UNIVERSITE PARIS 8 VINCENNES - SAINT-DENIS
LABORATOIRE DYNAMIQUES SOCIALES ET RECOMPOSITION DES ESPACES, CNRS, UMR 7533
LABORATOIRE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE, CNRS, UMR 8591
LABORATOIRE GEOSCIENCES PARIS SUD, CNRS, UMR 8148

REPONSES HYDROLOGIQUES DE LA LOIRE MOYENNE AUX CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Formation des débits et fonctionnement d'une plaine alluviale : approches hydrologiques et géochimiques multi-scalaires

THESE PRESENTEE LE 6 NOVEMBRE 2015 PAR

STERENN RAMOND

EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS VIII

DISCIPLINE / SPECIALITE : **GEOGRAPHIE / GEOGRAPHIE PHYSIQUE**

CO-DIRECTRICES DE THESE : **EMMANUELE GAUTIER**
CHRISTELLE MARLIN

Jury

Gilles ARNAUD – FASSETTA	Professeur	Université Paris - Diderot	Président
Emmanuèle GAUTIER	Professeure	Université Paris 1	Co-directrice
Emmanuel GILLE	Maître de Conférences - HDR	Université de Lorraine	Rapporteur
Christelle MARLIN	Professeure	Université Paris Sud	Co-directrice
Florentina MOATAR	Professeure	Université F. Rabelais de Tours	Rapporteur
Emmanuelle PETELET - GIRAUD	Docteur, chef de projet	BRGM, Service EAU, Orléans	Examinatrice
Lionel BERTHET	Docteur, chef de service Hydrométrie	DREAL Centre	Invité

Remerciements

Cette thèse aura été une sacrée aventure. Au moment d'y mettre un point final, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont accompagnée dans ce long périple. Cette thèse d'hydrologie, interdisciplinaire par ses méthodes et approches, aura été une école de formation. Mais derrière ces grands mots, il y a plein de gens en chair et en os qui n'ont eu de cesse de m'apporter leur aide et leurs connaissances.

Tout d'abord, je tiens à remercier les membres du jury, Gilles ARNAUD – FASSETTA, Emmanuèle GAUTIER, Emmanuel GILLE, Christelle MARLIN, Florentina MOATAR, Emmanuelle PETELET-GIRAUD et Lionel BERTHET qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Un grand merci à mes deux directrices de thèse. Sans vous, sans votre investissement et votre passion pour la recherche, sans vos enseignements et votre soutien, je n'en serais pas là. Merci aussi pour votre ténacité, votre détermination, votre patience, votre confiance, et votre disponibilité.

Emmanuèle, ce sont tes cours qui m'ont fait choisir la géomorphologie fluviale, il y a plusieurs années. Toujours en respectant mes inclinations vers les relations société – milieux, tu as su me proposer les projets qui m'ont conduite à te suivre sur les problématiques ligériennes. C'est ton investissement et ton militantisme qui m'ont gagné à ton travail. Merci aussi pour ta connaissance de l'hydrologie ligérienne qui a permis de guider ce travail vers les problématiques essentielles. Et enfin, merci pour avoir mis en place cette recherche, au-delà des frontières de l'hydrogéographie, dont la diversité m'a tellement bien convenue.

Christelle, mes souvenirs impérissables resteront pour nos après-midis de travail où les idées et les raisonnements foisonnent pour tenter de décrypter, avec toute ta rigueur scientifique, ces données bizarres et complètement inconnues pour moi qu'étaient la chimie et les isotopes. Tu m'as montré comment je pouvais prendre pied au milieu de ces centaines de données, comment me les approprier, comment leur donner un sens. Les multiples pistes de travail en sortant de ton bureau ont toujours soutenu ma détermination à continuer.

Cette thèse n'aurait également jamais vu le jour sans les soutiens financiers à ce projet que sont le Feder, les régions Centre et Bourgogne, le Conservatoire des Espaces Naturels de la région Centre et la Zone Atelier Loire. Merci à toutes les équipes administratives de l'Etablissement Public Loire, de l'Université Paris 8 et du LGP pour avoir gérer tous les aspects administratifs et financiers, bien complexes, de ce projet, et en particulier à Benoît Rossignol, à Armelle Denis, à Marie-Christine Lamiche, à Marie-Line Chemin, à Michèle Pennec et à Mireille Morvan.

Un énorme merci à Vincent Robert, par-delà les mers qui nous séparent maintenant, pour toutes les journées passées au labo, en voiture, sur le terrain. L'attente des résultats des analyses des anions était interminable, mais on a réussi. Merci pour m'avoir expliqué le b.a.-ba de la chimie et tous les protocoles. Merci pour ton dévouement et ton sens de l'humour qui auront fait passer plus vite les longues journées d'analyse et de vaisselle.

Merci à Véronique Durand. Tu m'as ouvert les portes de la piézométrie et de la modélisation, un autre monde inconnu pour moi. A nouveau, nos heures de travail ensemble m'ont fait gagner un temps fou.

Cette thèse a comporté un long travail de collecte de données sur le terrain. Merci d'abord à tous les agriculteurs, propriétaires ou locataires, qui m'ont permis d'aller farfouiller dans leur puits et ont supporté mes fréquents envahissements avec tout mon matériel : la famille Valta, M. Aubier, M. Chollet, M. Crêche, M. Allaire, M. Robert, M. Brague et M. Chambole en rive gauche et M. Asselineau, M. Boin, M. Quettier et M. Boulier en rive droite. Un remerciement particulier à Pascal Coti et à M. Crêche, berger sur le méandre de Guilly, pour votre accueil et vos vastes connaissances de la Loire que vous avez su me faire partager. Merci à M. Robert et à Dominique Boin d'avoir convaincu vos collègues de l'intérêt de mon travail et d'avoir dissipé à l'avance tout malentendu sur mes objectifs.

Merci à François Hergott du Conservatoire des Espaces Naturels pour m'avoir guidé sur le terrain à travers le méandre de Guilly et pour avoir facilité la logistique de mes campagnes de prélèvements. Mais merci surtout pour ton soutien et ta confiance dans les travaux de recherche qui ont été menés sur le méandre.

Toutes ces campagnes de terrain n'auraient pas été possibles sans l'aide de tous ceux qui m'y ont accompagnée régulièrement ou ponctuellement, sous la pluie, la neige, la chaleur plombante ou dans la boue : Vincent, Thomas, Fouzy, Emmanuèle, Christelle, Véronique, Florent, Charles, Sylvaine, Daniel, Clothilde, Mélanie, Claude.

Merci à Laurent Paris de la Maison du Parc du Morvan pour avoir effectué les prélèvements des précipitations et m'avoir même apporté les échantillons à la sortie de l'autoroute pour éviter que je me retrouve dans le fossé à cause de la neige.

Merci à Franck Gilloux et à Philippe Lang pour leur disponibilité et leurs réponses précises à toutes mes questions imprécises. Merci à tous ceux de la Dreal Centre qui ont répondu à mes demandes incessantes de mise à jour des données.

Un remerciement global et collectif pour les équipes de mes deux laboratoires d'accueil le LGP et GEOPS. Merci à Delphine Grancher pour son soutien lors de mes doutes statistiques,

merci à Gaël Monvoisin, Aurélie Noret et Marc Massault pour les multiples analyses isotopiques réalisées, merci à Claude Legentil pour les aides et sauvetages informatiques en tous genres, merci à Daniel Brunstein pour nos discussions diverses et toujours riches.

Merci à Cécile Quantin et Delphine Jouvin de Paris Sud, qui à travers leur aide dans la préparation de mes cours m'ont apporté de nombreuses clés pour comprendre les recherches dans lesquelles j'étais engagée.

Merci aux anciens doctorants des milieux ligériens, pour leur aide et leur attention : Cyril, Stéphane, Saïda, Julienne, Soraya, Fouzy et Thomas (merci pour tes coups de fils, M. Depret), et aussi à ceux d'autres terrains parfois lointains : Senda, Paul, Salomé et Mélanie.

Merci à Charles pour ton aide dans la gestion des données et la mise en place d'outils permettant leur traitement.

Merci à la famille Boin dont la chaleur et la bienveillance m'auront toujours fait retrouver le sourire malgré la fatigue. Merci d'avoir accepté mes véritables invasions de la cuisine pour les filtrations de mes échantillons ! Merci pour ton aide, Dominique, dans mon incessante recherche du puits perdu de La Malette, au milieu du maïs, du colza et autres céréales en tous genres….

Merci à Clothilde, ma dernière relectrice, dont le travail n'a pas été le moins ingrat.

Merci à ma famille, toute proche ou plus éloignée, à tous mes soutiens fraternels, qui ne m'ont jamais lâchée et dont l'attention, la solidarité, l'affection et l'énergie m'ont accompagné pendant tout ce long parcours.

Pour finir, j'aurai une pensée pour le jars de l'Ile aux Canes qui devait être aussi effrayé que moi, mais qui a fini par disparaître….



Résumé

La Loire est un fleuve aux influences climatiques, physiques et géologiques variées. Les enjeux que représente la gestion du plus grand fleuve français sont multiples, en termes de risque (une crue centennale de la Loire est considérée comme la troisième catastrophe naturelle prévisible en France métropolitaine) mais aussi en termes de gestion de la ressource en eau (centrales nucléaires, alimentation en eau potable). Malgré cela, la dernière thèse portant sur l'hydrologie de la Loire date de 1974 avec les travaux de M. Dacharry.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du Plan Loire Grandeur Nature, financée et soutenue par le Feder, la région Centre, la région Bourgogne, le Conservatoire des Espaces Naturels de la région Centre et la Zone Atelier Loire.

L'objectif de ce travail est d'analyser à différentes échelles de temps et d'espace les transferts d'eau et leurs évolutions depuis la Loire amont jusqu'au Bassin Parisien et entre la Loire et sa nappe d'accompagnement. Il s'agit donc de rechercher des évolutions dans les chroniques de débits, d'étudier la formation des débits en amont de la Loire moyenne et notamment le rôle de la Loire bourbonnaise et des affluents drainant le Massif du Morvan, et enfin d'étudier la diffusion de ces eaux en Loire moyenne et leurs interactions avec la nappe alluviale.

L'étude de la chronique des débits annuels de la Loire à Blois, comprenant un siècle et demi de données, présente une stabilité temporelle, au-delà de ses variations interannuelles. La variabilité de l'occurrence des saisons hydrologiques a diminué avec un certain resserrement de leurs occurrences autour du cœur de leur saison. Par exemple, les dates de début très précoces ou de fin très tardives dans l'année hydrologique, tant pour les hautes eaux que pour les basses eaux, ont disparu. Les débits à pleins bords connaissent une relative stabilité de leur nombre d'occurrences par an, mais leur saisonnalité a évolué. Ils se produisent plus fréquemment en période hivernale et ont quasiment disparu en période estivale. Il faut noter également, depuis 1923, la disparition des débits supérieurs à 3 000 $m^3.s^{-1}$ à Blois (crue vicennale). Enfin, les plus faibles débits d'étiage connaissent une augmentation artificielle due à la politique de soutien des débits d'étiage par les grands barrages. Le nombre d'années sans étiage a néanmoins tendance à augmenter.

Des campagnes de prélèvements des eaux de la Loire entre Roanne et Orléans, ainsi que des eaux de ses principaux affluents (Allier et Arroux) ont été réalisées pendant une année hydrologique afin d'identifier la part relative de la Loire amont, de l'Allier et des affluents du Morvan dans la formation des débits écoulés en Loire moyenne. Les résultats des analyses des éléments chimiques majeurs et des isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$) n'ont pas permis de définir avec précision les apports que représente l'Allier dans les eaux de la Loire moyenne, à cause de la complexité hydrologique de la confluence (apports de sources et de la nappe alluviale). Cependant, l'importance des apports en Loire bourbonnaise a été mise en évidence. Ils sont relativement réduits en période d'étiage, mais les affluents drainant le Morvan sont responsables de l'inversion de la proportion entre la Loire amont et les affluents de la Loire bourbonnaise en période de hautes eaux, avec un rapport de 25% pour la Loire amont et 75% pour les affluents de la Loire bourbonnaise. Ces résultats sont validés par les données de débits disponibles.

A son entrée dans le Bassin parisien, après avoir collecté les apports du Morvan et de l'Allier, la Loire ne reçoit pas d'apports d'affluents significatifs jusqu'au Bec du Cher en aval de Tours. L'importance des nappes alluviales est donc majeure en Loire moyenne. L'étude d'un site atelier, un méandre de la Loire sur la commune de Guilly (proche de Sully-sur-Loire, Loiret), a permis le suivi piézométrique ainsi que géochimique de la nappe alluviale en parallèle de celui de la Loire. Ce site offre un élargissement de la plaine alluviale active grâce à un relatif éloignement des levées.

A l'échelle de ce méandre, le fonctionnement hydrologique global de la nappe alluviale a pu être décrit. Les échanges entre la nappe alluviale et la Loire ont été mis en évidence. La Loire contribue à la recharge de la nappe alluviale et la nappe alluviale soutient les débits de la Loire, mais ces échanges ne s'inversent pas selon un scénario hautes eaux – basses eaux. Les deux phénomènes d'échange entre la Loire et la nappe alluviale sont observés en toutes saisons hydrologiques. Le facteur de contrôle du sens de ces échanges est la ligne d'eau de la Loire. La variabilité saisonnière et interannuelle des débits de la Loire inverse les différences de charge entre la Loire et sa nappe alluviale à tout moment de l'année. La recharge de la nappe alluviale,

dépendant essentiellement de la Loire, est donc favorisée par les plus forts débits, quelle que soit leur date d'occurrence. La nappe alluviale joue donc un rôle majeur de soutien des débits de la Loire, dans la mesure où plus ses réserves sont reconstituées, plus le soutien des débits lors de leur baisse pourra mobiliser une réserve importante. La nappe alluviale au sein du méandre est également alimentée par les eaux provenant de la plaine alluviale s'infiltrant à travers les levées, en fonction des gradients hydrauliques.

Malgré l'absence d'apports de surface et le corsetage de son lit par les levées, la Loire moyenne est donc connectée à l'ensemble de sa plaine alluviale à travers ses échanges avec la nappe d'accompagnement. Ainsi, potentiellement, l'impact des prélèvements d'eau dans les nappes alluviales et des pollutions diffuses de leurs eaux, liées dans cette zone aux activités agricoles, est ainsi transmis à la Loire. Dans la perspective de la gestion de la ressource en eau, même en l'absence de crue, l'importance des débits annuels les plus importants de la Loire est une nouvelle fois démontrée pour conserver un fonctionnement hydrologique dynamique et abondant.

Ce vaste hydrosystème oppose donc sa complexité et la variété des influences qu'il cumule au fur et à mesure de l'augmentation de son bassin versant. Des variations dans l'hydrologie locale liées à l'évolution de l'occupation des sols ou à des variations climatiques possibles en tête des bassins de la Loire amont et de l'Allier, sont probablement masquées et diluées par la diversité des apports suivants. Cette approche globale a permis de démontrer des fonctionnements hydrologiques ressentis par les gestionnaires du fleuve mais non démontrés jusqu'alors. Les perspectives de recherche et d'approfondissement des conclusions présentées dans ce travail sont multiples. L'impact des sociétés sur ce fleuve ou les enjeux de gestion sont présents à toutes les échelles de ce travail, tant en termes d'échelle temporelle que spatiale. Ces préoccupations doivent motiver la poursuite de ces recherches pour améliorer la compréhension globale de l'hydrologie ligérienne.

Mots-clés : Relations société – milieux, hydrologie, nappe alluviale, géochimie, changements environnementaux, Loire

Sommaire

Remerciements ……i

Résumé ……iv

Sommaire ……vii

Introduction ……2

Première partie. Connaissance de l'hydrologie ligérienne

Introduction de la première partie ……27

Chapitre 1 – Le cadre d'étude géographique et hydrologique ……28

1.1. Fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne……29

1.1.1. Contexte physique de la Loire amont et moyenne ……29
1.1.2. Composantes principales du débit de la Loire moyenne ……35
1.1.3. Régime de la Loire moyenne ……38
1.1.4. Une importante variabilité interannuelle ……41

1.2. Les extrêmes en Loire moyenne ……43

1.2.1. Des étiages médiocres ……43
1.2.2. Crues : immodération et variabilité ……44

1.3. Echanges nappes-rivière et pertes karstiques en Loire moyenne ……48

1.3.1. Diffusion des débits en Loire moyenne ……48
1.3.2. Contexte hydrogéologique de la Loire moyenne ……50
1.3.3. Présentation du site-atelier : le méandre de Guilly ……54

Conclusion du premier chapitre ……59

Chapitre 2 – Le cadre scientifique : état de l'art ligérien à la lumière des recherches et méthodes de l'hydrologie actuelle ……60

2.1. Développement des travaux de recherche sur les grands hydrosystèmes français en lien avec les problématiques de gestion ……61

2.2. Etude des chroniques de débits centrée sur les extrêmes et les impacts des changements climatiques ……64

2.2.1. Recherches portant sur les crues ……64
2.2.2. Recherches portant sur les impacts des changements climatiques passés et actuels ……65
2.2.3. Recherches portant sur les étiages ……67

2.3. Changements environnementaux et modélisation prospective ……69

2.4. Fonctionnement hydrologique des plaines alluviales : zones humides alluviales et échanges nappes-rivière ……73

Conclusion du second chapitre ……75

Deuxième partie. Evolutions et formation des débits de la Loire moyenne

Introduction de la deuxième partie ……80

Chapitre 3 – Analyse des évolutions des débits en Loire moyenne depuis la deuxième moitié du 19ème siècle ……82

3.1. Objectifs, limites des données disponibles et adaptation des méthodes ……82

3.1.1. Les données disponibles et leurs limites ……83
3.1.2. Méthodes ……95

3.2. Impacts de la politique de soutien des débits d'étiage et de la construction de grands barrages ……102

3.2.1. Politique de soutien des débits d'étiage et gestion des barrages ……103
3.2.2. Impacts des grands barrages sur les débits de la Loire ……108

3.3. De légères tendances dans les chroniques climatiques ……117

3.4. Les débits moyens annuels : une stabilité robuste dans le temps ……124

3.5. Diversité des évolutions des maxima et stabilité des minima annuels ……133

3.5.1. Des VCN3 stables dans le temps ……133
3.5.2. Maxima annuels des débits journaliers ……139

3.6. Les basses-eaux ……146

3.7. Les hautes-eaux ……163

3.8. Occurrences des débits à pleins bords à Blois ……175

3.9. Synthèse des changements environnementaux imbriqués au sein du bassin qui pourraient impacter l'hydrologie de la Loire moyenne ……180

Conclusion et synthèse des résultats du troisième chapitre ……182

Chapitre 4 – Contribution des trois bassins amont principaux (haute Loire, Allier et Morvan) aux débits de la Loire moyenne (au Bec d'Allier) ……186

4.1. Données disponibles et méthodes ……186

4.2. Caractéristiques chimiques des eaux la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan ……205

4.2.1. Impacts d'un gradient amont-aval sur le faciès chimique des eaux de la Loire moyenne et de ses principaux affluents ……205
4.2.2. Variabilité saisonnière des principaux paramètres physico-chimiques et de la concentration en éléments majeurs ……216

4.3. Signatures isotopiques (^{18}O et ^{2}H) des eaux en la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan ……240

4.4. Apports des méthodes de la géochimie dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des confluences Loire – Allier et Loire – Arroux ……247

4.4.1. La confluence Loire – Allier ……247
4.4.2. La confluence Loire – Arroux ……260

4.5. Importance des apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire amont……265

4.5.1. Apports des analyses géochimiques réalisées durant les années 2010 et 2011 ……267
4.5.2. Validation des résultats grâce à 40 ans de données de débits ……271

4.6. Importance des apports de la haute Loire, de l'Allier et du Morvan dans les débits de la Loire moyenne 275

Conclusion et synthèse des résultats du quatrième chapitre 280

Conclusion de la deuxième partie 283

Troisième partie. Interactions des eaux de la Loire moyenne au sein de sa plaine alluviale

Introduction de la troisième partie 289

Chapitre 5 – Fonctionnement hydrologique d'une plaine alluviale de la Loire moyenne – Analyse des connectivités hydrologiques entre la Loire et la nappe alluviale sur le site du méandre de Guilly 290

5.1. Le site atelier du méandre de Guilly 292

5.1.1. Une morphologie fluviale héritée, liée à l'évolution des usages autour du fleuve .295
5.1.2. Dépôts alluvionnaires au sein du méandre et encaissant de la nappe alluviale 297
5.1.3. Expansion des crues de la Loire et remise en eau du méandre 299

5.2. Méthodologie d'analyse des échanges d'eau entre les différents réservoirs hydrologiques sur le site du méandre de Guilly 304

5.2.1. Le choix des sites et protocole du suivi piézométrique et géochimique 304
5.2.2. Validation des sites choisis et des données géochimiques 310
5.2.3. Méthodes de traitements des données 316

5.3. Caractérisation de la chimie des différentes masses d'eau en présence 320

5.3.1. Les précipitations 324
5.3.2. La nappe de Beauce 325
5.3.3. Une zone humide : le Trou Robert 325
5.3.4. La nappe alluviale 326
5.3.5. Influences des activités agricoles sur la chimie des eaux de la nappe alluviale 328

5.4. Piézométrie de la nappe alluviale : variations, échanges avec la Loire, circulation au sein de la nappe et autres apports ……331

5.4.1. Variations temporelles et spatiales de la piézométrie de la nappe alluviale ……..331
5.4.2. Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations des lignes d'eau de la Loire ……337
5.4.3. Mise en évidence des échanges entre la Loire et la nappe alluviale ……342
5.4.4. Occurrences des échanges entre la Loire et la nappe alluviale ……...349
5.4.5. Vidange progressive de la nappe alluviale en période d'étiage : exemple de l'étiage 2011 ……359
5.4.6. Impacts des crues moyennes et exemple de la crue printanière de mai 2013 ……..363
5.4.7. Circulation des eaux de la nappe alluviale, parallèlement ou transversalement à la levée ……368

5.5. L'apport des mesures isotopiques : caractérisation des mélanges des eaux au sein de la nappe alluviale ……..381

5.5.1. Chroniques des données isotopiques dans le secteur du méandre de Guilly ……381
5.5.2. Les hautes eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly ……393
5.5.3. Les basses eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly ……..400
5.5.4. Influence des formes fluviales héritées : les zones humides au sein des anciens bras de la Loire ……..404

5.6. Généralisation au fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne ……...409

Conclusion et synthèse des résultats du cinquième chapitre ……..416

Conclusion de la troisième partie ……419

Conclusion générale ……422

Bibliographie ……..431

Table des figures ……446

Table des tableaux ……459

Annexes ……465

Résumés ……541

Introduction

La compréhension des modifications actuelles du fonctionnement des hydrosystèmes continentaux, soumis aux changements environnementaux, constitue un enjeu essentiel pour la société et le monde de la recherche, à l'échelle internationale. Les stratégies de gestion de la ressource en eau et des grands hydrosystèmes évoluent selon les urgences ou les catastrophes qui surviennent. Selon le développement des pays, les problématiques ne sont pas les mêmes. L'impact de l'aménagement d'un bassin n'est pas appréhendé, par les gestionnaires des hydrosystèmes, selon la même vision du monde à travers la planète. D'autant plus avec l'explosion démographique de la planète et les changements climatiques, les gestionnaires de l'eau, au sens global, qu'ils soient publics ou privés, ont des responsabilités immenses envers les populations dont la vie, et parfois la survie, dépendent de la gestion de cette ressource vitale.

La communauté scientifique s'emploie, avec les moyens dont elle dispose, à mener à bien des recherches pour apporter des éléments de compréhension sur les impacts des changements environnementaux passés, en cours et à venir. La compréhension du fonctionnement des grands hydrosystèmes continentaux reste l'objectif de nombreuses recherches. La complexité et la diversité de leurs évolutions, engendrées par des facteurs « naturels » ou anthropiques, lorsqu'elles sont étudiées, ne peuvent que venir enrichir les recherches futures des équipes qui s'attèleront à de nouveaux travaux scientifiques sur ces problématiques.

Parmi les grands systèmes fluviaux, la Loire est un fleuve à part avec plus de 1000km de long. Son bassin versant de 117 000 km² représente plus d'un cinquième du territoire métropolitain. Son bassin est divisé en trois zones : la Loire amont, des sources jusqu'au Bec d'Allier à Nevers, puis la Loire moyenne jusqu'au Bec de Vienne, en amont de la ville de Saumur, et enfin la Loire aval jusqu'à son estuaire (fig.1). A l'école, on apprend qu'elle est le plus long fleuve français. Dans l'imaginaire collectif, elle est le dernier fleuve sauvage d'Europe. Elle marque les esprits par ses extrêmes, tant en étiage, qu'en période de crue (fig. 2). Pour les chercheurs, c'est surtout un anthroposystème complexe : la multitude d'aménagements dont son lit a été l'objet depuis le Moyen-Age, avec des objectifs différents, parfois contradictoires ; les modifications de l'occupation du sol non homogènes à l'échelle du bassin ; et tout simplement, la grandeur de son bassin. Ceci explique sûrement, en partie, que la dernière thèse sur

l'hydrologie de la Loire moyenne date de 1974 (Dacharry, 1974), et demeure la référence sur le sujet. Pourtant, cette compréhension du fonctionnement hydrologique global de la Loire, pour la société, est essentielle et urgente. Les enjeux de gestion, que ce soit en termes de gestion de la ressource en eau, ou en termes de protection des agglomérations contre les inondations, sont d'une actualité brûlante.

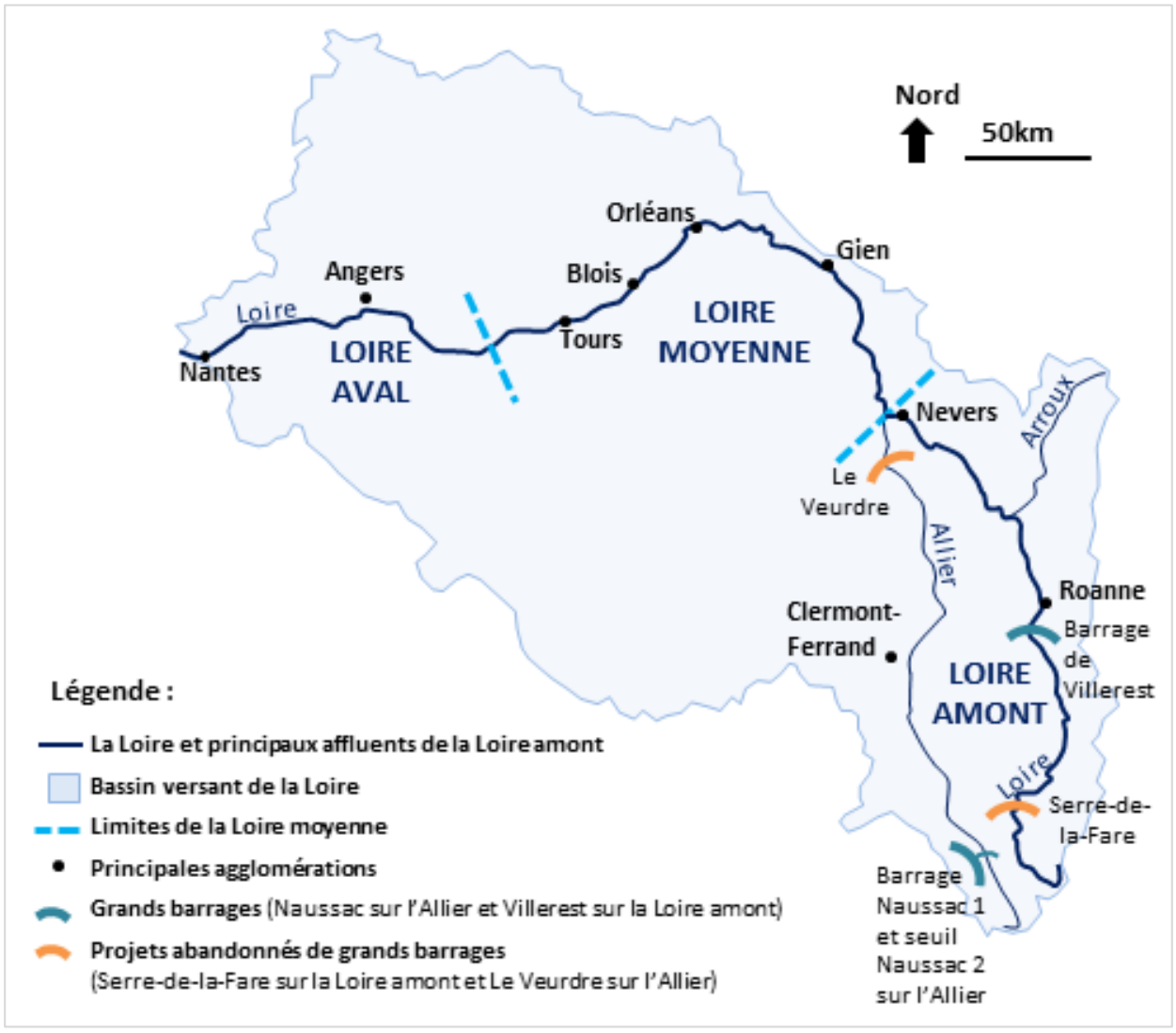


Fig. 1. *Bassin versant de la Loire.*



Crue de décembre 2003 dans le secteur de Sancerre, crédit M. Louchart, Aérodrome de Cosne-sur-Loire



Crue de la Loire en 1907 à Nevers (Etude EGRIAN, 2008)



Niveaux de crues historiques sous le pont Wilson à Tours, http://dagi.pagesperso-orange.fr/page-inondation-loire.html



Etiage 1949 à Orléans, Pont royal, http://www.lthe.fr/RIWER2030/CaseStudies.html



Loire à Sougy-sur-Loire , juillet 2006, S.R.

Fig.2. *La Loire dans tous ses états*

Bien que la Loire demeure un hydrosystème modeste à l'échelle du monde, que les enjeux liés à sa gestion ne soient pas aussi critiques que dans bien des régions, qu'elle se situe en zone tempérée, et donc que ses excès, tant dans la pénurie que dans l'abondance, et leurs évolutions ne soient pas si impressionnants et rapides, il n'en demeure pas moins que de nombreuses évolutions sont en cours, et que sa gestion représente des enjeux importants à l'échelle nationale. De plus, malgré les siècles d'aménagement que la Loire a connus, la communauté scientifique est loin d'apporter des réponses suffisantes à la compréhension globale du système. Plus précisément, les chercheurs doivent fournir des réponses aux impacts des changements environnementaux passés ou futurs, par une explication des divers processus à l'œuvre qui modifient ou perturbent le fonctionnement de cet hydrosystème continental. De nombreuses pierres sont encore à apporter à l'édifice d'une gestion pleinement consciente des conséquences qu'elle peut engendrer aux différentes échelles du bassin, afin que les stratégies adoptées soient

adaptées et répondent aux enjeux auxquelles les populations riveraines et la société dans son ensemble, sont confrontées.

Cette thèse s'inscrit donc pleinement dans ces vastes problématiques et apporte sa contribution à une meilleure compréhension du fonctionnement du plus grand bassin versant français.

Anthropisation du bassin ligérien

De longue date, la vallée de la Loire a offert de multiples sites d'implantation aux sociétés humaines qui ont vécu avec et malgré le fleuve et qui ont modifié et aménagé l'hydrosystème petit à petit (Dion, 1934 ; Miéjac, 1997 ; Audebert, 2000 ; Burnouf et *al*., 2000 ; Carcaud, 2004 ; Castanet, 2008). Pendant une première période, jusqu'à la fin de l'Age de Fer, il ne s'agissait que d'interactions entre ces sociétés et le milieu. Puis vint l'époque des « forçages », dans le sens où l'impact des sociétés sur le fleuve a modifié, de façon durable, l'hydrosystème. L'hydrosystème ligérien est d'ailleurs considéré comme un anthroposystème dès l'époque gallo-romaine (Carcaud, 2004). Plus récemment, depuis le 17ème siècle, la Loire a traversé de nouvelles phases d'aménagement (Temam, 2012). Ces ouvrages ont d'ailleurs, dans le temps, changé d'objectif. Au départ, prévus pour assurer la navigation sur le fleuve, ils sont devenus des protections contre les inondations. Puis de nouveaux aménagements se sont surimposés, dans la deuxième moitié du 20ème siècle, avec la construction de barrages.

En effet, depuis l'Antiquité et jusqu'à l'apparition du chemin de fer, la Loire était un axe de communication majeur. Les aménageurs de l'époque devaient donc assurer des conditions permettant la navigation sur le fleuve mais également l'accès aux nombreux ports qui le jalonnaient. Dans les années 1880, l'expansion du chemin de fer donne le coup de grâce à la Marine de Loire qui avait pourtant vu se développer les décennies précédentes les bateaux à vapeur et roues à aubes (Dacharry, 1991). Ainsi, « les villes et les campagnes riveraines « tournent le dos » au fleuve ; un fleuve désert, que ne hantent plus guère que les pêcheurs professionnels, de plus en plus rares […]. » (Poitrineau, 1996, p.19). Ce n'est donc pas seulement l'abandon de la navigation qui a bouleversé dans la deuxième moitié du 19ème siècle la place qu'occupait la Loire dans la société. La Révolution industrielle accompagnée de l'exode des populations rurales vers

les villes et leurs industries, transforme les usages autour du fleuve. L'abandon des pâturages sur les berges de la Loire, la fin de l'entretien de ses marges par les populations qui venaient y couper du bois tant pour le chauffage que pour la vannerie, tout cela disparait progressivement et va entrainer la modification du paysage de la Loire, qui peut lui donner aujourd'hui, cet aspect faussement sauvage (Gautier et *al*., 2007 ; Grivel, 2008) (Fig. 3). En effet, la Loire est un milieu très anthropisé et a perdu son caractère « naturel » depuis longtemps. Les levées de la Loire (terme local pour digue) en font d'ailleurs le fleuve français le plus largement et anciennement aménagé (Schulé, 2000 ; Burnouf et *al*., 2000). Par exemple, les première turcies dans le Val d'Orléans datent de 1412. Puis dès le début du 16ème siècle, leur linéaire est continu en rive gauche de Bouteille à Orléans (Dion, 1961). Les levées sont des ouvrages sans fondation (Bachoc et *al*., 1996), qui sont aujourd'hui le résultat de plusieurs périodes de rehaussement, suite aux grandes crues de la Loire de 1846, 1856 et 1866 (Lino et *al*., 2000), puis de périodes de restauration.



Famille de pêcheurs en Loire entre Gien et Sully-sur-Loire, 1936. Source : famille Ramond



En Nivernais, vers 1920, moutons en pâture en bord de Loire. Source : E. Gautier



Illustration de la « Loire sauvage » : un argument touristique qui masque l'anthropisation du milieu
Source : http ://www.berryprovince.com

Fig. 3. *Quelques vues des usages et paysages au sein de l'hydrosystème anthropisé ligérien.*

Or, les enjeux en Loire moyenne ont énormément évolué au cours du 20ème siècle, bien que les ouvrages d'aménagement antérieurs soient demeurés. Les levées construites pour permettre la navigation, deviennent des ouvrages essentiels de la protection contre les inondations (Temam, 2012). Il est possible de regrouper les enjeux actuels en trois groupes, dont les frontières sont perméables : la protection contre les inondations, les pressions sur la ressource en eau en période d'étiage et enfin la préservation ou la restauration des fonctionnalités écologiques et sociales de l'ensemble du système fluvial et de la biodiversité, que l'on peut résumer sous l'expression « un bon fonctionnement écologique ».

Enjeux de la gestion du bassin ligérien

En ce qui concerne le premier enjeu majeur de la gestion du bassin de la Loire, la protection contre les inondations, depuis sa création en 1983, l'Etablissement Public Loire a mené de nombreux projets visant à réduire la vulnérabilité des sociétés : du développement de modèles de prévision des crues sur les bassins de la Loire amont, de l'Allier et de la Loire moyenne jusqu'à la gestion de travaux de restauration des levées, en passant par le projet OSIRIS visant à préparer les riverains et les gestionnaires de crise à une crue historique de la Loire.

La connaissance des crues de la Loire est essentielle. En effet, une crue centennale de la Loire est considérée par les pouvoirs publics comme la troisième catastrophe naturelle prévisible en France métropolitaine. En cas de rupture de digues les dommages pourraient atteindre 10 milliards d'euros (http://www.europe-centre.eu). Or, les levées ne sont parfois que des amas de terre, aucune n'a de fondation (Bachoc et *al*., 1996) et l'accumulation de brèches accompagne l'histoire des grandes crues de la Loire (Dion, 1961 ; Halbecq, 1996 ; Lino et *al*., 2000).

Des travaux de restauration des levées ont d'ailleurs été un axe important du Plan Loire Grandeur Nature, avec une attention particulière à la protection des grandes agglomérations. Le grand barrage de Villerest, dans la partie amont du bassin de la Loire, en amont de Roanne, construit essentiellement pour soutenir les débits d'étiage de la Loire, est néanmoins aussi présenté comme un barrage écrêteur de crue (EPL, 2009). Le barrage de Villerest est censé intervenir sur les crues d'automne de plus de 1000 $m^3.s^{-1}$. Il réduirait les crues d'automne inférieures à 4000 $m^3.s^{-1}$ de moitié, et de 2000 $m^3.s^{-1}$ les crues d'automne supérieures à 4000

$m^3.s^{-1}$. L'exemple mis en avant pour étayer cette fonction du barrage est la crue de décembre 2003, car il s'agit de la crue la plus importante survenue depuis la mise en service du barrage de Villerest. Selon les études menées, ce barrage a permis de réduire de 90 cm la cote maximale à Nevers (Dreal, 2004). Il faut cependant rappeler, que le barrage de Villerest n'a pu avoir un tel effet sur cette crue que parce que le lac de retenue était à un niveau exceptionnellement bas à cause d'un étiage particulièrement sévère et parce que ce niveau avait été maintenu pour permettre la réalisation de travaux de maintenance (Dreal, 2004).

Cependant, ces ouvrages masquent la réalité et les dégâts qu'engendrerait une crue majeure. La vulnérabilité de la société a fortement augmenté par rapport au 19ème siècle. De plus, la Loire, sur ses 450 km entre le Bec d'Allier et le Bec du Maine, près d'Angers, est encadrée par 500 km de levées. Les deux tiers du lit de la Loire y sont ainsi soustraits aux inondations ordinaires, la Loire ne disposant plus que de 300 m à 1 km pour s'étaler en période de crue, alors que sa vallée s'étend sur 3 à 8 km (Bachoc et *al*., 2000). Les déversoirs aménagés sont actifs pour des débits plus importants que prévu à cause de l'incision du lit de la Loire (Bachoc et *al*., 1996), ce qui renforce encore la pression sur les levées. D'ailleurs, la Dreal prend en compte la forte probabilité d'éventrement (les « brèches ») des digues basses entre le Bec d'Allier et Gien pour simuler la ligne d'eau dans le secteur du Val d'Orléans en cas de crue majeure de la Loire (Goutx et *al*., 2011).

