24E-07
	Essai 3	8,83E-07	8,04E-07	8,14E-07	8,21E-07
	Essai 4	8,61E-07	8,04E-07	8,19E-07	8,08E-07
	Écart type	1,10E-08	1,30E-08	2,63E-08	1,01E-08
	Moyenne	8,70E-07	8,09E-07	8,27E-07	8,14E-07
Avignon brut 18 décembre 2012	Essai 6	9,06E-07	8,19E-07	8,34E-07	8,20E-07
	Essai 7	8,92E-07	8,02E-07	8,15E-07	8,07E-07
	Écart type	9,90E-09	1,20E-08	1,34E-08	9,19E-09
	Moyenne	8,99E-07	8,11E-07	8,25E-07	8,14E-07
Avignon brut 20 décembre 2012	Essai 8	8,92E-07	8,02E-07	8,15E-07	8,07E-07
	Essai 9	8,85E-07	7,93E-07	8,00E-07	7,98E-07
	Essai 10	9,00E-07	8,12E-07	8,25E-07	8,19E-07
	Écart type	7,51E-09	9,50E-09	1,26E-08	1,05E-08
	Moyenne	8,92E-07	8,02E-07	8,13E-07	8,08E-07
	Écart type général	2,14E-08	1,83E-08	2,29E-08	1,86E-08
	Moyenne générale	8,92E-07	8,11E-07	8,24E-07	8,15E-07

Comp Avignon sat 4%/Avignon brut	Écart (%)	8,98%	11,28%	11,61%	10,95%

29.18. Résultats mesures sur échantillons minces en face avant

Tableau 102 : Résultats mesure parametres thermophysiques sur ech. minces par methode photothermique

	Témoin					sel			
	Effusivité thermique b (SI)	T_{max} (K)	Diffusivité Parker (m²/s)	Diffusivité ajustement (m²/s)		Effusivité thermique b (SI)	T_{max} (K)	Diffusivité Parker (m²/s)	Diffusivité ajustement (m²/s)
Dépouillement 1	1049,7	12,9	9,40E-07			1107,7	9,7	1,00E-06	
	1039,6	13,3	8,80E-07			1124,7	11	1,00E-06	
	1034,4	12,5	9,40E-07			1093,7	8,5	9,40E-07	
	1032	12,3	9,40E-07			1075,7	9,6	9,40E-07	
	998,6	10,1	9,40E-07			1103,9	9,9	1,10E-06	
Moyenne	1030,86	12,22	9,28E-07			1101,14	9,74	9,96E-07	
Écart type	19,27	1,25	2,68E-08			18,09	0,89	6,54E-08	
Dépouillement 2	1059,1	12,9	9,70E-07	8,26E-07		1096,1	9,7	9,40E-07	9,91E-07
	1044,3	13,6	8,40E-07	8,97E-07		1133,8	11,2	1,00E-06	1,02E-06
	1027,4	12,2	8,80E-07	8,98E-07		1126,7	8,2	1,00E-06	9,69E-07
	1050,8	12,2	9,40E-07	9,09E-07		1061,1	9,5	9,40E-07	1,06E-06
	1009	10	9,40E-07	7,62E-07		1117,7	9,7	9,40E-07	9,40E-07
Moyenne	1038,12	12,18	9,14E-07	8,58E-07		1107,08	9,66	9,64E-07	9,98E-07
Écart type	20,01	1,35	5,27E-08	6,32E-08		29,35	1,06	3,29E-08	4,82E-08
Dépouillement 3	1131,71	1,8				1024,81	1,76		
	1039,53	1,85				1094,31	1,76		
	1023,82	1,86				1178,1	1,31		
	1093,15	1,91				1051,98	1,81		
	1021,49	1,65				1162,72	1,68		
Moyenne	1061,94	1,814				1038,12	12,18		
Écart type	48,56	0,10				67,08	0,20		
Moyenne totale	1043,64	8,74	9,21E-07	8,58E-07		1103,53	7,02	9,80E-07	9,98E-07
Écart type total	32,91	5,16	4,01E-08	6,32E-08		40,40	3,99	5,16E-08	4,82E-08

29.19. Résultat mesure de diffusivité echantillons mince en face avant par ThIR

Tableau 103 : Mesure diffusivité ech. minces face avant par ThIR

	Témoin		**sel**	
	Diffusivité Parker (m²/s)	**Diffusivité ajustement (m²/s)**	**Diffusivité Parker (m²/s)**	**Diffusivité ajustement (m²/s)**
Dépouillement 1	9,40E-07		1,00E-06	
	8,80E-07		1,00E-06	
	9,40E-07		9,40E-07	

	9,40E-07		9,40E-07	
	9,40E-07		1,10E-06	
Moyenne	9,28E-07		9,96E-07	
Écart type	2,68E-08		6,54E-08	
Dépouillement 2	9,70E-07	8,26E-07	9,40E-07	9,91E-07
	8,40E-07	8,97E-07	1,00E-06	1,02E-06
	8,80E-07	8,98E-07	1,00E-06	9,69E-07
	9,40E-07	9,09E-07	9,40E-07	1,06E-06
	9,40E-07	7,62E-07	9,40E-07	9,40E-07
Moyenne	9,14E-07	8,58E-07	9,64E-07	9,98E-07
Écart type	5,27E-08	6,32E-08	3,29E-08	4,82E-08
Moyenne totale	**9,21E-07**	**8,58E-07**	**9,80E-07**	**9,98E-07**
Écart type total	**4,01E-08**	**6,32E-08**	**5,16E-08**	**4,82E-08**

29.20. Résultats mesures diffusivité thermique sur échantillons minces en face arrière

Tableau 104 : Résultats mesure diffusivité thermique en face arrière sur ech. minces

	Méthode				
		Parker	P time	Moments	OLS
Avignon saturé 4% Fev 2014	Tir 1 essai 1		2,06E-06	6,93E-07	1,04E-06
	Tir 1 essai 2	1,05E-06	1,16E-06	6,98E-07	9,78E-07
	Moyenne courbes	9,71E-07	1,64E-06	7,55E-07	9,45E-07
	Tir 2 essai 1	5,12E-05	1,53E-06	3,32E-07	9,12E-07
	Tir 2 essai 2	9,34E-07	8,49E-07	5,63E-07	8,79E-07
	Moyenne courbes	8,02E-07	9,44E-07	5,96E-07	8,59E-07
	Tir 3 essai 1	8,92E-07	1,55E-06	4,37E-07	9,06E-07
	Tir 3 essai 2	4,32E-05	1,73E-06	4,19E-07	9,55E-07
	Moyenne courbes	8,49E-07	1,87E-06	5,29E-07	9,31E-07
	Tir 4 essai 1	8,47E-07	2,33E-06	4,30E-07	8,76E-07
	Tir 4 essai 2	7,43E-07	1,54E-06	4,59E-07	7,43E-07
	Moyenne courbes	2,89E-05	1,42E-06	4,42E-07	8,01E-07
	Tir 5 essai 1	1,07E-06	8,24E-07	1,09E-06	1,11E-06
	Tir 5 essai 2	3,14E-05	3,83E-06	8,50E-07	9,20E-07
	Moyenne courbes	1,04E-06	8,76E-07	9,41E-07	1,02E-06
	Écart type	1,84E-05	7,64E-07	2,19E-07	1,01E-07
	Moyenne	1,17E-05	1,61E-06	6,16E-07	9,25E-07
Avignon brut Fev 2014	Tir 1 essai 1	8,21E-07	1,31E-06	7,06E-07	8,21E-07
	Tir 1 essai 2	7,34E-07	7,59E-07	7,89E-07	8,54E-07
	Moyenne courbes	7,38E-07		6,52E-07	8,05E-07
	Tir 2 essai 1	7,87E-07	8,58E-07	4,03E-07	8,45E-07
	Tir 2 essai 2	8,02E-07		5,00E-07	8,43E-07
	Moyenne courbes	7,37E-07	8,00E-07	6,28E-07	7,81E-07
	Tir 3 essai 1	6,80E-07	7,12E-07	2,90E-07	7,54E-07
	Tir 3 essai 2	6,71E-07	7,82E-07	2,63E-07	7,67E-07
	Moyenne courbes	6,89E-07	1,09E-06	3,86E-07	7,61E-07
	Tir 4 essai 1	3,56E-05	1,80E-06	3,53E-07	7,74E-07
	Tir 4 essai 2	7,19E-07	6,40E-07	4,65E-07	7,36E-07
	Moyenne courbes	6,68E-07	7,21E-07	4,93E-07	7,43E-07
	Tir 5 essai 1	9,85E-06	1,46E-06	5,02E-07	7,98E-07
	Tir 5 essai 2	8,19E-07	1,29E-06	6,45E-07	7,93E-07

	Moyenne courbes	1,14E-07	1,45E-06	6,19E-07	8,00E-07
	Écart type	9,16E-06	3,72E-07	1,57E-07	4,11E-08
	Moyenne	3,63E-06	1,05E-06	5,13E-07	7,92E-07
Comparaison Avignon sel 4%/Avignon brut	Écart (%)	222,62%	53,14%	20,02%	16,90%

29.21. Analyse en aléatoire d'echantillons mince : Détermination de l'effusivité thermique et du Tmax (Paramètre na = nb = 5)

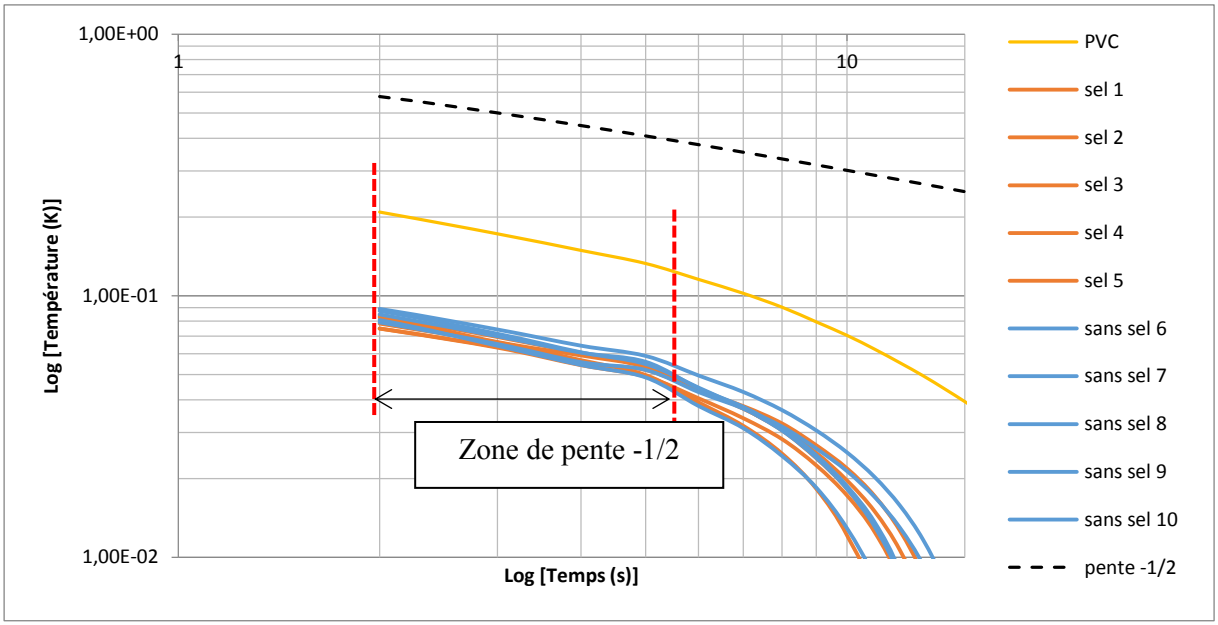


Figure 490 : Évolution logarithmique de la température

Les résultats de ce dépouillement sont regroupés sur le tableau suivant.