Etant donnés les volumes d'eau en jeu, le recours à des champs d'expansion des crues dans les vals est le seul moyen de protéger les agglomérations en aval, comme l'illustre le concept de redonner au système fluvial ligérien un « espace de liberté » (Gautier et *al*., 2001). Mais, ce mode de gestion du risque inondation engendre bien des conflits d'intérêts, tant à l'échelle locale, qu'à l'échelle du bassin.

Le second enjeu majeur de gestion du bassin de la Loire est le problème de la gestion de la ressource en eau en période de basses-eaux (fig. 4). Les prélèvements dans le bassin sont importants tant au niveau des eaux souterraines que des eaux de surface. Ils sont réalisés pour l'alimentation en eau potable, pour l'industrie, pour l'irrigation et pour les centrales nucléaires. Etant donné le caractère incomplet des données et la variabilité interannuelle des prélèvements,

notamment ceux dus à l'irrigation, il est impossible d'étudier l'évolution des volumes prélevés dans le temps à partir des données fournies par l'Agence de l'Eau du bassin Loire – Bretagne. Cependant, à l'échelle du bassin, les prélèvements d'EDF représentent plus de la moitié des prélèvements totaux (dont une partie retourne à la Loire) et varient fortement d'une année à l'autre. Les prélèvements liés à l'industrie (hors EDF) sont équitablement répartis en volume à travers le bassin et sont stables dans le temps. Les prélèvements pour l'Adduction d'Eau Potable (AEP) sont également stables bien que contrastés en volume à travers le bassin. Enfin, les prélèvements liés à l'irrigation sont en augmentation, essentiellement dans la partie aval du bassin.

Si l'on compare ces données à celles de l'année 1981 (Babillot et *al*., 1996), on obtient, pour l'ensemble du bassin Loire-Bretagne, une augmentation des prélèvements pour l'AEP de 13% et pour l'irrigation de 33%. La fiabilité des données, anciennes et récentes étant très discutable, il faut considérer ces valeurs avec beaucoup de précaution. En effet, les prélèvements agricoles demeurent souvent sous-estimés.

Les pressions sur la ressource en eau augmentent avec la pénurie en période d'étiage, notamment les années sèches. L'augmentation des prélèvements pour l'irrigation en période de basses-eaux et l'implantation de quatre centrales nucléaires en Loire moyenne (Belleville-sur-Loire, Dampierre-en-Burly, Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon), se sont accompagnées de la construction de grands barrages (Villerest et Naussac, voir fig.1) devant soutenir les débits d'étiage : en Loire moyenne, à Gien, le débit doit être maintenu à 60 $m^3.s^{-1}$. En effet, les centrales nucléaires prélèvent de l'eau pour le refroidissement des réacteurs. Cependant, les contraintes de débit liées aux centrales concernent également leurs rejets d'eau chaude (liée au refroidissement des réacteurs) et d'effluents. Ces derniers ne sont pas autorisés, par les services de l'Etat, si le débit descend sous 60 $m^3.s^{-1}$ (L'Hermitte, 1996). Le mode de gestion des ouvrages de Naussac et Villerest grâce à la modélisation des étiages a fait l'objet de plusieurs études (Lefèvre, 1974 ; Clérin et *al*., 1992 ; Moreau, 2004 ; Mathevet et *al*., 2010). Cependant, les conflits liés à la pénurie d'eau en étiage n'ont pas disparu, l'étiage de 2003 en est un bon exemple (Mathevet et *al*., 2010) ou plus récemment, celui du printemps et de l'été 2011.

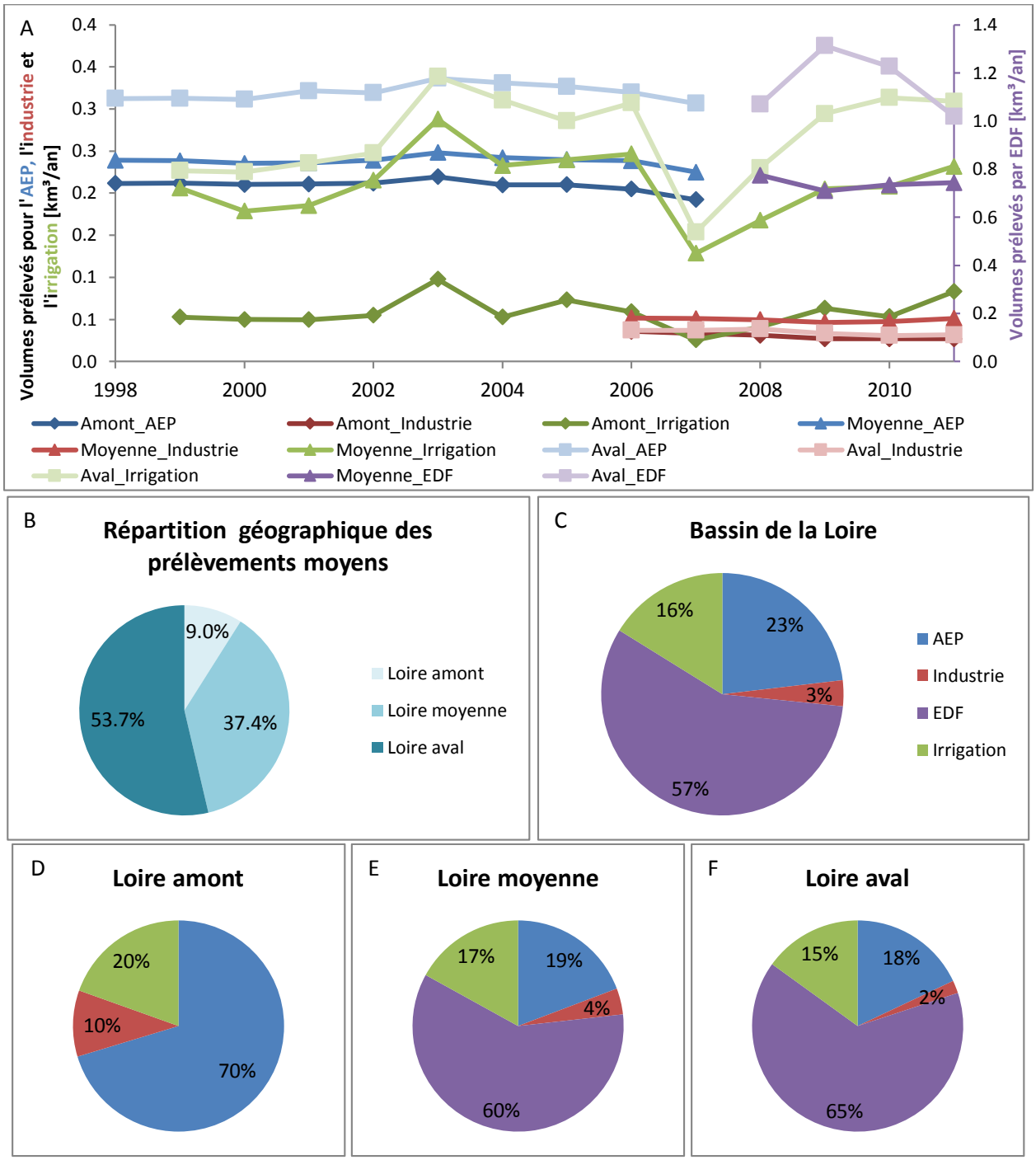


Fig. 4. *Répartition géographique (A et B) et sectorielle (A et C) des prélèvements d'eau (entre la Loire amont : en amont du Bec d'Allier, bassin de l'Allier et de la Haute Loire (D) ; la Loire moyenne : du Bec d'Allier au Bec de Vienne (E) ; la Loire aval : du Bec de Vienne, bassin de la Vienne compris, à l'estuaire(F)) et répartition par usages (Alimentation en Eau Potable, industrie hors EDF, EDF, irrigation) des prélèvements annuels moyens (eau de surface et eau souterraine) calculés à partir des données partielles disponibles des années 1998 à 2011. Les données des prélèvements pour l'alimentation des canaux ne sont pas disponibles, ainsi que les volumes d'eau dérivés du bassin de la haute Loire vers l'usine à haute chute de Montpezat dans le bassin de l'Ardèche). Source des données : Agence de l'eau Loire-Bretagne.*

Enfin, le dernier enjeu majeur au sein du bassin concerne la restauration d'un bon fonctionnement écologique des milieux ligériens. Un infléchissement dans la politique d'aménagement de la Loire a été opéré dans les années 1990-2000, avec l'abandon ou la mise en veille de projets d'aménagement hydraulique de grande ampleur, comme la construction du grand barrage de Serre-de-la-Fare sur la Loire ou du Veurdre sur l'Allier, face aux contestations émanant d'élus locaux et d'associations défendant la préservation de l'environnement telles WWF (World Wildlife Fund) et de la FFSPN (Fédération Française des Sociétés de Protection de la Nature) (Rode, 2010). Le Plan Loire Grandeur Nature, mis en place en 1995, est l'expression de cette évolution des moyens et techniques, mais aussi des politiques d'aménagement du bassin ligérien ; cette évolution illustre une certaine prise de conscience comme le souligne J.-P. Bravard (2000, p. 12) sur la question des crues et étiages majeurs : «Le principe même d'accepter les extrêmes hydrologiques est une nouvelle donne scientifique et sociétale caractéristique des années 1990 ». Il ne s'agit donc plus de tenter, souvent vainement, de contrôler les excès et la variabilité hydrologique de la Loire, mais d'en préserver et d'en restaurer le bon fonctionnement écologique auquel les extrêmes hydrologiques sont indispensables (Dufour et *al*., 2009). Les programmes de recherche interdisciplinaire portant sur le fonctionnement et l'évolution hydrodynamique de la Loire à plus ou moins long terme se sont développés (Gautier, 2006). Ainsi, ont été mises en place des actions de restauration de zones humides, de protection de 19 habitats dans le cadre de la Directive Habitats ou encore des projets d'arasement d'ouvrages hydrauliques anciens afin de restaurer le continuum fluvial et permettre notamment le franchissement de ces obstacles par les poissons migrateurs.

L'ensemble de ces politiques d'aménagement, de ces évolutions des usages autour de la Loire ont engendré des réajustements et des réponses du système fluvial ligérien, impulsés notamment par l'hydrologie de la Loire, qui est un des moteurs du système. Bien que moins spectaculaire que sur la Seine ou le Rhône où les capacités de stockage et de rétention sont bien supérieures, la construction des barrages-réservoirs de Villerest et Naussac a modifié le régime hydrologique de la Loire, essentiellement par le soutien des débits d'étiage. L'évolution de l'occupation du sol, notamment dans le secteur amont du bassin, dans le Massif Central, a eu des

répercussions sur les écoulements de surface. Les prélèvements tant au niveau des nappes que de la surface, ont modifié les ressources en eau disponible au sein du bassin. Les échanges nappes-rivière ont également été largement perturbés, échanges qui ont une importance particulière en Loire moyenne puisqu'il n'y a pas d'apports d'affluent majeur entre le bec d'Allier et le bec du Cher. La construction des levées, insubmersibles lors des crues fréquentes a entraîné une baisse de la recharge de la nappe d'accompagnement par les inondations. Ces zones d'échanges entre les nappes et le système fluvial de surface ont été largement réduites : l'enfoncement du plancher alluvial lié à l'extraction de granulats renforce la concentration des écoulements au sein du lit mineur (Nabet, 2013). La Loire est donc coupée d'un grande partie de sa plaine d'inondation par les levées ; les zones humides, souvent colmatées, sont de plus en plus rarement connectées à la Loire alors qu'elles sont des interfaces privilégiées d'échanges et de mélanges entre les différentes masses d'eau (Gautier et *al*., 2001). De plus, la colonisation forestière du lit a sans doute créé un changement de l'évapotranspiration. L'hydrologie de la Loire s'ajuste, répond, à ces changements environnementaux passés et présents. Etudier ces réponses est essentiel dans un contexte de changement climatique. Comprendre, ou au moins apporter des éléments de compréhension à la société et aux gestionnaires sur les conséquences de ces changements environnementaux ne peut que permettre une meilleure anticipation des conséquences des changements environnementaux à venir, notamment des conséquences du changement climatique et une meilleure adaptation de la société. Il s'agit d'enjeux sociaux, mais aussi d'enjeux pour la communauté scientifique d'aujourd'hui.

Objectifs, données et méthodes de la thèse

Les travaux de recherche sur les grands hydrosystèmes continentaux nécessitent la synthèse de nombreux processus souvent complexes, qui peuvent interagir entre eux, voire se compenser. Ainsi, les changements environnementaux, d'origine anthropique ou naturelle, au sein de grands bassins, peuvent induire, ou non, des évolutions de leur fonctionnement hydrologique. Appréhender de tels systèmes impose tant une compréhension globale du

fonctionnement du système qu'une approche plus fine des détails de son fonctionnement pour en saisir la complexité et la diversité à différentes échelles de temps et d'espace.

De plus, l'évolution des outils et méthodes dans le domaine de l'hydrologie au sens large, nécessite actuellement des approches interdisciplinaires. Sans renier les approches de l'hydrologie classique, illustrées par la thèse de M. Dacharry (1974), qui donne un cadre indispensable aux actuels travaux de recherche menés sur la Loire moyenne, il est essentiel, aujourd'hui, de connaître et d'utiliser les différentes approches et méthodes à la disposition des chercheurs afin de compléter et d'approfondir la connaissance générale du fonctionnement hydrologique de la Loire.

La Loire moyenne correspond à l'entrée de ce fleuve dans le Bassin Parisien, où le contexte géologique et géomorphologique change par rapport à la Loire amont. Les bassins amont de la haute Loire et de l'Allier sont caractérisés par des hautes terres, enserrées dans les terrains basaltiques et cristallins du Massif Central, où se succèdent gorges et petits bassins, ce qui implique des réseaux d'écoulement de surface relativement denses et une importance du rôle des nappes réduite à quelques bassins tels que la plaine du Forez. L'entrée de la Loire dans le Bassin Parisien se traduit, au contraire, par une pauvreté générale des écoulements de surface, illustrée par l'absence d'affluents importants et même par les pertes que subit la Loire dans les zones où les karsts sont les plus développés (val d'Or, secteur de Sully-sur-Loire).

En effet, le bassin versant de la Loire représente au Bec d'Allier une surface de 32 800 km² (fig. 5) et à Blois, de, seulement, 38 300 km², soit une augmentation de 5 500 km² pour un linéaire d'environ 230 km. Entre Blois et le Bec de Vienne (juste en aval de Tours), la surface du bassin versant de la Loire a plus que doublé (81 000 km² au Bec de Vienne) avec l'ajout des bassins versants du Cher et de la Vienne (Schulé, 2000). Dans ces conditions, les échanges entre les nappes et la Loire sont donc primordiaux pour comprendre l'évolution des débits entre le Bec d'Allier et Blois.

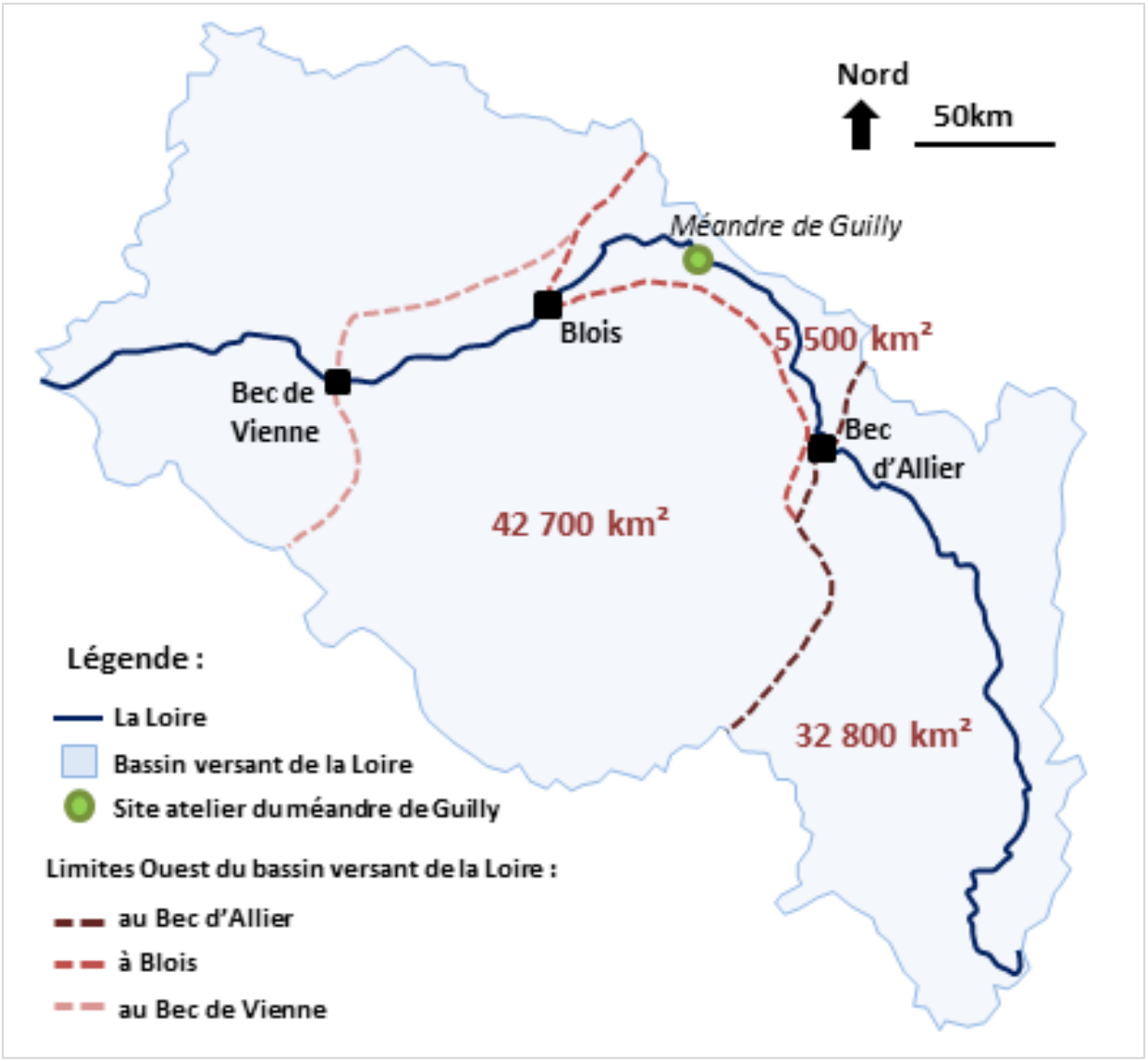


Fig. 5. *Limites du bassin versant de la Loire au Bec d'Allier, à Blois et au Bec de Vienne.*

Cependant, l'analyse du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne ne peut se limiter à cela. On a besoin de pouvoir comprendre l'origine de la variabilité hydrologique des débits en Loire moyenne. Pour cela, il est indispensable de s'intéresser aux bassins amont (haute Loire, Loire bourbonnaise et Allier, fig.6) qui vont contribuer à la composition des débits de la Loire au niveau du Bec d'Allier (Nevers, Nièvre). En effet, au sein de la Loire bourbonnaise, l'importance des apports des affluents drainant le massif du Morvan n'a jamais été quantifiée, alors que le Morvan est souvent qualifié de « château d'eau ». Les études précédentes se sont attachées à caractériser les apports, au Bec d'Allier, de l'Allier et de la Loire amont, sans identifier spécifiquement ceux provenant du Morvan.

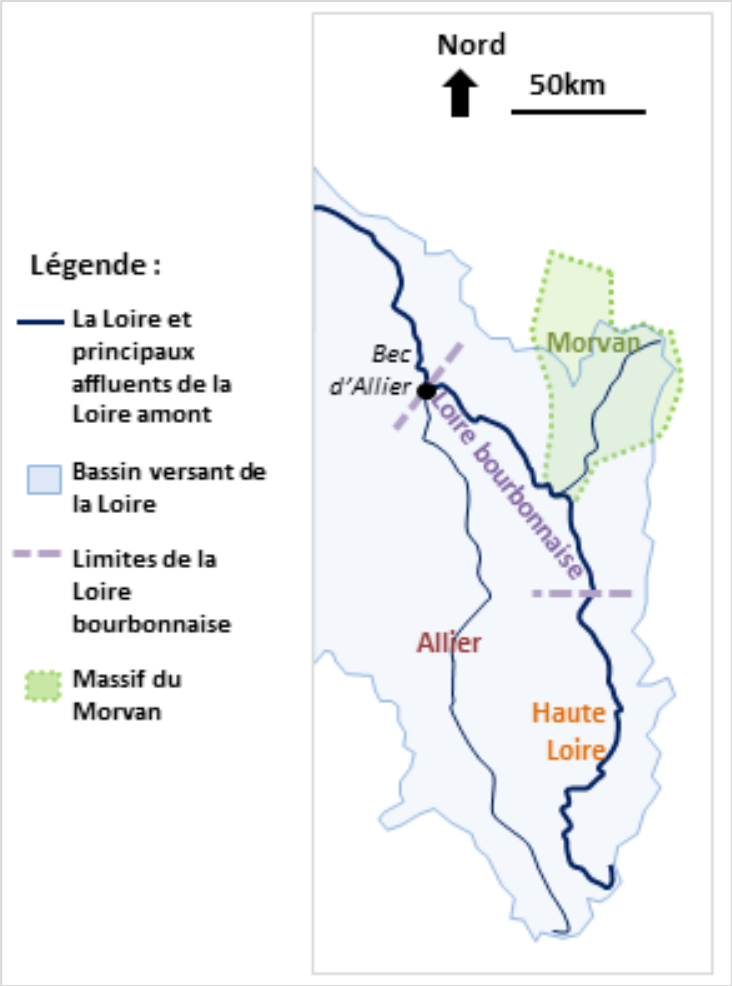


Fig. 6. *Les différents secteurs de la Loire amont contribuant à la formation des débits de la Loire au Bec d'Allier.*

Il s'agit donc, tout d'abord, d'analyser les débits de la Loire dans leur diversité temporelle et spatiale, c'est-à-dire leur évolution, en Loire moyenne, dans le temps ainsi que la variabilité des apports des bassins amont qui les composent. Puis, l'étude, à une échelle fine, des échanges entre la Loire et sa plaine alluviale, par l'intermédiaire de sa nappe alluviale, est essentielle car les échanges en surface sont limités par les levées en Loire moyenne.

1er objectif : Evolutions des débits de la Loire moyenne

Afin d'étudier les évolutions du débit de la Loire, il a été choisi de travailler essentiellement sur la chronique de débits de Blois (la plus longue chronique en Loire moyenne avec un siècle et demi de données), à partir d'indices hydrologiques (Bard et *al*., 2012).



Fig. 7. *Bassins étudiées et leurs stations de jaugeage.*

Ces indices statistiques caractérisent le régime hydrologique moyen de la Loire, ainsi que ces basses et hautes eaux. A partir de ces indices, des traitements statistiques simples ont été réalisés afin de rechercher des évolutions des débits de la Loire moyenne. En fonction des tendances identifiées, des évolutions similaires ont été recherchées dans les chroniques de débits de la Loire amont (haute Loire, Loire bourbonnaise et Allier, fig.6), grâce aux données de débits disponibles (fig.7).

De plus, les facteurs qui pourraient contrôler ces évolutions ont été étudiés à partir des données climatiques (données mensuelles homogénéisées de températures et de précipitations

fournies par les services de Météo France) ainsi que des éléments descriptifs des principaux changements environnementaux au sein du bassin, essentiellement la politique de soutien des débits d'étiage par les grands barrages (Naussac et Villerest, fig.1) depuis le milieu des années 1980, grâce aux données de « débits naturels reconstitués » pour les périodes d'étiages (fournies par la DREAL Centre).

2ème objectif : Formation des débits de la Loire moyenne : analyse des apports relatifs des bassins affluents et de leur variabilité spatio-temporelle

Pour comprendre les débits de la Loire moyenne, il est donc essentiel de travailler sur les apports des bassins amont et leurs mélanges. Il s'agit donc d'analyser la variabilité de ces débits « hérités » de l'amont qui formeront ensuite les débits de la Loire moyenne. Or, dans certains secteurs, les données de débits font défaut soit par leur inexistence (petits affluents en Loire bourbonnaise par exemple), soit par leur faible fiabilité, notamment dans les secteurs des confluences majeures.

Ainsi, le suivi géochimique (éléments chimiques majeurs, ^{18}O, ^{2}H), pendant une année hydrologique, puis adapté en fonction des évènements hydrologiques, des eaux de la Loire de Roanne à Orléans, de celles de l'Arroux (principal affluent drainant le Massif du Morvan) et de l'Allier avant leur confluence avec la Loire, a permis d'étudier en détail ces apports des bassins amont. Les données de débits disponibles ont servi à valider ces résultats.

Les influences climatiques différentes auxquelles sont exposés d'une part la haute Loire et l'Allier, et d'autre part le Morvan, induisent une complexité dans le régime hydrologique de la Loire moyenne. Il était donc important de se pencher sur les apports relatifs de ces sous-bassins, ainsi que sur la saisonnalité de ces apports et notamment le rôle du Morvan dans la variabilité des hautes eaux en Loire moyenne.

3ème objectif : Diffusion des écoulements en Loire moyenne et caractérisation des échanges Loire – nappe alluviale – zone humide

Comme on l'a vu, la compréhension des échanges nappes-rivière est cruciale en Loire moyenne en l'absence d'apports de surface (pas d'affluent significatif entre l'Allier et le Cher). La dimension transversale, *i.e*. celle des échanges entre Loire et nappes, y est donc analysée en détail. Ainsi, cette approche repose sur un décryptage à haute résolution spatiale et temporelle du fonctionnement hydrologique d'une plaine alluviale. Les objectifs sont multiples, car il s'agit, sur un petit secteur, d'une part, d'apporter une description du fonctionnement du système nappes-rivière et de sa variabilité saisonnière et interannuelle, et d'autre part, de mettre en évidence l'importance des zones humides dans le fonctionnement même de ce système nappes-rivière.

Cette étude s'est donc appuyée sur le suivi géochimique des eaux de la Loire moyenne et sur l'équipement et le suivi d'un secteur de la plaine d'inondation de la Loire moyenne, le méandre de Guilly (fig. 5), dans le Loiret, en amont de Châteauneuf-sur-Loire. Tout en présentant les caractéristiques « classiques » d'un méandre en Loire moyenne, il est au cœur des enjeux liés au risque d'inondation en amont de l'agglomération d'Orléans, car il s'agit d'une zone d'expansion des crues.

Trois critères principaux expliquent le choix de ce site :

(i) Le secteur a été l'objet de nombreuses études dans le domaine de la géomorphologie fluviale.

(ii) Le site du méandre de Guilly allie activités agricoles, zones protégées et gérées dans le but de la préservation de milieux fragiles et rares.

(iii) Les levées, qui corsètent la Loire dans le Val d'Orléans s'écartent de quelques centaines de mètres (en rive gauche) donnant ainsi au fleuve un certain espace de liberté (fig.8). L'inondation d'une fraction plaine alluviale lors des crues moyennes est donc possible. Ce site synthétise donc toutes les contraintes anthropiques caractéristiques des bords de Loire (levées, activités agricoles), tout en permettant d'analyser au sein de ce méandre les échanges d'eau entre

lit actif, la plaine d'inondation active (et non fossilisée par les levées) et les composantes souterraines.

La présence d'anciens bras de la Loire (le « Petit Riot » et le « Grand Riot », fig. 8) au sein du méandre permet l'étude de ces zones humides et de leurs connexions à la Loire. Ces bras morts sont réputés pour permettre l'abaissement des lignes d'eau de crue en amont des vals urbanisés (ici Orléans). Ils ont donc fait l'objet de travaux d'entretien répétés par les services de l'État.

Toutefois, leur fonctionnement hydrologique est totalement inconnu même si l'on sait que l'ensemble de leur linéaire est entièrement reconnecté à la Loire (à l'aval et à l'amont) par une crue quinquennale.

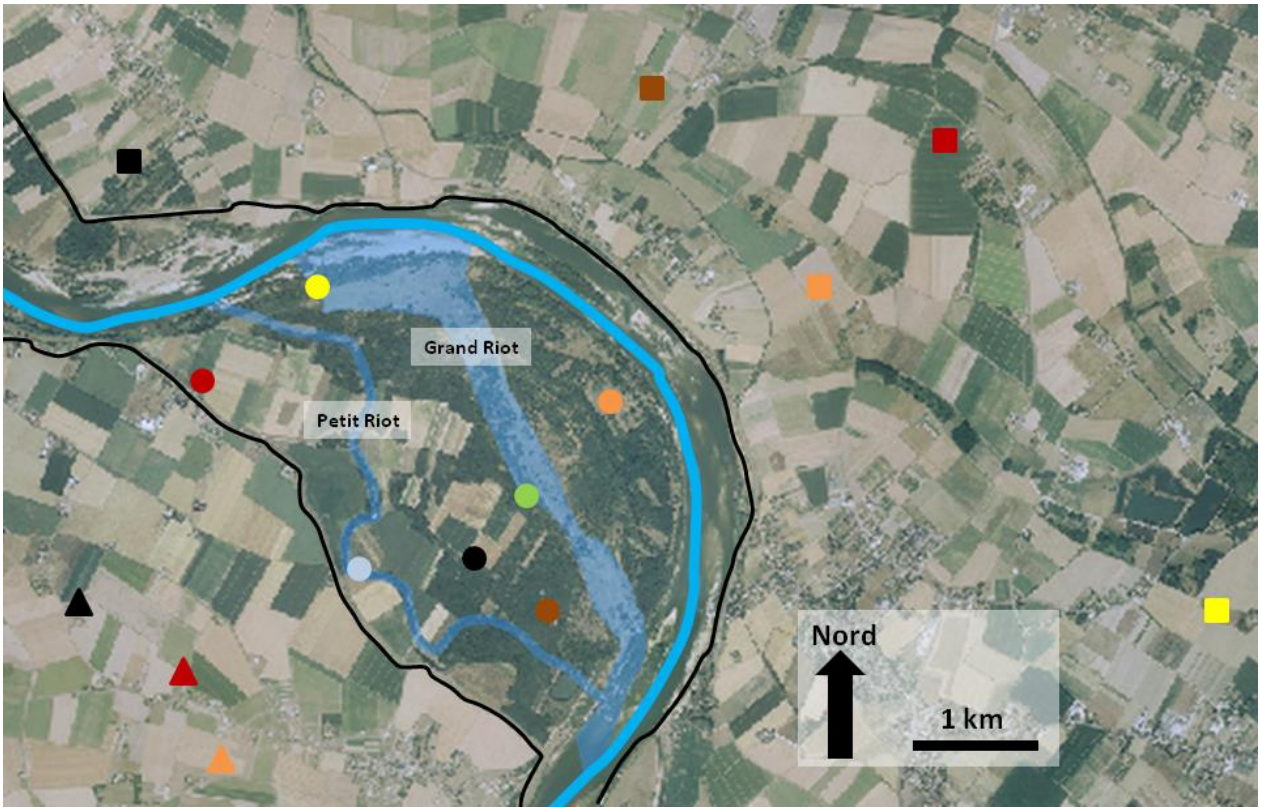


Fig. 8. *Méandre de Guilly et puits faisant l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique.*

L'originalité de l'approche retenue pour cette étude de cas est donc la combinaison d'un suivi hydrogéologique fin de la nappe alluviale, au suivi géochimique, à un pas de temps mensuel

puis selon les évènements hydrologiques, des différentes masses d'eau en présence (Loire, nappe alluviale, nappe de Beauce et zone humide, fig. 8).

Si ces méthodes ont été mises au point sur d'autres cours d'eau (bassin de la Garonne : Ochoa-Salazar, 2008 ; bassin de la Seine : Weng, 2000), la spécificité de la présente thèse réside dans la densité temporelle et spatiale des données piézométriques continues collectées, et non ponctuelles ou en lien avec des épisodes hydrologiques particuliers.

Ce protocole permet donc une compréhension fine du fonctionnement saisonnier de la nappe alluviale. De plus, le suivi des zones humides a fait l'objet d'une attention particulière afin d'étudier le rôle de stockage saisonnier qu'elles peuvent jouer, même en l'absence de crue. Au vu de la variété des mesures effectuées, qui mettent en lumière une certaine complexité du système et les influences anthropiques qu'il subit, la multiplication des approches permet une vérification solide des résultats présentés.

Les principaux objectifs et méthodes utilisées pour mener à bien cette recherche sont synthétisés par la figure 9. Les méthodes seront exposées dans le détail au début de chaque chapitre.

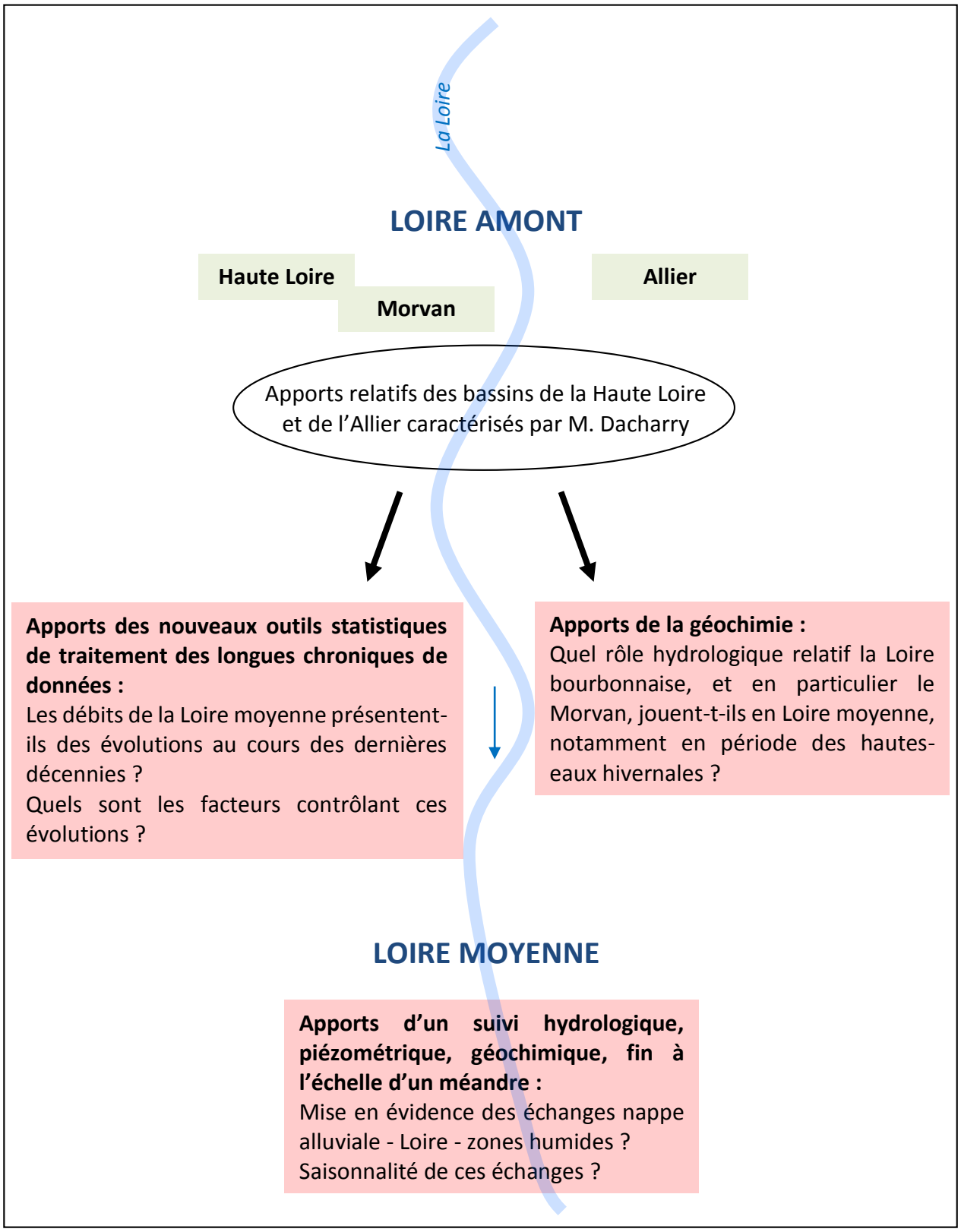


Fig. 9. *Synthèse des objectifs et méthodes de la thèse.*

Plan de la thèse

Dans une première partie, les cadres géographique et scientifique seront présentés afin de comprendre les connaissances de l'hydrologie ligérienne sur lesquelles cette recherche est basée, ainsi que les avancées de la recherche internationale qui ont inspirées le choix des méthodes.

La seconde partie est consacrée à la présentation des résultats concernant d'une part l'évolution des débits en Loire moyenne depuis 150 ans, et d'autre part, l'étude fine des apports des différents bassins amont à la formation des débits de la Loire au Bec d'Allier.

Enfin, la troisième partie étudie la diffusion de ces eaux en Loire moyenne, et en particuliers, les interactions entre les eaux du fleuve de celles de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly.

Cadre de la réalisation de la thèse

Cette thèse a été réalisée dans le cadre de deux programmes de recherche majeurs : le Plan Loire Grandeur Nature (2007 – 2013, Plateforme Recherche, Données et Informations) et la Zone Atelier Loire (CNRS, Inee). Les financeurs en sont : le fonds Feder, les régions Centre et Bourgogne, le Conservatoire des Espaces Naturels de la région Centre et la Zone Atelier Loire. La coordination a été assurée par l'Etablissement Public Loire.

L'Ecole doctorale en Sciences Sociale (ED 401) de l'Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis en a été le support universitaire. Le laboratoire Ladyss, rattaché à l'Université Paris 8, en est le laboratoire d'accueil.

Ces recherches ont été menées au sein, et, grâce à la collaboration scientifique, de deux laboratoires de recherche : le LGP (géographie physique, Meudon, CNRS UMR 8591, Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne) et GEOPS (sciences de la Terre, Orsay, CNRS UMR 8148, Université Paris Sud).

La Dreal Centre et Météo France ont fourni l'essentiel des données existantes, nécessaires à ce travail.

Le travail de terrain de collecte de données a été permis par le soutien du Conservatoire des Espaces Naturels de la région Centre et par l'accord des propriétaires des puits agricoles qui ont fait l'objet d'un suivi.

Première partie

Connaissance de l'hydrologie ligérienne

Sommaire de la première partie :

Introduction de la première partie ……27

Chapitre 1 – Le cadre d'étude géographique et hydrologique ……28

1.1. Fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne……29

1.1.1. Contexte physique de la Loire amont et moyenne ……29
1.1.2. Composantes principales du débit de la Loire moyenne ……35
1.1.3. Régime de la Loire moyenne ……38
1.1.4. Une importante variabilité interannuelle ……41

1.2. Les extrêmes en Loire moyenne ……43

1.2.1. Des étiages médiocres ……43
1.2.2. Crues : immodération et variabilité ……44

1.3. Echanges nappes-rivière et pertes karstiques en Loire moyenne ……48

1.3.1. Diffusion des débits en Loire moyenne ……48
1.3.2. Contexte hydrogéologique de la Loire moyenne ……50
1.3.3. Présentation du site-atelier : le méandre de Guilly ……54

Conclusion du premier chapitre ……59

Chapitre 2 – Le cadre scientifique : état de l'art ligérien à la lumière des recherches et méthodes de l'hydrologie actuelle ……60

2.1. Développement des travaux de recherche sur les grands hydrosystèmes français en lien avec les problématiques de gestion ……61

2.2. Etude des chroniques de débits centrée sur les extrêmes et les impacts des changements climatiques ……64

2.2.1. Recherches portant sur les crues ……64
2.2.2. Recherches portant sur les impacts des changements climatiques passés et actuels ……65
2.2.3. Recherches portant sur les étiages ……67

2.3. Changements environnementaux et modélisation prospective ……69

2.4. Fonctionnement hydrologique des plaines alluviales : zones humides alluviales et échanges nappes-rivière ……73

Conclusion du deuxième chapitre ……75

L'objectif de cette première partie est de présenter l'ensemble du cadre de cette recherche, tant géographique, scientifique que méthodologique.

L'étendue du bassin de la Loire nécessite une vaste présentation de sa diversité géomorphologique, géologique et climatique afin de comprendre la variabilité importante qui caractérise l'hydrologie de la Loire. Les connaissances du fonctionnement hydrologique, moyen et extrême, de la Loire moyenne, sont ensuite synthétisées afin de présenter le cadre scientifique local dans lequel s'inscrit cette thèse d'hydrologie. Les connaissances des particularités des écoulements en Loire moyenne, étroitement liés au substrat calcaire, sont synthétisées. Le cadre de l'étude de cas, le site du méandre de Guilly est également présenté, en tant que site-atelier de l'étude du fonctionnement de la nappe alluviale dans ce secteur.

Une étude hydrologique portant sur la Loire moyenne ne peut donc pas faire abstraction de l'importance des bassins amont de la Loire. Dans ce premier chapitre, seront donc présentés non seulement les éléments du contexte physique et de l'hydrologie de la Loire moyenne mais également ceux des bassins de la Loire amont nécessaires à l'étude présente.

Le second chapitre s'attache à présenter les avancées de la recherche internationale dans le domaine de l'hydrologie afin de comprendre les perspectives de recherches au sein du bassin ligérien, autour de quatre thèmes principaux : l'analyse de longues chroniques de débits, les crues, les étiages, l'impact des changements environnementaux et le fonctionnement hydrologiques des plaines alluviales.

Chapitre 1 : Le cadre d'étude géographique et hydrologique

Pour introduire ce chapitre et comprendre les causes de la variété des influences que subissent les débits de la Loire moyenne, le concept d'hydro-écorégions est utilisé pour illustrer efficacement la diversité physique présente dans le bassin de la Loire (fig. 10).

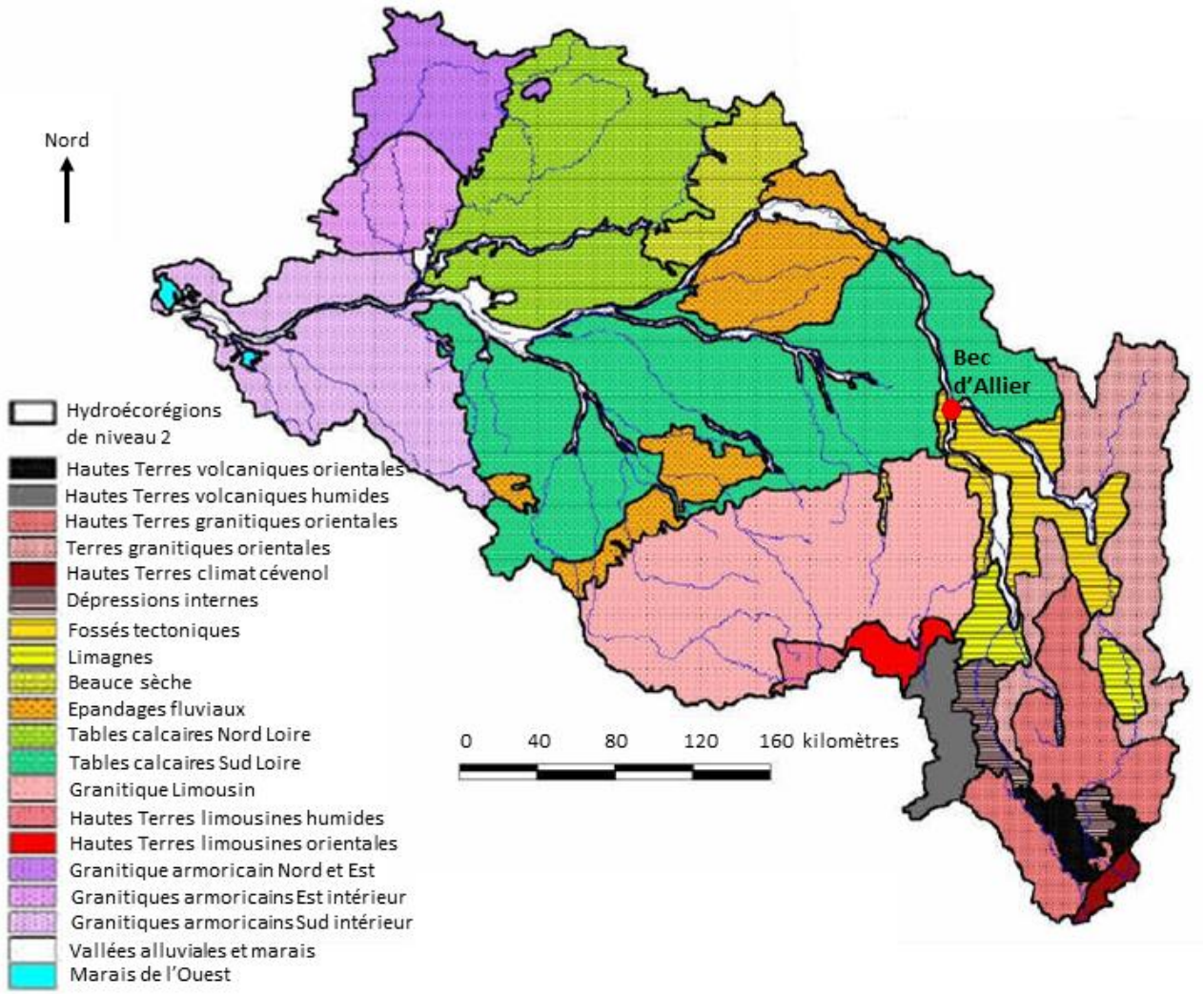


Fig. 10. *Les hydro-écorégions du bassin de la Loire. Source : Wasson, et al., 2001 (modifié).*

En effet, le découpage en hydro-écorégions permet de définir différents sous-ensembles d'un bassin versant à partir des facteurs contrôlant la biodiversité présente au sein de l'hydrosystème. Ainsi, ces facteurs sont l'hydrologie et la morphologie fluviale, eux-mêmes sous

le contrôle direct de la géologie, de la géomorphologie et du climat (Wasson, 1996 ; Anfriamahefa, 1999). Pour le bassin de la Loire, il est notable que cette zonation possède un important déterminisme géologique.

Le passage de la Loire amont à la Loire moyenne est donc une zone de transition (voir Bec d'allier, fig. 10), dont l'ensemble des paramètres sera décrit au paragraphe 1.1.1. L'évolution de la géologie, du climat et de la géomorphologie entre la Loire amont et la Loire moyenne entraîne également une évolution des conditions d'écoulement des eaux au sein de ces deux secteurs.

L'évolution spatiale des paramètres physiques entraîne ainsi de nombreuses conséquences sur le fonctionnement hydrologique de la Loire, que ce soit au niveau de son régime, ou bien des extrêmes hydrologiques. Il est important de noter que la présente recherche repose entièrement sur l'étude de ces diversités et de ces conséquences hydrologiques.

1.1. Fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne

1.1.1. Contexte physique de la Loire amont et moyenne

La superficie du bassin versant de la Loire s'élève à 117 500 km², soit près de 1/5ème du territoire métropolitain français. Elle traverse trois ensembles géologiques majeurs : le Massif Central, le Bassin Parisien et le Massif Armoricain. L'étendue du bassin versant explique l'importante variabilité saisonnière et interannuelle des débits de la Loire et leur complexité étant donné la variété des influences géologiques et climatiques auxquelles le bassin est soumis (fig. 11 à 15).

Le bassin Loire – Allier, ou Loire amont, est la partie du bassin la plus productrice. Au Bec d'Allier, la Loire a déjà cumulé 40% de son débit alors qu'elle n'a collecté les eaux que de 30% de la superficie totale de son bassin (Schullé, 2000). Le bassin amont est caractérisé par sa grande diversité tant géologique, morphologique que climatique. On y retrouve les plus hauts reliefs du bassin (tab. 1), soumis à un climat montagnard et sub-montagnard (importance de la neige au-

dessus de 700 m). La Loire et l'Allier traversent d'abord une succession de gorges et de petits bassins tectoniques, dans un ensemble de hautes terres qui sont d'autant plus arrosées qu'elles approchent des bordures cévenols. Viennent ensuite la Plaine du Forez pour la Loire et la Grande Limagne pour l'Allier, deux grands bassins tectoniques, où l'on trouve un climat continental et donc plus sec (la partie centrale de la Plaine du Forez reçoit annuellement des précipitations inférieures à 600 mm). Enfin, Loire et Allier traverse les dépôts tertiaires du Bourbonnais sous un climat océanique de transition.

Cette hétérogénéité climatique de la Loire amont s'explique par deux caractéristiques principales de la circulation des masses d'air dans la région (Dacharry, 1974). D'une part, les perturbations ont un sens de circulation principal Ouest-Est (fig. 15), même si, cependant, les reliefs assez élevés du Massif Central d'orientation Nord-Sud créent de nombreuses situations d'abri. D'autre part, les fortes altitudes de l'extrême Sud-Est du bassin de la Loire entraînent des ascendances orographiques et donc, un accroissement des précipitations dans cette zone, ce qui explique les influences cévenoles observables au Sud du bassin. Ainsi, le relief du Massif Central joue un rôle déterminant dans la diversité de la répartition des précipitations au sein du bassin, mais également, par conséquent, dans la variabilité hydrologique en Loire amont.

Après sa confluence avec l'Allier, la Loire entre dans le secteur de la Loire moyenne, qui appartient, pour la géologie, au Bassin Parisien. En ce qui concerne le climat, il s'agit d'un ensemble homogène. C.-A. Schullé décrit ainsi la Loire moyenne : « La confluence nivernaise donne naissance à une grande artère qui va traverser le bassin médian un peu en étrangère » (Schulé, 2000, p. 240). En effet, la Loire ne reçoit aucun apport d'affluent significatif. Il s'agit d'un fleuve exogène. La densité du réseau hydrographique est plus faible qu'en Loire amont. Cependant, la Loire interagit avec sa plaine alluviale. Les caractéristiques géologiques de la région entraînent la présence de vastes nappes. La résurgence du Loiret est alimentée par des pertes au sein même du lit de la Loire. Les nappes alluviales y jouent également un rôle majeur : elles sont rechargées par la Loire lorsque que les débits augmentent et soutiennent les débits de la Loire en période d'étiage.

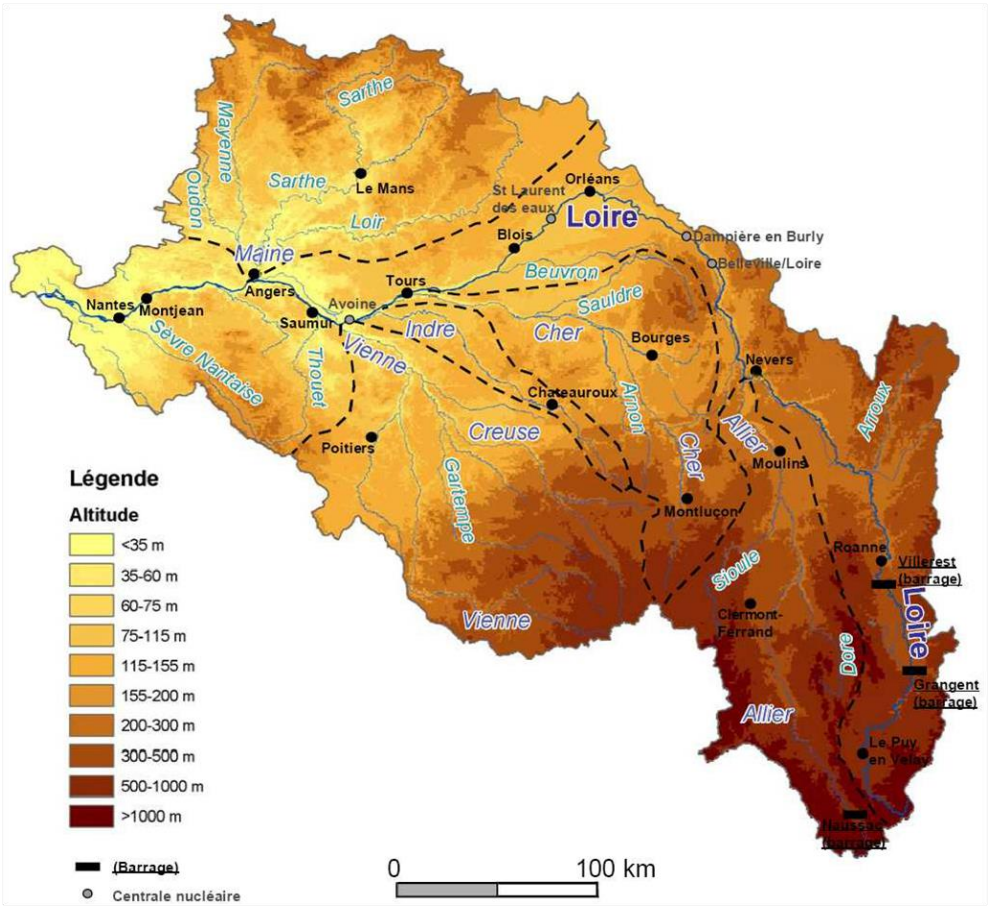


Fig. 11. *Relief du bassin versant de la Loire. Source : Rodrigues, 2004.*

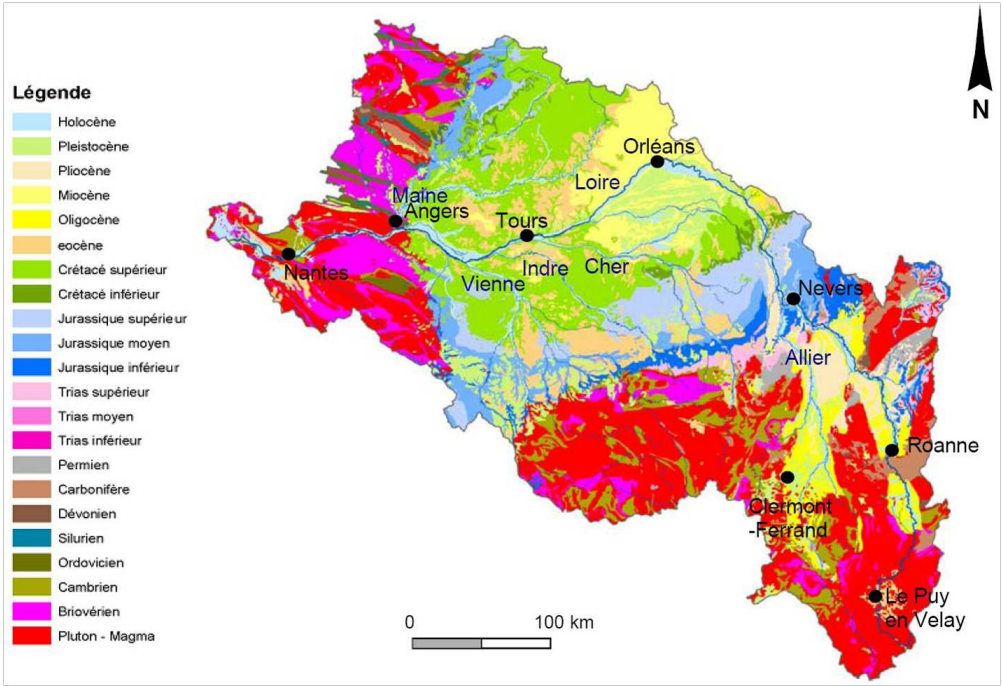


Fig. 12. *Carte géologique du bassin versant de la Loire extraite de la carte géologique de la France au 1/1000000 (source données : BRGM). Source : Rodrigues, 2004.*

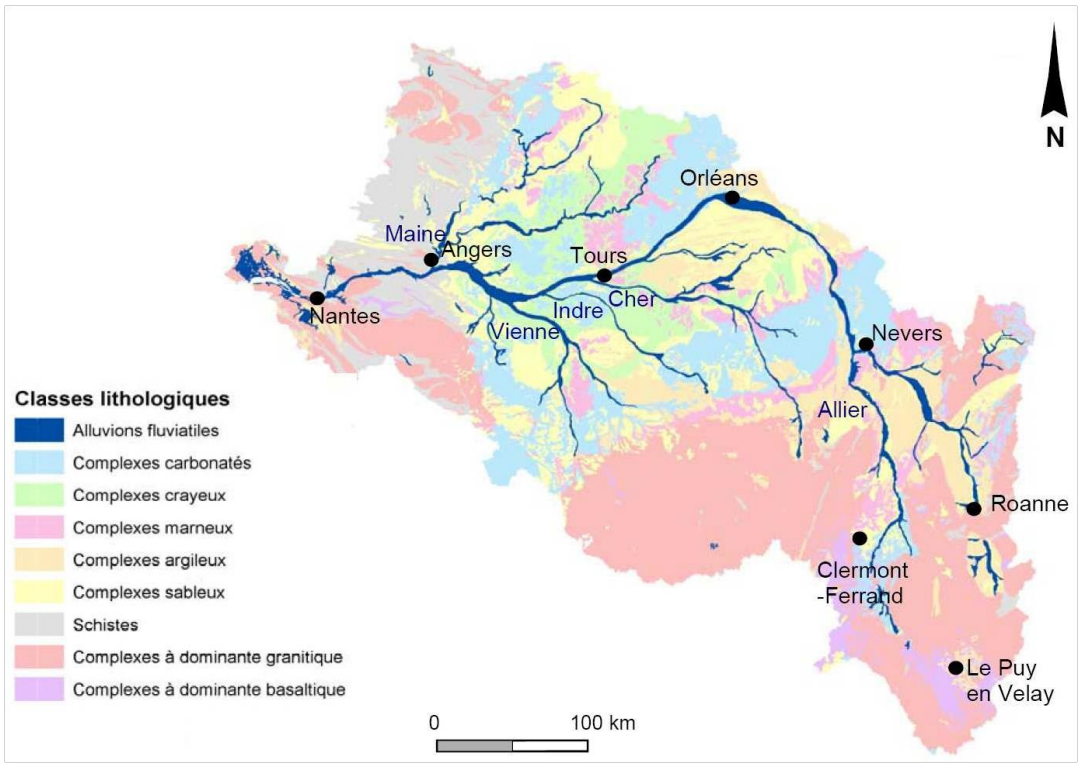


Fig. 13. *Carte lithologique du bassin versant de la Loire. Source : Rodrigues, 2004.*

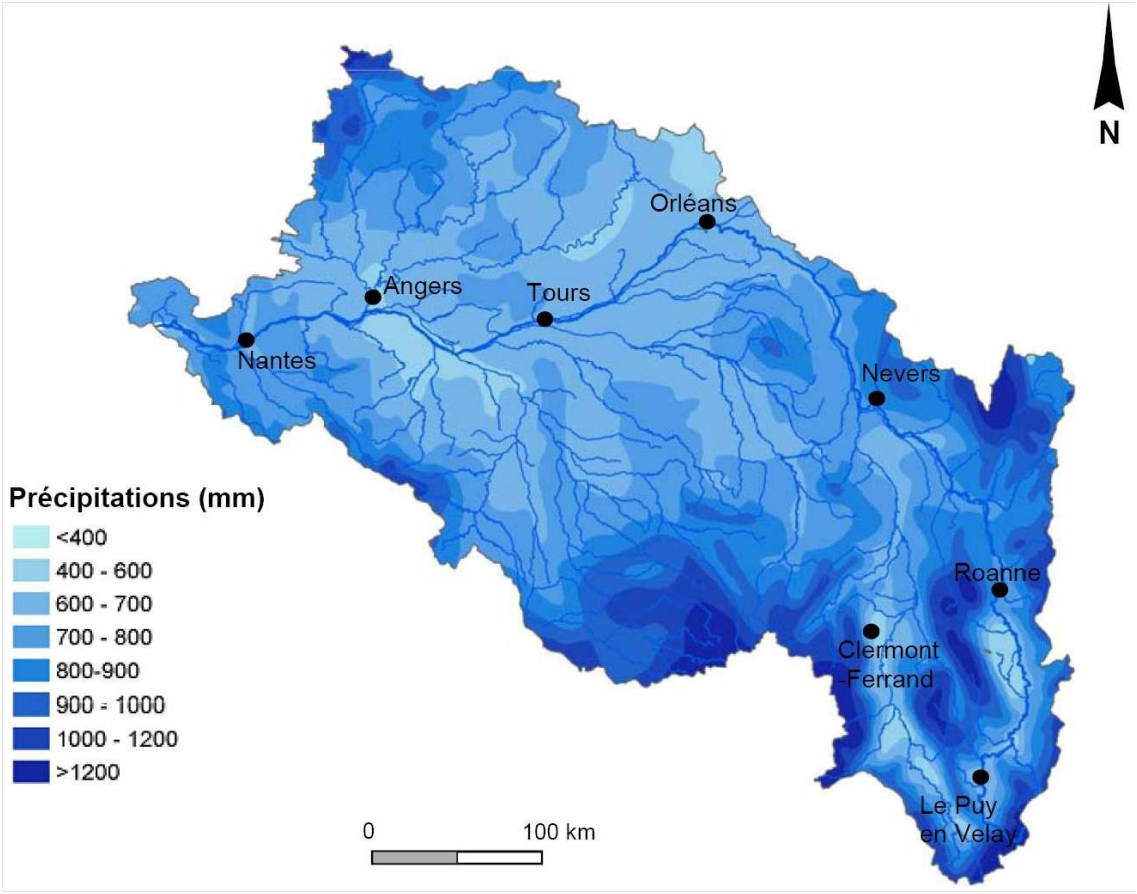


Fig. 14. *Carte des précipitations du bassin versant de la Loire. Source : Rodrigues, 2004.*

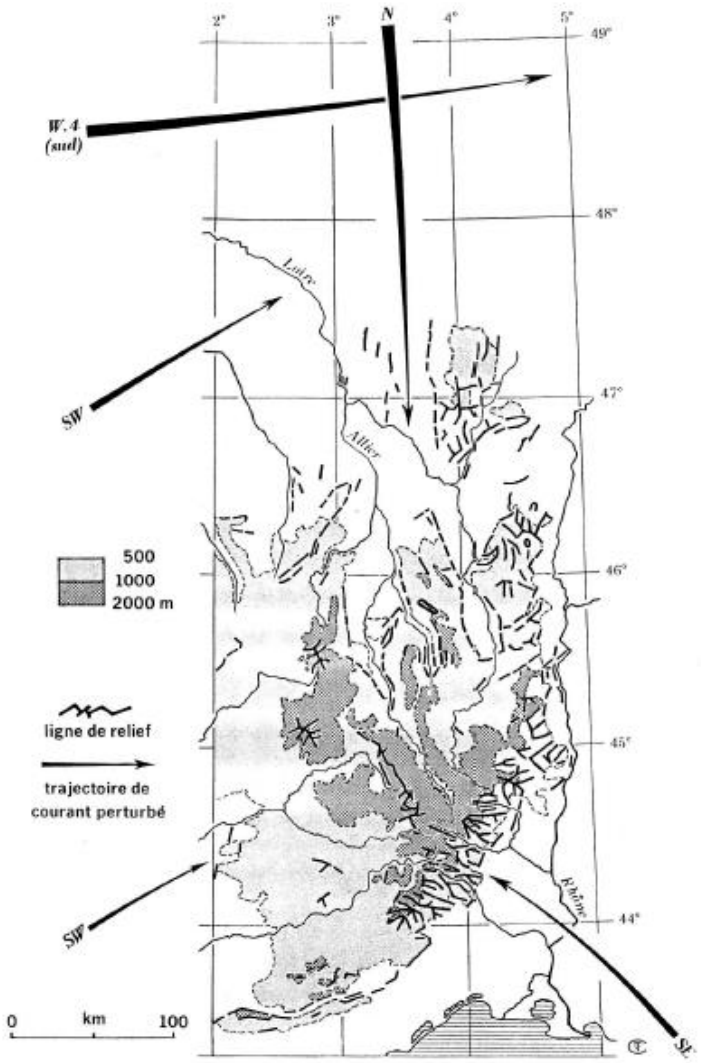


Fig. 15. *Principales lignes de relief et trajectoires les plus fréquentes des vents dans le bassin amont de la Loire. Source : Dacharry, 1974.*

Cette présentation du contexte physique, résumé par le tableau 1, a donc permis d'apporter les principaux éléments d'explication du régime hydrologique de la Loire moyenne et de ses extrêmes hydrologiques. Pour synthétiser l'ensemble de ces facteurs contrôlant l'hydrologie ligérienne, la représentation des relations précipitations / écoulements (fig. 16) permet d'illustrer l'hétérogénéité géographique des apports du bassin amont tout en soulignant la faiblesse des écoulements de surface au sein du Val d'Orléans.

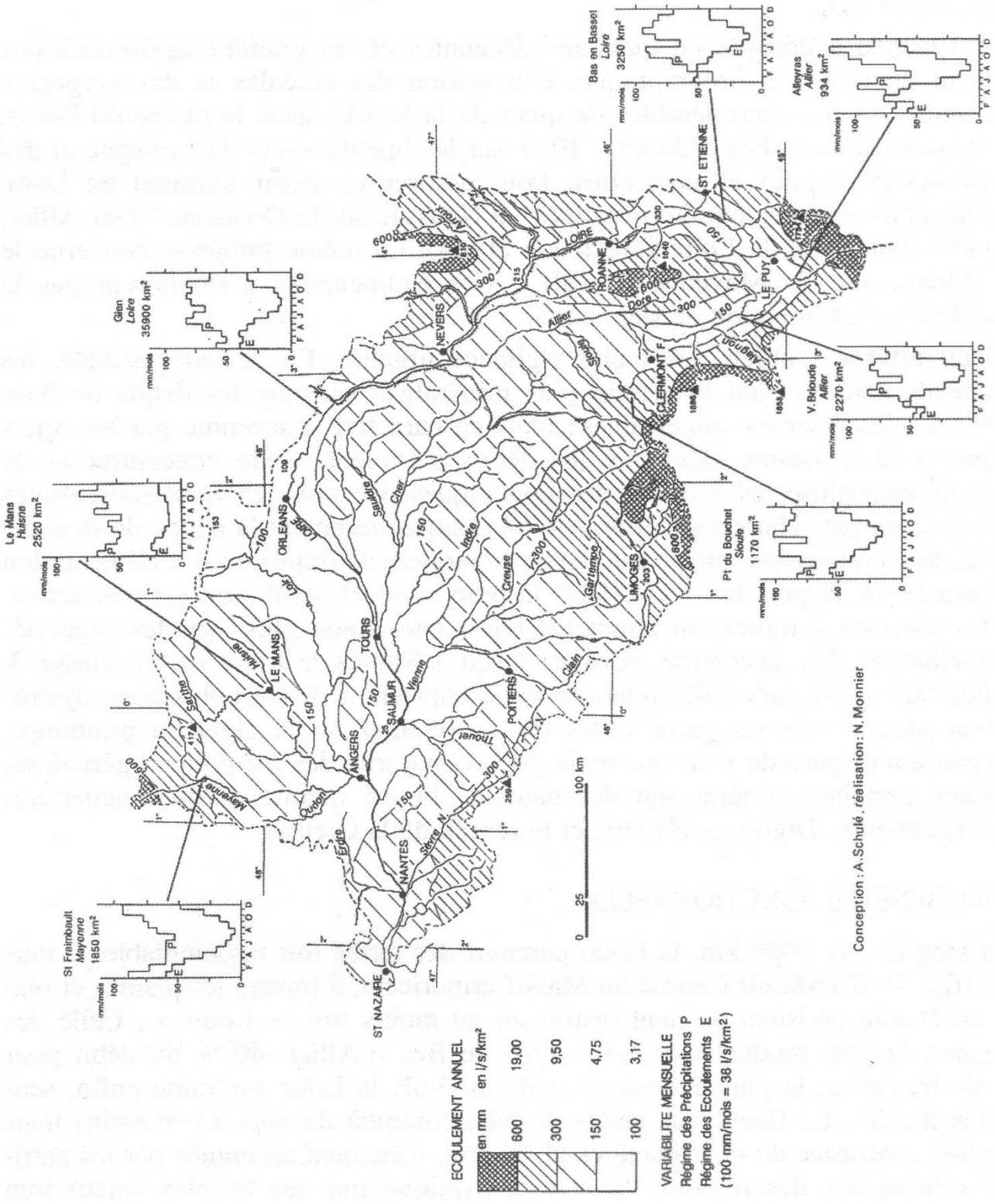


Fig.16. *Relations précipitations / écoulements au sein du bassin de la Loire. Source : Schullé, 2000.*

	Haute Loire et Haut Allier	Plaine du Forez (Loire) et Grande Limagne (Allier)	Loire bourbonnaise	Loire moyenne
Altitude (m NGF)	500 à 1900	200 à 500	200 à 900	30 à 350
Géomorphologie	Gorges et petits bassins tectoniques	Grands bassins tectoniques	Morvan et bassins sédimentaires	Bassin Parisien
Substrat	Complexes à dominante granitique ou basaltique	Bassins sédimentaires tertiaires	Dépôts tertiaires du Bourbonnais et complexes granitiques	Calcaire de Beauce
Climat	Montagnard à sub-montagnard avec influences cévenoles	Continental	Océanique de transition	Océanique de transition
Précipitations ($mm.an^{-1}$)	400 à plus de 2000	600 à 700	400 à plus de 1600	600 à 700

Tab. 1. *Synthèse des principales caractéristiques physiques du bassin amont et moyen de la Loire.*

1.1.2. Composantes principales du débit de la Loire moyenne

En Loire moyenne, il n'existe pas d'affluents significatifs. Il convient donc ici de présenter comment se forment à l'amont les débits qui vont alimenter la Loire moyenne. Au Bec d'Allier, le débit de la Loire est supérieur à celui de l'Allier. Mais, les débits de la Loire, en amont des apports du Morvan, et de l'Allier sont à peu près équivalents (fig. 17). Deux zones de confluences sont donc importantes et entraînent une augmentation significative du débit de la Loire en amont de la Loire moyenne : celles de la Loire amont avec les différents affluents qui drainent la Massif du Morvan, puis celle entre la Loire et l'Allier (tab. 2 et fig. 18 et 19). Ces apports des différents bassins amont seront l'objet du chapitre 4.

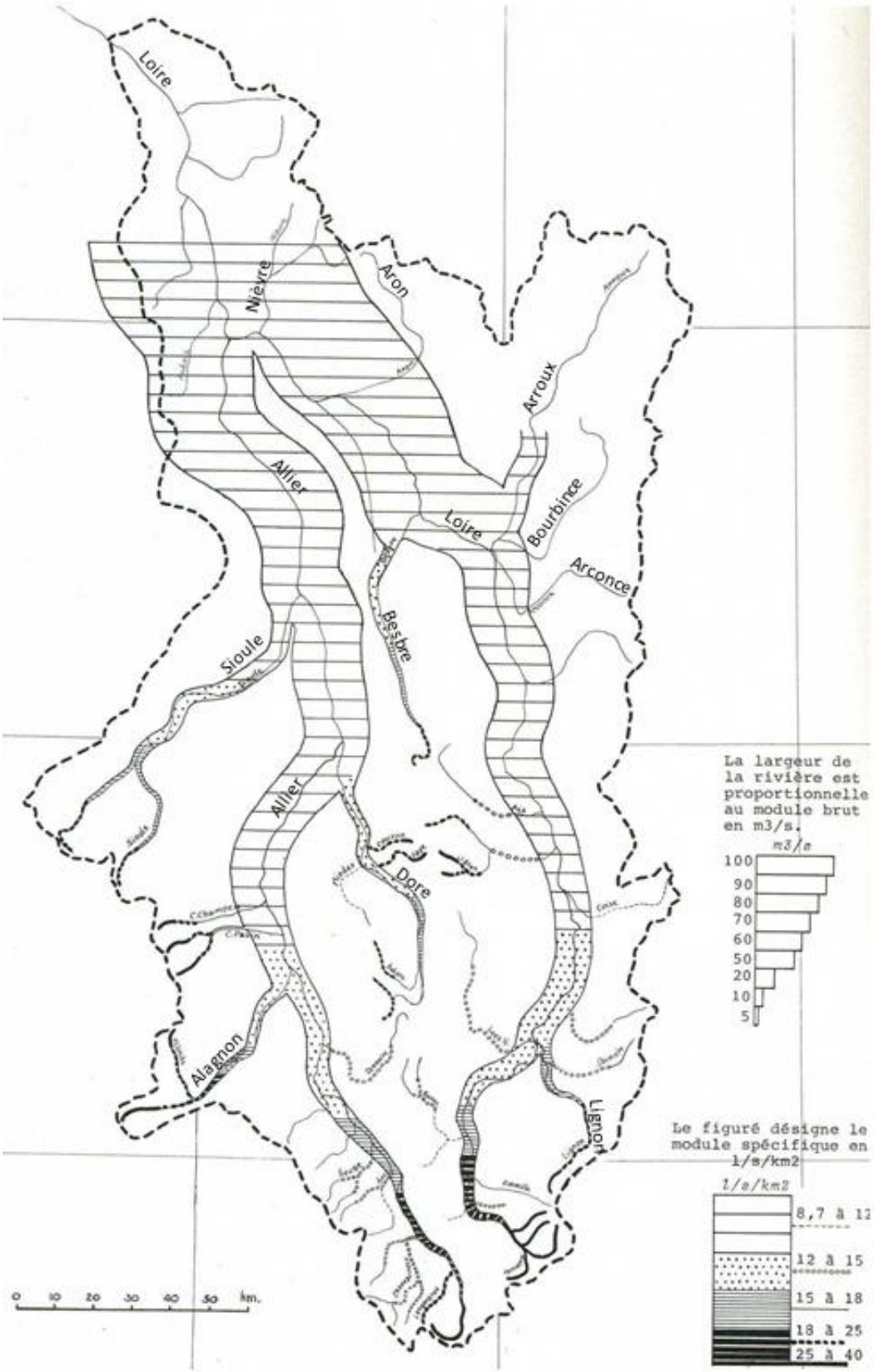


Fig. 17. *Carte des écoulements moyens annuels dans le bassin de la Loire amont. Source : Dacharry, 1974 (modifié).*

	Stations de jaugeage	Bassin versant (en km²)	(en $m^3.s^{-1}$)		
			Quinquennale sèche	Module	Quinquennale humide
1	Bas-en-Basset	3234	27	38	47
2	Villerest	6585	50	67	84
3	Digoin	9315	67	88	110
4	Gilly	13007	100	134	170
5	Nevers	17570	130	177	220
6	Givry	32610	240	315	380
7	Gien	35500	240	326	420
8	Orléans	36970	260	343	430
9	Blois	38320	270	359	450

Tab. 2. *Débit de référence des principales stations de jaugeage de la zone d'étude. Sources des données : Banque Hydro*



Fig. 18. *Situation des principales stations de jaugeage de la zone d'étude.*

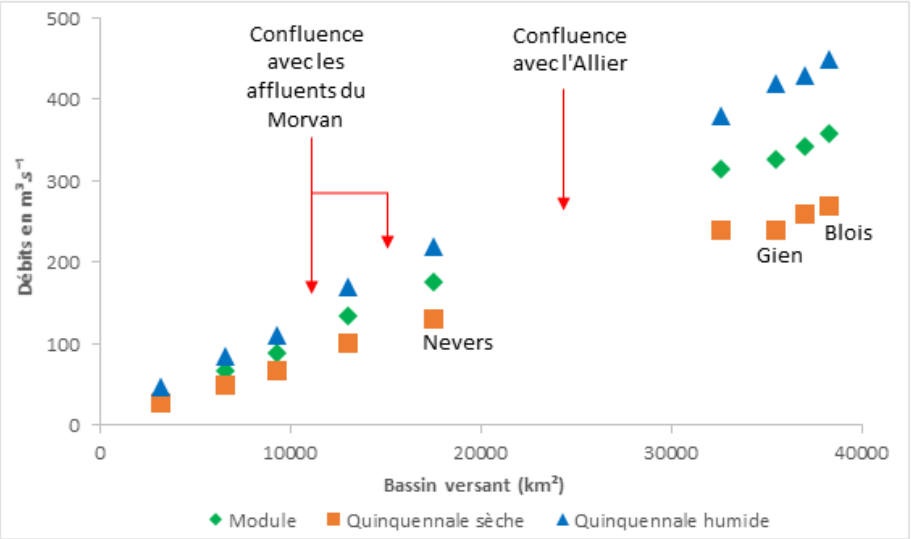


Fig. 19. *Répartition et importance relative des apports au fil de la Loire. Source des données : Banque Hydro*

On peut noter, sur la figure 19, qu'en Haute Loire, le débit de la Loire augmente régulièrement avec l'augmentation de son bassin versant. Puis deux sauts dans l'augmentation du débit de la Loire sont marqués au niveau des confluences, avec les affluents provenant du Morvan et avec l'Allier. Bien sûr, l'Allier représente des apports beaucoup plus importants que ceux des affluents du Morvan au regard du bassin versant qu'il draine. Néanmoins, les apports du Morvan ne sont pas négligeables. Ainsi, entre Digoin et Nevers, le débit de la Loire amont est, en moyenne, multiplié par deux. Entre Nevers et Givry (en amont et en aval de la confluence entre la Loire et l'Allier), l'augmentation du débit de la Loire se situe entre 73% pour la quinquennale humide et 85% pour la quinquennale sèche. Enfin, en Loire moyenne, les débits sont stables jusqu'à Gien puis augmentent faiblement jusqu'à Blois. Cette augmentation est d'ailleurs plus importante pour la quinquennale sèche (+12,5%) que pour la quinquennale humide (+7.1%).

1.1.3. Régime de la Loire moyenne

En amont de Gien, 50% de la superficie du bassin versant se situent au-dessus de 500 m d'altitude et 10% au-dessus de 1000 m. Cependant, à Gien, la Loire présente un régime simple,

de type pluvial, très légèrement influencé par la neige (fig. 20). L'alternance régulière des hautes eaux de saison froide et des basses eaux de saison chaude est en effet un trait dominant de la Loire à Gien.