Tableau 105 : Propriétés thermophysiques mesurées

	b mesuré (SI)	b moyen (SI)	écart type (SI)
b sel 1	1054,7	1091,1	54,7
b sel 2	1143,2		
b sel 3	1158,4		
b sel 4	1011,1		
b sel 5	1088,2		
b théorique sel	1101		

T_{max} (K)	T_{max} moyen	Ecart type T_{max} (K)
0,18	0,17	0,02
0,17		
0,15		
0,20		
0,18		

b témoin 1	1068,6	1015,0	49,7
b témoin 2	1077,3		
b témoin 3	991,3		
b témoin 4	948,8		
b témoin 5	989,3		
b théorique témoin	1030		

0,19	0,20	0,01
0,19		
0,21		
0,22		
0,20		

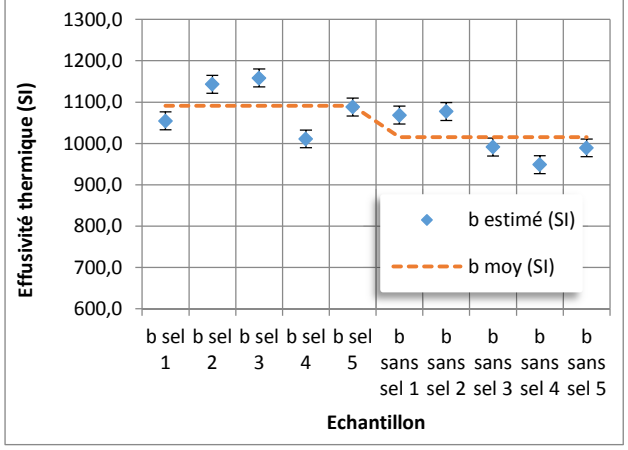


Figure 491 : Évolution de l'effusivité b

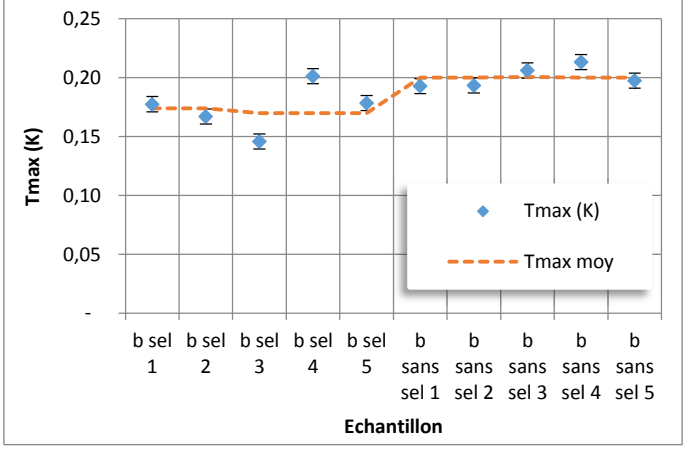


Figure 492 : Évolution de la température maximale

On observe les mêmes résultats que précédemment les valeurs d'effusivité sont plus élevés pour les échantillons avec sel que ceux sans sel, on observe de plus que les températures maximales sont plus grandes pour les zones sans sel.

29.22. Complément à l'analyse d'un bloc épais (peint en face avant)

Ces résultats font suite à l'étude effectué en 20.2 page 244, elle comprend l'étude d'un bloc de calcaire soumis à une infiltration de sel à l'aide d'un excitation créneau puis aléatoire.

29.22.1. Analyse avec des halogènes en créneau

381

Excitation créneau 2 x 500 W pendant 1 s.

a) Analyse spatiale

L'image thermique permet de repérer lèvement la zone d'infiltration. On note une légère inflexion provoquée par la présence de sel sur le graphe du profil de température.

Tableau 106 : Etude d'un bloc épais soumis à une excitation créneau (analyse spatiale)

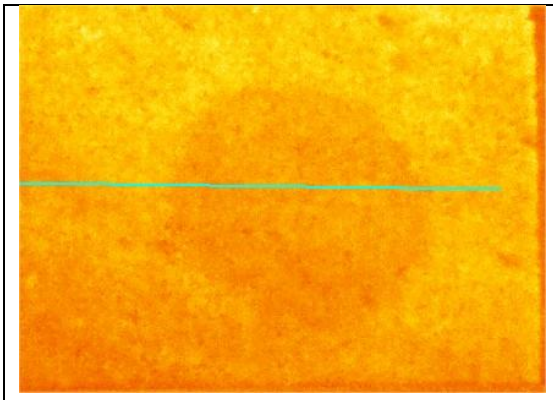


Figure 493 : Image thermique de l'échantillon avec profil

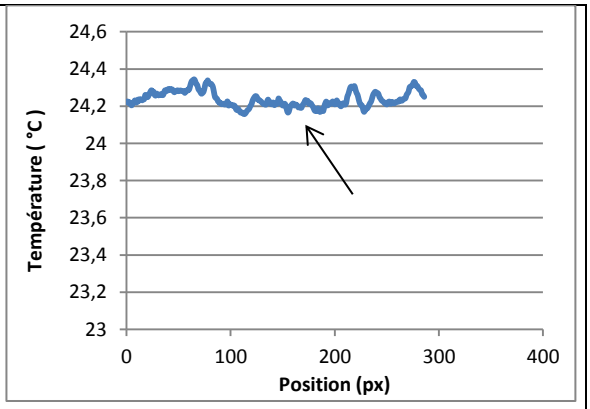


Figure 494 : Profil de température

b) Analyse temporelle

Les répondses en température sont disjointes pendant l'echauffement et le début du refroidissement. On observe 4 °C d'écart dans les élévations de température.

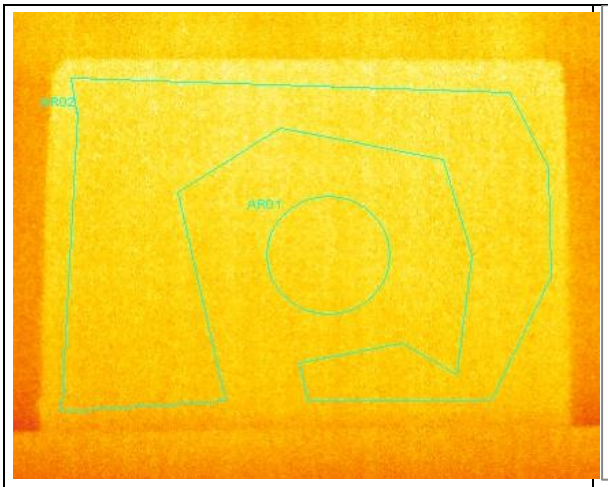
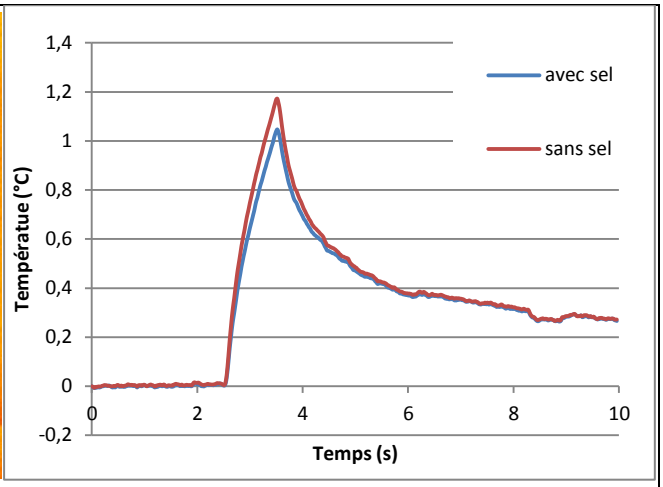


Image thermique et zones d'étude



Réponses en température des 2 zones

Figure 495 : Etude d'un bloc épais soumis à une excitation créneau (analyse temporelle)

c) Mesure de propriétés thermophysiques

Le calcul de l'effusivité relative b* et du Tmax se sont fait sur les zones délimitées sur la figure ci-dessus. Le tableau suivant regroupe ces valeurs, elles sont conformes à ce qui est attendu. On note toutefois un faible ecart en ce qui concerne l'effusivité mais cela a déjà été observé avec ce type d'excitation (faible énergie et durée d'observation longue donc faible echauffement de l'echantillon).

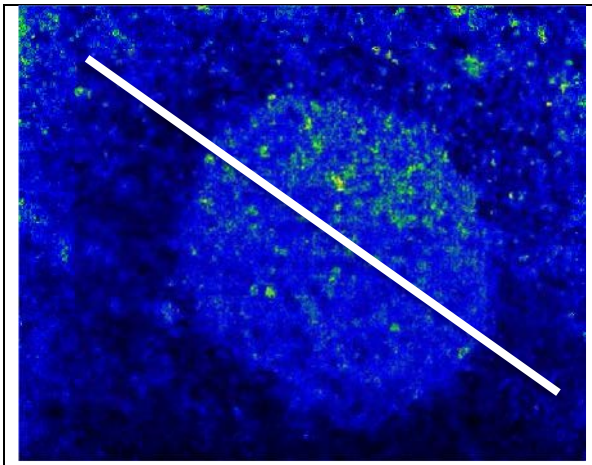
Tableau 107 : Propriétés thermo-physiques mesuré sur un bloc soumis à une excitation créneau

	b*	T_{max} (K)
Zone sel	1,02	1,05
Zone sans sel	1,00	1,17

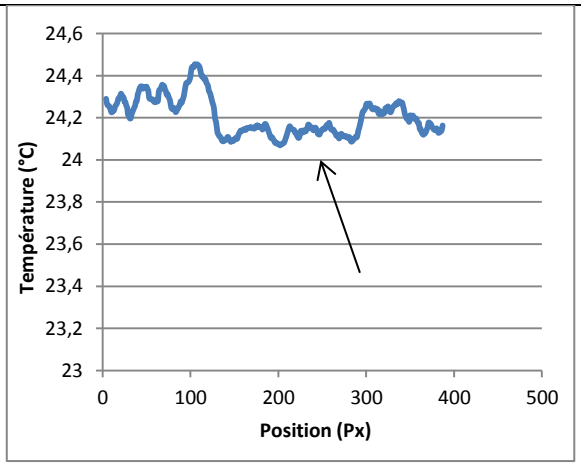
29.22.2. Analyse avec des halogènes en aléatoire

Nous effectuons la même étude sur le même bloc en le soumettant à une excitation aléatoire (PRBS 256).

a) Analyse spatiale



Réponse impulsionnelle avec profil



Profil spatial

Figure 496 : Etude d'un bloc épais soumis à une excitation créneau (analyse spatiale)

Le repérage de la zone est très net sur le profil spatial ci-dessus, contraireent au résultat obtenu avec un créneau.

b) Analyse temporelle

Les deux figures suivantes représentent d'une part un thermogramme avec l'emplacement d'extraction des ré onses en tempé atures brutes et d'autre part les ré onses impulsionelles reconstruites au moyen d'une reconstruction parametrique ARMA.