Une diversité importante est observable dans le régime des apports (Haut-Allier, Haute-Loire, Morvan) que cumule la Loire au Bec d'Allier. Cependant, des caractères communs apparaissent tels que le contraste des saisons hydrologiques, à savoir l'existence de basses eaux au mois d'août (d'autant plus accentuées que la latitude est plus proche de la Méditerranée) et des plus hautes eaux au mois de février, sauf pour les deux stations situées le plus au Sud du bassin (Bas-en-Basset et Vieille-Brioude pour lesquelles les plus hautes eaux sont respectivement en mars et en avril).

Les stations les plus en amont du bassin (Villerest, Moulins et surtout Bas-en-Basset et Vieille-Brioude) présentent un régime complexe de type pluvio-nival méditerranéen. Il est influencé par un manteau nival intermittent, qui n'est pas suffisamment épais et persistant pour immobiliser des volumes importants créant un minimum hivernal. Cependant, les redoux qui entraînent la fonte progressive de la neige imbibent le sol, régularisent les émergences et nourrissent les débits printaniers. De plus, les influences méditerranéennes restent sensibles jusque dans des zones où la pluviométrie moyenne n'est plus du tout méditerranéenne. Ainsi, elles expliquent l'irrégularité et l'abondance des débits moyens mensuels d'automne. En été, l'influence méditerranéenne façonne également les débits qui semblent soumis aux conséquences de températures élevées plutôt qu'aux précipitations peu abondantes.

Cependant, ces particularités sont masquées à l'aval (stations de Gilly-sur-Loire et de Gien), notamment par les apports du Morvan (Etang-sur-Arroux). Le régime pluvial de Gien paraît donc, au premier abord, un régime simple pouvant résulter d'un climat tempéré océanique de transition. Mais, le débit de la Loire à Gien n'est en fait que la somme des apports des bassins amont aux régimes variés. Cette complexité est engendrée par les diversités successives des zones traversées et par l'alternance d'influences climatiques qui régissent tout à tour la plus grande partie du bassin. Ces alternances s'ajoutent d'ailleurs à l'irrégularité pluviale de la zone tempérée océanique pour renforcer l'extrême variabilité interannuelle des débits (Dacharry, 1974).

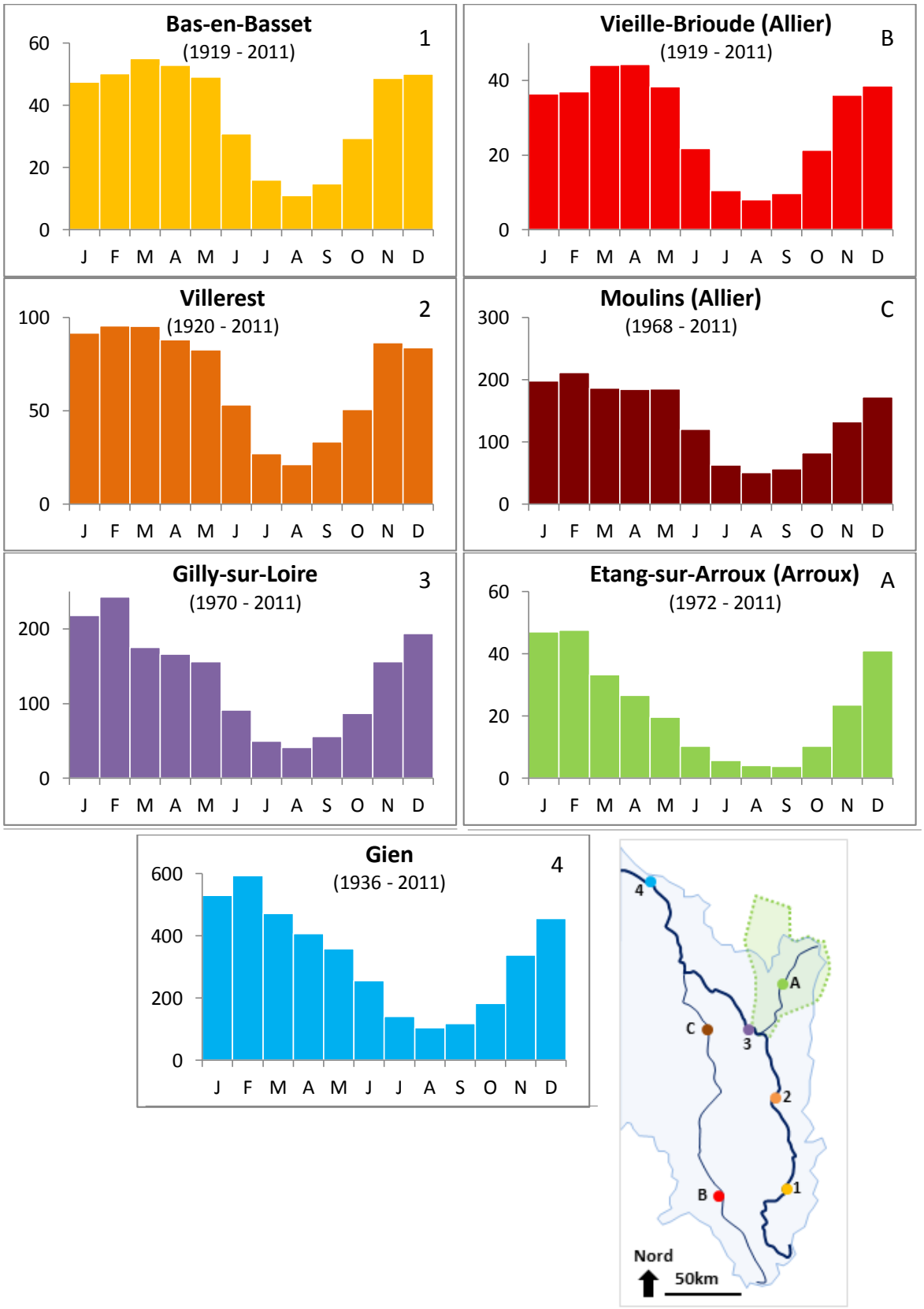


Fig. 20. *Débits moyens mensuels pour différentes stations de jaugeage en Loire amont et moyenne (toutes les données sont en $m^3.s^{-1}$). Sources des données : Banque Hydro.*

1.1.4. Une importante variabilité interannuelle

Il existe une importante variabilité interannuelle des débits de la Loire. Cette variabilité s'observe tant à l'échelle des débits moyens annuels (fig. 21) que des débits moyens mensuels. Cette irrégularité est également présente tout au long de la Loire.

La variabilité des débits moyens mensuels se manifeste de deux manières. D'une part, les débits moyens d'un même mois accusent des irrégularités très sensibles. D'autre part, les dates d'occurrence des maxima et des minima annuels varient d'une année à l'autre. Les débits des basses eaux sont plus réguliers que ceux des hautes eaux et leur durée dans l'année est plus courte. En effet, les maxima se répartissent sur environ neuf mois alors que les minima ne surviennent qu'entre juin et octobre. Ainsi, les mois des maxima d'hiver sont très variables, d'autant plus que le mois de plus fort débit moyen ne correspond pas toujours au mois où les hautes eaux se manifestent avec le plus de régularité (Dacharry, 1974).

La cause principale de cette variabilité interannuelle semble être « la possibilité de situations météorologiques très différentes durant les mois de mai, juin, septembre, octobre et novembre, tantôt secs et stables, tantôt violemment et copieusement arrosés » (Dacharry, 1974, I, p. 103). Ainsi, il existe une grande variabilité pluviométrique interannuelle, ce qui induit l'irrégularité des débits.

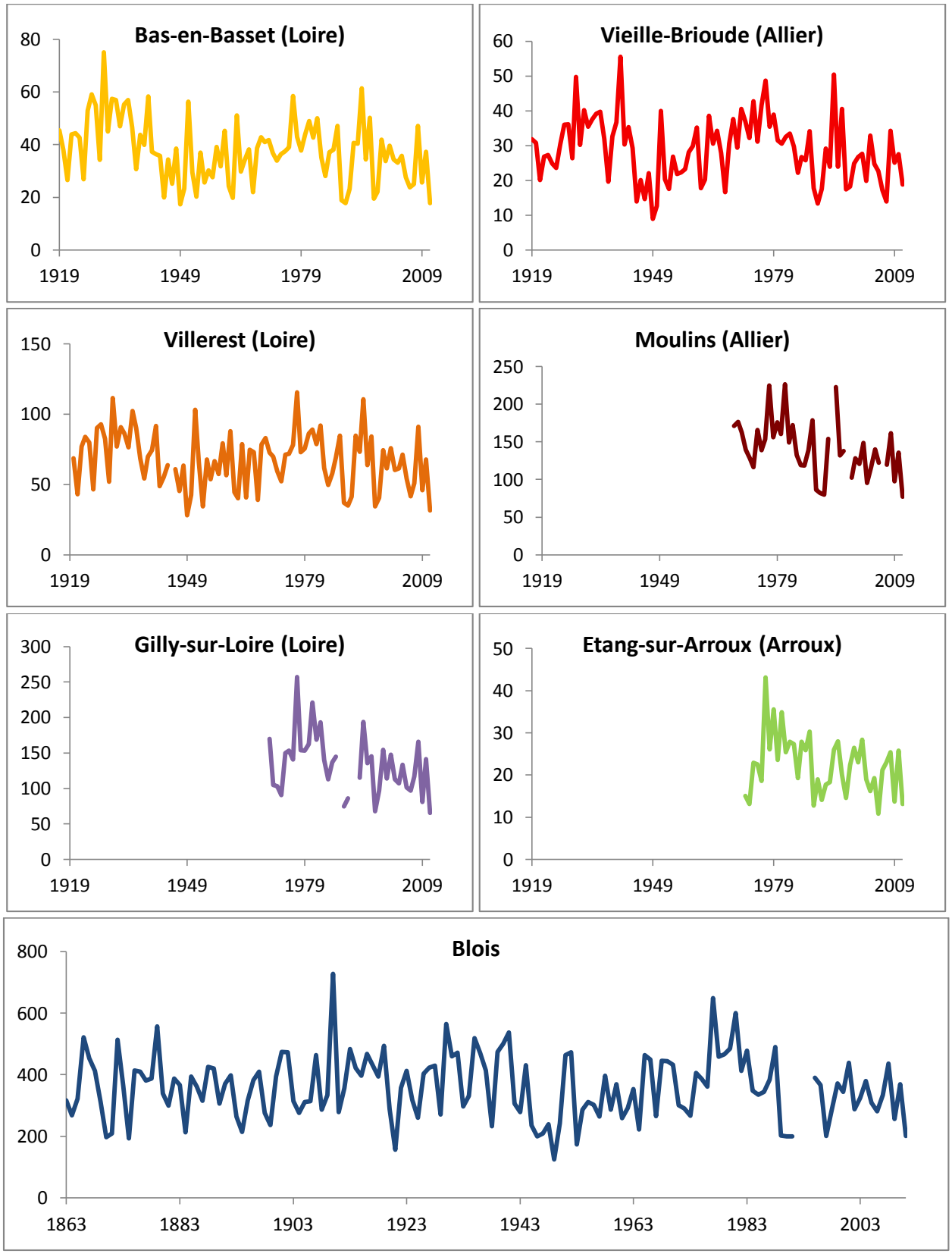


Fig. 21. *Débits moyens annuels de la Loire et de ses principaux affluents (toutes les données sont en $m^3.s^{-1}$). Source des données : Banque Hydro.*

1.2. Les extrêmes en Loire moyenne

1.2.1. Des étiages médiocres

Les basses eaux estivales de la Loire sont d'une médiocrité générale, comparées à celles d'autres cours d'eau français (tab. 3). En effet, le débit le plus faible enregistré à Gien date d'août 1949 et atteignait 11m³.s⁻¹, soit 0,31 l.s⁻¹.km⁻². En 1974, M. Dacharry les considéraient comme nuisibles à une bonne utilisation du fleuve, ce qui a été modéré par la politique de soutien d'étiage menée sur le bassin de la Loire et la mise en service de deux grands barrages au milieu des années 1980 (Naussac et Villerest).

Bassin	Période d'observation	Bassin versant (en km²)	Débit spécifique (en l. s⁻¹. km⁻²)
Loire à Gien	1861 – 1970	35 890	0,31
Loire à Villerest	1919 – 1970	6 520	0,20
Loire à Bas-en-Basset	1919 – 1970	3 300	0,36
Seine à Paris	1927 – 1970	44 300	0,40
Garonne au Mas d'Agenais	1914 – 1970	52 000	0,73
Saône à Lyon	1877 – 1936	29 908	0,84
Ardèche à Saint-Martin	1851 - 1900	2 150	0,70

Tab. 3. *Débits spécifiques pour les débits minima connus sur la Loire et quelques autres cours d'eau français*. *Source : M. Dacharry, 1974.*

Les débits minimums annuels révèlent à nouveau une forte variabilité interannuelle (fig. 22). L'écart-type des VCN3 à Gien entre 1936 et 1975 (avant l'influence des grands barrages) est de 23 m³.s⁻¹. Cependant, malgré l'irrégularité de leur abondance, le retour annuel des étiages au rythme des saisons thermiques est observable à l'échelle du bassin. De plus, cette faiblesse des débits d'étiage, malgré le caractère montagneux du bassin versant, est étroitement liée aux caractéristiques physiques du bassin versant, que ce soit en termes de nature des sols et du sous-sol, d'abondance pluviale et nivale, et donc de richesse des réserves souterraines.

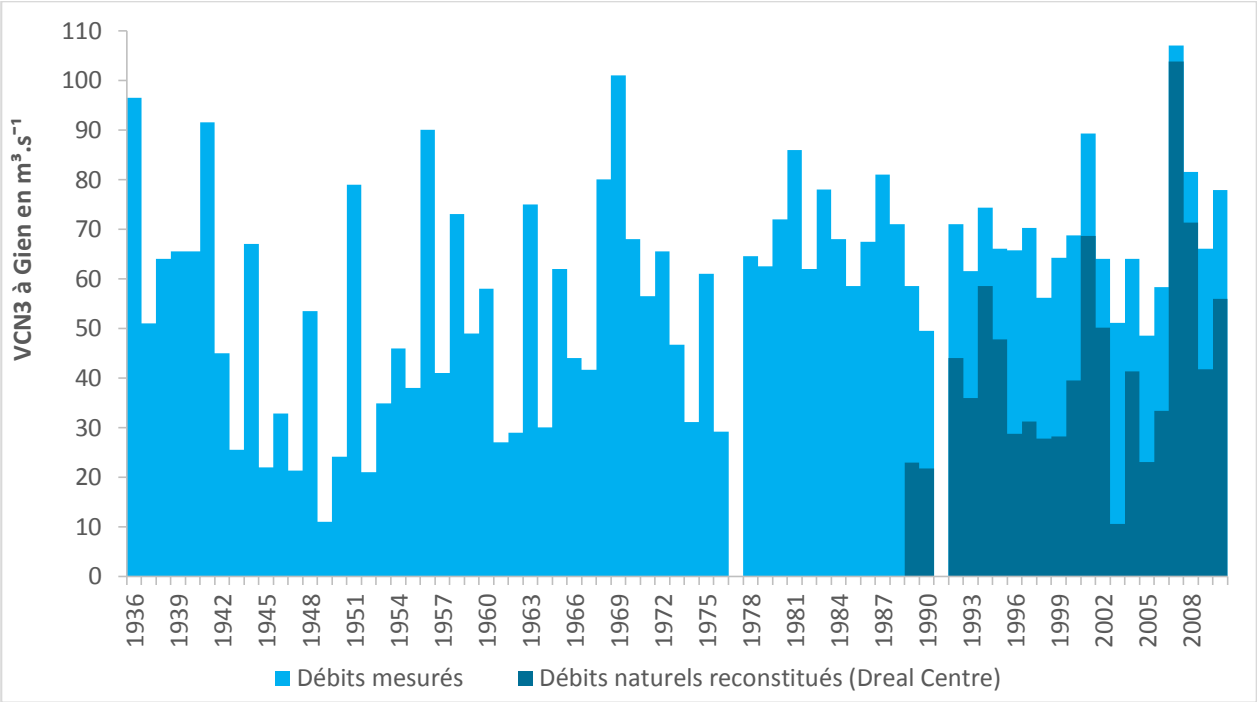


Fig. 22. *Débit moyen minimal annuel calculé sur 3 jours consécutifs (VCN3) de la Loire à Gien. Source des données : Banque Hydro.*

Pour les étiages les plus sévères en Loire moyenne et amont, les débits présentent une grande diversité régionale d'un cas à l'autre pour aboutir néanmoins à des débits du même ordre de grandeur à Gien. Les causes de ces étiages sont donc à chercher dans les influences climatiques générales plutôt que dans les conditions géographiques locales. Ces étiages prononcés sont donc liés à divers phénomènes tels que la raréfaction des pluies (insuffisance en quantité ou en durée), une durée exceptionnelle d'insolation, de grandes chaleurs dont l'origine est toujours l'établissement durable de régimes anticycloniques sur l'ensemble de la France.

Est ainsi réaffirmé l'importance du climat, et son corollaire, la pauvreté des réserves, parmi les causes des étiages. En effet, le bassin versant ne peut avoir un rôle de régulateur si et seulement si les précipitations ont tout d'abord reconstitué les faibles réserves, ce qui implique que les causes de ces étiages sont à rechercher au moins à l'échelle de l'année hydrologique.

1.2.2. Crues : immodération et variabilité

Les grandes crues de la Loire doivent leur notoriété à leurs effets catastrophiques, leur fréquence, mais également à leur puissance intrinsèque. Grâce au coefficient A = Q / √S (où Q = débit maximum et S = surface réceptrice) de M. Pardé (1964), il est possible de comparer les plus grandes crues observées. Ce coefficient A pour les maxima connus au Bec d'Allier vaudrait plus que pour la majorité des cours d'eau français et européens à leur paroxysme. En effet, A = 41 pour les crues de la Loire de mai-juin 1856 et septembre 1866, avec un débit estimé à 7 600 $m^3.s^{-1}$ (SOGREAH, 1988), soit plus de trois fois le débit maximal de la Seine à Paris lors de la crue de janvier 1910 (A=11,4). En Europe, les valeurs du coefficient A de deux grandes crues seulement dépassent les crues centennales de la Loire du 19ème siècle : la crue du Pô à Piacenza de novembre 1951 et la crue de la Durance à Mirabeau en octobre 1882.

Cependant, depuis trois grandes crues survenues sur une période de 20 ans (1846, 1856 et 1966), seules deux crues ont dépassé les 4 000 $m^3.s^{-1}$ (fig. 23), seuil non dépassé depuis 1907. Bien sûr, ces crues gigantesques n'ont pas « disparu ». En synthétisant les mécanismes de formation de ces crues, on verra que leurs causes pourraient se reproduire, comme l'illustre le calcul des périodes de retour du tableau 4.

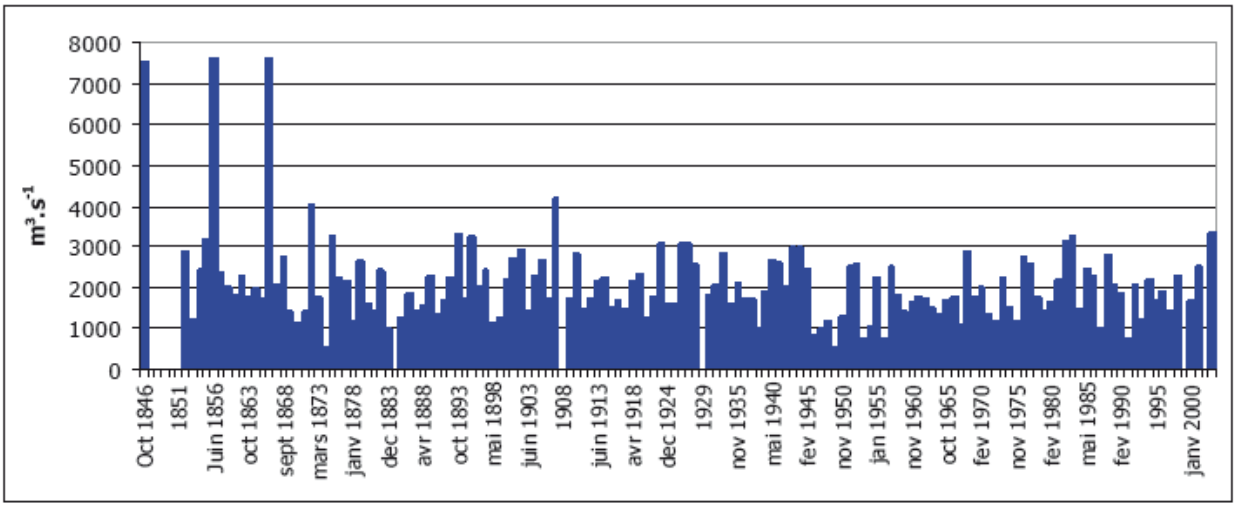


Fig. 23. *Chronologie des crues en Loire moyenne depuis 1846. Source : Gautier, 2006.*

Périodes de retour (en années)	2	5	10	30	50	100	1000
Débits des crues (en $m^3.s^{-1}$)	1820	2470	2910	3540	3910	7000	Entre 7 500 et 11 000

Tab. 4. *Périodes de retour des crues de la Loire au Bec d'Allier. Source des données : DDE, 1975 et SOGREAH, 1988.*

La répartition des crues supérieures à 3 000 $m^3.s^{-1}$ à Gien est quelque peu insolite (fig. 24). En effet, leur mois d'occurrence est décalé par rapport au régime de la Loire ainsi que par rapport à l'occurrence des crues moyennes. Cependant, en Loire aval, l'occurrence de ces plus grandes crues évolue parallèlement au régime moyen de la Loire. Ces crues de printemps et d'automne à Gien permettent donc de souligner à nouveau l'importance des apports des bassins amont. La singularité saisonnière des crues de la Loire semble liée au maximum de fréquence, au printemps et à l'automne, des circulations méridiennes, susceptibles de produire des abats diluviens sur le bassin de la Loire supérieure et moyenne. Ainsi, la Loire moyenne hérite de leurs excès au début et à la fin de la saison chaude.

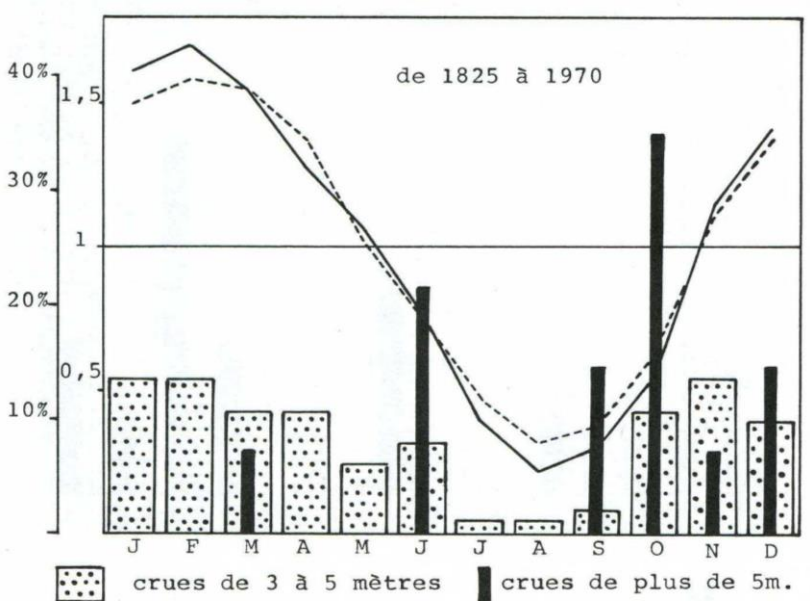


Fig. 24. Histogramme de fréquence des plus grandes crues de la Loire comparé au régime moyen global à Gien entre 1825 à 1970. Source : M. Dacharry, 1974.

Le rôle du bassin, en Loire amont, dans l'atténuation des crues est hétérogène en fonction de la saturation des sols avant les précipitations à l'origine d'une crue, et la saison (rôle de l'évaporation en saison chaude) (Dacharry, 1974). En effet, le bassin versant n'y amortit que faiblement les sursauts des débits de la Haute Loire et de l'Allier. Cependant, le rôle du bassin

versant n'est pas nul. En effet, il influence, par sa morphologie, la vitesse de translation des crues grâce à des caractéristiques telles que la pente du talweg, la forme du lit ou encore la largeur de la vallée.

Cependant, ce sont les conditions météorologiques qui jouent un rôle majeur dans la genèse des crues de la Loire avec l'abondance de pluies généralisées qui est toujours à l'origine des fortes crues. En effet, la fréquence et l'intensité des précipitations sont « dangereuses » si l'intervalle de temps qui les sépare n'excède pas huit jours (Dacharry, 1974). Toutefois, l'évaporation peut réduire, en été, l'effet de pluies qui pourraient, en hiver, générer des crues importantes. Ainsi, la forte variété des crues s'explique par la prédominance des conditions météorologiques dans la genèse des crues, étant donné que les influences climatiques décisives portent sur un bassin versant étendu et morphologiquement contrasté.

Il est donc logique que la typologie explicative des crues de la Loire moyenne (Dacharry, 1974, d'après Pardé, 1964) révèle l'importance des mécanismes météorologiques dans la genèse des crues :

- Les crues méditerranéennes sont liées à des précipitations massives, soudaines et souvent répétées sur la Loire et l'Allier supérieur. Ces précipitations atteignent un maximum de fréquence et de violence en automne, bien qu'elles puissent se produire tout au long de l'année. Ces crues méditerranéennes sont également caractérisées par des courbes de crue et de décrue aussi rapides les unes que les autres.
- Les crues océaniques se produisent principalement sur les affluents qui se jettent dans la Loire entre Digoin et Nevers (Morvan). Elles surviennent en saison froide.
- Les crues mixtes sont les plus fréquentes et les plus graves. Elles sont constituées de la combinaison des deux types de crues précédentes, suivant toutes les proportions possibles. Elles peuvent donc être déclenchées par des pluies variées, simultanées dans diverses parties du bassin versant, ou très rapprochées dans le temps.

Cependant, il est impossible de définir une correspondance exacte entre chaque type de crue et des situations météorologiques données. En effet, étant données les possibilités multiples de combinaisons des flots élémentaires, une même situation météorologique peut donner des

résultats très inégaux. De même, des évolutions hydrométriquement comparables peuvent être dues à des causes pluviales très diverses (Dacharry, 1974).

Le Loire est donc, selon E. de Martonne (1942), « toujours prompt à réagir aux caprices du climat et prêt à écouler au plus vite les eaux tombées sur son bassin ». En effet, ni à l'amont, ni dans les plaines alluviales, ne se trouvent les éléments pondérateurs que pourraient constituer, en raison de la taille et de l'altitude du bassin, les réserves lithologiques ou neigeuses.

L'hydrologie de la Loire moyenne est donc caractérisée par son immodération chronique. Cependant, il est important de noter ici le caractère exogène de ces excès, de leur variabilité, mais aussi de l'ensemble des débits qui vont se propager ensuite en Loire moyenne. En effet, on a vu comment l'influence des bassins de la Loire supérieure, de l'Allier et du Morvan est à l'origine et explique les débits entrant en Loire moyenne. Alors, il s'agit maintenant de présenter les facteurs qui affectent ces débits en Loire moyenne, elle-même.

1.3. Echanges nappes-rivière et pertes karstiques en Loire moyenne

1.3.1. Diffusion des débits en Loire moyenne

La plaine alluviale en Loire moyenne s'étend en moyenne sur une largeur de 3,4 km, mais elle présente une variabilité importante. En effet, la médiane de la largeur des vals en Loire moyenne est de 2,7 km. Sa valeur minimum est de 0,93 km et son maximum de 8,3 km en Loire orléanaise où la plaine d'inondation est en moyenne 3 à 4 fois plus large que dans le reste de la Loire moyenne (Castanet, 2008). Cette géométrie pourrait permettre un étalement des eaux de crues, mais il est très limité étant donné l'important endiguement des vals.

Entre le Bec d'Allier et Briare, la Loire est formée de chenaux multiples encadrant de grands bancs sableux et caillouteux, permis par des levées discontinues et éloignées du chenal. Dans cette portion de la Loire moyenne, les zones humides sont composées de bras morts, de vastes îles boisées et des francs-bords parcourus par de longs chenaux anastomosés (Gautier et

al., 2001). A partir de Briare, les levées encadrent plus étroitement le fleuve. La Loire se compose alors d'un chenal principal, accompagné localement d'un chenal secondaire encadrant des îles. Ce cours rectiligne est perturbé par des méandres, présents seulement dans le secteur entre Sully-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire, sans compter le méandre de Bou entre Saint-Denis-de-l'Hôtel et Orléans.

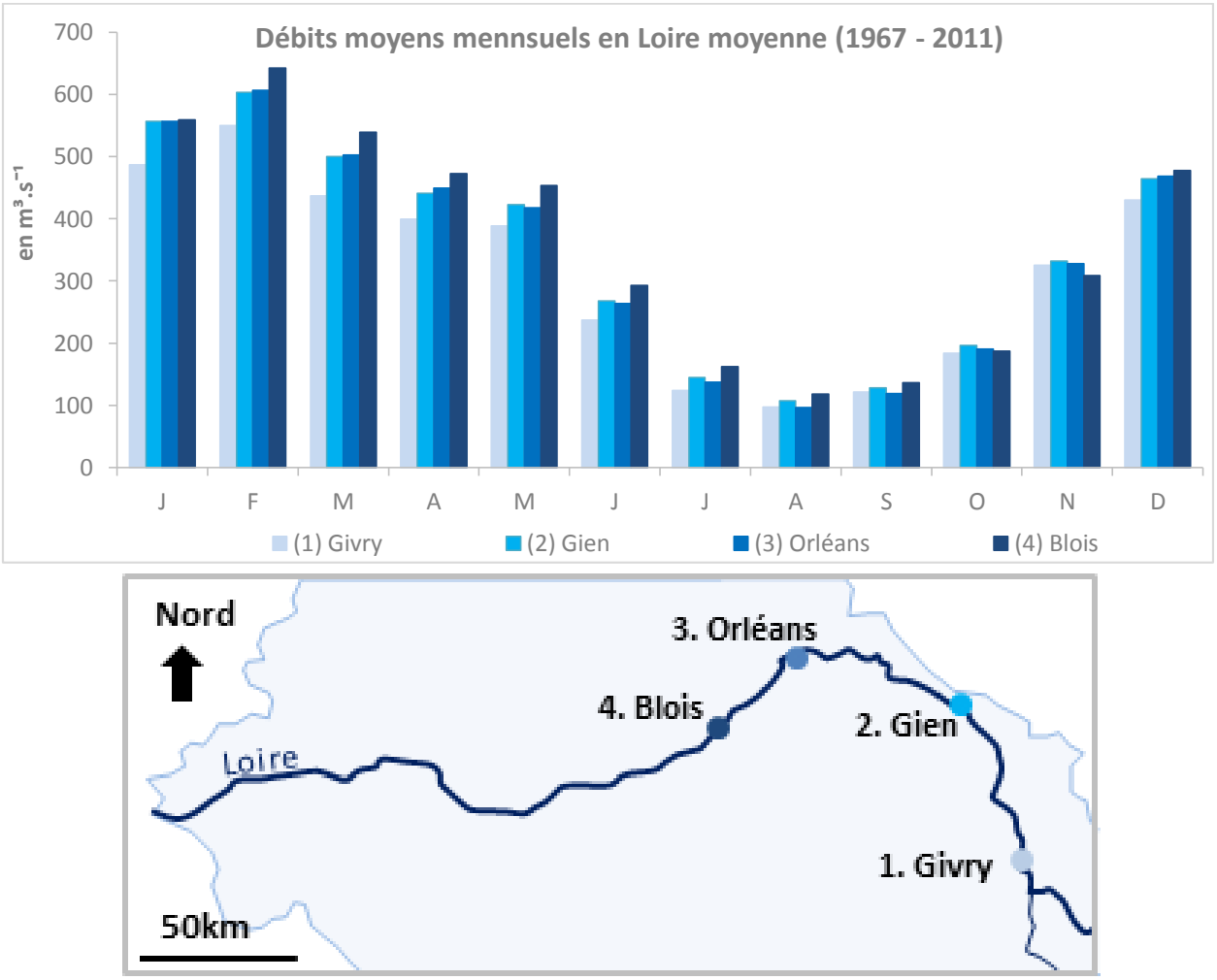


Fig. 25. *Débits moyens mensuels en Loire moyenne en quatre stations hydrométriques (Givry, Gien, Orléans et Blois). Source des données : Banque Hydro*

En ce qui concerne les débits mesurés en quatre stations hydrométriques différentes en Loire moyenne (Givry, Gien, Orléans et Blois), leur interprétation est complexe (fig. 25). En effet, au regard des débits moyens mensuels, l'hétérogénéité des comportements hydrologiques est évidente. Il convient de se méfier des données disponibles à cause de la faible fiabilité des

mesures en elles-mêmes (notamment pour la station de Givry). Cependant, il est certain qu'il ne s'agit pas d'un scénario où les débits augmentent d'amont en aval de façon linéaire.

Il semble que le débit de la Loire subisse des pertes, notamment en période d'étiage, essentiellement entre Gien et Orléans, des pertes qui auraient pu être expliquées par l'évapotranspiration. Cependant, en période de hautes eaux, ces pertes pourraient être masquées par d'autres phénomènes, sans compter que la Loire pourrait bénéficier d'un soutien de ces débits d'étiage par les nappes alors qu'elle participerait à leur recharge en période de hautes eaux.

En effet, ces phénomènes de diminution des débits ont été observés depuis longtemps. Entre 1859 et 1865, des jaugeages réalisés à l'étiage par Sainjon (1888), démontrent une telle baisse entre Bouteille et Orléans. Plus tard, Zunino (1979) et Chéry (1983) ont défini une relation linéaire entre les débits de la Loire et ses pertes. Les estimations de ces pertes par Chéry (1983) montrent que les débits de pertes, en étiage moyen, ne doivent pas être inférieurs à 5 $m^3.s^{-1}$, et atteindraient 200 à 300 $m^3.s^{-1}$ pour les forts débits de Loire. F. Lelong (2008) a effectué une synthèse des estimations réalisées des volumes annuels des pertes de la Loire dans le Val d'Orléans (entre Sully-sur-Loire et la confluence entre la Loire et le Loiret) à partir de bilans hydrologiques à l'échelle de ce secteur. Pour les années de pluviosité moyenne, ces pertes représenteraient entre 4,5 et 5 % du module de la Loire à Gien (d'après les volumes annuels des pertes de la Loire estimés par : Gonzalès, 1991 ; Géohyd, 2004 ; Lepiller, 2006 ; Lelong et *al*., 2008). F. Lelong (2008) insiste sur le fait que ces valeurs sont estimées « à la louche ».

1.3.2. Contexte hydrogéologique de la Loire moyenne

Les pertes de la Loire sont causées par la présence d'un réseau karstique développé dans les calcaires du substratum. Elles alimentent donc des écoulements souterrains « rapides » (jusqu'à environ 150 $m.h^{-1}$) jusqu'à plusieurs résurgences, notamment celles du Loiret. Ces pertes massives sont concentrées entre Châteauneuf-sur-Loire et Chécy, soit sur une vingtaine de kilomètres (Lelong et *al*., 2008).

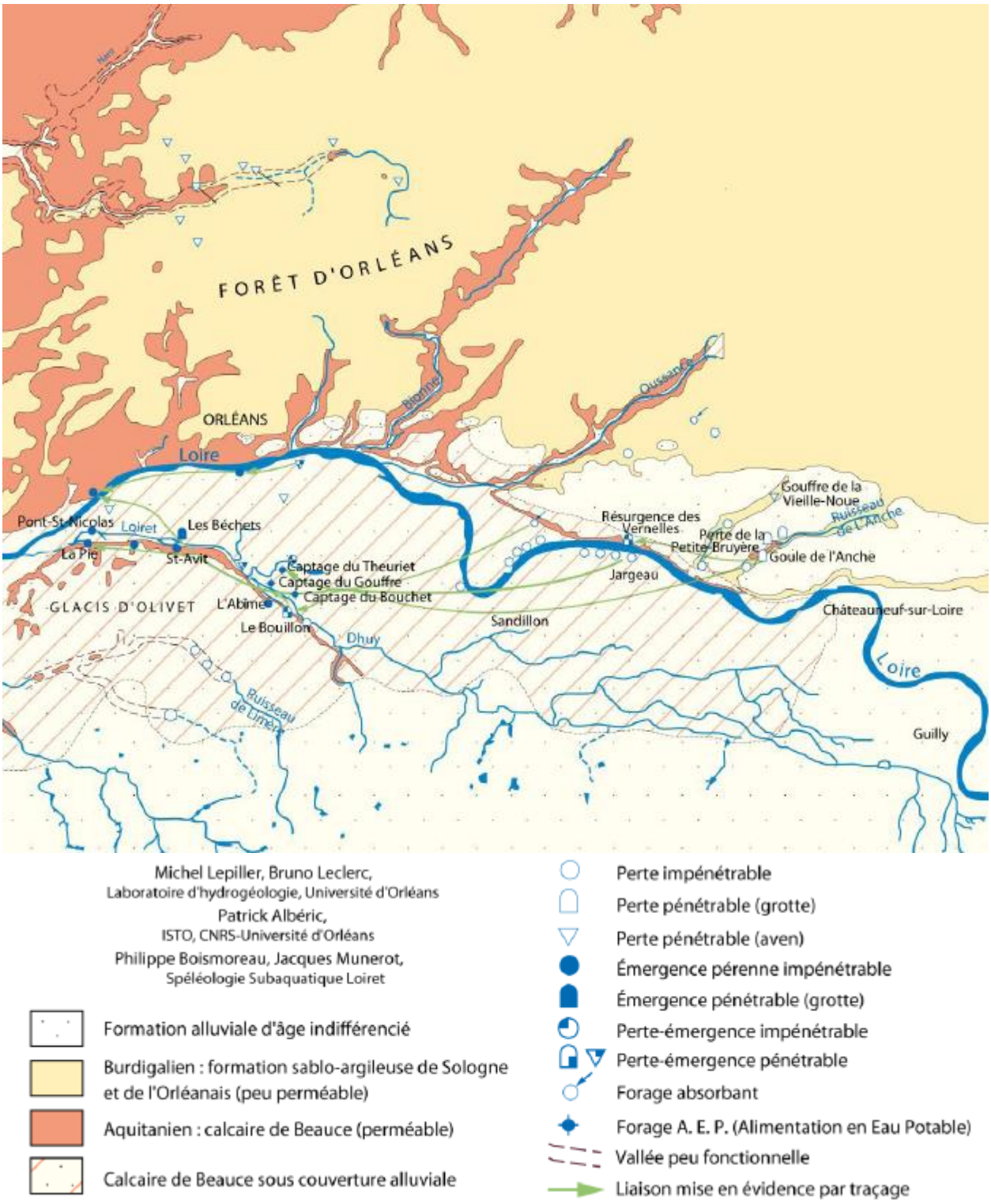


Fig. 26. *Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans. Source : Lepiller et al., 2000.*

Il s'agit de pertes diffuses dans le lit de la Loire à travers les alluvions récentes, ou bien de pertes localisées à travers de nombreux gouffres creusés dans le substrat calcaire (fig. 26 et 27). A ces pertes correspondent des résurgences, diffuses ou ponctuelles, tout au long du Loiret, mais aussi en Loire, à l'aval d'Orléans. Un certain nombre de ces gouffres a été exploré et ces expéditions ont révélé l'extension profonde des conduits karstiques et le gigantisme de certaines cavités. D'autres phénomènes karstiques sont d'ailleurs observables en surface (fig. 28). Ainsi, les débits perdus dans la zone amont du val d'Orléans sont en majorité restitués à l'aval. Cependant, ces pertes ne peuvent être chiffrées avec exactitude à cause de l'évolution de l'emplacement des pertes d'un jour à l'autre, de leur ouverture ou comblement en fonction du débit de la Loire, du comportement des alluvions et de la dissolution plus ou moins rapide des calcaires sous-jacents (Joigneaux, 2011).



Fig. 27. *Perte en bordure de Loire à Jargeau. Source : Joigneaux, 2011.*



Fig. 28. *Fontis (ou avens) à Jargeau. Source : Géosciences, BRGM.*

Cependant, cette influence d'un système karstique n'opère pas dans l'ensemble de la Loire moyenne. Et même, il est l'exception. En effet, dans la partie Ouest du Val d'Orléans, il n'existe qu'un seul aquifère mêlé au sein des formations alluviale et calcaire. Ainsi, au sein de cette zone, les eaux de la Loire qui s'infiltrent à travers les berges, au niveau de Jargeau ou de Saint-Denis-de-l'Hôtel, atteignent directement le karst.

Au contraire, à l'amont de Châteauneuf-sur-Loire, il existe deux aquifères distincts, séparés par la formation imperméable de Sologne (fig. 29). Ainsi, l'aquifère supérieur est la nappe alluviale, dont l'épaisseur varie entre 5 et 10 m. Le deuxième aquifère, plus profond, correspond au calcaire de Beauce.

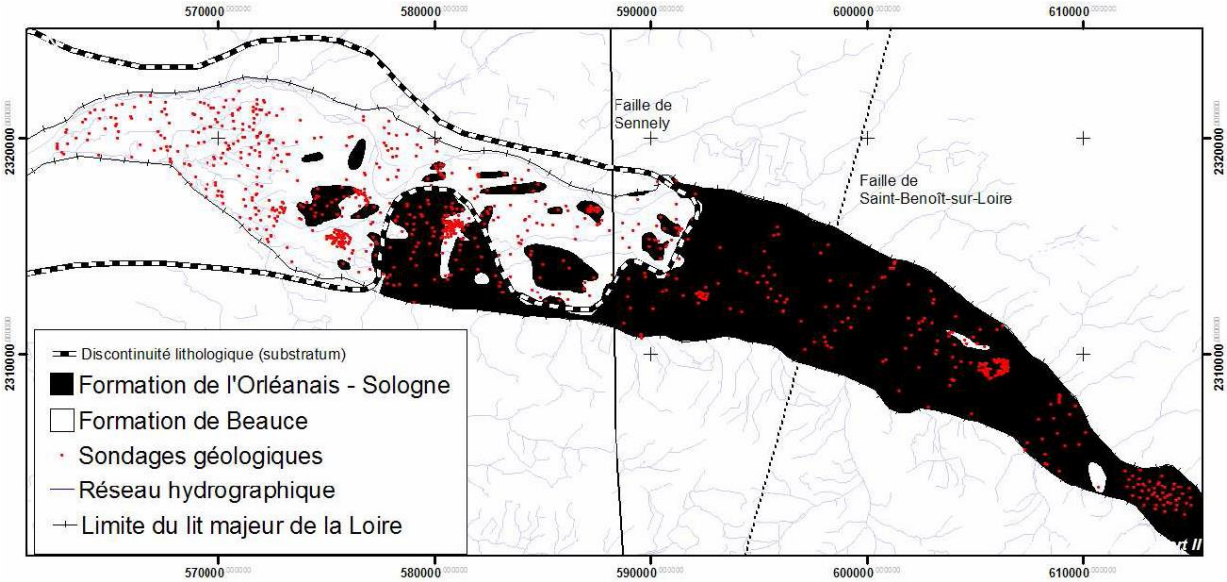


Fig. 29. *Lithologie du substratum de la plaine alluviale orléanaise. Source : Castanet, 2008*

Enfin, il est à noter qu'à travers plusieurs études géochimiques portant sur la Loire en différents secteurs de la Loire moyenne, à l'aval de Tours avec le site de Bréhémont (Grosbois, 1998), à Orléans (Grosbois, 1998 et Gazowski, 1999), au Bec d'Allier (Gautier et *al*., 2001), le soutien des débits d'étiage de la Loire par la nappe alluviale (bien qu'il s'agisse de situations variées telles que la présence sur le site du Bec d'Allier de deux nappes alluviales superposées) a été démontré notamment grâce à l'identification de différents pôles de mélanges dans les eaux de la Loire et à la variation saisonnière des proportions de ce mélange. Néanmoins, les échanges entre les nappes alluviales et la Loire n'ont fait l'objet d'aucune étude malgré leur importance dans le fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne.

Pour synthétiser, la Loire moyenne est constituée de quatre secteurs aux fonctionnements hydrogéologiques différents : (i) du Bec d'Allier à Châteauneuf-sur-Loire, la nappe alluviale est séparée de l'aquifère régional par une couche imperméable, il n'y existerait pas de perte d'eau de la Loire dans le substratum rocheux (Thuillier, 1969 ; Dacharry, 1974 ; Lalot, 2015) ; (ii) de Châteauneuf-sur-Loire à Chécy, pertes massives à travers un système karstique où il existe un aquifère unique au sein des formations alluvionnaires et calcaires (Lelong, 2008 ; Lalot, 2015) ; (iii) de Chécy à Chaingy, apports de la nappe de Beauce à travers des résurgences ponctuelles ou diffuses, aquifère unique (Lelong, 2008 ; Lalot, 2015) ; (iv) de Chaingy à Blois, diminution des apports de la nappe de Beauce à la Loire (Lalot, 2015).

1.3.3. Présentation du site-atelier : le méandre de Guilly

Le site du méandre de Guilly a été choisi pour une étude, à grande échelle, des échanges entre la Loire et la nappe alluviale, ainsi que du rôle des zones humides dans ce système d'échanges. En effet, à partir du suivi piézométrique de la nappe alluviale combiné aux lignes d'eau de la Loire, l'objectif est de démontrer la variabilité saisonnière et spatiale de ces échanges. Ainsi, le fonctionnement hydrologique de la nappe alluviale, intimement lié aux débits de la Loire, pourra être décrit en détail. Le suivi géochimique des eaux de la Loire et de la nappe alluviale permettra de confirmer ces résultats.

Le méandre de Guilly se situe dans le secteur médian des vals de la Loire orléanaise (fig. 30), dont la pente longitudinale de la vallée présente une anomalie positive comparativement à l'ensemble du Val d'Orléans. En effet, la pente moyenne est de 0,5‰ alors qu'au sein de ce tronçon, elle varie entre 0,6 et 0,8‰ (fig. 31).

Le site est confiné par l'endiguement de la Loire alors que le lit mineur s'inscrit dans une plaine alluviale particulièrement large. Le val atteint effectivement 7 km de large. Le lit majeur est limité, de part et d'autre, par des terrasses alluviales dont l'altitude varie entre 5 et 15 m, vestiges d'un plancher alluvial ancien, incisé actuellement par la Loire. Ces terrasses sont elles-mêmes dominées par le plateau de la Beauce au Nord, et par celui de la Sologne au Sud (fig. 32 et 33).

Les alluvions (Fy, Fz) sont les formations principales qui constituent le premier aquifère au niveau de la zone d'étude (fig.33). Comme décrit précédemment, la nappe alluviale est bien individualisée car séparée de l'aquifère sous-jacent par des argiles vertes compactes imperméables du Burdigalien. La coupe hydrogéologique (fig. 32), entre Châteauneuf-sur-Loire et Tigy, montre que l'aquifère alluvial est essentiellement constitué par des sables grossiers, des sables fins et des galets. Le substratum est identifié comme étant des argiles compactes composant la formation de l'Orléanais et de la Sologne (Miocène Inférieur, Burdigalien). Ces argiles imperméables mettent en charge la nappe du calcaire de Beauce d'âge Aquitanien et constituent la séparation entre les deux aquifères.

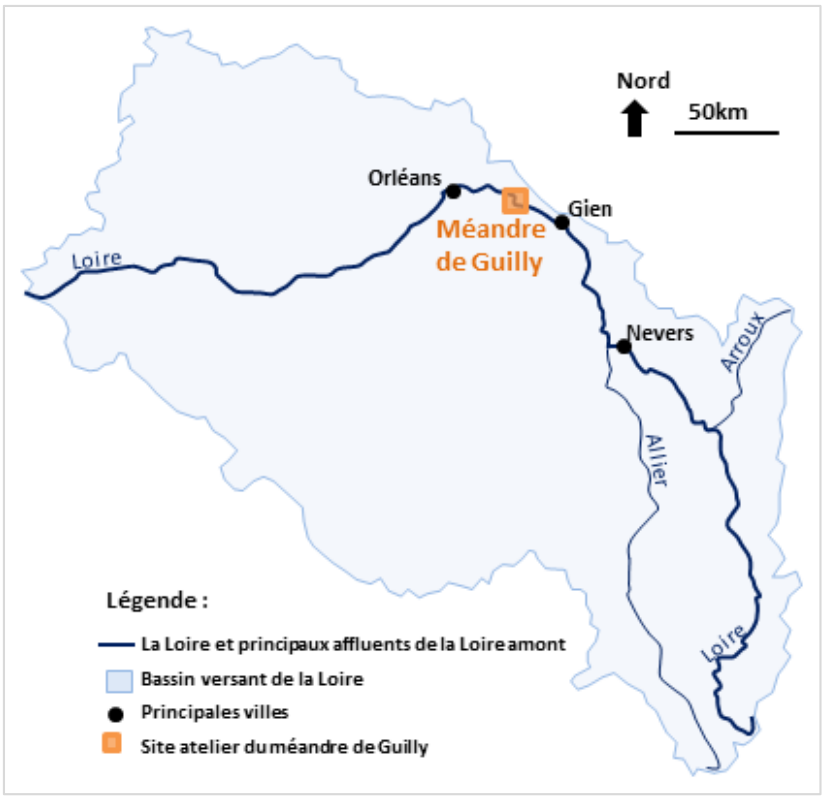


Fig. 30. *Localisation du site du méandre de Guilly (Loiret).*

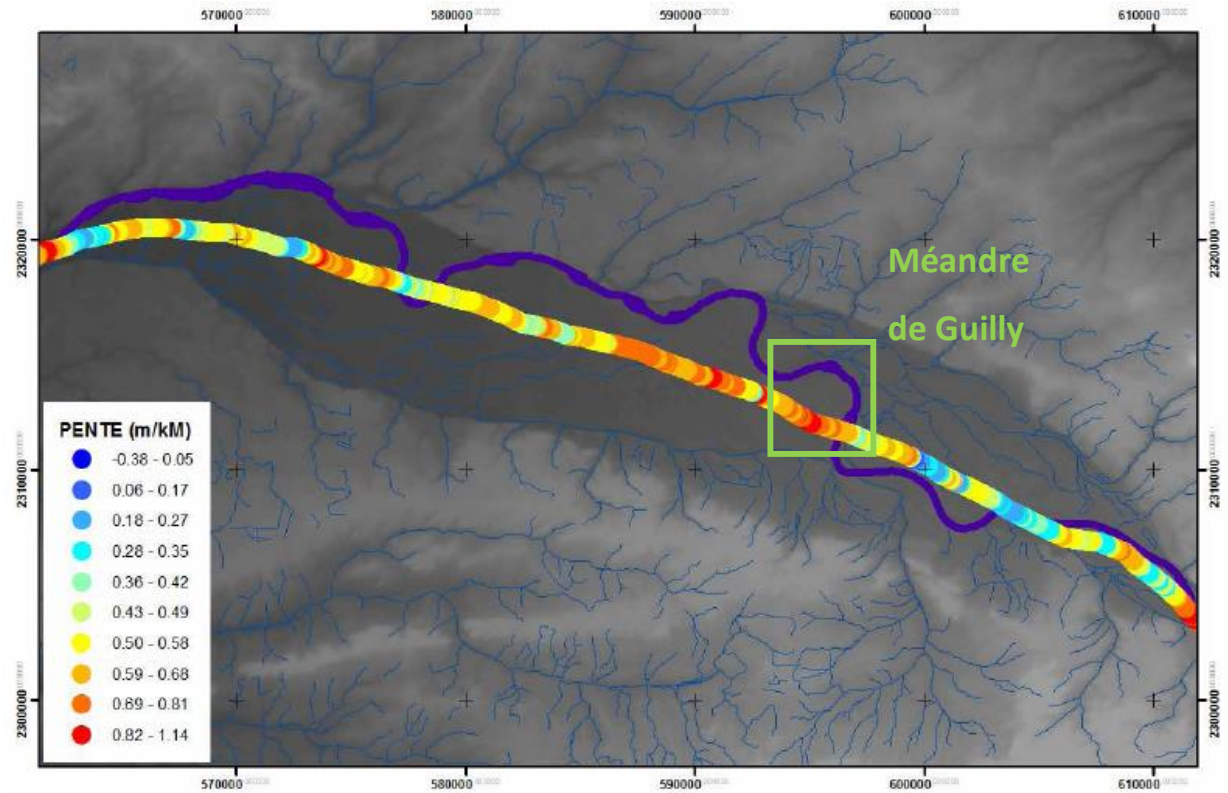
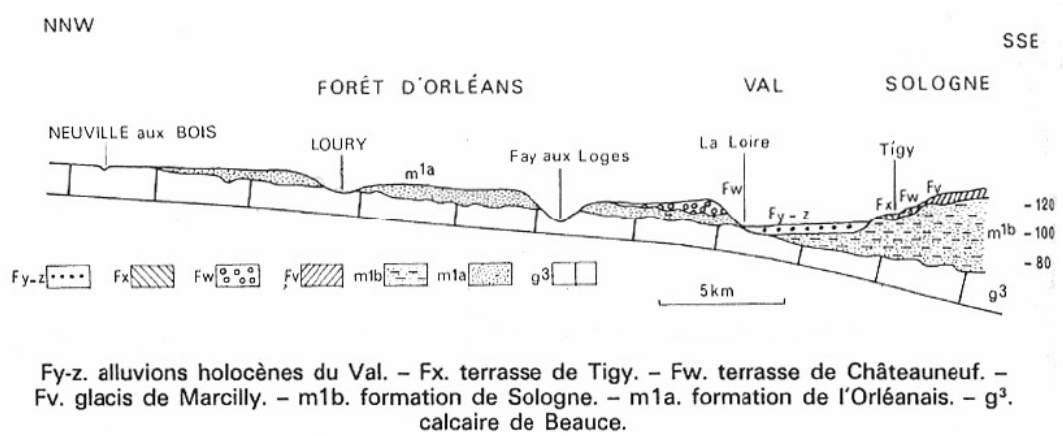


Fig. 31. *Pente de la plaine alluviale de la Loire au sein des vals de Loire orléanais. Source : Castanet, 2008 (modifié).*



Fy-z. alluvions holocènes du Val. – Fx. terrasse de Tigy. – Fw. terrasse de Châteauneuf. – Fv. glacis de Marcilly. – m1b. formation de Sologne. – m1a. formation de l'Orléanais. – g³. calcaire de Beauce.

Fig.32. *Coupe schématique du Val de Loire aux environs d'Orléans. Source : Alcaydé et al., 1990*

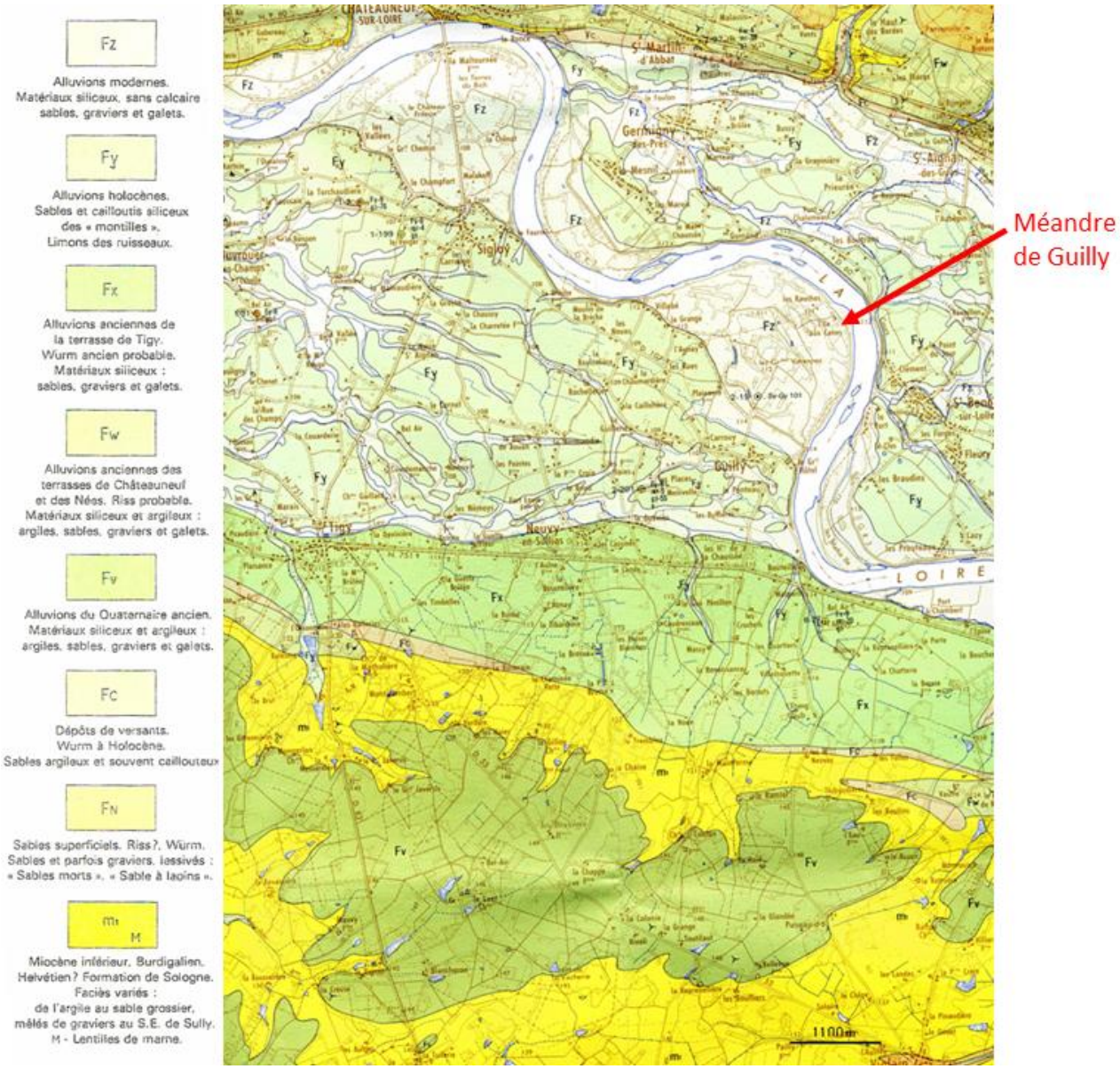


Fig. 33. *Extrait de la carte géologique au 1/50000 de Châteauneuf-sur-Loire. Source : BRGM (modifié).*

Les formes fluviales sont dominées par des méandres. Cependant, les études précédentes ont montré que ces méandres sont fixes depuis longtemps (Guérin, 1996 ; Castanet, 2008), sans doute du fait de la présence des levées construites ici à la fin du Moyen Âge. I. Larousse (1998) et E. Gautier et *al*. (2001) ont montré le côté artificiel du lobe de convexité en rive gauche. En effet, il était composé de chenaux multiples encadrant de grandes îles au début du 19ème siècle, puis, le comblement artificiel de ces bras a donné naissance à un vaste lobe au milieu du 19ème siècle. Là aussi, le lit actif s'est fortement réduit au cours du 20ème siècle : la Loire a délaissé les marges de son lit et les îles se sont boisées (Guérin, 1996 ; Gautier et *al*., 2001 ; Depret, 2006 ; Grivel, 2008 ; Nabet, 2013).

Au cours du 20ème siècle, la déprise agricole aidant, la partie proximale de la plaine (secteur de l'Ile aux Canes, fig. 34) ne fait plus l'objet d'aucune culture, alors que la partie distale montre toujours un peu d'activités agricoles (céréales, maraîchage,…) (Cossalter, 2009). Cependant, les milieux ouverts se sont progressivement fermés. C'est pourquoi le site des méandres de Guilly est actuellement géré en rive gauche (Îles aux Canes et en rive droite île des Mahis, fig. 34) par le Conservatoire des Espaces Naturels de la Région Centre : l'objectif est de conserver des milieux écologiquement riches et protégés à l'échelle européenne (pelouses sur sable sec, saulaie blanche en particulier).

Actuellement, le méandre de Guilly représente donc un fragment de la plaine alluviale de la Loire. Il s'agit de l'un des rares espaces dans le Val d'Orléans encore connectés au fleuve (fig.34), à l'exemple de la rive droite où la levée longe pratiquement le lit mineur de la Loire. Le lit majeur, délimités par les levées, est donc, très réduit comparée à la plaine d'inondation historique de la Loire.

Cependant, au sein du méandre, les deux anciens bras de la Loire, le Petit et le Grand Riot (fig. 34) conserve un certain dynamisme hydrologique grâce aux crues de la Loire qui les remettent en eau. De plus, dans leurs anciennes mouilles, des zones humides demeurent en eau une grande partie de l'année, comme le Trou Robert (fig. 34), au sein du Grand Riot. Ces connectivités seront développées au chapitre 5 (5.1).

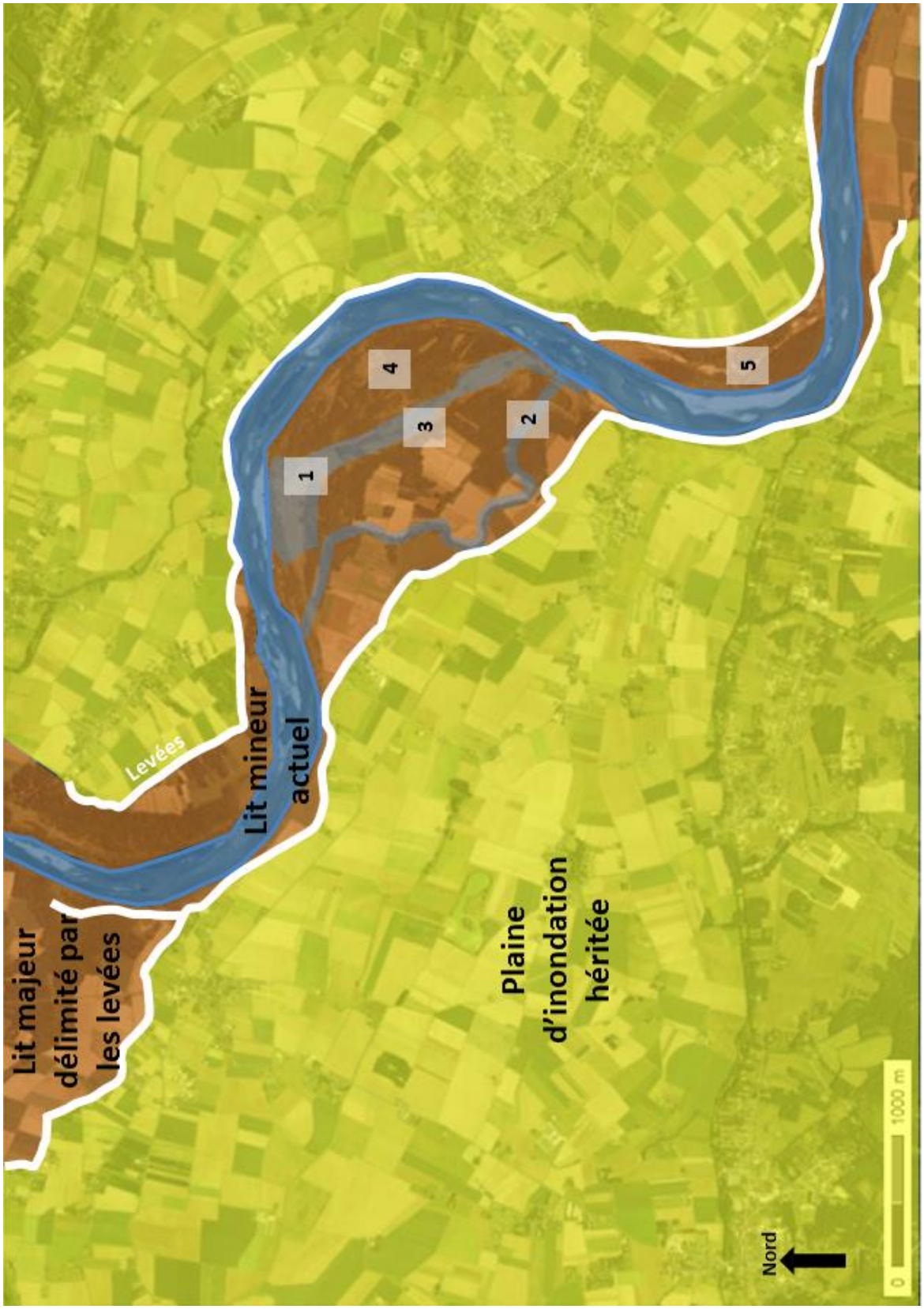


Fig.34. *Connectivités actuelles de la Loire avec sa plaine alluviale dans le secteur du méandre de Guilly. 1 : Grand Riot ; 2 : Petit Riot ; 3 : Trou Robert ; 4 : Ile aux Canes ; 5 : Ile des Mahis.*

Le méandre de Guilly offre donc un cadre permettant l'étude des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale ainsi que du rôle hydrologique des zones humides. De plus, en comparant les fonctionnements hydrologiques entre les rives droite et gauche, l'impact des levées sur ces échanges pourra être décrit.

La Loire moyenne est donc caractérisée par ses excès, tant dans l'abondance que dans le déficit. Ses débits sont d'une irrégularité intrinsèque. Cependant, la variété des bassins affluents dans leurs caractéristiques physiques impliquent la complexité importante des études portant sur son hydrologie. Toute généralisation nécessite une rigueur importante et des précautions.

De plus, la Loire moyenne représente un espace de transition hydrologique. Les eaux de la Loire y sont essentiellement composées d'apports exogènes, mais elles interagissent avec les plaines alluviales qu'elles traversent, que ce soit en termes de pertes karstiques ou d'échanges avec les nappes alluviales.

Ainsi, à la lumière des recherches actuelles menées sur les hydrosystèmes anthropisés, les progrès des méthodes offrent et ouvrent de nouvelles perspectives à la compréhension de ce système imposant.

Chapitre 2 : Le cadre scientifique : état de l'art ligérien à la lumière des recherches et méthodes de l'hydrologie actuelle

Le dynamisme de la recherche en géomorphologie fluviale a apporté, et apporte encore, de nombreuses réponses aux conséquences des changements environnementaux et des aménagements sur l'évolution de la géométrie et de la diversité des formes du lit de la Loire moyenne, sur l'évolution du lit mineur, des zones humides, des flux sédimentaires, des processus d'érosion et de sédimentation au sein du bassin de la Loire. Pour citer quelques études importantes, on retiendra : Babonaux, 1970 ; Wasson et *al*., 1993 ; Gazowski, 1994 ; Bazin et *al*., 1996 ; Malavoi et *al*., 1999 ; Gautier et *al*., 2000 ; Gautier et *al*., 2001 ; Gautier, 2006 ; Rodrigues, 2004 ; Rodrigues et *al*., 2005 ; Grivel, 2008 ; Claude, 2012 ; Nabet, 2013. De nombreuses recherches ont également été menées sur la flore ligérienne et ses particularités (notamment Braque et *al*., 1980 ; Corillion, 1982 ; Loiseau et *al*., 1995 ; Schnitzler, 1995 ; Chambaud et *al*., 1996 ; Cornier, 2002).

L'ensemble de ces recherches ont par la suite mené à des études interdisciplinaires notamment sur les conséquences des évolutions géomorphologiques sur la faune et la flore du bassin ligérien qui ont permis une meilleure compréhension de la répartition et des besoins des espèces (Gautier et *al*., 2001), conduisant ainsi à la mise en place de politiques de protection des milieux ligériens originaux et riches. Ceci ne fait que démontrer une nouvelle fois, la nécessité d'études de fond permettant la compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème ligérien dans toutes ses dimensions afin de permettre par la suite le brassage de ces connaissances qui aboutissent à l'identification des différents paramètres qui interagissent au sein du système et permettent une gestion plus adaptée de ces espaces ligériens.

Au contraire, l'hydrologie de la Loire moyenne a fait l'objet de peu d'études globales. La dernière en date est la thèse de Monique Dacharry en 1974. En se plaçant à l'échelle de l'hydrosytème, elle a pu décrire et analyser les éléments majeurs du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne, grâce aux méthodes « classiques » de la recherche en hydrologie. Ainsi, la variabilité interannuelle des débits en Loire moyenne a été étudiée de façon

approfondie et mise en relation avec l'étendue des bassins amonts, avec les diverses influences climatiques qu'ils subissent, avec l'importance limitée de la neige au sein du bassin ligérien. De plus, les particularités des extrêmes hydrologiques, tant les crues que les étiages en Loire moyenne, ont été décrits tout en recherchant dans les spécificités du bassin versant leurs explications (Dacharry, 1996). Ces conclusions sont toujours incontournables pour toute étude de l'hydrologie ligérienne.

Face aux enjeux de gestion au sein du bassin ligérien, les gestionnaires du bassin, et notamment le service hydrologique de la Dreal et la DDE, anciennement DDT (en particulier l'ancien Service Hydrologique Centralisateur), ont mené et financé de nombreuses études concernant les crues centennales datant du 19ème siècle, des crues plus récentes mais importantes localement, ainsi que sur la gestion des étiages. Les débits des grandes crues du 19ème siècle ont été reconstituées (DDE, SHC, 1975). Cependant, face aux enjeux actuels et aux capacités de compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes envisageables aujourd'hui, il est nécessaire que chacun dans sa spécialité, apporte les connaissances permettant une meilleure compréhension du fonctionnement global de l'hydrosystème ligérien.

2.1. Développement des travaux de recherche sur les grands hydrosystèmes français en lien avec les problématiques de gestion

L'émergence des recherches sur les relations sociétés-milieux depuis la fin de années 1960 a amené les hydrogéographes à travailler, notamment, sur les problématiques de la gestion de la ressource en eau et des risques (Laganier et *al*., 2011). Et plus récemment, l'évolution des politiques de gestion des hydrosystèmes a renforcé les liens entre gestionnaires et chercheurs. Ainsi, les problèmes rencontrés par les gestionnaires, plus réceptifs, par exemple, à l'impact des aménagements sur le fonctionnement écologique des hydrosystèmes, ont influencé les recherches menées sur les fleuves français. Cette tendance est également visible dans l'ensemble de la recherche internationale sur les hydrosystèmes continentaux. Les problèmes de la

connaissance puis de la gestion des risques, ainsi que des diverses pollutions reviennent très souvent dans les revues internationales.

Les recherches menées sur les hydrosystèmes anthropisés portent d'autant plus vers les problématiques de gestion que par définition, ces cours d'eau sont au cœur de la société, au moins géographiquement. Leur aménagement varié a modifié la géométrie de leur lit, a en partie artificialisé les écoulements et ainsi modifié leur fonctionnement hydrologique. Les évolutions des pratiques agricoles, l'extension des grandes agglomérations ont modifié les prélèvements qui ne cessent d'augmenter et les rejets croissants ont détérioré la qualité des eaux. L'ensemble de ces impacts nécessite donc des approches pluridisciplinaires pour renforcer, dans un premier temps les connaissances du fonctionnement de l'hydrosystème puis, dans un deuxième temps, pour comprendre les processus modifiés par les changements environnementaux, qu'ils soient d'origine anthropique ou pas (Laganier et *al*., 2011 ; Meybeck et *al*., 1998).

Au début des années 1980, la création par le CNRS du Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement (Piren) a fait faire un bond aux connaissances du fonctionnement des grands fleuves français, notamment, le Rhône, le Rhin, la Garonne et la Durance. La Seine a intégré ce programme par la suite, mais pas la Loire. Pour le bassin de la Seine, ce programme a été déterminant (Meybeck et *al*., 1998) grâce à des objectifs et un déroulement du programme concertés, multidisciplinaires, et planifiés avec une approche systémique, dans l'objectif d'obtenir une connaissance globale du fonctionnement de l'hydrosystème. En effet, une première phase a permis aux chercheurs d'aboutir à une compréhension générale et une modélisation du fonctionnement du système grâce à l'étude de différents tronçons de la Seine représentatifs de la diversité des milieux fluviaux du bassin versant. Puis, dans une seconde phase, un approfondissement de ces connaissances a été rendu possible par l'étude des zones humides fluviales, zones primordiales du fonctionnement écologique des hydrosystèmes. L'ensemble de ces recherches a permis d'élaborer des modèles et de renforcer les connaissances sur le fonctionnement de l'hydrosystème, sur la circulation des polluants à travers la diversité des milieux, et enfin sur les réponses de ces mêmes milieux aux changements environnementaux. Ainsi, les impacts des aménagements et des réservoirs, des polluants apportés par la région parisienne, le rôle écologique des zones humides ont été analysés et décrits dès la fin des années

1990. Aujourd'hui, il est donc possible de réaliser des synthèses basées sur une bonne connaissance des changements environnementaux, dans de nombreux domaines de la recherche sur les hydrosystèmes, notamment en géomorphologie fluviale (Foussard, 2009 ; Lescure et *al*., 2011).

De même, le bassin du Rhône, territoire dynamique où les enjeux ont pu paraître plus urgents à connaître et à gérer que sur le bassin de la Loire, la description des évolutions géomorphologiques et les impacts des activités anthropiques et du changement climatique sont aujourd'hui largement étudiés, que ce soit au niveau des bassins amont ou de la partie aval du Rhône.

Le bassin ligérien n'a bénéficié d'un tel programme qu'avec 15 ans de retard, à partir du milieu des années 1990. De plus, les objectifs du Plan Loire Grandeur Nature sont centrés sur les problèmes majeurs de gestion du bassin et non sur une description systématique du fonctionnement global de l'hydrosystème faisant intervenir tous les domaines de la recherche sur ces milieux. Etant donnée la diversité des aménagements, des milieux, des évolutions des usages au sein du bassin, de nombreuses études ont été menées. Cependant, il manquait, dans la plupart des domaines, une analyse des processus en œuvre avant d'en arriver aux impacts de la société et aux évolutions récentes. Ainsi, ce programme n'a pas permis de combler entièrement les manques et les retards dans la compréhension du fonctionnement global de l'hydrosystème ligérien et notamment dans la description des changements environnementaux passés et en cours, au sein du bassin.

Au sein du bassin de la Loire, les études menées sur son fonctionnement hydrologique ont été réalisées par et/ou pour les besoins des gestionnaires. Comme exposé précédemment, la recherche sur les hydrosystèmes anthropisés est forcément orientée selon les enjeux majeurs de la gestion des risques et de la ressource au sein du bassin versant. Cependant, ces études menées ou commanditées par les gestionnaires sur des épisodes exceptionnels ou sur des problèmes de gestion spécifiques ne peuvent apporter une vision et une connaissance globale du fonctionnement hydrologique du bassin ligérien. Ce n'est pas le but de ces études. Les travaux

avec une approche globale, systémique et synthétique doivent être menés par les chercheurs, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui en hydrologie sur le bassin de la Loire.

La géomorphologie fluviale a su se donner les objectifs et les études, combinant la description des processus particuliers tout en revenant à la compréhension du fonctionnement de l'ensemble du système. Ainsi, tout en répondant aux problèmes de la gestion des ouvrages au sein du lit mineur (Tombozafy, 2011 ; Claude, 2012 ; Nabet, 2013), en étudiant des tronçons particuliers de la Loire ou des processus précis (Gasowsky, 1994 ; Guérin, 1996 ; Larousse, 1998 ; Larue, 1999 ; Larue, 2008 ; Larue, 2009 ; Leteinturier et *al*., 2000 ; Rodrigues, 2004 ; Ramond, 2006 ; Depret, 2006 ; Grivel, 2008), des publications et rapports synthétiques apportent des explications sur le fonctionnement du système et des propositions de gestion en lien avec les principaux enjeux (Bazin et *al*., 1996 ; Gautier et *al.*, 2000 ; Gautier et *al*., 2001 ; Gautier et al., 2007).

Dans le domaine de l'hydrologie, sur la Loire, ces va-et-vient entre enjeux, recherche et gestion, entre processus particuliers et fonctionnement du système, échelle locale et régionale n'existent pas, même si les relations chercheurs-gestionnaires, elles, existent. Les services de la Dreal, notamment, répondent aux problèmes de gestion cruciaux et urgents au fur et à mesure que les évènements extrêmes se produisent. Ainsi, depuis la thèse de M. Dacharry en 1974, aucune thèse n'a été menée sur l'hydrologie de la Loire moyenne ayant une approche systémique, qui pourrait, compléter l'état des lieux dressé par M. Dacharry, se pencher sur les évolutions, et compléter les travaux des services gestionnaires.

2.2. Etude des chroniques de débits centrée sur les extrêmes et les impacts des changements climatiques

2.2.1. Recherches portant sur les crues

Les crues de la Loire ont fait l'objet de nombreux travaux étant donné l'importance de l'aléa et la vulnérabilité importante des agglomérations. Ces études portent notamment sur des retours d'expérience de crues, dont certaines ont pu faire l'objet de rétention par les barrages de Naussac et surtout Villerest (Staron, 1981 ; Béchet, 1983 ; Etablissement Public Loire, 2006 ; Etude Egrian, 2008), sur les crues centennales du milieu du 19ème siècle et l'estimation de leurs débits (Geneslay, 1972 ; Gazowski, 1986 ; Bontron et *al*., 1999 ; Cœur, 2004). Publications et rapports sur les stratégies de gestion des crues sont également nombreux (Bachoc et *al*., 1996 ; Bachoc et *al*., 2000 ; Camp'Huis, 2007 ; Reinbold et *al*., 2008 ; Goutx et *al*., 2011 ; Ferreira, 2011). Des recherches ont également été menées dans l'objectif d'améliorer la prévision des crues dans le secteur amont de la Loire (Grelat, 2002 ; Moulin, 2009).