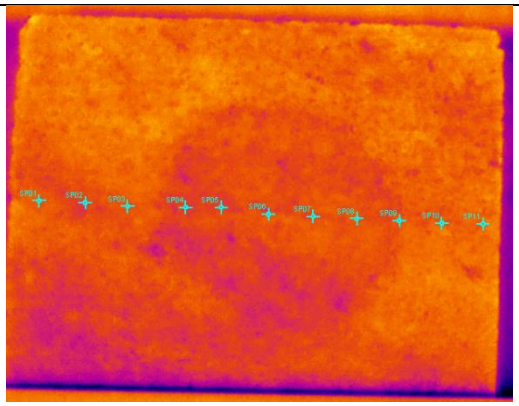
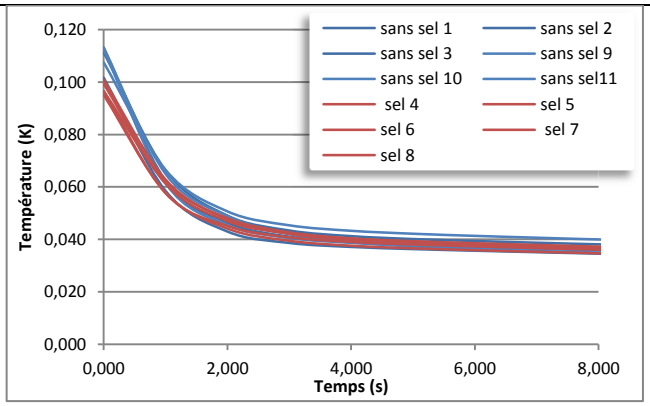


Image thermique avec point d'étude



Réponses en température reconstruites

Figure 497 : Etude d'un bloc épais soumis à une excitation créneau (analyse temporelle)

Les réponses impulsionnelles des points étudiés se regroupent en deux séries clairement identifiables aux temps courts : la premiere correspond aux points de la zone sans sel, pour ces points l'echauffement est plus important aux premiers instants, les point situés dans la zone avec sel ont des echauffements moindres. Ceci s'accorde avec les observations déjà faites.

c) Estimation de propriétés thermophysiques

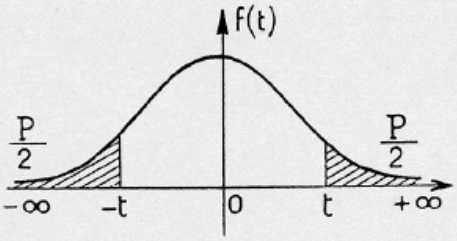
Le tableau suivant regroupe les efffusivités relatives moyennes ainsi que l'echauffement maximal moyen des deux zones d'intérêt :

Tableau 33:Résultats des paramètres thermo-physique mesurés

	b*	Tmax
Moyenne zone sel	1,07	0,10
Moyenne zone sans sel	0,98	0,11

Ces résultats son conforme à ceux déjà relevés à savoir une effusivité supérieure dans la zone avec celle et un echauffement moindre.

29.23. Table de Student



ν \ P	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,929
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
80	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

E. Annexe chapitre V

29.24. Publications et actes de congrès

Articles

2013

Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2013) 64: 21001 http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2013130132

Non destructive testing of works of art by terahertz analysis

Jean-Luc Bodnar[1]a, Jean-Jacques Metayer[2], Kamel Mouhoubi[1] and Vincent Detalle[3]

[1] GRESPI/ ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims, France
[2] VISIOM, Parc de haute Technologie, 13 rue Alexis de Tocqueville, SILIC 41, 92182 Antony, France
[3] LRMH, 29 avenue du Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France

Received: 14 March 2013
Revised: 11 July 2013
Accepted: 17 October 2013
Published online: 15 November 2013

Eur. Phys. J. Appl. Phys. (2013) 64: 21001 http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2013130132

Abstract

Improvements in technologies and the growing security needs in airport terminals lead to the development of non destructive testing devices using terahertz waves. Indeed, these waves have the advantage of being, on one hand, relatively penetrating. They also have the asset of not being ionizing. It is thus potentially an interesting contribution in the non destructive testing field. With the help of the VISIOM Company, the possibilities of this new industrial analysis method in assisting the restoration of works of art were then approached. The results obtained within this framework are presented here and compared with those obtained by infrared thermography. The results obtained show first that the THZ method, like the stimulated infrared thermography allows the detection of delamination located in murals paintings or in marquetries. They show then that the THZ method seems to allow detecting defects located relatively deeply (10 mm) and defects potentially concealed by other defects. It is an advantage compared to the stimulated infra-red thermography which does not make it possible to obtain these results. Furthermore, they show that the method does not seem sensitive to the various pigments constituting the pictorial layer, to the presence of a layer of "Japan paper" and to the presence of a layer of whitewash. It is not the case of the stimulated infrared thermography. It is another advantage of the THZ method. Finally, they show that the THZ method is limited in the detection of low-size defects. It is a disadvantage compared to the stimulated infrared thermography.

Conférences

2013

13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII), 20-24 May 2013, Le Mans

Edge Detection Combined with Optical and Infrared NDT Techniques: an Aid for Wooden Samples with Complex Surface and Subsurface Defects

Article (PDF Available) *in* 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (NDCM-XIII) , 20-24 May 2013, Le Mans, France, www.ndt.net/?id=15516

Stefano SFARRA, Jean-Luc BODNAR, Dario AMBROSINI, Kamel MOUHOUBI, Domenica PAOLETTI

Abstract

To explore wood is to realize its complexity, its diversity, and its variability. The union of wood and paint is as old as the human desire to protect an object, or simply to decorate a surface. The link between paint and wood is therefore at the heart of any approach to conservation of these objects.

Panel paintings are increasingly being investigatedusing advanced non-destructive infrared and optical measurement techniques. In the present work, a wooden sample having a complex surface and

realized following the Cennino Cenninirules, containing natural and fabricated defects (Mylar®inserts), was investigated by stimulated thermography, near-infrared reflectography, double-exposure (DE) and sandwich holographic (SH) interferometry. The stimulated thermography technique consists in depositing energy, whatever be the means of deposition and the type of energy (sun, flash lamp,laser, and hot air flow), into the observed system (in the present case a wooden sample with complex surface and subsurface defects) and in monitoring the temporal and/or local evolution of the surface temperature field of the system caused by this thermal stimulation. Infrared reflectography is a non-destructive testing imagingtechnique based on the different optical behaviourof visible and near-infrared (NIR) radiation through a thin pictorial layer. This effect is a consequence of bothlower NIR absorption and reduced NIR scattering due to the particle size smaller than the wavelength. The acquisition of NIR images using LED lamps working at different wavelengths, seems a very promising method in this field. However, NIR and DE are not dynamic techniques, while SH is a dynamic technique. In the latter, a number of holograms can be made, each one recording a single state of the object, in a temporal sequence. Since enhancing the edge of a detached area identified by SH, means improving the detection of the defect's position, this idea was applied in the present research. Instead, the defect's depth was retrieved working with phase analysis, i.e. using the pulsed phase thermography (PPT) technique. Finally, the results coming from optical and infrared NDT techniques were compared each other in order to explore the advantages and disadvantages of the methods used.

Keywords : Infrared thermography,Near-infrared,Holographic interferometry,Panel painting,Defect

2014

12th Quantitative InfraRed Thermography (QIRT) conference

Identification of frescoes among murals paintings of the inheritance by stimulated infra-red thermography

K Mouhoubi, JL Bodnar, L Ibos, V Detalle, JM Vallet, T DuvautRevue : 12th Quantitative InfraRed Thermography (QIRT) conference

Abstract

In this work, we study the stimulated infrared thermography possibilities to differentiate fresco and mural painting using bone adhesive. We show theoretically and experimentally, that frescoes, because of the pictorial layer carbonation are with a thermal behaviour point of view, close to a single layer material, when murals paintings using bone adhesive are rather close to a double-layered material. This difference permits to differentiate these two types of murals paintings.

Table des illustrations

FIGURE 1 : GRANDS LABORATOIRES PARTENAIRES 2
FIGURE 2 : FRESQUES DE POMPÉI 3
FIGURE 3 : PEINTURE RUPESTRE (GROTTE DE LASCAUX) 3
FIGURE 4 : FRESQUE DE L'ÉGYPTE ANTIQUE (EXPÉDITION DE RAMSÈS II EN NUBIE) 3
FIGURE 5 : COUPE TRANSVERSALE DE LA STRUCTURE TYPIQUE D'UNE FRESQUE (A-COUCHE PICTURALE, B-INTONACO, C-ARRICCIO, D-MUR) 4
FIGURE 6 : ÉTUDE STRATIGRAPHIQUE SUR PIGMENT BLEU EFFECTUÉE AU MICROSCOPE À BALAYAGE ÉLECTRONIQUE – ABBAYE DE CHAALIS – LRMH. 4
FIGURE 7 : CYCLE DE LA CHAUX AÉRIENNE 5
FIGURE 8 : TABLEAU SYNTHÉTIQUE DES DIFFÉRENTS TYPES DE STRATÉGIE EN MATIÈRE DE CND 7
FIGURE 9 : LA JOCONDE (LÉONARD DE VINCI, MUSÉE DU LOUVRE PARIS), VUE DANS LE VISIBLE (1), SOUS UV (2), EN RÉFLECTOMÈTRE IR (3) ET AUX RAYONS X (4) 7
FIGURE 10 : PRINCIPE DE LA RADIOMÉTRIE INFRAROUGE STIMULÉE 11
FIGURE 11 : WILLIAM HERSCHEL (1738~1822), COMPOSITEUR ET ASTRONOME, DÉCOUVREUR DES INFRAROUGES 12
FIGURE 12 : SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE 12
FIGURE 13 : SPECTRE DE TRANSMISSION DE L'ATMOSPHÈRE 13
FIGURE 14 : FLUX DANS LA DIRECTION OX 14
FIGURE 15 : ÉMITTANCE SPECTRALE DU CORPS NOIR POUR DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES 15
FIGURE 16 : RÉPARTITION DE FLUX LORS D'UNE INTERACTION RAYONNEMENT/MATIÈRE 16
FIGURE 17 : PRINCIPE DU TRANSFERT DE CHALEUR CONDUCTIF (SOURCE SCHÉMA TRANSFERTS THERMIQUES, JANNOT) 18
FIGURE 18 : RÔLE DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE LORS D'UN ÉCHANGE DE CHALEUR 19
FIGURE 19 : EFFETS CONTRIBUTIFS À UNE SCÈNE THERMIQUE (TIRÉ DE MONCHAU [32]) 20
FIGURE 20 : THERMOGRAMME METTANT EN ÉVIDENCE DES PONTS THERMIQUES SUR UNE FAÇADE D'IMMEUBLE (SOURCE : HTTP://WWW.SPURGIN.FR). 20
FIGURE 21 : DÉTECTIVITÉ SPECTRALE DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE CAPTEUR (SOURCE HAMAMATSU) 21
FIGURE 22 : ANALYSE D'UNE ŒUVRE D'ART AU MOYEN DE LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE STIMULÉE 22
FIGURE 23 : THERMOGRAMMES OBTENUS À DIFFÉRENTS INSTANTS AVEC MISE EN ÉVIDENCE DE DÉFAUTS 22
FIGURE 24 : EFFET DES SELS HYGROSCOPIQUES SUR LA PIERRE 23
FIGURE 25 : PRINCIPE DE LA MISE EN ÉVIDENCE D'UN DÉFAUT EN THERMOGRAPHIE IR STIMULÉE 25
FIGURE 26 : PUERTA DE L'ALMOINA (CATHÉDRALE DE VALENCE) TIRÉ DE LA PUBLICATION. 26
FIGURE 27 : EXEMPLE DE CONFIGURATION PROBLÉMATIQUE SUR LE PLAN DE LA CONSERVATION 26
FIGURE 28 : ÉCHANTILLON (SOURCE : PUBLICATION) A) ZONE REPÉRÉE PAR MÉTHODE ACOUSTIQUE B) EN THERMOGRAPHIE IR STIMULÉE C) AVEC LA MÉTHODE 28
FIGURE 29 : INTERACTION ENTRE LES BANDES SPECTRALES ET LES COUCHES CONSTITUTIVES D'UNE FRESQUE (SOURCE : PUBLICATION) 28
FIGURE 30 : DIFFUSION LATÉRALE D'UN FRONT DE CHALEUR PONCTUEL (FACE AVANT) 30
FIGURE 31 : A) CUBE DE TEMPÉRATURE (MATRICE 3D DANS LE DOMAINE TEMPOREL), B) RÉPONSE EN TEMPÉRATURE EN FONCTION DU TEMPS AU POINT DE COORDONNÉES (I,J) 31
FIGURE 32 : DISTRIBUTION DU CONTRASTE PAR RAPPORT À LA VITESSE V POUR UNE DISTANCE D=50 MM (TIRÉ DE CARLOMAGNO ET MEOLA [78]) 32
FIGURE 33 : PRINCIPE DE LA MÉTHODE DU CONTRASTE 33
FIGURE 34 : PRINCIPE DU DAC (TIRÉ DE [91]) 34
FIGURE 35 : ÉVOLUTION DE LA PHASE AVEC LA FRÉQUENCE ET DÉTERMINATION DE LA « FRÉQUENCE AVEUGLE » F_B APPARENTE (TIRÉ DE [107]). 36
FIGURE 36 : STRUCTURE DE LA FAÇADE DU CHÂTEAU DE WARTBURG IN EISENACH, (ALLEMAGNE) EN IMAGE DE PHASE. (TIRÉ DE LA PUBLICATION) 36
FIGURE 37 : PRINCIPE DE LA THERMOGRAPHIE IR MODULÉE (LOCK-IN) 37
FIGURE 38 : PRINCIPE DE LA MÉTHODE DES 4 POINTS (TIRÉ DE D. WU [114]). 38
FIGURE 39 : FONCTION D'AUTOCORRÉLATION ET DENSITÉ SPECTRALE ESTIMÉES D'UN BRUIT BLANC APPROCHÉ 39