Au sein du numéro 6-7 de la Houille Blanche de 1996 consacré à la Loire, il est frappant que les deux articles de synthèse des connaissances de l'hydrologie des crues de la Loire (Dacharry, 1996 et Duband, 1996) n'apportent que peu de connaissances nouvelles depuis les ouvrages majeurs de R. Dion (1961) et M. Pardé (1964), ainsi que depuis la thèse de M. Dacharry (1974). Certes le recensement des crues historiques a été fait et n'a pas connu de révolution en 50 ans. Cependant, l'analyse des chroniques avec les méthodes statistiques récentes n'apporterait-elle rien de nouveau ? Et qu'en est-il des crues moyennes, de faible période de retour ? Il a été démontré que les crues à pleins bords et leur durée ont un rôle morphogène important (Grivel, 2008 ; Nabet, 2013 ; Depret, 2014). Des études menées par des hydrologues pourraient compléter et approfondir les connaissances sur ces crues annuelles ou biennales. Enfin, dans la perspective du changement climatique, sans compter les nombreux autres changements environnementaux qui ont pu influencer l'hydrologie ligérienne, n'y a-t-il pas quelques évolutions à chercher dans les chroniques des maxima annuels, par exemple ?

2.2.2. Recherches portant sur les impacts des changements climatiques passés et actuels

On trouve de nombreuses études sur l'analyse de longues chroniques, ou de données historiques, de précipitations et/ou de débits portant sur diverses régions françaises. Il s'agit de travaux sur les extrêmes à partir des données observées, parfois extraites d'archives par des

historiens, qui sont traitées statistiquement, dans un but méthodologique (comparaison avec la méthode du Gradex), comme sur le bassin de l'Ardèche (Lang et *al*., 2002) ou bien pour rechercher des variations telles celles caractérisant le Petit Age Glaciaire (Pichard, 1995 ; Llasat et *al*., 2002). Sur le bas Rhône, il a été démontré que la fréquence du gel des eaux du Rhône est corrélée à celle des crues (Pichard, 1995). De plus, cette période plus froide du Petit Age Glaciaire est également marquée par une forte proportion de crues en période chaude (Pichard, 1995). Des périodes d'augmentation de la fréquence des inondations catastrophiques pendant le Petit Age Glaciaire a également été démontré plus généralement pour l'Espagne et le Sud de la France (Llasat et *al*., 2002).

Les travaux concernant les étiages et sécheresses sur de longues périodes sont, eux, plus rares. L'étude portant sur le nombre de jours sans pluie dans les régions Ile-de-France et Languedoc-Roussillon sur une période de 500 ans (Garnier, 2010), a permis de montrer d'une part que les sécheresses, depuis les années 1950 s'aggravent, mais, d'autre part, que les siècles derniers ont connu des périodes sèches plus graves qu'actuellement, notamment pendant le Petit Age Glaciaire. De plus, tant en Ile-de-France que dans la région Languedoc-Roussillon, ces travaux ont démontré une modification de la saisonnalité de ces sécheresses sur 500 ans avec une diminution des épisodes printaniers au profit des épisodes estivaux et hivernaux.

Cependant, il est plus difficile de déceler des évolutions plus récentes dans les régimes hydrologiques des cours d'eau à partir de données observées. Ainsi, les précipitations extrêmes en région méditerranée, ne montrent pas d'augmentation significative, entre 1958 et 2000 (Neppel et *al*., 2003). A l'échelle des cours d'eau français, l'étude de 192 séries de débits journaliers d'au moins 40 ans n'a pas permis de montrer de tendance générale à la hausse concernant l'intensité des crues (Renard, 2006). Par contre, pour les débits minimaux, les tendances significatives à la baisse semblent plus nombreuses (Renard, 2006). Cependant, à l'échelle de quinze régions hydro-climatiques françaises, quelques tendances cohérentes sont apparues (Lang et *al*., 2007) : i) augmentation des maxima annuels dans la région continentale du Nord-Est, ii) aggravation des crues en région océanique (Nord de la France), iii) aggravation des étiages dans les Pyrénées et le Pays Basque, iv) des étiages moins sévères dans les Alpes, v)

augmentation du module nival des stations glaciaires. Pour l'Arc Alpin, ces résultats ont été complétés (Bard et *al*., 2012). En effet, d'une part les étiages hivernaux sont moins sévères, d'autre part, les crues nivales sont plus précoces et leur durée est allongée. Toutefois, il convient de rappeler que ces études démontrent notamment la difficulté de discerner l'influence du changement climatique, maintenant bien avéré sur les températures, dans un signal à forte variabilité, avec d'autres sources de changement possibles (Lang et *al*., 2007).

2.2.3. Recherches portant sur les étiages

En ce qui concerne les travaux de recherche sur les étiages de la Loire, l'essentiel des études menées sur ce sujet depuis le milieu des années 1970, se sont portées sur les problèmes de gestion de la ressource en eau et plus particulièrement sur la gestion des barrages (Lefèvre, 1974 ; Clérin et *al*., 1992 ; Babillot et *al*., 1996 ; Mignot et *al*., 1996 ; Moreau, 2004 ; Mathevet et *al*., 2010). De plus, les étiages sévères sur le bassin ligérien des années 1921 et 1949, ont fait l'objet d'études plus poussées. Ils correspondent, d'une part, à des phénomènes observables à l'échelle de l'Europe et d'autre part, à des années où le déficit annuel de précipitations est particulièrement marqué (Duband et *al*., 2004 ; Duband, 2010). Les conditions physiques des étiages ont également été étudiées. En effet, le tarissement des cours d'eau au sein du bassin de la Maine a fait l'objet de travaux qui ont permis de démontrer l'importance des conditions morphostructurales et pédologiques (socle du Massif Armoricain) dans l'assèchement de ces cours d'eau, ainsi que celle des prélèvements par les ripisylves et ceux pour l'irrigation (Larue et *al*., 2004). Au sein du Bassin Parisien, au contraire, l'exemple de l'Aigre (affluent du Loir) montre l'importance de la compréhension des relations nappes-rivières dans l'explication des étiages (Pointet, 2004).

Enfin, grâce à l'élaboration d'un modèle couplé hydrologie et hydrogéologie, la part d'eau provenant des nappes composant le débit de base de la Loire entre les confluences Loire-Allier et Loire-Vienne a pu être estimée (Monteil, 2011). Ainsi, les apports cumulés des nappes sur ce tronçon de la Loire sont évalués à 15 $m^3.s^{-1}$ en moyenne pour la période 1975-2008, dont 10 $m^3.s^{-1}$ provenant de l'aquifère de Beauce. L'utilisation de ce modèle ainsi que de quatre projections

climatiques ont permis de simuler les évolutions possibles dans les décennies à venir. Il en ressort une tendance significative à la baisse des pluies efficaces dès 2050 qui pourrait entraîner une diminution de la recharge des nappes et par voie de conséquence, de leurs apports à la Loire.

Les recherches menées sur les étiages de la Loire sont en adéquation avec la pauvreté relative de la recherche française sur le sujet alors que les enjeux de gestion de la ressource en eau ne cessent de s'aggraver dans bien des régions. En France, l'une des recherches majeures de ces dernières années est l'étude des processus et des causes de tarissement de petits cours d'eau dans l'Est de la France, dans le but de modéliser les débits d'étiage à des fins de gestion (Lang, 2007). Outre les apports conceptuels sur les méthodes statistiques appliquées au traitement des données en période d'étiage et sur l'élaboration d'un modèle hydrologique transposable à d'autres bassins, le rôle majeur des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des bassins dans l'explication de leur fonctionnement en période d'étiage est démontré.

Les recherches sur les étiages de la Loire inclinent vers des tentatives de modélisation de ces débits (Mercier et *al*., 1996 ; Galéa et *al*., 1999 ; Bernard, 2010 ; Pushpalatha, 2013). Déjà en 1999, Galéa et *al*. soulignaient la difficulté de la régionalisation des régimes d'étiage à partir de sites observés à grande échelle, à cause des discontinuités géologiques entre les bassins versants. L'un des éléments de la conclusion de la thèse de R. Pushpalatha (2013), portant sur les bassins de la Loire et de la Seine, est révélateur de la situation de la recherche sur les étiages ligériens : l'efficacité des modèles mis en place serait améliorée par la mise en place de méthodologie prenant mieux en compte l'impact des barrages et les échanges nappes-rivière. On se trouve donc devant une contradiction : on possède dorénavant des capacités de modélisation de plus en plus performante mais on est confronté au déficit de compréhension de cet élément majeur des étiages ligériens, le soutien des débits d'étiage par les nappes, et notamment par les nappes alluviales.

De telles études ont néanmoins été menées à l'international. Par exemple, dans des circonstances particulières, en zone tropicale, au Mali, il a été démontré que la sévérité des étiages de la rivière Bani, durant les années de déficit pluviométrique est bien liée à une diminution générale du niveau des nappes sur la période 1981-1995 (Mahé et *al*., 2000). On

notera que la sécheresse régnant en Afrique sub-saharienne et ses conséquences sur l'écoulement a fait l'objet de nombreuses publications (Descroix et *al*. 2009).

De plus, dans les études portant sur la chimie des eaux de surface ou sur les échanges nappe-rivière utilisant la géochimie, dans le bassin de la Loire, de la Somme, du Rhône ou encore en Allemagne et en Slovénie, est observée une saisonnalité importante des données (Négrel et *al*., 1997 ; Négrel et *al*., 2005 ; Grosbois et *al*., 2000 ; Négrel et *al*., 2003 ; Fette et *al*., 2005 ; Petelet-Giraud et *al*., 2007 ; Ogrinc et *al*., 2008 ; Moatar et *al*. 2009). Cependant, l'étude des étiages et de leurs mécanismes n'étant pas le cœur de la problématique de ces recherches, les conclusions ou remarques sur les données disponibles en périodes d'étiage ne sont pas toujours formulées.

Il existe donc de nombreuses perspectives de recherches sur les étiages ligériens, notamment en lien avec le rôle des nappes alluviales. La nécessité de ces recherches est d'autant plus prégnante que les impacts du changement climatique pourraient aggraver les tensions sur la ressource en eau et compliquer la gestion de celle-ci en période de basses eaux.

2.3. Changements environnementaux et modélisation prospective

En ce qui concerne les recherches sur les impacts du changement climatique en cours, à de rares exceptions près citées précédemment, les travaux se fondent sur des modélisations climatiques et hydrologiques. Dans le cadre du programme « Impact du changement climatique sur l'hydrosystème Loire : hydrologie, régime thermique, qualité (ICC-HYDROQUAL) », une équipe pluridisciplinaire a recherché les impacts potentiels du changement climatique sur le bassin de la Loire à l'aide de différents modèles. Les principales tendances observées dans les différentes simulations réalisées sont la baisse des débits en période d'étiage et l'augmentation de la durée de ces basses eaux au cours du 21ème siècle (Moatar et *al*., 2010). Il s'agirait des effets induits par l'augmentation de l'évapotranspiration et la diminution des précipitations. Ces conclusions rejoignent celles des travaux menés par EDF (projet IMPEC) qui pointaient notamment cette même aggravation des étiages (Manoha et *al*., 2008).

De telles tendances robustes de diminution des débits d'étiage ont déjà été simulées pour le bassin de la Seine (GICC-Seine, 2005). Cependant, les simulations pour ces deux bassins ne démontrent pas d'évolution significative au cours du 21ème siècle en ce qui concerne les régimes de crues (Moatar et *al*., 2010 ; Ducharne et *al*., 2011), contrairement aux modélisations réalisées sur les cours d'eau les plus influencés par la neige. En effet, pour les bassins où la composante nivale joue un rôle important, la diminution du manteau neigeux entraînera une diminution des crues printanières qui apparaitront également plus tôt dans la saison, et une augmentation des débits hivernaux à cause de l'augmentation des précipitations liquides (Martin et *al*., 2002 ; Gicc-Rhône, 2005).

Cependant, d'autres changements environnementaux affectent les hydrosytèmes anthropisés : modification de l'occupation du sol, artificialisation des écoulements et grands barrages, gestion de la ressource en eau et de la pénurie, qualité des eaux. Ces modifications majeures des bassins versants et leurs impacts sur les régimes hydrologiques font l'objet de beaucoup moins de travaux que les conséquences du changement climatique.

Néanmoins, sur certains bassins versants, des études ont été menées, notamment à partir de l'élaboration de nouveaux modèles. Par exemple, à grande échelle, l'impact de la modification du paysage rural breton sur les conditions d'écoulement au sein de trois petits bassins versants a été étudié grâce à l'élaboration d'un modèle distribué intégré à un SIG (Bocher, 2005).

A des échelles plus petites, les modélisations entreprises dépendent largement des enjeux majeurs de gestion au sein des bassins versants, tout en intégrant divers scénarios de changements climatiques. Ces modélisations ont pour but de prendre en compte les effets des changements climatiques et environnementaux, voire d'essayer de démêler les effets des uns par rapport aux autres. Pour la Seine, la modélisation s'est portée sur l'évolution de la qualité des eaux en fonction de sources de pollution, en intégrant, notamment, un scénario de « bonnes pratiques agricoles » afin d'étudier les conséquences d'une modification des comportements sur les concentrations en nitrates au sein du bassin (Ducharne et *al*., 2007). Dans les Alpes, l'hydrologie du Rhin est perturbée par les barrages et la modification de l'occupation du sol. Leurs effets ont été démontrés par la modélisation des débits (Verbunt et *al*., 2005). Il a notamment

été montré que le passage de prairie à une forêt au sein d'un petit bassin, modifie l'évapotranspiration, ce qui impacte les débits notamment en période de croissance de la végétation. Enfin, depuis les années 1940, a été observée une augmentation des débits du Mississippi, notamment en période de basses eaux (Lins et *al*., 1999 ; Raymond et *al*., 2003). Plusieurs études ont permis d'aboutir à l'élaboration de modèles et de démontrer que cette baisse des débits est imputable à l'évolution des précipitations mais également aux barrages construits dans les années 1950 et à l'extension des cultures de soja au sein du bassin (Zhang et *al*., 2006 ; Rossi et *al*., 2009 ; Schilling et *al*., 2010).

Cette tendance à la modélisation ne doit pas faire oublier que l'on ne modélise bien que ce que l'on connait. L'élaboration de ces modèles, pour qu'ils soient valables, repose sur des connaissances solides du fonctionnement des hydrosystèmes étudiés, et également sur des données fiables. Ainsi, les études menées sur le Lac Tchad, alliant observations, données de hauteurs d'eau, compréhension des modes d'alimentation du lac et modélisation des volumes manquants chaque année pour que le lac atteigne un certain seuil (Bader et *al*., 2011), ont permis de répondre à des enjeux de gestion vitaux. En effet, le déficit de précipitations depuis les années 1970, a provoqué la diminution des apports et du niveau du lac, jusqu'à l'assèchement de sa partie Nord, ce qui pose d'importants problèmes aux populations qui vivent dans cette zone (Lemoalle et *al*., 2010). Dans la zone sahélienne, il s'est agi, au contraire, d'identifier les différentes causes de l'augmentation des coefficients d'écoulement depuis les années 1970, alors que la région subit un déficit important de précipitations depuis cette période (« paradoxe sahélien »; Descroix et *al*. 2009). Bien que les effets de la sécheresse, augmentés de prélèvements supplémentaires de l'évapotranspiration à cause de l'augmentation des températures, devraient réduire les coefficients d'écoulement de la zone sahélienne, ces conséquences sont contrecarrées par la modification de la végétation, qui s'est adaptée aux conditions climatiques plus sèches, et de l'occupation du sol lié à l'extension de la déforestation et à la mise en culture de terre, qui a, au moins, accentué la désertification de cette zone (Mahé et *al*., 2009 ; Descroix et *al*., 2009).

La diversité des situations exposées ci-dessus illustre la complexité de ces recherches et la nécessité d'une connaissance approfondie des changements environnementaux en cours ou passés, tant climatiques qu'anthropiques, que subissent les bassins versants. Il est à noter que

pour le bassin ligérien, ces connaissances font en partie défaut. Nous avons souligné en introduction la difficulté de comptabilisation de l'évolution des prélèvements d'eau à l'échelle du bassin par les différents acteurs. De plus, même si l'évolution des usages au sein du bassin a été étudiée comme la fin de l'entretien des marges du fleuve par des activités de pâturages, de pêche, ou de vannerie, les conséquences des modifications de l'occupation du sol dans le secteur du Massif Central où la reforestation pourrait avoir des conséquences non négligeables sur les coefficients d'écoulement, restent mal connues. Ce manque de connaissance est d'autant plus problématique que les études portant sur les conséquences du reboisement lent qu'a connu le Massif Central dans sa partie Sud n'ont pas été clairement identifiées, étant donné les résultats contradictoires selon les bassins versants étudiés (Cosandey et *al*., 2005).

Cependant, le travail de thèse de M. Lavrieux (2011), qui à partir de biomarqueurs moléculaires (lipides de la matière organique) différenciés en fonction des occupations du sol (essentiellement complexes de prairies et pâtures d'une part, et d'autre part les forêts de conifères), a décrit l'impact des modifications de l'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique du lac d'Aydat (Puy-de-Dôme) grâce à l'étude de ses archives sédimentaires. En effet, une augmentation des crues a été observée vers la fin du Haut Moyen-Age et deux périodes d'eutrophisation du lac ont été définies, l'une au milieu du Haut Moyen-Age et la seconde, encore en cours, qui aurait débutée il y a 200 ans. La mise en place de cette méthode et sa calibration ouvrent de nouvelles perspectives à l'étude de l'impact des modifications de l'occupation du sol sur le fonctionnement hydrologique des bassins versant de la Loire amont.

Enfin, la qualité des eaux de surface est un bon indicateur de l'impact de la société sur l'hydrosystème. En Loire moyenne, plusieurs études ont été menées sur la qualité des eaux de surface (Moatar et *al*., 1999 ; Grosbois, 1998 ; Moatar et *al*., 2009). Ainsi, pour expliquer la chimie des eaux de la Loire, C. Grosbois a défini des pôles de mélange illustrant les apports des rejets urbains et ceux pollués par les activités agricoles.

2.4. Fonctionnement hydrologique des plaines alluviales : zones humides alluviales et échanges nappes-rivière

Comme on l'a vu avec l'exemple du programme de recherche Piren Seine, l'étude du fonctionnement des zones humides et des échanges d'eau au sein des plaines alluviales fait aujourd'hui partie intégrante des études du fonctionnement hydrologique des cours d'eau. En effet, selon les enjeux majeurs qui varient selon les régions du monde, la compréhension du fonctionnement de ces milieux particuliers joue un rôle majeur dans les études sur la diffusion des pollutions, plus généralement sur la qualité de l'eau, sur les modes de recharge des nappes et le soutien des étiages des cours d'eau ou encore sur la gestion des risques d'inondation (Mitsch et *al*., 2000 ; Fustec et *al*., 2000). Ainsi, les études sur les zones humides en Chine portent surtout sur les problèmes de la qualité de l'eau et sur le rôle de filtre que jouent ces milieux, alors qu'aux Etats-Unis, les problématiques sont plus proches de celles de l'Europe et les études se focalisent plus sur les enjeux de gestion des inondations et de restauration d'un bon fonctionnement écologique de zones humides.

En France, les décennies 1990 et surtout 2000 ont vu se développer les recherches sur les zones humides et le fonctionnement des plaines alluviales à partir de plusieurs problèmes que rencontrent les gestionnaires à l'heure actuelle. Ces recherches ont largement été impulsées par le Programme National de Recherche sur les Zones Humides (PNRZH, 1997 à 2001). Ces études ont permis la mise en place de collaborations scientifiques pluridisciplinaires, alliant les méthodes actuelles des hydrogéographes à celles de la géochimie et de l'hydrogéologie par exemple. Ainsi, les objectifs d'étude du rôle écologique et social des zones humides sont renforcés et développés par des connaissances solides de leur fonctionnement hydrologique. Ainsi, plusieurs études récentes ont contribué à la compréhension des modes d'alimentation en eau des zones humides alluviales et des échanges entre les différents réservoirs en présence.

Les recherches sur la Seine dans le cadre du PNRZH et du Piren Seine sont à nouveau de bons exemples pour illustrer l'état des connaissances actuelles. En effet, les échanges entre nappe alluviale – nappe de coteau – rivière ont été démontrés sur plusieurs sites (Weng, 2000 ; Curie,

2006) tout en identifiant les perturbations liées à l'artificialisation des écoulements, notamment en période d'étiage. A l'aide de suivis géochimique, hydrologique et piézométrique, ces zones humides et la nappe alluviale sont identifiées comme des zones de mélange entre les eaux de la rivière et les eaux de la nappe de la craie ; ces mélanges variant essentiellement en fonction des niveaux d'eau de la rivière. Cette approche met ainsi en évidence un fonctionnement saisonnier des zones humides et de leur rôle de stockage des eaux de crue. Ces études de cas montrent également qu'en période de basses-eaux, la rivière continue à alimenter sa nappe alluviale étant donné les débits d'étiage relativement importants dus à la politique de soutien d'étiage. De même, l'étude de la zone humide de Montbéqui, dans le bassin de la Garonne, a permis d'identifier les différentes masses d'eau (rivière et nappes) que l'on retrouve au sein de la zone humide tout en décrivant la variabilité de ces mélanges en fonction de la situation hydrologique (Ochoa-Salazar, 2008).

Les recherches sur les zones humides du bassin ligérien ne sont cependant pas en reste. En effet, à nouveau dans le cadre du PNRZH, deux sites ont été étudiés (Négrel et *al*., 2003) avant et après la confluence Loire-Allier. Il y a été montré que la nappe alluviale contribue au soutien des débits d'étiage de la Loire, mais que dans ces deux cas, elle ne bénéficierait pas d'apports de la Loire en période de hautes eaux. Au cours des années étudiées (1998 – 2000), elle a été rechargée majoritairement par les précipitations. De plus, les zones humides, chenal secondaire ou méandre abandonné, sont des zones de mélange des eaux de la Loire et de la nappe alluviale, les apports de la Loire étant plus importants dans les zones qui sont les plus proches et les mieux connectées.

Enfin, M. Nabaz (2014), en Grande Limagne (Auvergne), a décrit les modes de recharges de la nappe alluviale de l'Allier grâce à un suivi géochimique des différentes masses d'eau en présence. L'Allier, les apports des coteaux adjacents, les précipitations et l'amont de la nappe alluviale (circulation des eaux souterraines parallèle à l'Allier du Sud vers le Nord) contribuent à la recharge de la nappe alluviale.

De plus, au niveau des bassins amont, Loire et Allier, deux thèses en cours, avec des approches différentes, apporteront de nouvelles connaissances sur le fonctionnement de zones

humides au sein du Massif Central et portent des perspectives intéressantes pour les recherches en hydrologie sur les bassins amont de la Loire (S. Delachanal-Chatelard, Evolution des zones humides du haut bassin de la Loire : étude du fonctionnement écologique et hydrologique des systèmes tourbeux. L'apport de l'étude des diatomées, Université de Saint-Etienne ; A. Duranel, Eco-hydrologie et fonctions des zones humides dans un contexte de changement climatique – l'exemple des têtes de bassin versant tourbeuses du Massif Central cristallin (Limousin et Monts du Forez), Université de Saint-Etienne).

Le tableau de la recherche sur le fonctionnement hydrologique de la Loire est donc assez contrasté et jalonné de certains manques de connaissances de l'hydrosystème, et ce, dans un contexte de changements climatiques et environnementaux croissant. Le retard accumulé est important et les perspectives de recherches sont multiples pour les années à venir d'autant plus au regard des travaux menés sur les grands hydrosystèmes.

Les objectifs de cette thèse, présentés en introduction, ont donc été définis en fonction des principaux enjeux de gestion du bassin versant ligérien et de la connaissance actuelle de l'hydrologie de la Loire moyenne. Les méthodes utilisées se basent sur celles des recherches en hydrologie menées actuellement permettant de répondre à ces objectifs. Elles seront développées en tête de chaque chapitre.

Deuxième partie

Evolutions et formation des débits de la Loire moyenne

Sommaire de la deuxième partie :

Introduction de la deuxième partie ……80

Chapitre 3 – Analyse des évolutions des débits en Loire moyenne depuis la deuxième moitié du 19ème siècle ……82

3.1. Objectifs, limites des données disponibles et adaptation des méthodes ……83

3.1.1. Les données disponibles et leurs limites ……84

3.1.2. Méthodes ……95

3.2. Impacts de la politique de soutien des débits d'étiage et de la construction de grands barrages ……102

3.2.1. Politique de soutien des débits d'étiage et gestion des barrages ……103

3.2.2. Impacts des grands barrages sur les débits de la Loire ……108

3.3. De légères tendances dans les chroniques climatiques ……117

3.4. Les débits moyens annuels : une stabilité robuste dans le temps ……124

3.5. Diversité des évolutions des maxima et stabilité des minima annuels ……133

3.5.1. Des VCN3 stables dans le temps ……133

3.5.2. Maxima annuels des débits journaliers ……139

3.6. Les basses-eaux ……145

3.7. Les hautes-eaux ……163

3.8. Occurrences des débits à pleins bords à Blois ……175

3.9. Synthèse des changements environnementaux imbriqués au sein du bassin qui pourraient impacter l'hydrologie de la Loire moyenne ……180

Conclusion et synthèse des résultats du troisième chapitre ……182

Chapitre 4 – Contribution des trois bassins amont principaux (haute Loire, Allier et Morvan) aux débits de la Loire moyenne (au Bec d'Allier) ……186

4.1. Données disponibles et méthodes ……186

4.2. Caractéristiques chimiques des eaux la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan ……205

4.2.1. Impacts d'un gradient amont-aval sur le faciès chimique des eaux de la Loire moyenne et de ses principaux affluents ……205

4.2.2. Variabilité saisonnière des principaux paramètres physico-chimiques et de la concentration en éléments majeurs ……216

4.3. Signatures isotopiques (^{18}O et ^{2}H) des eaux en la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan ……240

4.4. Apports des méthodes de la géochimie dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des confluences Loire – Allier et Loire – Arroux ……247

4.4.1. La confluence Loire – Allier ……247

4.4.2. La confluence Loire – Arroux ……260

4.5. Importance des apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire amont……265

4.5.1. Apports des analyses géochimiques réalisées durant les années 2010 et 2011 ……267

4.5.2. Validation des résultats grâce à 40 ans de données de débits ……271

4.6. Importance des apports de la haute Loire, de l'Allier et du Morvan dans les débits de la Loire moyenne ……275

Conclusion et synthèse des résultats du quatrième chapitre ……280

Conclusion de la deuxième partie ……283

La première étape de l'étude de l'impact des changements environnementaux sur l'hydrologie de la Loire moyenne est la recherche d'évolutions dans les chroniques longues de débit en Loire moyenne, permise par l'existence d'une chronique continue de plus de 145 ans à la station hydrométrique de Blois.

L'étude statistique de cette chronique, à partir de la définition d'indices caractérisant le fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne, a permis de montrer que la politique de soutien des débits d'étiage en Loire moyenne est la cause des principales évolutions de l'hydrologie de la Loire moyenne. Les autres évolutions recensées portent essentiellement sur l'occurrence des saisons hydrologiques ainsi que celle des débits à plein bords.

Il n'a pas été possible d'identifier clairement les causes de ces évolutions, excepté le rôle des grands barrages. Les données disponibles, notamment météorologiques, ou bien les descriptions des changements environnementaux au sein du bassin versant, à l'exemple de l'occupation du sol dans le secteur du Massif Central, ne sont pas assez détaillées pour identifier leurs impacts sur l'hydrologie de la Loire moyenne. La complexité et la diversité des influences cumulées dans la formation des débits en amont de la Loire moyenne limitent aujourd'hui l'explication des résultats obtenus par cette étude statistique.

Néanmoins, l'importance des apports des trois principaux bassins amont contribuant aux débits de la Loire moyenne (haute Loire, Morvan et Allier) est la clé des perspectives de recherche ouvertes par ces premiers résultats. Une étude géochimique a donc été menée afin de caractériser les apports de ces différents tributaires et leur mélange en Loire moyenne.

Les apports que représentent l'Allier et la Loire amont avaient été décrits par M. Dacharry (Dacharry, 1974) à partir des données de débits autour de la confluence Loire - Allier.

Le suivi géochimique des eaux de la Loire s'est donc ici attaché à créer des données caractérisant les apports de la haute Loire et de l'Allier, mais une attention particulière a été portée au Massif du Morvan, principal contributeur aux débits de la Loire en Loire bourbonnaise, en amont de son entrée dans le Bassin parisien et de sa confluence avec l'Allier. Les apports provenant du Morvan sont en effet primordiaux dans les débits de la Loire bourbonnaise et de la Loire moyenne en période de hautes-eaux, alors que leur abondance est réduite en période de

basses-eaux, au profit de la haute Loire. L'absence de crue, tant de type cévenol qu'océanique, pendant la période du suivi géochimique, représente la principale limite de ces conclusions. Ces résultats permettront à la fin de la troisième et dernière partie de faire la synthèse des apports cumulés par la Loire moyenne après avoir étudié la diffusion des débits issus des bassins amont à travers la vaste plaine alluviale de la Loire moyenne au sein du Bassin parisien et décrit les interactions avec les nappes alluviales qui caractérisent le fonctionnement hydrologique de ce tronçon de la Loire.

Chapitre 3 : Analyse des évolutions des débits en Loire moyenne depuis la deuxième moitié du 19ème siècle.

Dans ce chapitre, tout d'abord, sont présentés les objectifs et méthodes de l'étude de la longue chronique des débits de la Loire à Blois. Cette analyse commence ensuite par celle des impacts sur les débits de la Loire, des deux facteurs de changements environnementaux, pour lesquels on dispose de données : la politique de soutien des débits d'étiage par les grands barrages et les chroniques de données climatiques disponibles pour la zone d'étude. Ensuite, sont décrits les caractéristiques structurantes, stables ou évolutives, de la chronique des débits de la Loire à Blois. La limite de ces résultats et la discussion des facteurs pouvant contrôler les évolutions identifiées sont exposées au fur et à mesure de ce chapitre.

3.1. Objectifs, limites des données disponibles et adaptation des méthodes

Les phénomènes extrêmes comme les crues de la Loire ont fait l'objet de nombreuses études dont les résultats se sont affinés au cours du temps grâce à l'évolution des outils et méthodes statistiques (Sainjon, 1864 ; Pardé, 1964 ; DDE, 1975 ; SOGREAH, 1988 ; Bontron et *al*., 1999 ; Cœur, 2004 ; Camp'Huis, 2007). Ces connaissances sont les plus primordiales pour les gestionnaires au vue des aléas et des politiques à mettre en place pour la protection des populations riveraines et des aménagements. Dans ce travail, l'étude des débits de la Loire ne se concentre donc pas sur les extrêmes du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne, mais sur les comportements médians des débits : le régime de la Loire moyenne, ses crues ordinaires, ses hautes et basses eaux moyennes.

En effet, bien que les crues les plus importantes représentent un réel enjeu de société en termes de coût, des évolutions dans le fonctionnement moyen de la Loire pourraient avoir de nombreuses répercussions sur les usagers du fleuve. Les changements environnementaux à

l'œuvre au sein du bassin versant sont multiples : évolutions du climat, de l'occupation du sol, des prélèvements d'eau, régulation des débits d'étiage. Ils peuvent avoir des effets sur l'hydrologie de la Loire, qui s'opposent ou qui se renforcent les uns les autres. Il est donc crucial de veiller à de telles évolutions, qui peuvent être minimes aujourd'hui mais qui pourraient induire, par exemple, des problèmes de gestion des nappes si leur recharge en période hivernale évolue, ou bien si les étiages devenaient plus importants.

Ici, l'étude des débits s'est donc attachée dans un premier temps à créer un certain nombre d'indices statistiques permettant de refléter au mieux les différents éléments du fonctionnement moyen de la Loire, en termes de débit annuel, de basses-eaux ou de hautes-eaux, tout en s'adaptant aux données disponibles. L'analyse s'est focalisée sur la chronique de débits de la Loire à Blois car elle est la plus longue disponible (148 années). D'autres stations hydrométriques ont également été prises en compte. On peut noter ici que, sont présentées, dans le sous-chapitre 3.1.1., des données qui ne sont pas utilisées dans ce chapitre, mais que l'on retrouvera dans le chapitre 4.

3.1.1. Les données disponibles et leurs limites

Deux types de données principales ont été utilisés : les données hydrologiques mises à disposition par la Dreal Centre (tab. 5) ainsi que les données climatiques fournies par Météo France (tab.7). Quatre préoccupations ont motivé les choix effectués dans ces données : la localisation des données, la durée des chroniques, leur continuité et leur fiabilité.

Les données hydrologiques

Tout d'abord, la Dreal Centre a mis à disposition les données de débit moyen journalier (QJM) de nombreuses stations de jaugeage, par l'intermédiaire de sa base de données, la Banque Hydro. Ces données hydrologiques présentent une variabilité importante dans leur densité géographique (fig. 35 et tab. 5). En effet, sur le cours de la Loire et de ses affluents entre Villerest

et Blois en passant par le Morvan, il existe de nombreuses stations de jaugeage. En amont de Villerest, sur la haute Loire, ainsi que sur l'Allier, les stations sont plus clairsemées.

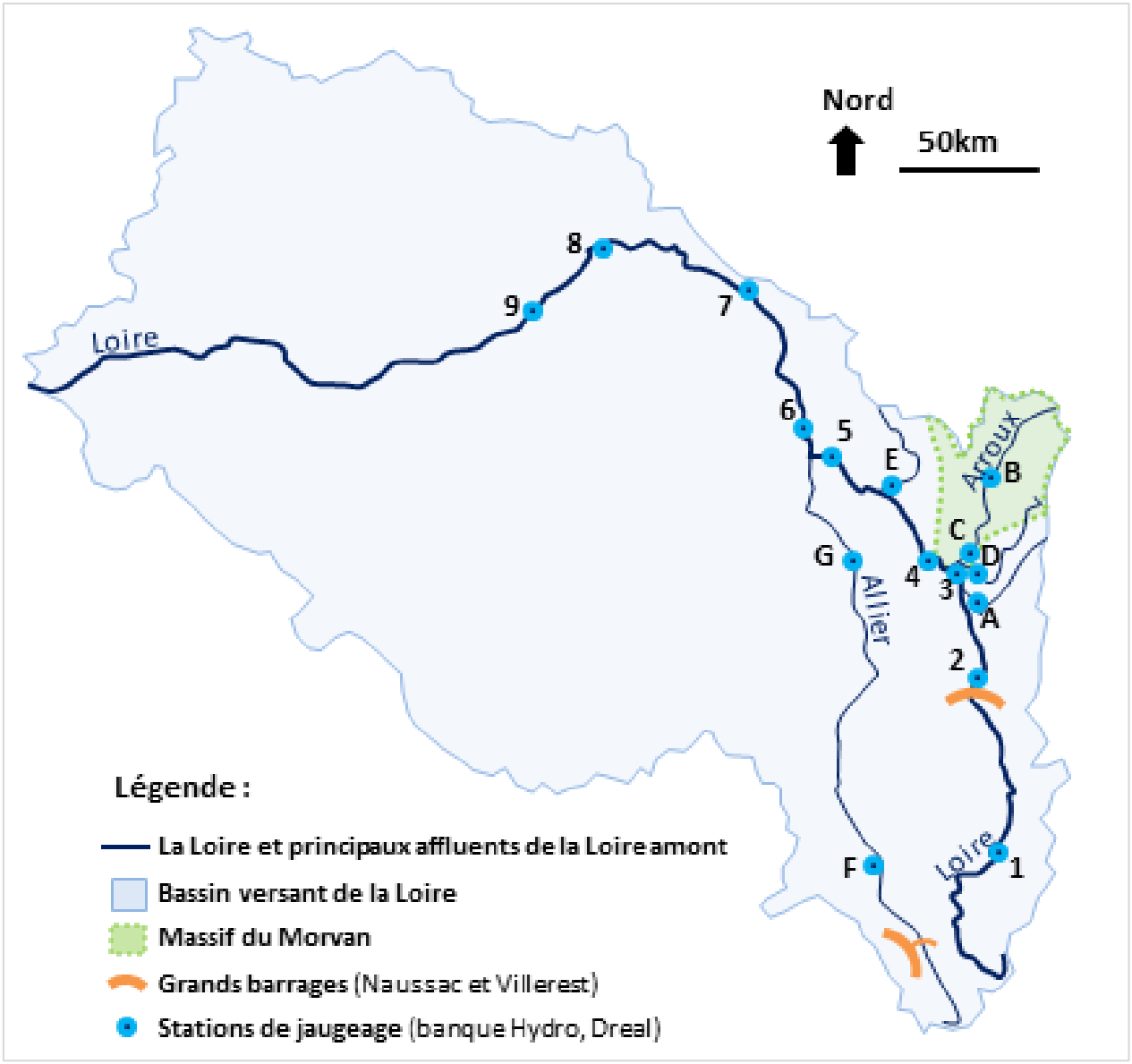


Fig. 35. *Situation des stations de jaugeage : (1) Bas-en-Basset, (2) Villerest, (3) Digoin, (4) Gilly-sur-Loire, (5) Nevers, (6) Givry, (7) Gien, (8) Orléans, (9) Blois, (A) Montceaux-l'Etoile sur l'Arconce, (B) Etang-sur-Arroux et (C) Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux, (D) Vitry-en-Charolais sur la Bourbince, (E) Verneuil sur l'Aron, (F) Vieille-Brioude et (G) Moulins sur l'Allier.*

Au-delà de la localisation des données disponibles, la durée des chroniques pose également problème (tab. 6). Une seule chronique de débit débute au 19ème siècle, à Blois, et présente 148 années de données. Viennent ensuite les débits de l'Allier à Vieille-Brioude et de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest avec respectivement des chroniques longues de 92, 93 et 90 années. Ensuite, la station de Gien dispose de 75 années de débit de la Loire. Toutes les autres stations ont été mises en service entre 1954 et les années 1970, voire plus récemment.

Les chroniques présentent de nombreuses discontinuités (tab. 6). Seule la chronique de Bas-en-Basset est continue parmi les cinq chroniques de débits les plus longues (Blois, Vieille-Brioude, Bas-en-Basset, Villerest et Gien).

Faisons ici une petite anticipation sur le sous-chapitre des méthodes, car il s'agit d'un problème ponctuel. Les interruptions de données durant trois jours au plus ont été comblées à l'aide des deux stations qui l'encadrent. L'intérêt de calculer ces données est de compléter la chronique d'un mois pour le rendre complet, par exemple. Cette correction ponctuelle ne règle pas du tout le problème de la continuité des données, puisque certaines chroniques présentent des interruptions de plusieurs mois consécutifs.