FIGURE 40 : PRINCIPE DE L'INTERCORRÉLATION : FONCTIONS F(T) ET G(T) ET FONCTION D'INTERCORRÉLATION. 40
FIGURE 41 : PRINCIPE DE L'ANALYSE CORRÉLATOIRE 41
FIGURE 42 : INTERPRÉTATION DE L'ACP 42
FIGURE 43 : RÉDUCTION DES EFFETS PAR LE PLS 43
FIGURE 44 : DISTRIBUTIONS DE TEMPÉRATURE SUR 3 PIXELS, INFLUENCE SUR LE SKEWNESS (TIRÉ DE MADRUGA [140]) 44
FIGURE 45 : INTERPRÉTATION VISUELLE DU SKEWNESS ET DU KURTOSIS 44
FIGURE 46 : LE DISPOSITIF SAMMTHIR 49
FIGURE 47 : SOURCE FLASH 49
FIGURE 48 : CARTE D'INTERFACE 49
FIGURE 49 : RELAIS STATIQUE 49
FIGURE 50 : VUE DE FACE AVANT 51
FIGURE 51 : VUE DE FACE ARRIÈRE 51
FIGURE 52 : MONTAGE VUE AVANT 51
FIGURE 53 : MONTAGE VUE ARRIÈRE 51
FIGURE 54 : IMAGE THERMIQUE BRUTE 51
FIGURE 55 : MONTAGE 52
FIGURE 56 : IMAGE THERMIQUE (DÉBUT D'ÉCHAUFFEMENT) 52
FIGURE 57 : IMAGE THERMIQUE (DÉBUT DE REFROIDISSEMENT) 52
FIGURE 58 : CONFIGURATION INHOMOGÈNE (RATIO TAILLE SOURCE/TAILLE ZONE INSUFFISANT) 54
FIGURE 59 : CONFIGURATION INHOMOGÈNE (MAUVAIS POSITIONNEMENT DES SOURCES) 54
FIGURE 60 : DÉPÔT D'ÉNERGIE UNIFORME SUR LA ZONE ÉTUDIÉE 54
FIGURE 61 : DÉPÔT D'ÉNERGIE INHOMOGÈNE EN RAISON DE LA COUCHE PICTURALE 54
FIGURE 62 : LE DISPOSITIF 55
FIGURE 63 : GROS PLAN DE LA TABLE DE MESURE ET DU DISPOSITIF DE MESURE 56
FIGURE 64 : FLUXMETRE 56
FIGURE 65 : RELEVÉ POUR UNE SOURCE UNIQUE PLACÉE À L'APLOMB (PROFILS À DIFFÉRENTES DISTANCE ET REPRÉSENTATION 3 D) . 56
FIGURE 66 : CONFIGURATION DE TYPE I 57
FIGURE 67 : EXEMPLES DE PROFILS TRANSVERSAUX ET LONGITUDINAUX (ÉCARTEMENT DES SOURCES = 15 CM) 57
FIGURE 68 : DÉPÔT D'ÉNERGIE MOYEN 58
FIGURE 69 : SURFACE UTILE 58
FIGURE 70 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE 59
FIGURE 71 : CONFIGURATION DE TYPE II 60
FIGURE 72 : DÉPÔT D'ÉNERGIE MOYEN 61
FIGURE 73 : SURFACE UTILE 61
FIGURE 74 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE 61
FIGURE 75 : CONFIGURATION II BIS 62
FIGURE 76 : DÉPÔT D'ÉNERGIE MOYEN 63
FIGURE 77 : SURFACE UTILE 63
FIGURE 78 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE 63
FIGURE 79 : CONFIGURATION DE TYPE III 64
FIGURE 80 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE 65
FIGURE 81: CONFIGURATION DE TYPE IV 66
FIGURE 82 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE 66
FIGURE 83 : SIGNAL D'EXCITATION ET RÉPONSE EN TEMPÉRATURE 69
FIGURE 84 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE ET POINTS D'INTÉRÊTS 69
FIGURE 85 : ÉCHANTILLON N°1 VUE DE FACE 70
FIGURE 86 : ÉCHANTILLON N°1 PROFIL 70
FIGURE 87 : ÉCHANTILLON N°1 VUE D'ENSEMBLE 70
FIGURE 88 : ÉCHANTILLON N°2 VUE D'ENSEMBLE 71
FIGURE 89 : ÉCHANTILLON N°2 VUE DE FACE 71
FIGURE 90 : ÉCHANTILLON N°2 PROFIL 71
FIGURE 91 : ÉCHANTILLON N° 3 VUE D'ENSEMBLE 71
FIGURE 92 : ÉCHANTILLON N° 3 PROFIL 71
FIGURE 93 : ÉCHANTILLON N° 3 VUE DE FACE 71
FIGURE 94 : ÉCHANTILLON N°4 VUE D'ENSEMBLE 72

FIGURE 95 : ÉCHANTILLON N°4 PROFIL 72
FIGURE 96 : ÉCHANTILLON N°4 FACE AVANT 72
FIGURE 97 : ST-CHRISTOPHE FACE AVANT 72
FIGURE 98 : ST-CHRISTOPHE EMPLACEMENT DES DÉFAUTS 72
FIGURE 99 : ST-CHRISTOPHE VUE D'ENSEMBLE 72
FIGURE 100 : SPECTRORADIOMETRE À LARGE BANDE 75
FIGURE 101 : CARACTÉRISATION DE SOURCES, PROTOCOLE N°1 (SOURCE ARCELOR MITTAL SA) 76
FIGURE 102 : MESURE DE PROPRIÉTÉS RADIATIVES (PROTOCOLE N°2) 76
FIGURE 103 : DISPOSITIF 77
FIGURE 104 : SOURCE CÉRAMIQUE SUR LE BANC D'ESSAI 77
FIGURE 105 : SOURCE EN TEST 77
FIGURE 106 : LUMINANCE SPECTRALE DES SOURCES CÉRAMIQUES À DIFFÉRENTES INTENSITÉS 78
FIGURE 107 : EXEMPLE D'ÉCHANTILLON ANALYSÉ 78
FIGURE 108 : ABSORPTIVITÉ HÉMISPHÉRIQUE DIRECTIONNELLE SPECTRALE DE DIFFÉRENTS PIGMENTS 79
FIGURE 109 : ÉCHANTILLON (1/VUE DE FACE, 2/VUE PROFIL, 3/MIS EN PLACE AVEC LE DISPOSITIF) 80
FIGURE 110 : MONTÉE EN REPRÉSENTATION NORMALISÉE (TEMPS) 80
FIGURE 111 : ÉCHANTILLON N° 6 81
FIGURE 112 : MEILLEURES IMAGES HALOGÈNES & CÉRAMIQUES 82
FIGURE 113 : INTERFACE DE L'OUTIL DE POST-TRAITEMENT 84
FIGURE 114 : INTÉGRATION ENTRE 2 BORNES DE LA RÉPONSE THERMIQUE D'UN PIXEL 85
FIGURE 115 : PRINCIPE DE LA MÉTHODE DU CONTRASTE 85
FIGURE 116 : PRINCIPE DU PPT 87
FIGURE 117 : ÉQUIVALENCE MATRICIELLE (TIRÉ DE WIKIPÉDIA) 88
FIGURE 118 : ÉTAPES DE LA DÉCOMPOSITION SVD 89
FIGURE 119 : EXEMPLE DE DÉTECTION DE DÉFAUT SUR UNE ŒUVRE D'ART AU MOYEN DU PCT (TIRÉ DE GAVRILOV [45]) 89
FIGURE 120 : RÉPONSE IMPULSIONNELLE 1D D'UN MUR SEMI-INFINI, ÉQUIVALENCE EN LOG-LOG 90
FIGURE 121 : RÉPONSE IMPULSIONNELLE 1D D'UN BICOUCHE EN LOG-LOG 90
FIGURE 122 : IDENTIFICATION DE DÉFAUTS SUR UN PATCH À L'AIDE DU TSR ET DE SES DÉRIVÉES SUCCESSIVES (SOURCE BALAGEAS [157]) 91
FIGURE 123 : PRINCIPE DE L'ANALYSE ALÉATOIRE 93
FIGURE 124 : CÂBLAGE D'UN GÉNÉRATEUR DE PRBS DE DEGRÉS 7 (TIRÉ DE LA THÈSE SALIM BRAHIM DJELLOUL [160, P. 34]) 93
FIGURE 125 : PRINCIPE DE CONSTRUCTION D'UN MODÈLE PARAMÉTRIQUE (SOURCE J.L. BODNAR [161]) 94
FIGURE 126 : CONSTRUCTION DES RÉPONSES IMPULSIONNELLE ET HARMONIQUE À L'AIDE D'UN MODÈLE PARAMÉTRIQUE 94
FIGURE 127 : INTERFACE DE L'OUTIL DÉVELOPPÉ POUR LA RECONSTRUCTION PARAMÉTRIQUE 95
FIGURE 128 : CARTE DES DÉFAUTS 96
FIGURE 129 : ÉCHANTILLON MODÉLISÉ 97
FIGURE 130 : THERMOGRAMMES THÉORIQUES OBTENUS À DIFFÉRENTS INSTANTS 97
FIGURE 131 : ÉPROUVETTE FACE AVANT 102
FIGURE 132 : ÉPROUVETTE FACE ARRIÈRE 102
FIGURE 133 : CARTE DE DÉFAUTS 102
FIGURE 134 : IMAGE THERMIQUE BRUTE DE L'ÉCHANTILLON 103
FIGURE 135 : ÉPROUVETTE ST SAVIN 106
FIGURE 136 : IMAGES BRUTES À DIFFÉRENTS INSTANTS 107
FIGURE 137 : DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE 111
FIGURE 138 : REPRÉSENTATION SYNTHÉTIQUE DES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR DES POST-TRAITEMENTS 116
FIGURE 139 : COMPARAISON IMAGE BRUTE HALOGÈNE ET CÉRAMIQUE 117
FIGURE 140 : AMÉLIORATION PERMETTANT LA MODULATION DES SOURCES DE TYPE CÉRAMIQUE 119
FIGURE 141 : DISPOSITIF AVEC ÉCHANTILLON 120
FIGURE 142 : DÉCLINAISONS DES MÉTHODES THERMIQUES 128
FIGURE 143 : CHAMP D'ACTION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE CARACTÉRISATION THERMIQUE 129
FIGURE 144 : PRINCIPE DE LA MÉTHODE FLASH 130
FIGURE 145 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE FACE ARRIÈRE (TIRÉ DE BALAGÉAS) 131
FIGURE 146 : DIFFUSIVIMETRE FLASH 131
FIGURE 147 : ENCEINTE DE MESURE 131