Tab. 5. *Caractéristiques des stations de jaugeage*

	Nom	Cours d'eau	Bassin versant en km²	Département	Code station	Altitude	Lambert II X	Lambert II Y	Mise en service	Type de station
1	Bas-en-Basset	Haute Loire	3234	Haute-Loire (43)	K0550010	450 m	739757 m	2034330 m	01/01/1918	Station à une échelle
2	Villerest	Haute Loire	6585	Loire (42)	K0910010	275 m	732250 m	2113011 m	01/01/1921	Station à une échelle
2'	Villerest [Pont de Villerest]	Haute Loire	6584	Loire (42)	K0910050	270 m	732434 m	2112065 m	01/11/2005	Station à une échelle
A	Montceaux-l'Etoile	Arconce	599	Saône-et-Loire (71)	K1173210	245 m	731835 m	2152310 m	01/12/1969	Station à une échelle
3	Digoin	Loire bourbonnaise	9315	Saône-et-Loire (71)	K1180010	227 m	726418 m	2165557 m	01/01/1954	Station à une échelle
B	Etang-sur-Arroux	Arroux	1798	Saône-et-Loire (71)	K1321810	273 m	741517 m	2207395 m	01/01/1971	Station à une échelle
C	Rigny-sur-Arroux	Arroux	2277	Saône-et-Loire (71)	K1341810	237 m	730234 m	2171909 m	01/01/1967	Station à une échelle
D	Vitry-en-Charolais	Bourbince	819	Saône-et-Loire (71)	K1383010	237 m	733758 m	2164997 m	01/01/1967	Station à une échelle
4	Gilly	Loire bourbonnaise	13007	Saône-et-Loire (71)	K1440010	215 m	709637 m	2171929 m	01/01/1969	Station à une échelle
E	Verneuil	Aron	1465	Nièvre (58)	K1773010	196 m	694501 m	2206519 m	01/01/1970	Station à une échelle
5	Nevers	Loire bourbonnaise	17570	Nièvre (58)	K1930010	175 m	663019 m	2220686 m	01/01/1955	Station à une échelle
F	Vieille-Brioude	Allier	2269	Haute-Loire (43)	K2330810	434 m	684154 m	2029455 m	01/01/1919	Station à une échelle
G	Moulins	Allier	12980	Allier (03)	K3450810	210 m	675831 m	2173967 m	01/01/1965	Station à une échelle
6	Givry	Loire moyenne	32610	Cher (18)	K4000010	170 m	655922 m	2224276 m	01/01/1964	Station à une échelle
7	Gien	Loire moyenne	35500	Loiret (45)	K4180010	125 m	622170 m	2298280 m	01/01/1936	Station à une échelle
8	Orléans [Pont royal]	Loire moyenne	36970	Loiret (45)	K4350010	95 m	567716 m	2322086 m	01/01/1964	Station à une échelle
8'	Orléans [Quai du Roi]	Loire moyenne	36970	Loiret (45)	K4350020	95 m	569305 m	2322362 m	01/01/1980	Station à une échelle
9	Blois	Loire moyenne	38320	Loir-et-Cher (41)	K4470010	70 m	524678 m	2287746 m	01/01/1863	Station à une échelle
9'	Onzain	Loire moyenne	40500	Loir-et-Cher (41)	K4800010	65 m	513625 m	2276847 m	01/09/1993	Station à une échelle

Tab. 6. *Séries de données par station de jaugeage*

	Nom	Cours d'eau	Confluence	QJM disponible	% de données disponible sur l'intervalle de temps	Lacunes dans les données
1	Bas-en-Basset	Haute Loire	–	du 01/01/1919 au 31/12/2011	100%	–
2	Villerest[1]	Haute Loire	–	du 01/01/1920 au 31/12/2011	99,9%	le 01/12/1923 ; janvier 1945
2'	Villerest [Pont de Villerest]	Haute Loire	–	du 01/12/2005 au 31/12/2011		–
A	Montceaux-l'Etoile	Arconce	amont Digoin	du 01/01/1970 au 31/12/2011	99,4%	29/03 au 01/05/1983 ; 03 au 05/01/1993 ; 29/11 au 06/12/1993 ; 26 au 31/01/1999 ; 02 au 07/03/1999 ; 18 au 21/07/2003 ; 23 au 27/07/2003 ; 08 au 29/08/2003 ; 20 au 22/09/2003
3	Digoin	Loire bourbonnaise	–	du 01/01/1958 au 31/12/2011	99,6%	03 au 19/08/1998 ; 02 au 22/12/2002 ; 29/05 au 06/07/2004
B	Etang-sur-Arroux	Arroux	Digoin	du 27/10/1971 au 31/12/2011	98,9%	03 au 21/02/1972 ; 25 au 30/08/1974 ; 30/07 au 06/08/1979 ; 20/08 au 03/09/1979 ; 23/03 au 06/04/1981 ; 30/07 au 29/08/1984 ; 10 au 31/01/1985 ; 04 au 11/11/1985 ; 01 au 19/01/1987 ; 29/08 au 26/09/1988 ; 14 au 21/11/1994
C	Rigny-sur-Arroux	Arroux	Digoin	du 01/11/1967 au 31/12/2011	94,7%	05/09/1994 au 31/12/1996
D	Vitry-en-Charolais	Bourbince	Digoin	du 01/11/1967 au 31/12/2011	100%	–
4	Gilly	Loire bourbonnaise	–	du 23/04/1969 au 31/12/2011	96,3%	09 au 12/08/1969 ; 1988 ; 19 au 26/02/1990 ; 2/09/1991 au 29/02/1992 ; 16/05 au 9/06/2006
E	Verneuil	Aron	Decize	du 01/01/1970 au 31/12/2011	82,0%	01/01/1980 au 31/12/1984 ; 22/07/1991 au 27/12/1993 ; 18 au 25/01/1999 ; 19/07 au 01/08/2001 ; 07/04 au 01/05/2002
5	Nevers	Loire bourbonnaise	–	du 01/01/1955 au 31/12/2011	100%	–
F	Vieille-Brioude	Allier	Nevers	du 01/01/1919 au 31/12/2011	99,9%	04 et 05/04/1987 ; 15/12/2001 au 01/01/2002
G	Moulins	Allier	Nevers	du 01/01/1968 au 31/12/2011	98,4%	05/07 au 31/12/1993 ; 23/06 au 11/08/1997 ; 25/09 au 25/10/2006

[1] Pour Villerest, la station en aval du barrage, et aussi la plus récente est la plus fiable, notamment en période d'étiage (Franck Giroud, Dreal Centre, com. pers.). Une chronique globale de débits a donc été constituée en utilisant les données disponibles de Villerest pont, quand elles existent, et celles de l'ancienne station pour les périodes plus anciennes.

	Nom	Cours d'eau	Confluence	QJM disponible	% de données disponible sur l'intervalle de temps	Lacunes dans les données
6	Givry	Loire moyenne	–	du 01/01/1967 au 31/12/2011	96,6%	02/01/1967 ; 09 au 16/01/1967 ; 28/08 au 08/09/1967 ; 10 au 14/09/1967 ; 30/12/1968 au 06/01/1969 ; 21/07 au 08/09/1969 ; 27/10 au 10/11/1969 ; 11 au 29/12/1969 ; 28/09 au 07/10/1970 ; 12/10/1970 ; 03 au 20/11/1980 ; 1981 ; 21/04 au 01/06/2002
7	Gien	Loire moyenne	–	du 01/01/1936 au 31/12/2011	99,8%	01/01 au 16/02/1992
8	Orléans [Pont royal][2]	Loire moyenne	–	du 01/01/1964 au 31/12/2011	95,7%	07 au 13/01/1997 ; 01/09/1997 au 02/03/1998 ; 15/06 au 31/12/1998 ; 1999
8'	Orléans [Quai du Roi]	Loire moyenne	–	du 01/01/2001 au 31/12/2011		01/06/2001 au 01/06/2002 ; 03/07/2002 au 05/04/2008
9	Blois[3]	Loire moyenne	–	du 01/01/1863 au 31/12/2011	98,9%	01/09/1992 au 26/12/1994 ; 24 et 25/06/1995 ; 14 au 16/10/1995 ; 02 au 03/12/1996 ; 07 au 20/11/1997 ; 12 au 17/12/1997 ; 18/02 au 25/04/2000 ; 06/05 au 01/06/2002 ; 24/06 au 31/12/2002 ; 02/04 au 15/05/2003 ; 11 au 14/08/2008 ; 23 au 29/06/2010 ; 29/07 au 31/08/2010
9'	Onzain	Loire moyenne	–	du 01/01/1994 au 31/12/2011		09/03 au 25/05/1994 ; 11/11/1994 au 01/01/1995 ; 29/11 au 17/12/1995 ; 27/07 au 31/12/1999 ; 08 au 15/11/2002 ; 05/09 au 01/10/2003 ; 03 au 09/06/2007 ; 11 au 15/12/2010

[2] Pour Orléans, un problème de mesure existe à la station Pont Royal depuis septembre 2011 (Franck Giroud, Dreal Centre, com. pers.), donc, à partir de cette date, les données de débit utilisées sont celles de la station Quai du Roi.

[3] Pour Blois, un problème de mesure existe en période d'étiage (Franck Giroud, Dreal Centre, com. pers.). Pour ces périodes, les données de la station d'Onzain sont utilisées.

Il convient maintenant d'aborder le problème principal de la fiabilité des données de débits en lien avec la situation géographique de la station et la qualité du jaugeage, notamment pour les données en période d'étiage.

Tout d'abord, les problèmes de situation des stations de jaugeage sont essentiellement liés à la proximité de confluences. Ils concernent les stations de Rigny-sur-Arroux et de Givry. La première est située sur un affluent modeste en comparaison de la Loire : lorsque les débits de la Loire sont importants, les eaux de la Loire ont tendance à bloquer l'écoulement de celles de l'Arroux. Ainsi, les données de débit de l'Arroux à la station de Rigny-sur-Arroux, juste en amont de la confluence avec la Loire, sont très perturbées en période de crues. Pour les débits de l'Arroux, la station d'Etang-sur-Arroux, plus en amont, a donc été préférée : les débits de l'Arroux y sont représentatifs aux dates où les données sont disponibles. Pour la station de Givry sur la Loire, située à quelques kilomètres en aval de la confluence entre la Loire et l'Allier, les écoulements de la Loire sont encore perturbés par cette confluence majeure (Franck Giroud, Dreal Centre, communication personnelle). Les données de cette station ont donc été abandonnées.

Ensuite, certaines stations de jaugeage ne sont pas représentatives, notamment en période d'étiage. C'est le cas des stations de Villerest, Orléans et Blois (Franck Giroud, Dreal Centre, communication personnelle), sur la Loire. La chronique de débits à Orléans ne présente pas beaucoup d'intérêt pour l'analyse des débits sur le long-terme, car elle ne débute qu'en 1964. On préférera les stations hydrométriques voisines de Gien et de Blois : leur chroniques sont plus longues et les données de débits à Gien sont réputées très fiables (Franck Giroud, Dreal Centre, communication personnelle). Pour les stations de Blois et de Villerest, la mesure des faibles débits y est également peu fiable. Cependant, pour ces deux stations, il existe à proximité une station plus récente qui permet de compléter la chronique en période d'étiage. Il s'agit de la station d'Onzain pour Blois et de Pont-de-Villerest pour Villerest (tab. 6). Ces substitutions, mêmes peu nombreuses, dans ces deux chroniques y intègrent forcément un certain biais qui reste cependant plus limité que l'utilisation de la chronique en l'état.

Pour synthétiser, les données des stations de jaugeage de Rigny-sur-Arroux, Givry et Orléans sont abandonnées**. Le travail principal de ce chapitre s'attache à l'analyse de la chronique de débits de la Loire à Blois.** Mais seront également utilisées dans ce chapitre, en complément, les chroniques de Vieille-Brioude pour l'Allier, Bas-en-Basset et Villerest en haute Loire, Etang-sur-Arroux située sur le principal affluent drainant le massif du Morvan, et Gien en Loire moyenne. Les chroniques de débit plus récentes seront utilisées dans les chapitres suivants, pour l'étude des confluences et de l'influence du Morvan notamment. Les données des stations des différents affluents du Morvan, ainsi que celles de Digoin, Gilly-sur-Loire et Nevers en Loire bourbonnaise y seront étudiées.

Les marges d'erreur à prendre en compte pour les mesures de débit sont habituellement de 2 à 3% (Dacharry, 1974). Les services producteurs de données (Dreal Centre) fournissent des informations sur la validation des données, synthétisées par station et par année en annexe I. On peut noter l'absence de validation des données les plus anciennes (stations de Blois et de Gien) ainsi qu'un nombre non négligeable d'années où les données demeurent provisoires, douteuses voir invalidées. De plus, étant donné les ajustements nécessaires de certaines chroniques par synthèse avec une station proche en période d'étiage ou par estimation de mesures manquantes isolées, il convient d'adopter **une marge d'erreur de 5%** pour l'étude des chroniques de débit retenues.

La Dreal Centre dispose également de données de « débits naturels reconstitués » à partir de 1989. Il s'agit de données calculées à partir des données de lâchers réalisés par les grands barrages. Ainsi, en prenant en compte les vitesses de propagation, les volumes d'eau correspondant aux lâchers journaliers réalisés à Villerest et à Naussac sont soustraits des données de débit moyen journalier à l'aval de ces barrages. Ces « débits naturels reconstitués » sont disponibles pour trois stations importantes : Vieille-Brioude sur l'Allier, Villerest en haute Loire et Gien en Loire moyenne. Ces données existent pour les périodes d'étiage et permettent ainsi d'étudier l'impact des barrages sur les débits.

Les données climatiques

Les données climatiques dont on dispose sont des données homogénéisées de hauteurs de précipitations et de températures. Les données fournies par Météo France ont donc été préalablement traitées afin, d'une part d'obtenir des chroniques de données continues et, d'autre part de minimiser les effets de changements de matériel de mesure ou de site, sur une longue série de données (Moisselin et al., 2002). Ici, la fiabilité des données ayant été préalablement optimisée, toutes les chroniques de données ont été retenues.

Les limites de cette étude liées aux données émergent de leur fréquence, de leur répartition géographique, ainsi que de la durée des chroniques. En effet, les chroniques disponibles sont pour les précipitations les cumuls mensuels et pour les températures, les températures maximum et minimum de chaque mois. L'information qu'elles contiennent reste donc limitée.

A nouveau, la répartition géographique des stations météorologiques et des chroniques de données homogénéisées est assez inégale au sein du bassin amont et moyen de la Loire (fig. 36 et tab. 7). Les données de précipitations sont denses en Loire bourbonnaise et dans le secteur aval du bassin de l'Allier, mais pratiquement inexistantes à l'amont des bassins de la Loire et de l'Allier. En ce qui concerne les données de températures, elles sont peu denses mais relativement mieux réparties au sein du bassin amont et moyen de la Loire.

La durée des chroniques de hauteurs de précipitation est également inégale. Sur les 24 chroniques de précipitations, une seule débute au 19ème siècle (celle de Châteauneuf-de-Randon, haut Allier), toutes les autres ne possèdent qu'une soixantaine d'années de données. Pour les données de températures, sur 9 chroniques, 3 commencent au 19ème siècle (Clermont-Ferrand, Chadrac et Andrézieux-Bouthéon), une dans les années 1920 (Charmeil), une autre dans les années 1930 (Les Estables) et enfin, les 4 dernières dans les années 1950 (Paray-sous-Briailles, Mont-Saint-Vincent, Marzy et Chambon-la-Forêt).

Enfin, on peut noter ici que certaines stations se détachent des autres par leur situation, et notamment par leur altitude. Pour les données de précipitations, seule la station de Châteauneuf-de-Randon, à l'amont du bassin de l'Allier, se situe à plus 1000 m d'altitude (1238 m). L'altitude des autres stations varie entre 175 m (station de Marzy) et 466 m (station de

Montmarault). De même, en ce qui concerne les données de températures, l'altitude d'une station dépasse les 1000 m (Les Estables à 1486 m), deux stations se situent entre 600 et 750 m d'altitude (Chadrac et Mont-Saint-Vincent), et l'altitude des six autres varie entre 143 et 400 m.

Malgré la répartition spatiale très inégale des stations météorologiques, dont les données sont homogénéisées, au sein des bassins de la Loire amont et de la Loire moyenne, on peut conclure qu'elles sont néanmoins représentatives de l'hétérogénéité climatique inhérente au bassin de la Loire amont.

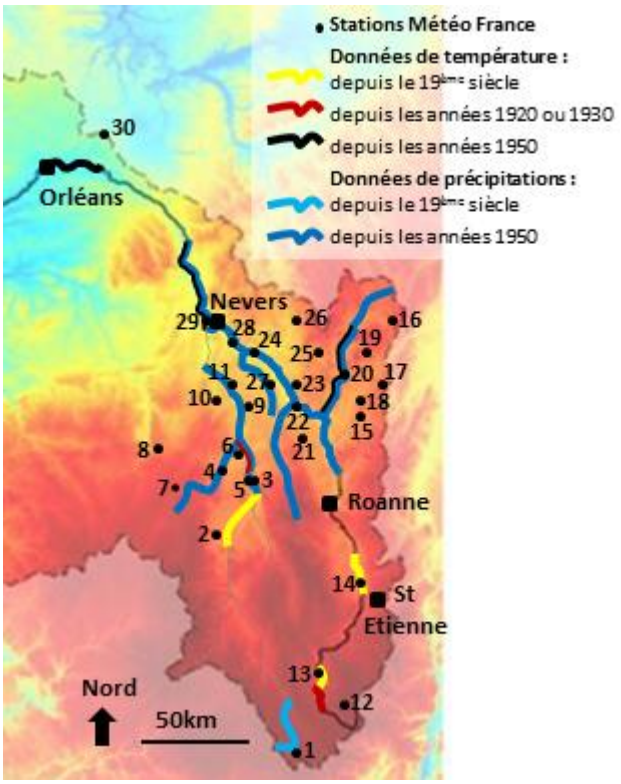


Fig. 36. *Situation des stations de Météo France dont les données ont été homogénéisées et tronçons de référence de ces stations sur la Loire et ses affluents (légende des numéros de stations météorologique : voir tab.7). Source fond de carte : Dreal Centre.*

Tab. 7. *Chroniques dont les données climatiques sont homogénéisées, au sein des bassins de la Loire amont et moyenne.*

		Commune	Type de poste	Paramètre	Début série	Fin série	Num. série	altitude (m)	lambx (hm)	lamby (hm)	Tronçon de référence
Allier	1	CHATEAUNEUF-DE-RANDON	4	RR	188201	200012	MRR048043001	1238	7064	19604	le Chapeauroux et ses affluents
	2	CLERMONT-FERRAND	0	TN	187801	200012	MTN063113001	331	6632	20877	l'Allier de l 'Auzon à la Dore
		CLERMONT-FERRAND	0	TX	187801	200012	MTX063113001	331	6632	20877	
	3	VICHY	4	RR	195401	201012	MRR003310001	260	6836	21254	l'Allier de la Dore au Beron
	4	BROUT-VERNET	4	RR	195401	201012	MRR003043001	315	6718	21323	l'Allier du Beron à la Sioule
	5	CHARMEIL	0	RR	195401	201012	MRR003060001	249	6820	21302	
		CHARMEIL	0	TN	192303	200012	MTN003060001	249	6820	21302	
		CHARMEIL	0	TX	192303	200012	MTX003060001	249	6820	21302	
	6	PARAY-SOUS-BRIAILLES	4	RR	195401	201012	MRR003204001	250	6772	21431	
		PARAY-SOUS-BRIAILLES	4	TN	195301	200912	MTN003204001	250	6772	21431	
		PARAY-SOUS-BRIAILLES	4	TX	195301	200912	MTX003204001	250	6772	21431	
	7	EBREUIL	4	RR	195401	201012	MRR003107001	310	6582	21245	la Sioule de la Viouze à l 'Allier
	8	MONTMARAULT	2	RR	195401	201012	MRR003186001	466	6474	21463	
	9	YZEURE	4	RR	195401	201012	MRR003321001	242	6779	21760	l'Allier de la Sioule à la Queune
	10	MARIGNY	4	RR	195401	201012	MRR003162001	240	6658	21763	l'Allier de la Queune à la Bieudre
	11	VILLENEUVE-SUR-ALLIER	4	RR	195401	201012	MRR003316001	223	6700	21855	
Haute Loire	12	LES ESTABLES	2	TN	193601	200012	MTN043091002	1486	7436	19918	la Loire de la Mejeanne à la Laussonne
		LES ESTABLES	2	TX	193601	200012	MTX043091002	1486	7436	19918	
	13	CHADRAC	2	TN	187903	200012	MTN043046001	714	7227	20072	la Loire de la Laussonne à la Sumene
		CHADRAC	2	TX	187903	200012	MTX043046001	714	7227	20072	
	14	ANDREZIEUX-BOUTHEON	0	TN	188101	200012	MTN042005001	400	7528	20611	la Loire du barrage de Grangent au Gand
		ANDREZIEUX-BOUTHEON	0	TX	188101	200012	MTX042005001	400	7528	20611	

LEGENDE PARAMETRES	
TN	Température minimale
TX	Température maximale
RR	Hauteurs des précipitations

		Commune	Type de poste	Paramètre	Début série	Fin série	Num. série	altitude (m)	lambx (hm)	lamby (hm)	Tronçon de référence
Loire bourbonnaise et Morvan	15	CHAROLLES	4	RR	195001	201012	MRR071106001	282	7494	21618	la Loire de la Teissonne à l'Arroux
	16	EPINAC	4	RR	195001	201012	MRR071190001	323	7643	22242	l'Arroux de sa source au Méchet
	17	MONT-SAINT-VINCENT	2	TN	195301	200912	MTN071320001	602	7638	21831	l'Arroux du Méchet à la Loire
		MONT-SAINT-VINCENT	2	TX	195301	200912	MTX071320001	602	7638	21831	
	18	PALINGES	4	RR	195001	201012	MRR071340002	281	7450	21745	
	19	SAINT-SYMPHORIEN-DE-MARMAGNE	4	RR	195001	201012	MRR071482001	360	7525	22078	
	20	TOULON-SUR-ARROUX	4	RR	195001	201012	MRR071542001	269	7378	21894	
	21	LE DONJON	4	RR	195401	201012	MRR003103001	325	7107	21513	la Loire de l'Arroux à la Besbre
	22	DIOU	4	RR	195401	201012	MRR003100001	220	7049	21724	la Besbre et ses affluents
	23	BOURBON-LANCY	4	RR	195001	201012	MRR071047001	260	7105	21836	la Loire de la Besbre a la Cressonne
	24	DECIZE	2	RR	195001	201012	MRR058095001	192	6853	22027	la Loire de la Cressonne à l'Acolin
	25	LUZY	4	RR	195001	201012	MRR058149001	300	7240	22021	
	26	ONLAY	4	RR	195001	201012	MRR058199001	375	7197	22214	
	27	CHEVAGNES	4	RR	195401	201012	MRR003074001	229	6941	21819	l'Acolin et ses affluents
	28	LUTHENAY-UXELOUP	4	RR	195001	201012	MRR058148001	206	6722	22043	la Loire de l'Acolin à l 'Allier
Loire moyenne	29	MARZY	0	RR	195001	201012	MRR058160001	175	6590	22223	la Loire de l'Allier au Nohain
		MARZY	0	TN	195301	200912	MTN058160001	175	6590	22223	
		MARZY	0	TX	195301	200912	MTX058160001	175	6590	22223	
	30	CHAMBON-LA-FORET	4	TN	195401	200912	MTN045069001	143	5943	23362	la Loire de la Bonnée au Loiret
		CHAMBON-LA-FORET	4	TX	195401	200912	MTX045069001	143	5943	23362	

LEGENDE TYPES DE POSTES	
0	station synoptique, automatique ou avec personnel Météo-France, temps réel en diffusion et expertise
2	station automatique, temps réel en diffusion et expertise
4	station climatologique (bénévole), expertise temps différé

3.1.2. Méthodes

Comme on l'a vu précédemment, les données tant climatiques qu'hydrologiques comportent de nombreuses limites. Il s'agit ici de présenter les méthodes utilisées pour améliorer la qualité des données avant l'analyse des tendances.

Les données de précipitations

L'analyse de données climatiques de la zone d'étude n'est présentée que pour rechercher les causes d'éventuelles évolutions dans les débits de la Loire.

Cependant, le volume des données de précipitations nécessite, pour une analyse plus rapide, un certain travail de synthèse. Ainsi, il est proposé ici de travailler par secteur géographique en y moyennant les données des différentes stations. Cela implique une perte d'informations mais compense les possibles spécificités locales des sites des stations météorologiques. Pour les précipitations, trois secteurs ont été considérés : l'Allier, le Morvan et la Loire bourbonnaise (tab. 8). La station de Châteauneuf-de-Randon s'individualise car elle est éloignée des autres, à l'amont du bassin de l'Allier. Il est intéressant de travailler indépendamment les données de cette station, alors qu'aucune donnée n'est disponible pour la haute Loire. Il faut également noter qu'aucune chronique de hauteurs de précipitation n'a fait l'objet d'un travail d'homogénéisation en Loire moyenne en amont de Blois.

Au sein de ces trois groupes, les stations présentent des données qui varient conjointement et révèlent donc une certaine homogénéité selon les secteurs géographiques (fig. 37), bien que les cumuls annuels de précipitations présentent des ordres de grandeurs sensiblement différents, surtout en Loire bourbonnaise. Ainsi, on peut supposer que pour les trois secteurs, on intègre la diversité de la zone considérée sans lui donner trop de poids. Les différentes stations de la zone du Morvan présentent des variations plus homogènes que les deux autres secteurs.

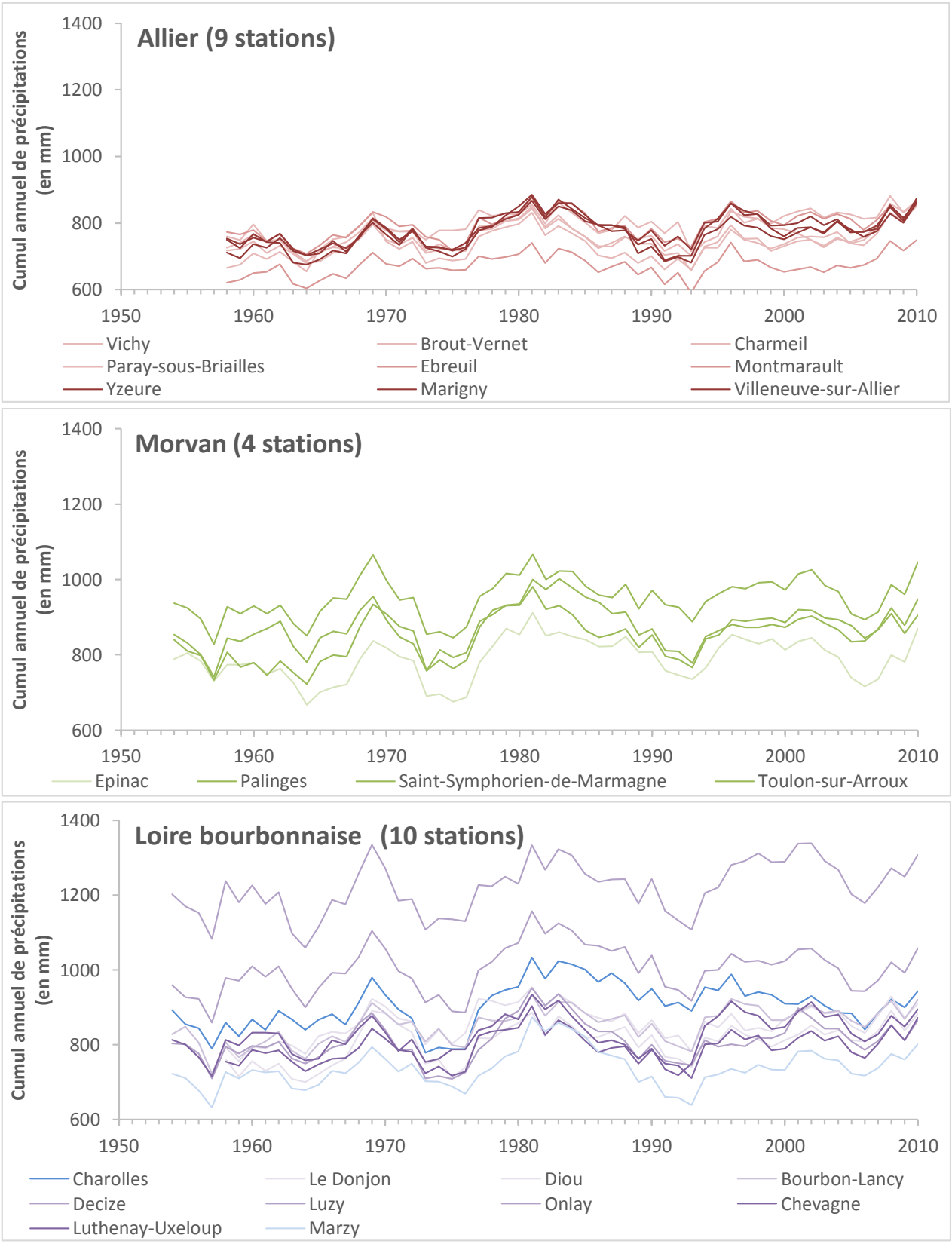


Fig. 37. *Moyennes mobiles par période de 5 ans des cumuls annuels des précipitations (en mm) pour chaque station, répartition en trois secteurs géographiques.*

Secteurs	Années disponibles	Nombre de stations	Nom des stations
Allier amont	1882-2000	1	Châteauneuf-de-Randon
Allier	1954-2010	9	Vichy, Brout-Vernet, Charmeil, Paray-sous-Briailles, Ebreuil, Montmarault, Yzeure, Marigny, Villeneuve-sur-Allier
Loire amont	_	0	_
Morvan	1950-2010	4	Epinac, Palinges, Saint-Symphorien-de-Marmagne, Toulon-sur-Arroux
Loire bourbonnaise	1954-2010	10	Charolles, Le Donjon, Diou, Bourbon-Lancy, Decize, Luzy, Onlay, Chevagnes, Luthenay-Uxeloup, Marzy
Loire moyenne	_	0	_

Tab. 8. *Synthèse des données homogénéisées de hauteurs de précipitations disponibles au sein des bassins de la Loire amont et moyenne.*

Les données de températures

Pour les données de températures, le nombre de stations étant moins important, il est plus facile de travailler à partir de l'ensemble des données et de différencier chaque station, sans regrouper le traitement des données par zone géographique (tab. 9).

Secteurs	Années disponibles	Nombre de stations	Nom des stations
Allier amont	_	0	_
Allier	De 1878, 1922 et 1953 à 2000	3	Clermont-Ferrand, Charmeil, Paray-sous-Briailles
Loire amont	1884-2000	3	Les Estables, Chadrac, Andrézieux-Bouthéon
Morvan	1953-2009	1	Mont-Saint-Vincent
Loire bourbonnaise	–	0	_
Loire moyenne	1954-2009	2	Marzy, Chambon-la-forêt

Tab. 9. *Synthèse des données homogénéisées de températures disponibles au sein des bassins de la Loire amont et moyenne.*

Les chroniques de débits

En ce qui concerne les données de débit, on a vu, au moment de la présentation des données disponibles, le travail en amont sur les chroniques qui a été réalisé. Ici, il s'agit de présenter les méthodes utilisées afin de caractériser le fonctionnement hydrologique moyen de la Loire moyenne. Cette méthode s'est inspirée des travaux de Bard et *al*. (2012) sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin. Différents indices statistiques ont été calculés à l'échelle annuelle, pour mieux caractériser le régime de la Loire, ses basses-eaux, ses hautes-eaux ainsi que ses débits à pleins bords. Ces indices ont été calculés pour l'ensemble des stations, bien que l'essentiel des résultats présentés ici soient ceux de la station de Blois. On verra néanmoins que cela a permis d'avoir recours aux données de différentes stations en cas d'incohérence ou de nécessité de confirmation des résultats.

Une année hydrologique unique n'a pas été définie pour l'ensemble du travail, mais adaptée en fonction du but recherché pour chaque indice. Il s'agit donc de définir la césure entre deux années hydrologiques pendant la saison hydrologique inverse de celle qui fait l'objet de l'indice, afin de conserver la cohérence de cette dernière. Ainsi, pour les indices qui décrivent les basses eaux, l'année hydrologique choisie va de mars à février, alors que pour les indices sur les hautes-eaux, l'année hydrologique va de septembre à août.

Pour caractériser **le régime des cours d'eau**, on utilisera **3 indices** :

1) Module, c'est à dire la moyenne des débits journaliers moyens ou QJM (l'année de référence est l'année civile),
2) VCN3, c'est à dire le QJM minimal sur 3 jours consécutifs (l'année hydrologique considérée s'étend de mars à février de l'année suivante),
3) QJM maximum (l'année hydrologique considérée s'étend de septembre à août de l'année suivante).

Par cette caractérisation du régime, existent ici les deux seuls indices révélant les extrêmes hydrologiques des cours d'eau. L'objectif étant d'étudier leur fonctionnement hydrologique moyen, ces deux indices (VCN3 et QJM maximum) sont ici essentiels à la caractérisation de la

variabilité interannuelle des débits, en tant que caractéristique majeure de l'hydrologie du bassin de la Loire moyenne. N'étant donc pas question de travailler sur les crues ou les étiages, en tant qu'évènements hydrologiques exceptionnels, les indices les caractérisant traditionnellement, à l'image du Débit Caractéristique d'Etiage (DCE, ou VCN10), n'ont pas été retenus ici.

Avec une année hydrologique considérée de mars à février de l'année suivante, on caractérisera **les basses-eaux avec 5 indices**. Au préalable, il faut préciser la définition des basses-eaux retenue pour ce travail. **Les basses-eaux sont définies ici comme les jours où les débits baissent sous le débit de fréquence 0,2** (calculé sur l'ensemble de la chronique). Le seuil de débit a été choisi de façon à ce que, au moins un épisode de basses eaux se produise par an (la fréquence choisie pourrait varier ; Bard et *al*., 2012).

4) Durée des basses-eaux, c'est-à-dire nombre de jours où le débit est inférieur au débit de fréquence 0,2,
5) Déficit de volume, c'est-à-dire volume annuel total manquant par rapport au seuil de débit de fréquence 0,2,
6) Date de début des basses-eaux (date à laquelle le déficit de volume atteint 10% du déficit de volume annuel total),
7) Date de milieu des basses-eaux (date à laquelle le déficit de volume atteint 50% du déficit de volume annuel total),
8) Date de fin des basses-eaux (date à laquelle le déficit de volume atteint 90% du déficit de volume annuel total).

Avec une année hydrologique considérée de septembre à août de l'année suivante, les **hautes-eaux** sont caractérisées par **5 indices**. **La définition des hautes-eaux retenues est la période où les débits passent au-dessus du débit de fréquence 0,8** (calculé sur l'ensemble de la chronique). Le seuil de débit a été choisi de façon à ce que, au moins un épisode de hautes eaux se produise par an (la fréquence choisie pourrait varier ; Bard et *al*., 2012).

9) Durée des hautes-eaux, c'est-à-dire nombre de jours où le débit est supérieur au débit-seuil de fréquence 0,8,

10) Excédent de volume, c'est-à-dire volume excédentaire annuel total par rapport au seuil de débit de fréquence 0,8,
11) Date de début de hautes-eaux (date à laquelle l'excédent de volume atteint 10% de l'excédent de volume annuel total),
12) Date de milieu des hautes-eaux (date à laquelle l'excédent de volume atteint 50% de l'excédent de volume annuel total),
13) Date de fin de hautes-eaux (date à laquelle l'excédent de volume atteint 90% de l'excédent de volume annuel total).

La définition de ces indices révèle donc une réflexion sur les définitions des notions classiques de basses et de hautes-eaux, qui permettent la caractérisation de l'hydrologie d'un cours d'eau. Elles sont définies habituellement par rapport au module : les hautes-eaux sont la période où les débits sont supérieurs au module et les basses-eaux où ils lui sont inférieurs (Lang Delus, 2011). Adopter une définition plus restrictive de ces deux périodes, les réduisant parfois à quelques jours par an, a permis une approche originale de l'hydrologie de la Loire moyenne. En effet, les définitions retenues ici permettent une étude des débits moyens, pouvant être qualifiés de forts ou de faibles, tout en étant des phénomènes plus précis que les définitions classiques. On peut noter que les processus de tarissement, relevant de phénomènes exceptionnels, n'étant pas ici l'objet de l'étude, il s'agit bien d'un travail sur les basses-eaux et non sur les étiages (Lang Delus, 2011).

Dans le cadre de cette étude, il a donc été choisi de définir ces deux périodes par des seuils de fréquence. Ainsi, au sein du bassin ligérien, la fréquence 0,2 correspond au débit le plus faible permettant de définir au moins une période de basses-eaux par année hydrologique, pendant laquelle le débit est inférieur à ce seuil. De même, au sein du bassin ligérien, la fréquence 0,8 correspond au débit le plus important permettant de définir au moins une période de hautes-eaux par année hydrologique, pendant laquelle le débit est supérieur à ce seuil. Il faut remarquer que les seuils de fréquence choisis ne correspondent pas à ceux retenus dans l'étude des régimes hydrologiques de l'Arc Alpin (Bard et *al.*, 2012). Les seuils de fréquence ont été adaptés au bassin ligérien, dont les caractéristiques du régime hydrologique diffèrent fondamentalement de celles des cours d'eau de l'Arc Alpin, ce qui justifie l'adaptation de ces seuils de fréquence.

La caractérisation des **débits à pleins bords** est étudiée sur la base de **4 indices**. La notion de débits à pleins bords provient de la géomorphologie fluviale. Pour la Loire moyenne, il a été défini par Gautier et *al*. (2001) à environ 1000 $m^3.s^{-1}$. Correspondant à des crues moyennes, il s'agit donc d'un débit-seuil dans les processus de mobilisation de la charge sédimentaire du lit mineur.

14) Nombre de jours par an où le débit moyen journalier de la Loire à Blois est supérieur à 1000 $m^3.s^{-1}$,
15) Nombre de jours où le débit moyen journalier de la Loire à Blois est supérieur à 1000 $m^3.s^{-1}$ pour chaque mois de l'année,
16) Nombre de jours où le débit moyen journalier de la Loire à Blois est supérieur à 1000 $m^3.s^{-1}$ entre les mois de décembre à mars de l'année suivante,
17) Nombre de jours où le débit moyen journalier de la Loire à Blois est supérieur à 1000 $m^3.s^{-1}$ entre les mois de juillet et de septembre.

Enfin, après le calcul des indices, les données ainsi obtenues ont fait l'objet de caractérisation statistique, de l'ensemble de la chronique, et de périodes de trente ans communes (1863-1891 ; 1892-1921 ; 1922-1951 ; 1952-1981 ; 1982-2011), grâce aux : moyennes, médianes, quartiles (le 1^{er} quartile représente la donnée sous laquelle se situe les 25% des données aux valeurs les plus faibles, de même pour le $3^{ème}$ quartile avec les 25% des données aux valeurs les plus fortes), écarts interquartiles (la différence entre le $3^{ème}$ quartile et le 1^{er} quartile ; il représente donc l'intervalle entre lequel se situent les 50% des valeurs médianes), maxima et minima, représentations graphiques de ces caractéristiques grâce à des boîtes à moustaches (Tukey, 1997) ou encore la pente de la droite de régression linéaire d'une série de données en fonction du temps, utilisée pour caractériser leur tendance.

Ainsi, la recherche d'évolutions dans les débits de la Loire moyenne est basée sur l'étude de la chronique de débits à Blois de près d'un siècle et demi. Les indices statistiques utilisés afin de détailler cette chronique ont été définis en fonction des objectifs précis de cette étude (accent sur le fonctionnement moyen du bassin et non sur ses extrêmes) et adaptés aux gammes de

débits de la Loire. De plus, les données des autres stations hydrométriques, les « débits naturels reconstitués » et les données climatiques permettent de compléter l'analyse de cette chronique principale.