FIGURE 148 : TEMPS PARTIELS (TIRÉ DE LA THÈSE DE VIGEN AYVAZYAN 2012) 132
FIGURE 149 : D'APRÈS DEGIOVANNI « UNE NOUVELLE TECHNIQUE D'IDENTIFICATION DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE POUR LA MÉTHODE " FLASH " », 1986. 132
FIGURE 150 : ÉVOLUTION PAR RAPPORT AU TEMPS DU RAPPORT DES COEFFICIENTS DE FOURIER CALCULÉS (ICI L'ORDRE 2) 134
FIGURE 151 : INTERFACE DE L'OUTIL D'ANALYSE 135
FIGURE 152 : EXCITATION PAR UNE DIODE LASER 136
FIGURE 153 : ÉVOLUTION DE LA SÉRIE PAR RAPPORT AU TEMPS 138
FIGURE 154 : GÉOMÉTRIE 139
FIGURE 155 : MAILLAGE DE LA GÉOMÉTRIE (FIN) 139
FIGURE 156 : MODULATION SPATIALE 139
FIGURE 157 : MODULATION TEMPORELLE 139
FIGURE 158 : FACE AVANT À T =0,5 S 140
FIGURE 159 : PROFILS DE TEMPÉRATURE À DIFFÉRENTS INSTANTS 140
FIGURE 160 : PRINCIPE DE LA MÉTHODE 141
FIGURE 161 : ÉVOLUTION DE $R^2(T)$ 141
FIGURE 162 : LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL AVEC SPOT LASER 142
FIGURE 163 : LE DIFFUSIVIMÈTRE FLASH DE RÉFÉRENCE MIS EN ŒUVRE POUR L'ÉTUDE 143
FIGURE 164 : RÉSULTATS DE MESURES DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE À L'AIDE DU DIFFUSIVIMETRE FLASH 143
FIGURE 165 : ÉVOLUTION DE LA SIGNATURE INFRAROUGE DE L'ÉCHAUFFEMENT LASER AVEC LE TEMPS 144
FIGURE 166 : ÉVOLUTION EN FONCTION DU TEMPS DU RAYON CARACTÉRISTIQUE DE LA SIGNATURE PHOTOTHERMIQUE EXPÉRIMENTALE 144
FIGURE 167 : RÉPLIQUE DU SAINT-CHRISTOPHE 145
FIGURE 168 : ZONE ÉTUDIÉE 145
FIGURE 169 : ÉVOLUTION DE $R^2(T)$ 146
FIGURE 170 : PRINCIPE 147
FIGURE 171 : RÉSULTAT DE SIMULATION 147
FIGURE 172 : RÉSULTAT EXPÉRMIMENTAL (METHODE TMAX) 148
FIGURE 173 : ANALYSE DU ST CHRISTOPHE À L'AIDE DE LA MÉTHODE DU TMAX 148
FIGURE 174 : LES PROPRIÉTÉS DE LA FONCTION « *ERF* » TIRÉ DE WIKIPÉDIA 149
FIGURE 175 : MOMENT À UN INSTANT T=0,34 S 151
FIGURE 176 : RÉSULTAT DE LA VALIDATION THÉORIQUE 152
FIGURE 177 : CARACTÉRISATION D'UN ÉCHANTILLON DE PLÂTRE PAR LA MÉTHODE DES MOMENTS 152
FIGURE 178 : CARACTÉRISATION D'UNE FRESQUE ACADÉMIQUE 153
FIGURE 179 : IMAGE EN VISIBLE DE L'ÉPROUVETTE 155
FIGURE 180 : LOCALISATION DES DÉFAUTS 155
FIGURE 181 : REPRÉSENTATION 3D DE L'ÉPROUVETTE AVEC LES INSERTS 155
FIGURE 182 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 156
FIGURE 183 : IMAGE THERMIQUE BRUTE : DÉTECTION DE 8 DÉFAUTS /10 REPÉRÉS 156
FIGURE 184 : REPÉRAGE DES ZONES 156
FIGURE 185 : VALEURS DE RÉFÉRENCE 157
FIGURE 186 : REPÉRAGES DES DÉFAUTS 157
FIGURE 187 : ESTIMATION DE PROFONDEUR DE DÉFAUTS PAR MÉTHODES PHOTTHERMIQUES SUR L'ÉPROUVETTE IDK 158
FIGURE 188 : EXTRACTION D'UN PROFIL SPATIAL 158
FIGURE 189 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DES PARAMÈTRES ATTACHÉS AUX PROFILS SPATIAUX 159
FIGURE 190 : CONFIGURATION EXPÉRIMENTALE 161
FIGURE 191 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE FACE AVANT ET PASSAGE EN REPRÉSENTATION LOG-LOG 164
FIGURE 192 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE DE DEUX ÉCHANTILLONS (PVC ET PIERRE CALCAIRE) EN REPRÉSENTATION ORDINAIRE ET LOG-LOG 164
FIGURE 193 : LAMPE FLASH 165
FIGURE 194 : GÉNÉRATEUR DIGITAL 2400 RX 165
FIGURE 195 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET ÉCHANTILLONS 165
FIGURE 196 : ÉCHANTILLONS 166
FIGURE 197 : DISPOSITIF 166
FIGURE 198 : IMAGE THERMIQUE (APRÈS LE FLASH) 166
FIGURE 199 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE 167

FIGURE 200 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 167
FIGURE 201 : COMPARAISON VALEURS D'EFFUSIVITÉ DICO ET VALEURS MESURÉES 168
FIGURE 202 : ÉCHANTILLONS DE PLÂTRE 169
FIGURE 203 : ÉCHANTILLON DE PVC (RÉFÉRENCE) 169
FIGURE 204 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE (REPRÉSENTATION CLASSIQUE) 169
FIGURE 205: RÉPONSES EN TEMPÉRATURE (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 170
FIGURE 206 : PRINCIPE DE DÉTERMINATION DE L'EFFUSIVITÉ RELATIVE 171
FIGURE 207 : COMPARAISON MODÈLES 1D ET 3D POUR UN RAYON DONNÉ (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 173
FIGURE 208 : COMPARAISON MODÈLES 1D ET 3D AVEC PRISE EN COMPTE DE L'INFLUENCE DU RAYON (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 174
FIGURE 209 : ÉVOLUTION DE LA DIVERGENCE DES MODÈLES 1D ET 3D AVEC L'AUGMENTATION DU RAYON D'EXCITATION 174
FIGURE 210 : GÉOMÉTRIE 176
FIGURE 211 : MODULATION TEMPORELLE 176
FIGURE 212 : MODULATION SPATIALE 176
FIGURE 213 : MAILLAGE 176
FIGURE 214 : RÉSULTAT DE MODÉLISATION 176
FIGURE 215 : RÉPONSES MOYENNES EN TEMPÉRATURE T(T) SUR DIFFÉRENTES ÉTENDUES D'INTÉGRATION 177
FIGURE 216 : REPRÉSENTATION LOG-LOG DE L'ÉVOLUTION DE T(T) POUR DIFFÉRENTES ÉTENDUES D'INTÉGRATION 177
FIGURE 217 : PHOTOS DU DISPOSITIF 179
FIGURE 218 : PRINCIPE DU DISPOSITIF 179
FIGURE 219 : ÉCHANTILLON EN PLACE 180
FIGURE 220 : IMAGE INFRAROUGE DU SPOT LASER AVEC DÉLIMITATION DE LA ZONE D'INTÉGRATION 180
FIGURE 221 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE 181
FIGURE 222 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) 181
FIGURE 223 : RÉSULTATS MESURES EFFUSIVITÉ MÉTHODE PONCTUELLE 182
FIGURE 224 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE 183
FIGURE 225 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 183
FIGURE 226 : RÉSULTATS MESURES EFFUSIVITÉ MÉTHODE ÉTENDUE 184
FIGURE 227 : COMPARAISON DES MÉTHODES 185
FIGURE 228 : COMPARAISON DES RÉPONSES EN TEMPÉRATURE SELON LES DEUX MÉTHODES 185
FIGURE 229 : ÉCHANTILLONS RECTO/VERSO 186
FIGURE 230 : PRINCIPE DES REMONTÉES CAPILLAIRES 191
FIGURE 231 : EFFLORESCENCE DE SEL SUR MUR PORTEUR 191
FIGURE 232 : EFFLORESCENCE SUR UNE PEINTURE MURALE (CHAPELLE SAINT-PIERRE À VILLEFRANCHE-SUR-MER) 193
FIGURE 233 : GROS PLAN D'UNE SURFACE PEINTE DÉTÉRIORÉE PAR DES REMONTÉES DE SELS HYGROSCOPIQUES 193
FIGURE 234 : COUPE D'UN MATÉRIAU POREUX 193
FIGURE 235 : DIAGRAMME DE SOLUBILITÉ DU NA2SO4 DANS L'EAU (TIRÉ DE « CRISTALLISATION DE SELS ET DÉGÂTS DE MATÉRIAUX », V. FURLAN ET Y. HOUST) 194
FIGURE 236 : CRISTAUX DE MIRABILITE 195
FIGURE 237 : CRISTAUX DE THÉNARDITE 195
FIGURE 238 : DIAGRAMME D'ÉQUILIBRE DU SYSTÈME NA2SO4-VAPEUR D'EAU EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE (TIRÉ DE « CRISTALLISATION DE SELS ET DÉGÂTS DE MATÉRIAUX », V. FURLAN ET Y. HOUST) 196
FIGURE 239 : CRISTALLISATION EN SOLUTION (TIRÉ DE « CRISTALLISATION DE SELS ET DÉGÂTS DE MATÉRIAUX », V. FURLAN ET Y. HOUST) 196
FIGURE 240 : PRESSION CRISTALLINE À L'INTÉRIEUR D'UN PORE 197
FIGURE 241 : ORIGINE DES SELS (TIRÉ DU GUIDE « ALTÉRATION DE LA PIERRE » 2010 DE L'ASSOCIATION MEDISTONE) 199
FIGURE 242 : CARRIÈRE SARRAGAN, BAUX-DE-PROVENCE (TIRÉ DE) 201
FIGURE 243 : GROS PLANS SUR DES CALCAIRES EXTRAITS DANS LA RÉGION D'AVIGNON 201
FIGURE 244 : ÉCHANTILLONS 202
FIGURE 245 : DSC DE LABORATOIRE 203
FIGURE 246 : PRINCIPE DU DSC 203
FIGURE 247 : MESURE DE LA CHALEUR SPÉCIFIQUE SUR DE LA PIERRE D'AVIGNON 204
FIGURE 248 : ÉCHANTILLONS (VUE DE FACE) 205
FIGURE 249 : ÉCHANTILLONS (VUE DE DOS) 205

FIGURE 250 : DIFFUSIVIMETRE FLASH 205
FIGURE 251 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE SUR ÉCHANTILLONS MINCES DE PIERRE D'AVIGNON 206
FIGURE 252 : REPRÉSENTATION DES MESURES OBTENUES 207
FIGURE 253 : DIAGRAMME QQ-PLOT ÉCHANTILLON TÉMOIN 207
FIGURE 254 : DIAGRAMME QQ-PLOT ÉCHANTILLON AVEC SEL 207
FIGURE 255: ÉCHANTILLON (FACE AVANT) 209
FIGURE 256 : ÉCHANTILLONS 209
FIGURE 257 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 210
FIGURE 258 : IMAGE THERMIQUE BRUTE 210
FIGURE 259 : IMAGE THERMIQUE AVEC PROFIL SPATIAL 213
FIGURE 260 : ÉVOLUTION DU PROFIL SPATIAL 213
FIGURE 261 : IMAGE THERMIQUE AVEC LES POINTS 214
FIGURE 262 : ÉVOLUTIONS TEMPORELLES DES ÉCHANTILLONS SEL ET SANS SEL 214
FIGURE 263 : ÉVOLUTIONS TEMPORELLES MOYENNES DES ÉCHANTILLONS SEL ET SANS SEL 214
FIGURE 264 : IMAGE THERMIQUE AVEC ZONE D'ANALYSE 215
FIGURE 265 : ÉVOLUTION TEMPORELLE MOYENNE 215
FIGURE 266 : MÉTHODE DE DÉPOUILLEMENT 1 215
FIGURE 267 : METHODE DE DÉPOUILLEMENT 2 215
FIGURE 268 : METHODE DE DÉPOUILLEMENT 3 215
FIGURE 269 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE DES ÉCHANTILLONS 216
FIGURE 270 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE DES ÉCHANTILLONS (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 216
FIGURE 271 : VARIATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE B 217
FIGURE 272 : VARIATION DU T_{MAX} 217
FIGURE 273: DÉTERMINATION DU TEMPS DE RUPTURE DE PENTE 218
FIGURE 274 : AJUSTEMENT D'UN RELEVÉ EXPÉRIMENTAL (SEL 1) AVEC UNE COURBE THÉORIQUE 218
FIGURE 275 : DIFFUSIVITÉS (MÉTHODE DE PARKER) 219
FIGURE 276 : DIFFUSIVITÉS (MÉTHODE PAR AJUSTEMENT) 219
FIGURE 277 : PRINCIPE DE LA MESURE EN FACE ARRIÈRE 220
FIGURE 278: MESURES DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN FACE ARRIÈRE 220
FIGURE 279 : DIFFUSIVITÉ EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 222
FIGURE 280 : T_{MAX} EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 222
FIGURE 281 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN FONCTION DU T_{MAX} 222
FIGURE 282 : EXEMPLE DE RÉPONSES EN TEMPÉRATURE DE L'ÉCHANTILLON AVEC SEL AVEC DIFFÉRENTES EXCITATIONS CRÉNEAUX 224
FIGURE 283 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE D'ÉCHANTILLONS AVEC SEL (REPRÉSENTATION LOG-LOG), SIMULATION CRÉNEAU 225
FIGURE 284 : IMAGE THERMIQUE CRÉNEAU 1 S 227
FIGURE 285: IMAGE THERMIQUE AVEC PROFIL 228
FIGURE 286 : ÉVOLUTION DES PROFILS SPATIAUX 228
FIGURE 287 : ÉCHANTILLONS AVEC DÉLIMITATION DES ZONES 229
FIGURE 288 : ÉVOLUTION TEMPORELLE POUR CHAQUE ÉCHANTILLON 229
FIGURE 289 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (REPRÉSENTATION LOG-LOG) 230
FIGURE 290 : VARIATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE B 230
FIGURE 291 : VARIATION DU TMAX 230
FIGURE 292 : ÉVOLUTION LOGARITHMIQUE DE LA TEMPÉRATURE 231
FIGURE 293 : VARIATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE B 232
FIGURE 294 : VARIATION DU TMAX 232
FIGURE 295 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE ESTIMÉE AU MOYEN D'UNE EXCITATION DE TYPE CRÉNEAU 233
FIGURE 296 : DIFFUSIVITÉ EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 234
FIGURE 297 : TMAX EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 234
FIGURE 298 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN FONCTION DU TMAX 235
FIGURE 299 : SIGNAL D'EXCITATION 236
FIGURE 300 : IMAGE THERMIQUE BRUTE 236
FIGURE 301: IMAGE RECONSTRUITE AVEC PROFIL SPATIAL 238
FIGURE 302 : ÉVOLUTION DES PROFILS SPATIAUX 238
FIGURE 303 : IMAGE THERMIQUE AVEC ZONE D'INTÉGRATION (MÉTHODE 1) 238
FIGURE 304: IMAGE THERMIQUE RECONSTRUITE A T_{MAX} 239

FIGURE 305: ÉVOLUTION TEMPORELLE DES ÉCHANTILLONS AVEC SEL ET SANS SEL 239
FIGURE 306: ÉVOLUTION LOGARITHMIQUE DE LA TEMPÉRATURE 239
FIGURE 307 : ÉVOLUTION DE L'EFFUSIVITÉ B 240
FIGURE 308 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MAX 240
FIGURE 309 : EXEMPLE D'AJUSTEMENT POUR L'ÉCHANTILLON SEL 1 241
FIGURE 310 : MESURE DE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN ALÉATOIRE 241
FIGURE 311 : DIFFUSIVITÉ EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 242
FIGURE 312 : TMAX EN FONCTION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE 242
FIGURE 313 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN FONCTION DU TMAX 243
FIGURE 314 : PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON 245
FIGURE 315 : ÉCHANTILLON (FACE AVANT) 245
FIGURE 316 : PRINCIPE 245
FIGURE 317 : DISPOSITIF 245
FIGURE 318 : IMAGE THERMIQUE DU BLOC 1 EN FACE AVANT 246
FIGURE 319 : IMAGE THERMIQUE DE L'ÉCHANTILLON AVEC PROFIL SPATIAL 247
FIGURE 320 : PROFIL SPATIAL 247
FIGURE 321 : IMAGE THERMIQUE DE L'ÉCHANTILLON AVEC PROFIL 248
FIGURE 322: PROFILS TEMPORELS 248
FIGURE 323 : EMPLACEMENT DES POINTS ÉTUDIÉS 248
FIGURE 324 : IMAGE THERMIQUE DE L'ÉCHANTILLON DE PVC 248
FIGURE 325 : REPRÉSENTATION EN LOG-LOG DES RÉPONSES EN TEMPÉRATURE 249
FIGURE 326: EFFUSIVITÉ THERMIQUE B SUR BLOC 250
FIGURE 327 : ÉCHAUFFEMENT TMAX SUR BLOC 250
FIGURE 328 : MESURE TRANSVERSE ET LONGITUDINALE 252
FIGURE 329 : (1) ÉCHANTILLON MINCE DE PIERRE CALCAIRE (2) ÉCHANTILLON DE PVC SOUMIS À UNE EXCITATION LOCALE (3) SPOT SUR ÉCHANTILLON DE PIERRE CALCAIRE. 252
FIGURE 330 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE D'ÉCHANTILLONS MINCES (EXCITATION LOCALE) 253
FIGURE 331 : MESURE D'EFFUSIVITÉ THERMIQUE SUR ÉCHANTILLONS MINCES EN LOCAL 254
FIGURE 332 : ÉCHAUFFEMENT (TMAX) SUR ÉCHANTILLONS MINCE (MESURE EN LOCAL) 255
FIGURE 333 : EXEMPLE DE DÉPOUILLEMENT D'UN ÉCHANTILLON TÉMOINS ET D'UN ÉCHANTILLON SEL À L'AIDE DE LA MÉTHODE RADIALE 255
FIGURE 334 : COMPARAISON MESURE DE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN LOCALE 256
FIGURE 335: COMPARAISON FLASH ÉTENDU ET LOCAL SUR L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE, L'ÉCHAUFFEMENT TMAX ET LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE 259
FIGURE 336 : ABBAYE D'ORVAL (PARTIE MODERNE) 260
FIGURE 337 : ABBAYE D'ORVAL (PARTIE ANCIENNE) 260
FIGURE 338 : ANALYSE PRÉLIMINAIRE (SONDAGE) 261
FIGURE 339 : PROFIL DE CONCENTRATION DE SOUFRE LE LONG D'UN AXE VERTICAL 261
FIGURE 340 : IMAGE DE LA ZONE D'ÉTUDE 261
FIGURE 341 : DISPOSITIF 261
FIGURE 342 : IMAGE VISIBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE AVEC EMPLACEMENTS DES SONDAGES. 262
FIGURE 343 : IMAGE THERMIQUE AVANT FLASH. 262
FIGURE 344 : IMAGE THERMIQUE AU MOMENT DU FLASH. 262
FIGURE 345 : IMAGE DE T_{MAX} 262
FIGURE 346 : POST-TRAITEMENT MOYENNE EFFUSIVITÉ 262
FIGURE 347 : PROFIL 1 SUR POST-TRAITEMENT EFFUSIVITÉ MOYENNE 263
FIGURE 348 : PROFIL 1 EFFUSIVITÉ 263
FIGURE 349 : PROFIL 2 SUR POST-TRAITEMENT EFFUSIVITÉ MOYENNE 263
FIGURE 350 : PROFIL 2 EFFUSIVITÉ 263
FIGURE 351 : IMAGE THERMIQUE LES PROFILS SPATIAUX 263
FIGURE 352 : PROFILS SPATIAUX 263
FIGURE 353 : IMAGE THERMIQUE AVEC POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURE 264
FIGURE 354 : RÉPONSES EN TEMPÉRATURE 264
FIGURE 355 : POSITIONNEMENT DES POINTS DE MESURES 265

FIGURE 356 : ÉVOLUTION DES GRANDEURS THERMOPHYSIQUES LE LONG D'UN PROFIL VERTICAL 265
FIGURE 357 : GRAPHIQUE DE SYNTHÈSE 266
FIGURE 358 : ILLUSTRATION D'UNE HYPOTHÈSE DE TRAVAIL POUVANT EXPLIQUER DES ÉCARTS DE DÉTECTION ENTRE L'ANALYSE EN SURFACE ET L'ANALYSE PAR THERMOGRAPHIE IR 266
FIGURE 359 : DOSAGE DU SULFATE EN FONCTION DE LA HAUTEUR POUR 3 PROFONDEURS DE PRÉLÈVEMENT 267
FIGURE 360 : ABBAYE ROYALE DE CHAALIS 268
FIGURE 361 : PLAFOND ORNÉ 268
FIGURE 362 : INTÉRIEUR DE LA CHAPELLE 269
FIGURE 363 : POSITIONNEMENT DE LA ZONE D'ÉTUDE 269
FIGURE 364 : RELEVÉ DES RESTAURATEURS N° 1 270
FIGURE 365 : RELEVÉ DES RESTAURATEURS N° 2 270
FIGURE 366 : INSTRUMENT DE MESURE DU DISPOSITIF SUSI 271
FIGURE 367 : ZONE D'ÉTUDE 271
FIGURE 368 : ZONE D'ÉTUDE AVEC POINTS DE MESURE 271
FIGURE 369 : REPÉRAGE DES ZONES AVEC SEL ET SANS SEL 272
FIGURE 370 : ÉTAT DES LIEUX RESTAURATEURS 273
FIGURE 371 : IMAGE THERMIQUE AVEC DÉFAUTS 273
FIGURE 372: MESURES SUSI 274
FIGURE 373 : IMAGE THERMIQUE AVEC ZONE D'ÉTUDE 274
FIGURE 374 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DES ZONES 274
FIGURE 375 : ESTIMATION DE B* 275
FIGURE 376 : MESURE DE TMAX 275
FIGURE 377 : ÉCHANTILLON LORS DE SA FABRICATION 278
FIGURE 378 : POSITIONNEMENT DES DÉFAUTS 278
FIGURE 379 : ÉCHANTILLON (VUE LATÉRALE) 278
FIGURE 380 : ÉCHANTILLON (VUE DU DESSUS) 278
FIGURE 381 : COMPARAISON RELEVÉ INTERFÉROMÉTRIQUE ET ÉCHANTILLON À NU 279
FIGURE 382 : ÉCLAIRAGE HALOGÈNE 279
FIGURE 383 : ÉCLAIRAGE INFRAROUGE 279
FIGURE 384 : IMAGE IR AVEC UNE EXCITATION HALOGÈNE 280
FIGURE 385 : IMAGE IR AVEC UNE EXCITATION INFRAROUGE 280
FIGURE 386 : POSITIONNEMENT DÉFAUTS 280
FIGURE 387 : IMAGE IR EN REPRÉSENTATION 3D 280
FIGURE 388 : PEINTURE SOUS BADIGEON (ÉGLISE SAINT-JEAN À MALINES, BELGIQUE) 281
FIGURE 389 : DÉGAGEMENT DE LA GRANDE SCÈNE DE SAINT GEORGE TERRASSANT LE DRAGON. (PHOTO KRIS VANDEVORST, CRÉDIT ONROEREND ERFGOED) 282
FIGURE 390 : APRÈS DÉGAGEMENT (PHOTO KRIS VANDEVORST, CRÉDIT ONROEREND ERFGOED) 282
FIGURE 391 : ÉCHANTILLON AVANT BADIGEONNAGE 283
FIGURE 392 : ÉCHANTILLON BADIGEONNÉ 283
FIGURE 393 : DÉTAIL DES 4 SCÉNETTES AVEC TYPE DE PIGMENTS UTILISÉS 283
FIGURE 394 : IMAGE IR AVANT EXCITATION 283
FIGURE 395 : IMAGE IR DÉBUT D'EXCITATION 283
FIGURE 396 : IMAGE IR DÉBUT REFROIDISSEMENT 283
FIGURE 397 : IMAGE IR FIN REFROIDISSEMENT 283
FIGURE 398 : INFRAROUGE LOINTAIN 284
FIGURE 399: LE PORTIQUE 285
FIGURE 400 : EXPOSITION FIGURE 401 : CONSOLE DE VISUALISATION APRÈS TRAITEMENT 285
FIGURE 402 : ÉCHANTILLON POSITIONNÉ 286
FIGURE 403 : GROS PLAN SUR ÉCHANTILLON (FACE AVANT) 286
FIGURE 404 : CLICHÉ FACE AVANT TÉRAHERTZ 286
FIGURE 405 : MOTIF SOUS BADIGEON 287
FIGURE 406 : SUPERPOSITION SEMI-TRANSPARENTE DU MOTIF ET DU RÉSULTAT DE DÉTECTION 287
FIGURE 407: ÉCHANTILLON EN POSITION 288
FIGURE 408 : GROS PLAN SUR L'ÉCHANTILLON 288
FIGURE 409 : IMAGE DE PHASE AVEC INDUCTEUR CIRCULAIRE 288

FIGURE 410 : MOTIFS SOUS BADIGEON 288
FIGURE 411 : SUPERPOSITION MOTIF ET DÉTECTION 288
FIGURE 412 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE D'UN MONOCOUCHE 289
FIGURE 413 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE D'UN BICOUCHE 289
FIGURE 414 : RÉPONSE THÉORIQUE D'UNE FRESQUE 290
FIGURE 415 : RÉPONSE THÉORIQUE D'UNE PEINTURE MURALE 290
FIGURE 416: LA PEINTURE MURALE À LA FRESQUE ANALYSÉE 291
FIGURE 417 : LA PEINTURE MURALE À LA COLLE D'OS ANALYSÉE 291
FIGURE 418 : LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL MIS EN ŒUVRE 291
FIGURE 419 : RÉPONSE PHOTOTHERMIQUE DE LA PEINTURE MURALE À LA FRESQUE ANALYSÉE 292
FIGURE 420 : RÉPONSE PHOTOTHERMIQUE DE LA PEINTURE MURALE À LA COLLE D'OS ANALYSÉE 292
FIGURE 421 : LA CHAPELLE NOTRE-DAME-DES-FONTAINES 293
FIGURE 422 : DÉCORATION DE LA NEF 293
FIGURE 423 : RENIEMENT DE SAINT-PIERRE 294
FIGURE 424 : ANALYSE DE LA TECHNIQUE PICTURALE ET COMPOSITION DES PIGMENTS 295
FIGURE 425 : ZONE D'ÉTUDE 295
FIGURE 426 : LOCALISATION DES POINTS ÉTUDIÉS 296
FIGURE 427 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) EPÉE 296
FIGURE 428 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) VÊTEMENT 296
FIGURE 429 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) JAMBE 296
FIGURE 430 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) GRIS 296
FIGURE 431 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE (LOG-LOG) GENOUX 297
FIGURE 432 : PLAFOND RICHEMENT DÉCORÉ DE LA CHAPELLE SAINT MARTIAL (PALAIS DES PAPES, AVIGNONS) 298
FIGURE 433 : DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 299
FIGURE 434 : ZONE ÉTUDIÉE 300
FIGURE 435 : RÉPONSE EN TEMPÉRATURE MOYENNE (LOG-LOG) 300
FIGURE 436 : VUE D'ENSEMBLE DE LA ZONE 300
FIGURE 437 : REPRÉSENTATION LOG-LOG DE LA RÉPONSE EN TEMPÉRATURE DE LA ZONE D'ÉTUDE 301
FIGURE 438 : ZONE ÉTUDIÉE 301
FIGURE 439 : REPRÉSENTATION LOG-LOG DE LA RÉPONSE EN TEMPÉRATURE DE LA ZONE ROUGE 301
FIGURE 440 : REPRÉSENTATION LOG-LOG DE LA RÉPONSE EN TEMPÉRATURE DE LA ZONE BLEUE 301
FIGURE 441 : COMPARAISON ROUGE ET BLEU DE LA FAÇADE EST 302
FIGURE 442 : COMPARAISON BLEU FAÇADE NORD ET EST 302
FIGURE 443 : VUE D'ENSEMBLE DE LA ZONE ÉTUDIÉE 303
FIGURE 444 : ZONE D'INTÉRÊT 303
FIGURE 445 : HORS SINOPIA 304
FIGURE 446 : SINOPIA 304
FIGURE 447 : ÉPROUVETTE 306
FIGURE 448 : IMAGE THERMIQUE (AVEC PROFIL) 306
FIGURE 449 : PROFIL SPATIAL DE TEMPÉRATURE 306
FIGURE 450 : VOUTE DÉCORÉE DE L'ANNEXE DE LA BIBLIOTHÈQUE DU SÉNAT 307
FIGURE 451 : DISPOSITIF EN PLACE 307
FIGURE 452 : ZONE ÉTUDIÉE 307
FIGURE 453 : FISSURES REPÉRÉES 308
FIGURE 454 : SUPERPOSITION VISIBLE/IR 308
FIGURE 455 : SUPERPOSITION VISIBLE/IR + FISSURES 308
FIGURE 456 : RESTAURATION « LACUNE ROUGE » 308
FIGURE 457 : ZONE ÉTUDIÉE 308
FIGURE 458 : COMPARAISON ZONE RESTAURÉE ET NON RESTAURÉE 309
FIGURE 459 : CAISSON AVEC CONNECTIQUE 311
FIGURE 460 : CONNECTIQUES PLATEAU 312
FIGURE 461 : SYSTÈME EN POSITION COMPACTE 312
FIGURE 462 : SYSTÈME SAMTTHIR COMPLÈTEMENT DÉPLOYÉ 313
FIGURE 463 : ÉCHANTILLON SOUMIS À UN DIRAC SURFACIQUE 328

FIGURE 464 : RÉPONSE IMPULSIONNELLE 1D D'UN MUR 330
FIGURE 465 : RÉSULTATS OBTENUS APRÈS APPLICATION D'UN FILTRE "PASSE-BAS". 331
FIGURE 466 : CONTRASTE SOMME 332
FIGURE 467 : CONTRASTE TEMPS DU MAX 332
FIGURE 468 : MOYENNE EFFUSIVITÉ 332
FIGURE 469 : RÉSULTAT TSR SUR MODÉLISATION D'UN ÉCHANTILLON DE PLÂTRE AVEC DÉFAUTS 334
FIGURE 470 : INTÉGRATION SUR LA PHASE D'ÉCHAUFFEMENT 340
FIGURE 471 : INTÉGRATION SUR LA PHASE DE REFROIDISSEMENT 340
FIGURE 472 : RÉSULTATS SVD (ÉPROUVETTE "PICASSO") 342
FIGURE 473 : RÉSULTATS TSR (ÉPROUVETTE "PICASSO") 343
FIGURE 474 : DÉPHASAGE PAR RAPPORT À LA CONSIGNE 355
FIGURE 475 : DÉFORMATION DU SIGNAL DE CONSIGNE 355
FIGURE 476 : PRINCIPE 364
FIGURE 477 : COURBE D'ÉTALONNAGE DU LASER 365
FIGURE 478 : EXEMPLE DE MESURE À D = 19 CM 365
FIGURE 479 : ÉVOLUTION DU RAYON CARACTÉRISTIQUE DU FAISCEAU EN FONCTION DE LA DISTANCE 366
FIGURE 480 : DISPOSITIF DICO 367
FIGURE 481 : PRINCIPE DU DISPOSITIF 367
FIGURE 482 : BLOC DE PVC 368
FIGURE 483: CHOIX DU TYPE DE THERMOGRAMME 369
FIGURE 484 : LISTE DE CHOIX DES MODES DE DÉPOUILLEMENT 369
FIGURE 485 : INTERFACE 370
FIGURE 486 : INTERFACE DE L'OUTIL D'ESTIMATION DE PARAMETRES 371
FIGURE 487 : INTERFACE 372
FIGURE 488 : DÉTAIL DE L'INTERFACE 372
FIGURE 489 : CHOIX DE L'EXCITATION 373
FIGURE 490 : ÉVOLUTION LOGARITHMIQUE DE LA TEMPÉRATURE 380
FIGURE 491 : ÉVOLUTION DE L'EFFUSIVITÉ B 381
FIGURE 492 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MAXIMALE 381
FIGURE 493 : IMAGE THERMIQUE DE L'ÉCHANTILLON AVEC PROFIL 381
FIGURE 494 : PROFIL DE TEMPÉRATURE 381
FIGURE 495 : ETUDE D'UN BLOC ÉPAIS SOUMIS À UNE EXCITATION CRÉNEAU (ANALYSE TEMPORELLE) 382
FIGURE 496 : ETUDE D'UN BLOC ÉPAIS SOUMIS À UNE EXCITATION CRÉNEAU (ANALYSE SPATIALE) 383
FIGURE 497 : ETUDE D'UN BLOC ÉPAIS SOUMIS À UNE EXCITATION CRÉNEAU (ANALYSE TEMPORELLE) 383

Tableaux

TABLEAU 1 : LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE LA PEINTURE MURALE 6
TABLEAU 2 : LES TECHNIQUES DE CND DANS LE DOMAINE DU PATRIMOINE (SOURCE C2RMF) 8
TABLEAU 3 : VUE D'ENSEMBLE DE TECHNIQUES D'ANALYSE EN THIR 30
TABLEAU 4 : ÉTUDE DE POSITIONNEMENT DES SOURCES, ÉLOIGNEMENT 0,75 M 57
TABLEAU 5 : ÉTUDE DE POSITIONNEMENT DES SOURCES, ÉLOIGNEMENT 1,5 M 58
TABLEAU 6 : COMPARAISON DES CONFIGURATIONS DE TYPE I (PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE) 59
TABLEAU 7 : COMPARAISON DES CONFIGURATIONS DE TYPE II (PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE) 61
TABLEAU 8 : COMPARAISON DES CONFIGURATIONS DE TYPE II BIS (PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE) 64
TABLEAU 9 : RÉSULTAT 3 SOURCES 65
TABLEAU 10 : COMPARAISON DES CONFIGURATIONS DE TYPE II ET III (PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE) 65
TABLEAU 11 : RÉSULTATS 4 SOURCES 66
TABLEAU 12 : COMPARAISON DES CONFIGURATIONS DE TYPE II ET IV (PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE) 67
TABLEAU 13 : RÉCAPITULATIF DES CONFIGURATIONS PAR ORDRE CROISSANT DE PERFORMANCE 67
TABLEAU 14 : COMPARAISON ATTÉNUATION EFFETS OPTIQUES SUR PLAQUE COLORÉE 81
TABLEAU 15 : ÉTUDE COMPARATIVE DE L'ATTÉNUATION DES EFFETS OPTIQUES SUR UNE ÉPROUVETTE (ST SAVIN) 82
TABLEAU 16 : PARAMETRES DE SIMULATION 96
TABLEAU 17 : GRILLE D'ÉVALUATION DES POST-TRAITEMENTS 97
TABLEAU 18 : RÉSULTATS D'ANALYSE SUR UNE SIMULATION, EXCITATION CRÉNEAU, TRAITEMENT SVD 98
TABLEAU 19 : RÉSULTATS D'ANALYSE SUR UNE SIMULATION, EXCITATION CRÉNEAU, TRAITEMENT PPT ET TSR 98
TABLEAU 20 : RÉSULTATS D'ANALYSE SUR UNE SIMULATION, EXCITATION CRÉNEAU, TRAITEMENT STATISTIQUE 98
TABLEAU 21 : RÉCAPITULATIF SIMULATION 99
TABLEAU 22 : RÉSULTATS D'ANALYSE D'UNE SIMULATION AVEC DES POST-TRAITEMENTS (EXCITATION PRBS) 99
TABLEAU 23 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS D'ANALYSE PAR POST TRAITEMENTS D'UNE SIMULATION AVEC PRBS 101
TABLEAU 24 : TABLEAU RÉCAPITULATIF POST-TRAITEMENT « *PICASSO* » 103
TABLEAU 25 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DE L'ANALYSE DU "PICASSO" 106
TABLEAU 26 : TABLEAU RÉCAPITULATIF POST-TRAITEMENTS « *SAINT-SAVIN* » 107
TABLEAU 27 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DE L'ANALYSE DU ST-SAVIN (1) 109
TABLEAU 28 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DE L'ANALYSE DU ST-SAVIN (2) 110
TABLEAU 29 : COMPARAISON DES POST TRAITEMENTS SELON LE MODE D'EXCITATION 111
TABLEAU 30 : COMPARAISON APPROCHE INSTRUMENTALE ET LOGICIELLE 117
TABLEAU 31 : POSSIBILITÉS DE L'APPROCHE COMBINÉE SUR LE SAINT-SAVIN (EXCITATION CRÉNEAU) 120
TABLEAU 32 : POSSIBILITÉ DE L'APPROCHE COMBINÉE SUR LE SAINT-SAVIN (EXCITATION ALÉATOIRE) 122
TABLEAU 33 : VALEURS DE RÉFÉRENCE DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE SUR UN BLOC DE PLÂTRE 143
TABLEAU 34 : MESURES DE DIFFUSIVITÉ THERMIQUES SUR UNE FRESQUE ACADÉMIQUE (MÉTHODE DU TMAX) 149
TABLEAU 35 : CONDITIONS DE SIMULATION 151
TABLEAU 36 : RÉCAPITULATIFS DES MESURES DE DIFFUSIVITÉ PAR MÉTHODES PHOTOTHERMIQUES 153
TABLEAU 37 : MESURES DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE DU BÉTON IDK 154
TABLEAU 38 : RÉSULTATS DES MESURES DE PROFONDEUR DES DÉFAUTS 157
TABLEAU 39 : PROPRIÉTÉS DE SIMULATION 164
TABLEAU 40 : RÉSULTATS MESURE DE B À L'AIDE DE DICO 166
TABLEAU 41 : RÉSULTATS MESURES D'EFFUSIVITÉ B, COMPARAISON AVEC DICO 167
TABLEAU 42 : RÉSULTATS DE MESURE D'EFFUSIVITÉ SUR DES ÉCHANTILLONS DE PLÂTRE (DICO) 168
TABLEAU 43 : MESURE D'ÉFFUSIVITÉ SUR DEUX ÉCHANTILLONS DE PLÂTRE (MÉTHODE PHOTHERMIQUE) 170
TABLEAU 44 : CONDITIONS DE SIMULATIONS 172
TABLEAU 45 : RÉSULTATS DE SIMULATION (PASSAGE LOCAL À SURFACIQUE) 177
TABLEAU 46 : RÉSULTATS APPROCHE PONCTUELLE 182
TABLEAU 47 : RÉSULTATS APPROCHE ÉTENDUE 183

TABLEAU 48 : RÉCAPITULATIF DES DEUX MÉTHODES 184
TABLEAU 49 : COMPARAISON MESURE D'EFFUSIVITÉ PAR MESURE SURFACIQUE ET LOCALE 186
TABLEAU 50 : MESURE DE MASSES VOLUMIQUES SUR ÉCHANTILLONS DE PIERRE D'AVIGNON 202
TABLEAU 51 : MESURE DE LA CAPACITÉ THERMIQUE SUR PIERRE D'AVIGNON 204
TABLEAU 52 : MESURE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE SUR ÉCHANTILLONS MINCES 205
TABLEAU 53 : COMPARAISON D'ÉCHANTILLONS AVEC LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS 206
TABLEAU 54 : FILTRES NUMÉRIQUES ET IMAGE D'EFFUSIVITÉ 210
TABLEAU 55: DÉCOMPOSITION POLYNOMIALE 211
TABLEAU 56: DÉCOMPOSITION SVD 211
TABLEAU 57 : TSR 212
TABLEAU 58: STATISTIQUE TEMPORELLE 212
TABLEAU 59: TRANSFORMÉE DE FOURIER TEMPORELLE 213
TABLEAU 60 : VALEURS D'EFFUSIVITÉ THERMIQUE ET DE TMAX MESURÉES (MÉTHODE DE DÉPOUILLEMENT 1) 216
TABLEAU 61 : MESURES DE DIFFUSIVITÉ FACE AVANT ECH. MINCES 218
TABLEAU 62: RÉCAPITULATIF 219
TABLEAU 63 : RÉSULTAT MESURES DE LA DIFFUSIVITÉ EN FACE ARRIÈRE – METHODE PAR AJUSTEMENT 220
TABLEAU 64 : VALIDATION STATISTIQUE DES PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES MESURÉS 221
TABLEAU 65 : VALEURS THÉORIQUES 223
TABLEAU 66 : RÉSULTATS DE SIMULATION CRÉNEAU 224
TABLEAU 67: ESTIMATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE À PARTIR D'UNE SIMULATION CRÉNEAU 225
TABLEAU 68 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE PAR ESTIMATION DU TEMPS DE RUPTURE DE PENTE (SIMULATION CRÉNEAU) 225
TABLEAU 69 : DIFFUSIVITÉ THERMIQUE PAR ESTIMATION DE PARAMÈTRE (AJUSTEMENT), SIMULATION CRÉNEAU 226
TABLEAU 70 : FILTRES NUMÉRIQUES ET IMAGE D'EFFUSIVITÉ 227
TABLEAU 71: DÉCOMPOSITION POLYNOMIALE 227
TABLEAU 72 : SVD 228
TABLEAU 73 : TRAITEMENT STATISTIQUE 228
TABLEAU 74 : PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES MESURÉES (LA MÉTHODE 1) 230
TABLEAU 75 : PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES MESURÉES PAR LA MÉTHODE 3 231
TABLEAU 76 : ESTIMATION DE LA DIFFUSIVITÉ THERMIQUE À L'AIDE D'UNE EXCITATION CRÉNEAU 232
TABLEAU 77 : VALIDATION STATISTIQUE DES PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES MESURÉS 233
TABLEAU 78 : IMAGES DE RÉPONSES IMPULSIONNELLES 236
TABLEAU 79 : RÉSULTATS ÉCHANTILLONS MINCES EN ALÉATOIRE (IMAGE DE PARAMÈTRES) 237
TABLEAU 80 : PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES MESURÉES 240
TABLEAU 81 : ESTMATIONS DE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE SUR DES ÉCHANTILLONS MINCES EN ALÉATOIRE 241
TABLEAU 82 : VALIDATION STATISTIQUE DES PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES MESURÉS 242
TABLEAU 83: DÉCOMPOSITION SVD 246
TABLEAU 84: **ÉTUDE D'UN BLOC AVEC SEL À L'AIDE D'UN POST-TRAITEMENT D'UNE TRANSFORMÉE DE FOURIER** 246
TABLEAU 85 : ESTIMATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE B ET TMAX MESURÉS SUR UN BLOC DE CALCAIRE 249
TABLEAU 86 : ESTIMATION DE L'EFFUSIVITÉ THERMIQUE AU MOYEN D'UNE EXCITATION LOCALE SUR DES ÉCHANTILLONS MINCES 253
TABLEAU 87 : ÉCHAUFFEMENTS TMAX SUR ÉCHANTILLONS MINCES DANS LE CADRE D'UNE EXCITATION LOCALE 254
TABLEAU 88: DIFFUSIVITÉ THERMIQUE MESURÉE EN LOCAL 256
TABLEAU 89 : VUE SYNTHÉTIQUE ANALYSE EN LOCAL D'ÉCHANTILLONS MINCES 257
TABLEAU 90 : COMPARAISON ENTRE UNE ANALYSE LOCALE ET ÉTENDUE 258
TABLEAU 91 : PARAMÈTRES THERMOPHYSIQUES MESURÉS (ORVAL) 265
TABLEAU 92 : DOSAGE DU $SO42-$ PAR CHROMATOGRAPHIE À ÉCHANGE D'IONS (EN MG/G) 267
TABLEAU 93 : MESURES OBTENUES À L'AIDE DE SUSI 271
TABLEAU 94 : ESTIMATIONS DE PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES (CHAALIS) 274
TABLEAU 95 : PARAMETRES DE SIMULATION (CARACTÉRISATION DES LA COUCHE PICTURALE) 290
TABLEAU 96 : RÉSULTATS D'ANALYSE DE LA COUCHE PICTURALE 296
TABLEAU 97 : RÉCAPITULATIF ANALYSE ND DES FONTAINES 297
TABLEAU 98 : CARACTÉRISTIQUES CAMÉRA 298
TABLEAU 99: COMPARAISON DES DISPOSITIFS DE MODULATION EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE 353
TABLEAU 100 : RÉSULTATS ÉTALONNAGE CERTES 368
TABLEAU 101 : RÉSULTATS MESURE DE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE PAR METHODE FLASH (DIFFUSIVIMETRE) SUR ECHANTILLONS MINCES 376

TABLEAU 102 : RÉSULTATS MESURE PARAMETRES THERMOPHYSIQUES SUR ECH. MINCES PAR METHODE PHOTOTHERMIQUE 378
TABLEAU 103 : MESURE DIFFUSIVITÉ ECH. MINCES FACE AVANT PAR THIR 378
TABLEAU 104 : RÉSULTATS MESURE DIFFUSIVITÉ THERMIQUE EN FACE ARRIÈRE SUR ECH. MINCES 379
TABLEAU 105 : PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES MESURÉES 380
TABLEAU 106 : ETUDE D'UN BLOC ÉPAIS SOUMIS À UNE EXCITATION CRÉNEAU (ANALYSE SPATIALE) 381
TABLEAU 107 : PROPRIÉTÉS THERMO-PHYSIQUES MESURÉ SUR UN BLOC SOUMIS À UNE EXCITATION CRÉNEAU 382

RADIOMETRIE PHOTOTHERMIQUE APPLIQUEE A LA DETECTION ET A LA CARACTERISATION D'ALTERATIONS STRUCTURALES DE PEINTURES MURALES DU PATRIMOINE

L'objectif de cette étude est de développer des méthodes d'analyse et de caractérisation des défauts structurels des matériaux s'appuyant sur la thermographie infrarouge stimulée.
Nous pouvons à l'aide d'une excitation photothermique distante et d'un outil d'analyse que nous avons développé en laboratoire, déterminer la structure sous-jacente d'un matériau, repérer précisément ses défauts et les mesurer. L'application qui nous intéresse ici porte sur la prévention, le diagnostic et la restauration des oeuvres d'art. Dans ce contexte, nous avons démontré lors de précédents travaux la pertinence de cette approche et son application potentielle importante dans de nombreux domaines, qu'ils soient industriels, culturels, médicales ou autres. Nous avons fait la démonstration qu'il était possible d'analyser des matériaux fragiles de façon fiable et sans contact. Nous comptons généraliser cette approche en élargissant ses domaines d'application et en améliorant sa précision.

Thermographie infrarouge stimulée Peinture murale Fresque Patrimoine OEuvres d'art Contrôle non destructif Caracterisation thermophysique Diffusivité thermique Effusivité thermique Détection de défauts Sels hygroscopiques Post-traitements Pierre calcaire

PHOTOTHERMAL RADIOMETRY APPLIED TO THE DETECTION AND CHARACTERIZATION OF STRUCTURAL ALTERATIONS MURAL PAINTINGS OF THE HERITAGE

The objective of this study is the development of methods of analysis and characterization of structural defects within materials based on photothermal radiometry.
Thanks to both a remote photothermal excitation and an analysis tool developed in the laboratory, the underlying structure of a material, the identification of the present flaws as well as their measurements are determined. Herein, the considered application focuses on the prevention, diagnosis and restoration of works of art. Against this background, the relevance of the proposed approach including its significant potential applications in many areas, such as cultural industry, medicine and others, have been shown in previous work. We have demonstrated that it has been possible to reliably analyze brittle materials and besides without contact. The generalisation of the proposed approach by extending its areas of application and its accuracy as well is in progress

Stimulated infrared thermography Mural painting Fresco Heritage Work of art Nondestructive testing Thermophysical characterization Thermal diffusivity Thermal effusivity Defects detection Hygroscopic salts Postprocessing Limestone

Discipline : MÉCANIQUE DES FLUIDES, ÉNERGÉTIQUE, THERMIQUE, COMBUSTION, ACOUSTIQUE

Université de Reims Champagne-Ardenne

ECA THERM EA 4301

Moulin de la Housse – 51687 REIMS CEDEX 2