3.2. Impacts de la politique de soutien des débits d'étiage et de la construction de grands barrages

Avant d'analyser les chroniques de débits, il convient de présenter les deux facteurs identifiables et quantifiables qui pourraient contrôler des évolutions des débits de la Loire moyenne. Il s'agit d'une part de la politique de soutien des étiages qui a été mise en place dans les années 1980, et d'autre part, des évolutions du climat (voir 3.3). En effet, cette présentation permettra de prendre les précautions nécessaires face aux résultats et de mettre en lumière rapidement les causes d'évolutions dans la mesure où elles relèvent de ces deux facteurs.

Tout d'abord, avec la politique étatique de développement du parc nucléaire français, quatre centrales nucléaires (fig. 38) ont été construites le long du fleuve, en Loire moyenne (Belleville-sur-Loire dans le Cher, Dampierre-en-Burly dans le Loiret, Saint-Laurent-des-Eaux dans le Loir-et-Cher et Chinon en Indre-et-Loire). Ces centrales ont été mises en service dans les années 1980 (respectivement 1988-1989, 1980-1981, 1984-1988 et 1983). Or, le bon fonctionnement des réacteurs qui les composent nécessite des apports réguliers et garantis en eau, afin d'assurer le refroidissement des réacteurs. Ces apports d'eau doivent donc être absolument garantis sous peine de graves risques de surchauffe des réacteurs qui menaceraient les populations.

Afin de garantir ces apports en eau, en toute saison, en Loire moyenne, alors qu'elle est connue pour ses étiages sévères, deux grands barrages (Naussac et Villerest, fig. 38) ont été préalablement construits en Loire amont. Leur principal objectif est donc de soutenir les débits d'étiage de la Loire moyenne.



Fig. 38. *Situation des centrales nucléaires implantées le long du cours de la Loire moyenne et des barrages de Naussac et Villerest en Loire amont. Source fond de carte : Dreal Centre.*

3.2.1. Politique de soutien des débits d'étiage et gestion des barrages

Prélèvements d'eau par les centrales nucléaires

Ainsi, « le débit d'eau prélevée pour une unité de production varie de 4,6 $m^3.s^{-1}$ pour des centrales implantées sur de grands fleuves (Rhône) à 2 $m^3.s^{-1}$ pour la centrale de Civaux sur la Vienne » (EDF, Centrales nucléaires et environnement, 2013, p. 90).

Les données de prélèvements d'eau de chaque centrale ne sont pas disponibles. Néanmoins, des données plus détaillés sont fournis par EDF pour la centrale de Nogent-sur-Seine, qui présente des caractéristiques similaires à la centrale de Belleville-sur-Loire : puissance identique (2 unités de production de 1300 MWe), un même système de refroidissement en circuit

fermé et les mêmes années de mise en service des réacteurs. Les données de prélèvements d'eau de surface de la centrale de Nogent-sur-Seine sont donc indiquées ici pour donner un ordre de grandeur des prélèvements réalisés en Loire moyenne par la centrale de Belleville-sur-Loire.

Pour la centrale de Nogent-sur-Seine, le débit maximal instantané prélevé est de 7 $m^3.s^{-1}$ pour un volume annuel maximal de 149 millions de m^3. Mais il est à noter que « sur les installations refroidies en circuits fermés en bord de rivière, 20 à 40% de l'eau prélevée s'évaporent dans les aéroréfrigérants » (EDF, Centrales nucléaires et environnement, 2013, p. 163).

L'eau rejetée par les centrales nucléaires est plus chaude. Des normes règlementent cette température ainsi qu'un débit minimum du cours d'eau, permettant une dilution des rejets, afin de contrôler l'augmentation de la température de l'eau du cours d'eau après rejet. Pour donner un ordre de grandeur, le réchauffement moyen des eaux de la Loire est 0,18°C après la centrale de Dampierre. Son maximum atteint 0,85°C. La limite du réchauffement de l'eau, entre l'amont et l'aval du site, en valeurs moyennes journalières pour les centrales de la Loire, indiquée par la loi, est de 1°C, et peut être portée à 1,5°C si le débit de la Loire est inférieur à 100 $m^3.s^{-1}$ et si la température de l'eau à l'amont est inférieure à 15°C (EDF, Centrales nucléaires et environnement, 2013, p. 156).

Débit réservé en Loire moyenne

En période d'étiage, le débit réservé, c'est-à-dire le débit minimal qu'EDF doit garantir en aval de ses installations nucléaires, est donc assuré par une réduction de la consommation d'eau et/ou par des lâchers de ses barrages en amont.

Plus précisément, la définition du débit réservé est la suivante :

- débit réservé = 1/10ème au minimum du débit annuel (module) moyen interannuel (MMI) si le MMI est < à 80 $m^3.s^{-1}$,
- débit réservé = 1/20ème au minimum du MMI si le MMI est > à 80 $m^3.s^{-1}$.

Pour les centrales de Belleville et Dampierre, le module de la Loire à Gien étant de 328 $m^3.s^{-1}$, le débit réservé est de l'ordre de 65 $m^3.s^{-1}$.

Or, la Loire est bien connue pour ces débits d'étiage extrêmement bas certaines années (débit minimum connu 9 $m^3.s^{-1}$ à Tours en 1949). Pour garantir au maximum ces débits d'étiage, deux barrages de classe A[1] ont été réalisé à l'amont des bassins de la Loire et de l'Allier à la fin des années 1970 (tab. 11). Ainsi, des débits d'objectif ont été défini pour l'Allier et la Loire afin d'ajuster la gestion des barrages de Naussac et Villerest pour garantir ces objectifs (tab. 10). Ce débit seuil est de 60 $m^3.s^{-1}$ à Gien.

L'un des étiages les plus sévères de ces dernières années est celui de l'été 2003. En effet, le débit journalier moyen a atteint 50 $m^3.s^{-1}$ à Gien alors que sans soutien par les lâchers des barrages, la Dreal Centre estime qu'il serait passé sous la barre des 10 $m^3.s^{-1}$.

Allier			Haute Loire	Loire moyenne
Poutès	Vieille-Brioude	Vic-le-Comte	Villerest (pied d'ouvrage)	Gien
5,5 $m^3.s^{-1}$	6 $m^3.s^{-1}$	10 à 14 $m^3.s^{-1}$	12 $m^3.s^{-1}$	60 $m^3.s^{-1}$

Tab. 10. *Objectifs de débit minimum d'étiage pour l'Allier et la Loire jusqu'à Gien. Source données : Dreal Centre.*

	Haut Allier	Haute Loire
	Naussac	Villerest
Classe	A	A
Hauteur du barrage	50 m	59 m
Volume du réservoir	190 millions m^3	128 millions m^3
Objectifs	soutien d'étiage	hydroélectrique, écrêteur de crues, soutien d'étiage
Début des travaux	1976	1978
Fin des travaux	1980	1982
Années de remplissage	1981 - 1983	1982 - 1984
Date de mise en service	1983	1985
Commune	Naussac	Villerest
Département	Lozère (48)	Loire (42)
Coordonnées	44° 43′ 22″ Nord	45° 59′ 10″ Nord
	3° 50′ 02″ Est	4° 02′ 54″ Est

Tab. 11. *Principales caractéristiques des barrages de Naussac et de Villerest. Source données : Dreal Centre.*

[1] Les barrages de classe A sont caractérisés par leur hauteur au-dessus du terrain « naturel » supérieure ou égale à 20 m.

Gestion des retenues des barrages de Naussac et Villerest

La gestion de ces deux barrages diffère à cause de leur localisation et de leur mode d'approvisionnement. En effet, le barrage de Villerest est situé sur le cours de la haute Loire. Son remplissage est plus maîtrisable, car des apports naturels importants existent. Le barrage de Naussac est, lui, situé, non pas sur l'Allier, mais sur un de ses affluents le Donozau (bassin versant de 53 km²). Les apports de cet affluent n'étant pas suffisants, le barrage collecte également les eaux du Chapeauroux (bassin versant de 400 km²), un autre affluent de l'Allier. Enfin, en 1997, une dérivation des eaux de l'Allier a été mise en service pour assurer le remplissage de la retenue en période hivernale. C'est pourquoi les niveaux de la retenue de Naussac sont plus irréguliers que ceux de Villerest (fig. 39 et 40).

La gestion de ces deux retenues est dictée par deux objectifs principaux : le soutien des débits de la Loire et de l'Allier en période d'étiage, ainsi que l'écrêtement des crues automnales de type cévenol, qui peuvent être très violentes à l'amont de ces deux bassins. En période hivernale, les retenues sont donc remplies afin de pouvoir soutenir les débits estivaux. Puis en septembre, des lâchers sont effectués afin de « faire de la place » pour retenir d'éventuels pics de crues à l'automne (ce qui a été le cas lors de la crue de décembre 2003). Ce fonctionnement type est plus marqué à Villerest qu'à Naussac étant donné les conditions de gestion plus faciles liées aux apports que collecte ce barrage sur la haute Loire (fig. 41).

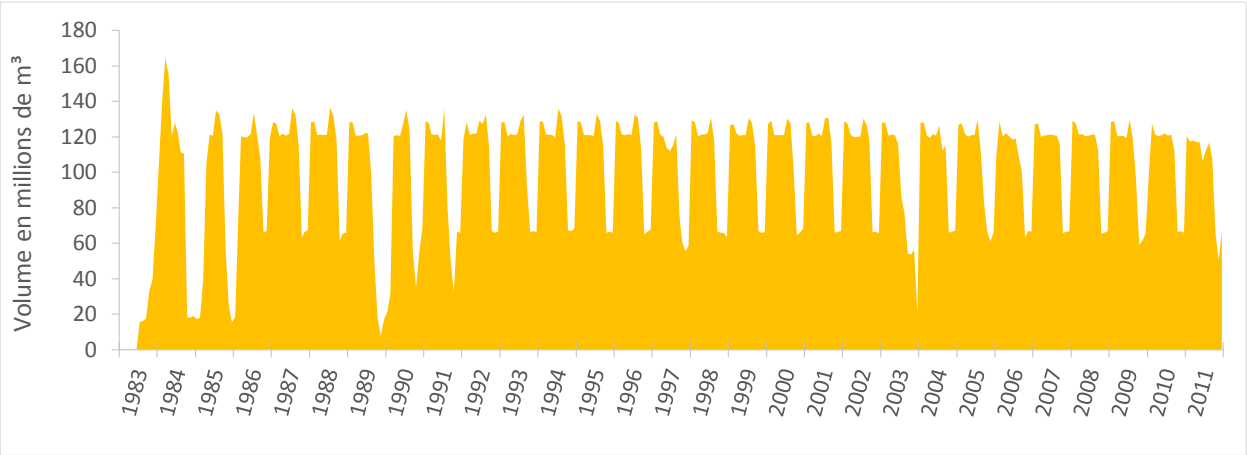


Fig. 39. *Evolution du volume de la retenue de Villerest depuis 1983. Graphique établi avec les valeurs de chaque premier jour du mois. Source données : Dreal Centre.*

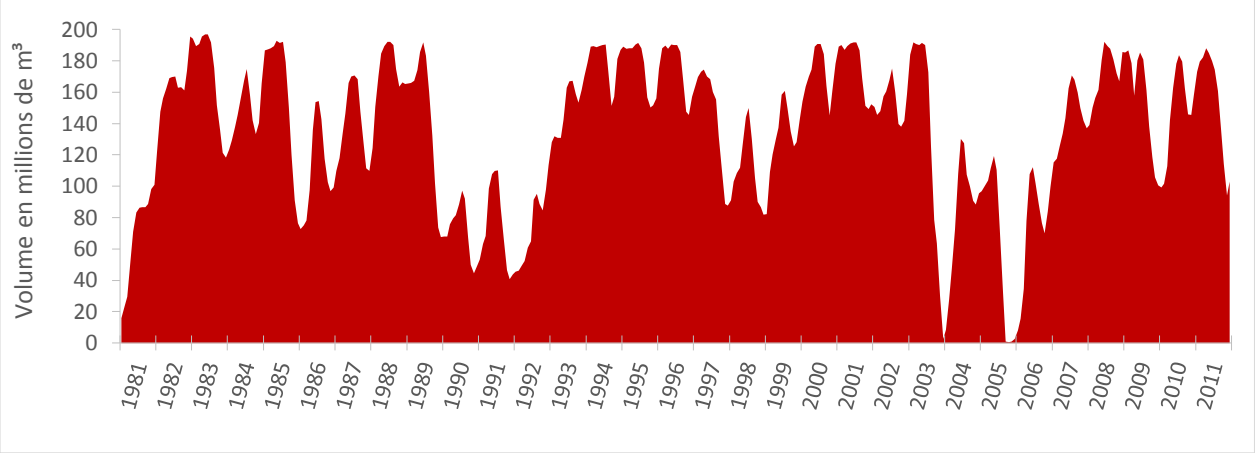


Fig. 40. *Evolution du volume de la retenue de Naussac depuis 1981. Graphique établi avec les valeurs de chaque premier jour du mois. Source données : Dreal Centre.*

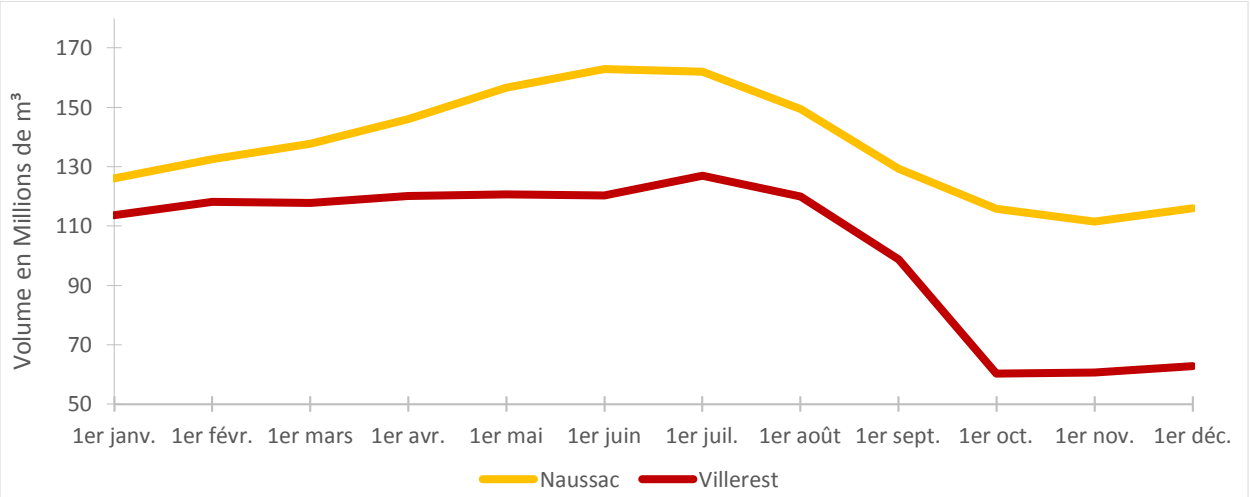


Fig. 41. *Moyenne interannuelle du volume des retenues de Naussac (1983-2011) et de Villerest (1985-2011). Graphique établi avec les valeurs de chaque premier jour du mois. Source données : Dreal Centre.*

3.2.2. Impacts des grands barrages sur les débits de la Loire

Dans les objectifs de gestion des barrages, sont présents le soutien d'étiage et l'écrêtement de crues. Ici seront étudiées exclusivement les conséquences de la politique de soutien d'étiage.

En effet, étant donnée la surface des bassins, le barrage de Naussac n'est pas reconnu comme un barrage écrêteur de crues. Le barrage de Villerest, quant à lui, n'a joué un rôle significatif d'écrêteur de crue que pour la crue de décembre 2003. La retenue du pic de crue par le barrage de Villerest a permis un abaissement de la ligne d'eau, correspondant à ce pic de crue, de 0,90 m à Nevers, faisant ainsi passer la ligne d'eau de 4,70 m (estimée) à 3,80 m, toujours à Nevers (Etude EGRIAN, 2008). Ceci n'est pas du tout négligeable. Cependant, cet effet a seulement été permis par un concours de circonstances. Le barrage de Villerest étant en cours de maintenance, le niveau de la retenue, anormalement basse, a donc permis au barrage de jouer un véritable rôle d'écrêteur de crue, ce qui n'est pas du tout le cas en période de fonctionnement normal lorsqu'une crue présente de tels volumes.

La recherche des impacts de ces deux grands barrages sur les débits de la Loire se concentre donc sur la période d'étiage. Sont utilisées les stations de jaugeage de Villerest, Vieille-Brioude et Gien, car la Dreal Centre calcule pour ses stations les « débits naturels reconstitués » en fonction des lâchers d'eau des barrages (fig. 42). La station hydrométrique de Bas-en-Basset, située sur la Loire en amont du barrage de Villerest, permettra de comparer ces trois premières stations à une qui ne subit pas l'influence des barrages.

De plus, afin d'évaluer les impacts des barrages, des périodes avant et après la construction et la mise en service ont été définies. Les travaux ayant commencé respectivement pour Naussac et Villerest, en 1976 et en 1978 et les dates de mise en service étant de même 1983 et 1985, les deux périodes retenues sont du début des chroniques jusque 1975 puis de 1985 à 2011.

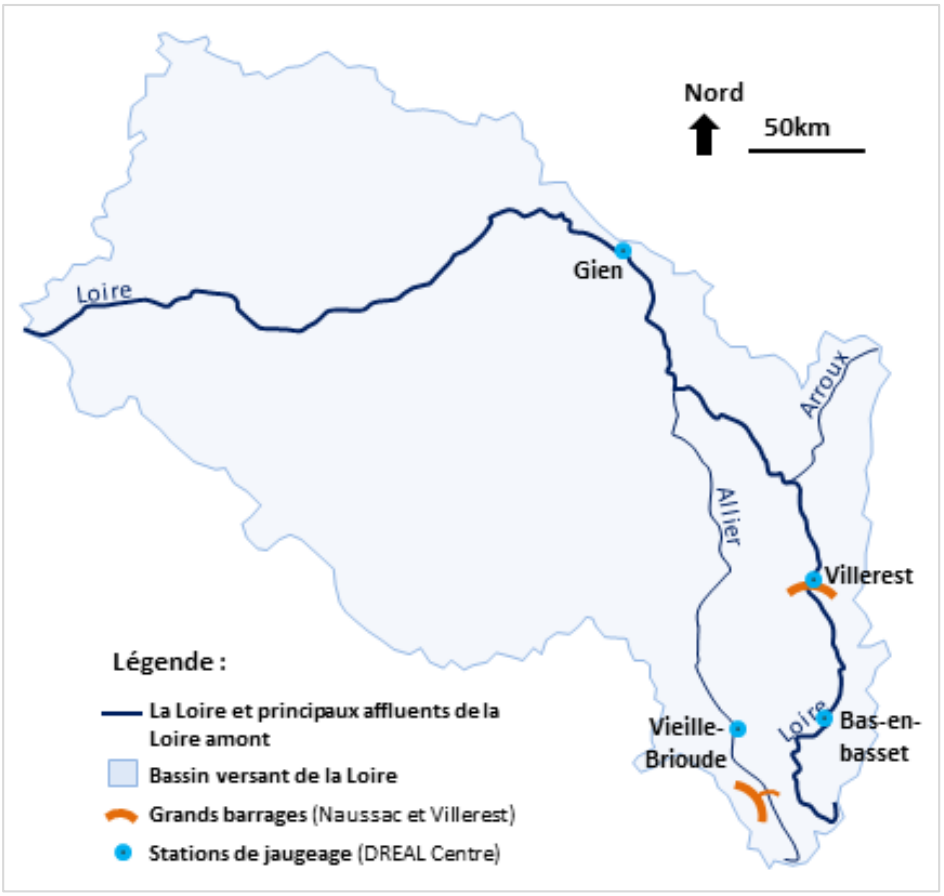


Fig. 42. *Situation des deux grands barrages du bassin de la Loire et des stations de jaugeage utilisées. Source du fond de carte : Dreal Centre.*

Impacts des barrages sur les débits moyens annuels

Tout d'abord, il convient de vérifier que les débits moyens annuels ne sont pas affectés par les barrages. En effet, en théorie, la moyenne annuelle des débits de la Loire devrait rester inchangée, les volumes d'eaux retenus l'hiver par les barrages étant relâchés en été. Ce fonctionnement parait plausible pour le barrage de Villerest. Mais pour Naussac, qui connaît des difficultés de remplissage, le bilan est sûrement plus complexe, avec une retenue l'année n et un lâcher l'année n + x. Cependant, étant donné que l'on ne possède que 26 années de données avec l'influence des barrages, les conclusions seront ici à nuancer au vue de la variabilité interannuelle des débits de la Loire, décrite plus loin, qui peut induire des différences entre les périodes qui ne sont pas forcément liées aux barrages.

Entre les deux périodes (avant 1976 et 1985-2011), c'est-à-dire avant et après la mise en place des barrages, on observe une tendance à la baisse des valeurs moyennes (-15% à Vieille-Brioude, -10% à Villerest et -2% à Gien) et médianes (-18% à Vieille-Brioude et -12% à Villerest) pour les stations de Villerest et de Vieille-Brioude que l'on ne retrouve pas à Gien (tab. 12). Cependant, en représentant graphiquement ces trois chroniques, il n'est pas possible de définir de rupture dans les chroniques en lien avec la construction des deux barrages (fig. 43).

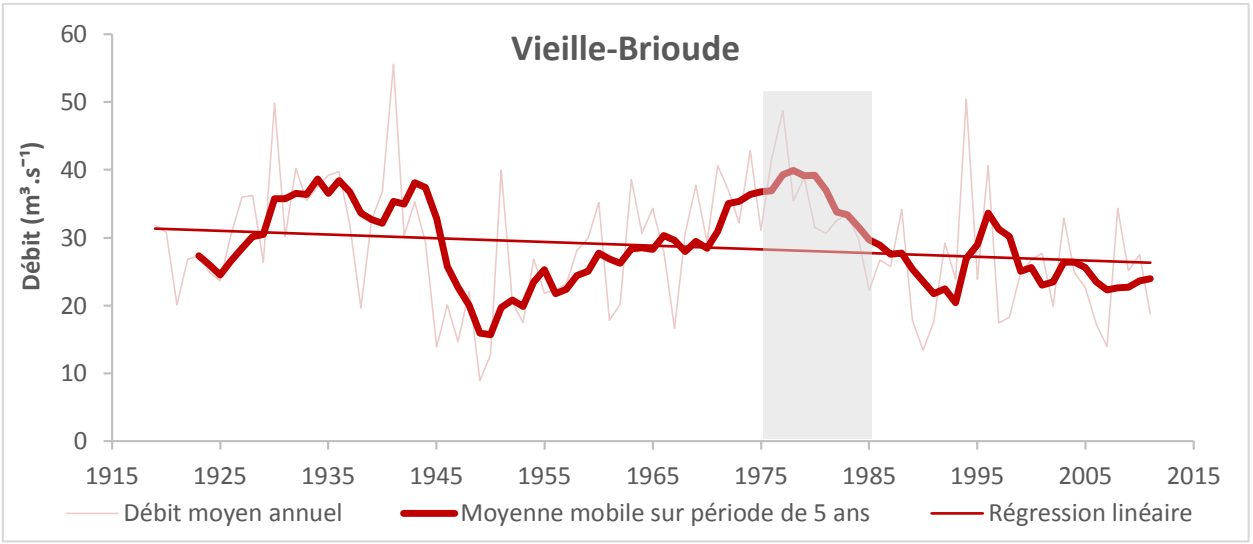
	Vieille-Brioude		Villerest		Gien	
	1919-1975	1985-2011	1920-1975	1985-2011	1936-1975	1985-2011
Moyenne	29,5	25,1	68,0	61,2	317,4	310,0
Ecart-type	9,2	8,3	18,8	20,0	100,3	86,6
1er quartile	22,3	18,6	53,9	43,8	239,1	264,9
Minimum	8,9	13,4	28,1	31,4	114,5	178,0
Médiane	30,3	24,8	69,7	61,3	289,6	311,2
Maximum	55,6	50,5	111,6	110,7	512,3	520,6
3ème quartile	36,0	27,6	79,6	73,8	404,8	357,1

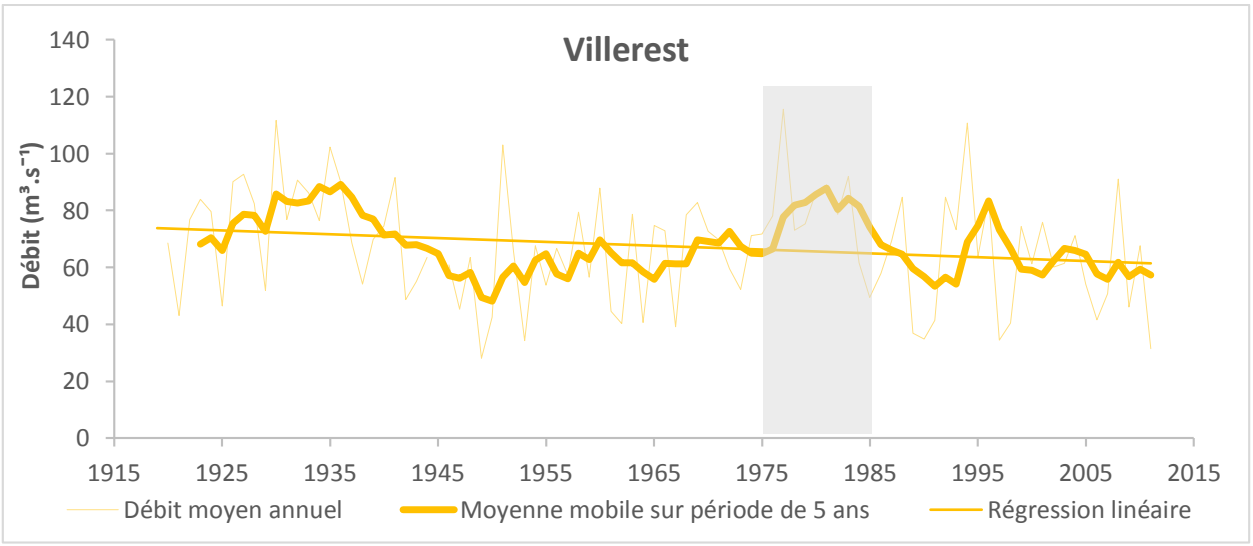
Tab. 12. *Caractérisation des chroniques de débits moyens annuels pour les stations de Vieille-Brioude (Allier), de Villerest (haute Loire) et de Gien (Loire moyenne) en fonction des dates de travaux et de mise en service des barrages de Naussac et de Villerest. Source données de débits : Dreal Centre.*

Pour statuer sur l'origine de la baisse des débits moyens annuels, une analyse des données de hauteurs de précipitations doit être faite. D'après le peu de données disponibles, les cumuls de précipitations ont plutôt tendance à augmenter (environ 7%) entre avant et après la mise en service des barrages (tab. 13).

	Châteauneuf-de-Randon		Charolles	
	1919-1975	1985-2000	1950-1975	1985-2010
Moyenne	819,0	881,7	865,9	923,1
Ecart-type	160,7	193,9	154,6	110,2
1er quartile	721,3	783,0	760,6	842,2
Médiane	833,1	882,2	895,5	956,8
3ème quartile	930,9	1001,0	956,8	997,2

Tab. 13. *Caractérisation de deux périodes des chroniques de cumuls annuels de précipitations pour les stations météorologiques de Châteauneuf-de-Randon (haut Allier) et de Charolles (Loire bourbonnaise). Source données de précipitations : Météo France.*





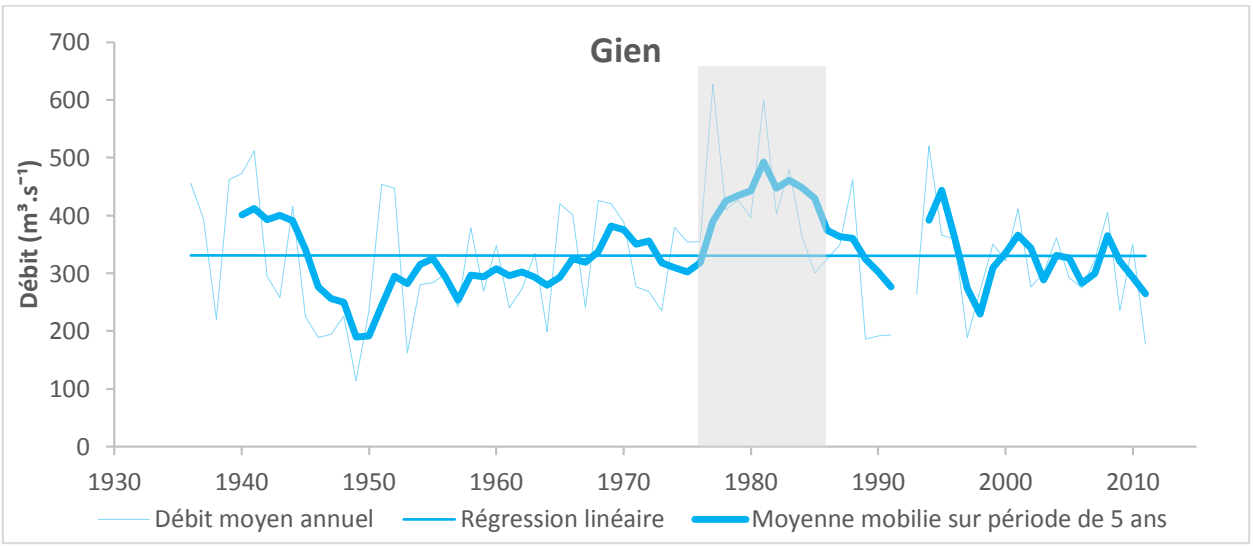


Fig. 43. *Débits moyens annuels pour les stations de Vieille-Brioude (Allier), Villerest (Haute Loire) et Gien (Loire moyenne). En grisé, période de construction et de remplissage des barrages.*

De plus, il existe une station de jaugeage en amont du barrage de Villerest, à Bas-en-Basset, qui ne subit donc pas l'influence des barrages. A cette station, les débits moyens annuels connaissent également une légère tendance à la baisse (-14% pour la moyenne et -9,5% pour la médiane) (tab. 14).

Ainsi, cette baisse sensible des débits moyens annuels à l'amont des bassins, ne semblent pas être attribuable aux barrages, ni aux précipitations d'ailleurs, bien que l'on ne dispose des données que d'une seule station météorologique pour le haut Allier et d'aucune pour la haute Loire.

	Bas-en-Basset	
	1919-1975	1985-2011
Moyenne	39,0	33,4
Ecart-type	12,1	10,9
1er quartile	30,2	24,4
Minimum	17,3	17,8
Médiane	37,9	34,3
Maximum	75,1	61,4
3ème quartile	45,3	39,9

Tab. 14. *Caractérisation de deux périodes différentes de la chronique des débits moyens annuels de la Loire à Bas-en-Basset. Source données de débits : Dreal Centre.*

Les deux grands barrages n'ont donc apparemment pas de conséquence sur le bilan hydrologique annuel. Par contre, en étudiant à l'échelle mensuelle les chroniques de débits, l'impact des barrages est bien perceptible entre les deux périodes (avant 1976 et 1985-2011).

Impacts des barrages sur les débits moyens mensuels

Comparer les débits moyens mensuels avant et après la mise en service des barrages peut permettre de mieux comprendre leurs impacts. Or, on intègre ainsi dans la comparaison des données qui ont pu évoluer pour de toute autre raison que les barrages. Ainsi, figure 44, ont également été représentées les données de débits de la Loire en amont du barrage de Villerest, à la station de Bas-en-Basset. On observe ainsi que les données à Bas-en-Basset et à Villerest subissent les mêmes évolutions, à savoir une forte diminution des débits de hautes-eaux. On

notera que cette baisse est marquée en amont, mais qu'elle est plus faible à Gien. Pour ce qui est des trois mois d'étiage, de juillet à septembre, la situation semble plus complexe.

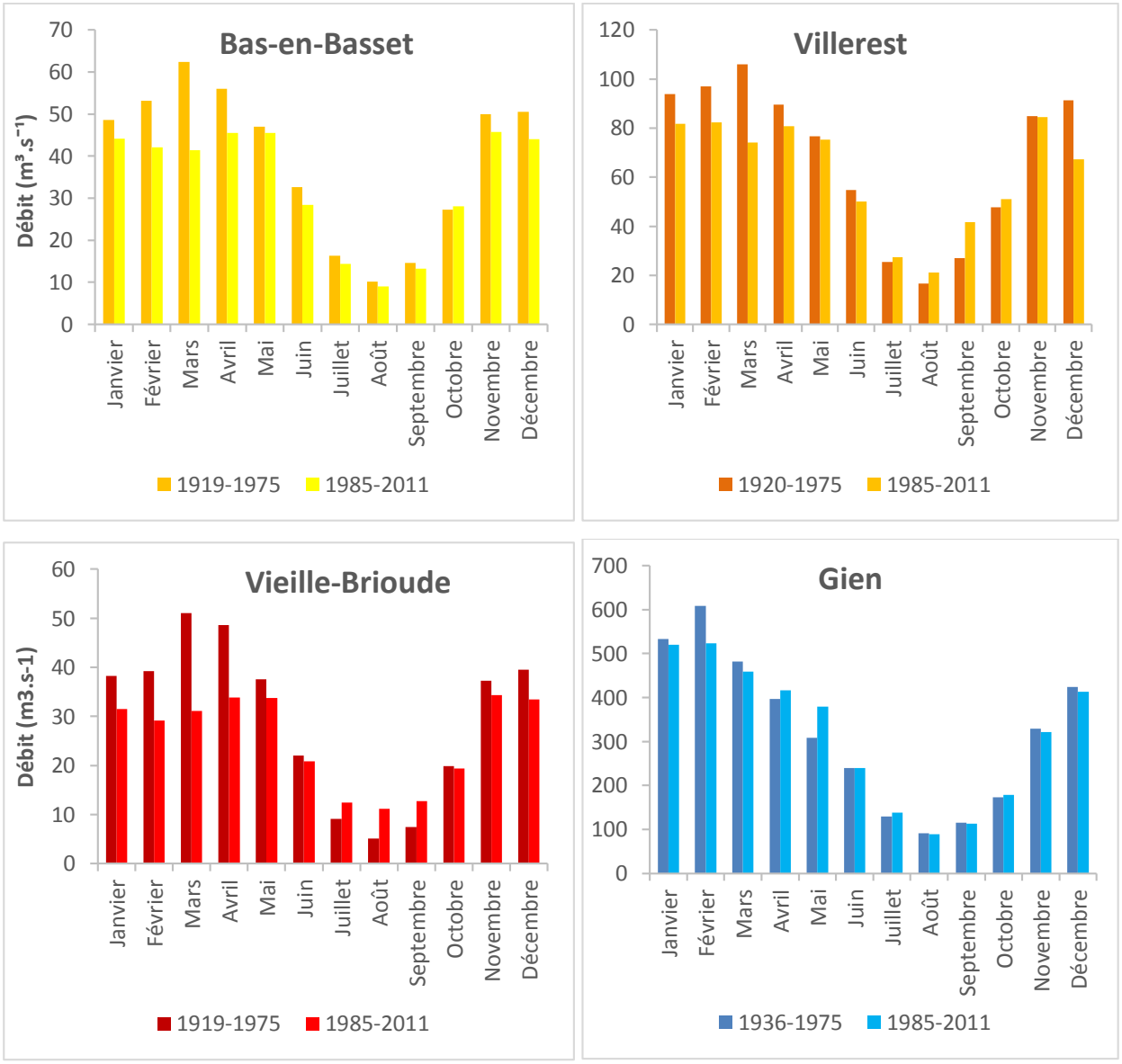


Fig. 44. *Débits moyens mensuels avant et après la mise en service des deux grands barrages pour l'Allier à Vieille-Brioude, et la Loire à Bas-en-Basset, à Villerest et à Gien. Source données de débits : Dreal Centre.*

Ainsi, le tableau 15, permet d'identifier quatre mois où les évolutions diffèrent entre la station de Bas-en-Basset et celle de Villerest. Pour les mois de juillet à septembre, les débits mensuels moyens de la Loire diminuent d'environ 10% à Bas-en-Basset, alors qu'ils augmentent fortement à Villerest (jusqu'à 53% pour le mois de septembre). L'augmentation des débits à

Villerest (ainsi qu'à Vieille-Brioude, où le débit moyen du mois d'août a doublé entre les deux périodes) est donc imputable à la politique de soutien des débits d'étiage menée grâce aux barrages. Il est surprenant qu'à Gien, sur un pas de temps long, cette politique soit à peine détectable dans les débits mensuels.

De plus, pour le mois de décembre, la baisse des débits moyens de ce mois est deux fois plus importante à Villerest (-26%) qu'à Bas-en-Basset (-13%). La baisse des débits d'un quart à Villerest au mois de décembre est donc expliquée par deux phénomènes : (i) une tendance à la baisse des débits de hautes eaux en haute Loire et haut Allier ; (ii) le doublement du volume d'eau stocké par la retenue de Villerest au mois de décembre (fig. 41). En effet, pour la période 1985-2011, le volume stocké par la retenue de Villerest augmente, en moyenne, de 63 millions de m³ au 1er décembre, à 114 millions de m³ au 1er janvier.

	Evolutions entre avant 1976 et 1985-2011			
	à Bas-en-Basset	à Villerest	Vieille-Brioude	Gien
Janvier	-9,1 %	-13,0 %	-17,7 %	-2,4 %
Février	-20,9 %	-15,2 %	-25,7 %	-14,1 %
Mars	-33,6 %	-30,1 %	-39,0 %	-4,9 %
Avril	-18,7 %	-9,9 %	-30,3 %	5,0 %
Mai	-3,1 %	-1,9 %	-10,0 %	23,1 %
Juin	-12,8 %	-8,5 %	-5,4 %	-0,2 %
Juillet	-11,3 %	7,4 %	36,5 %	7,4 %
Août	-11,3 %	27,0 %	116,6 %	-2,7 %
Septembre	-10,0 %	53,7 %	70,1 %	-2,2 %
Octobre	2,7 %	7,0 %	-2,2 %	3,2 %
Novembre	-8,5 %	-0,4 %	-7,8 %	-2,2 %
Décembre	-13,0 %	-26,3 %	-15,5 %	-2,6 %

Tab. 15. *Evolutions des débits mensuels moyens de deux périodes (avant 1976 et 1985-2011) pour quatre stations (Bas-en-Basset, Villerest et Gien sur la Loire et Vieille-Brioude sur l'Allier). Source données de débits : Dreal Centre.*

Enfin, pour les débits d'étiage, on dispose de données de « débits naturels reconstitués » par la Dreal Centre pour les années de 1989 à 2011. Ainsi, il est possible de chiffrer plus précisément l'augmentation artificielle des débits d'étiage, sans les incertitudes liées à la comparaison avec des données d'une autre période.

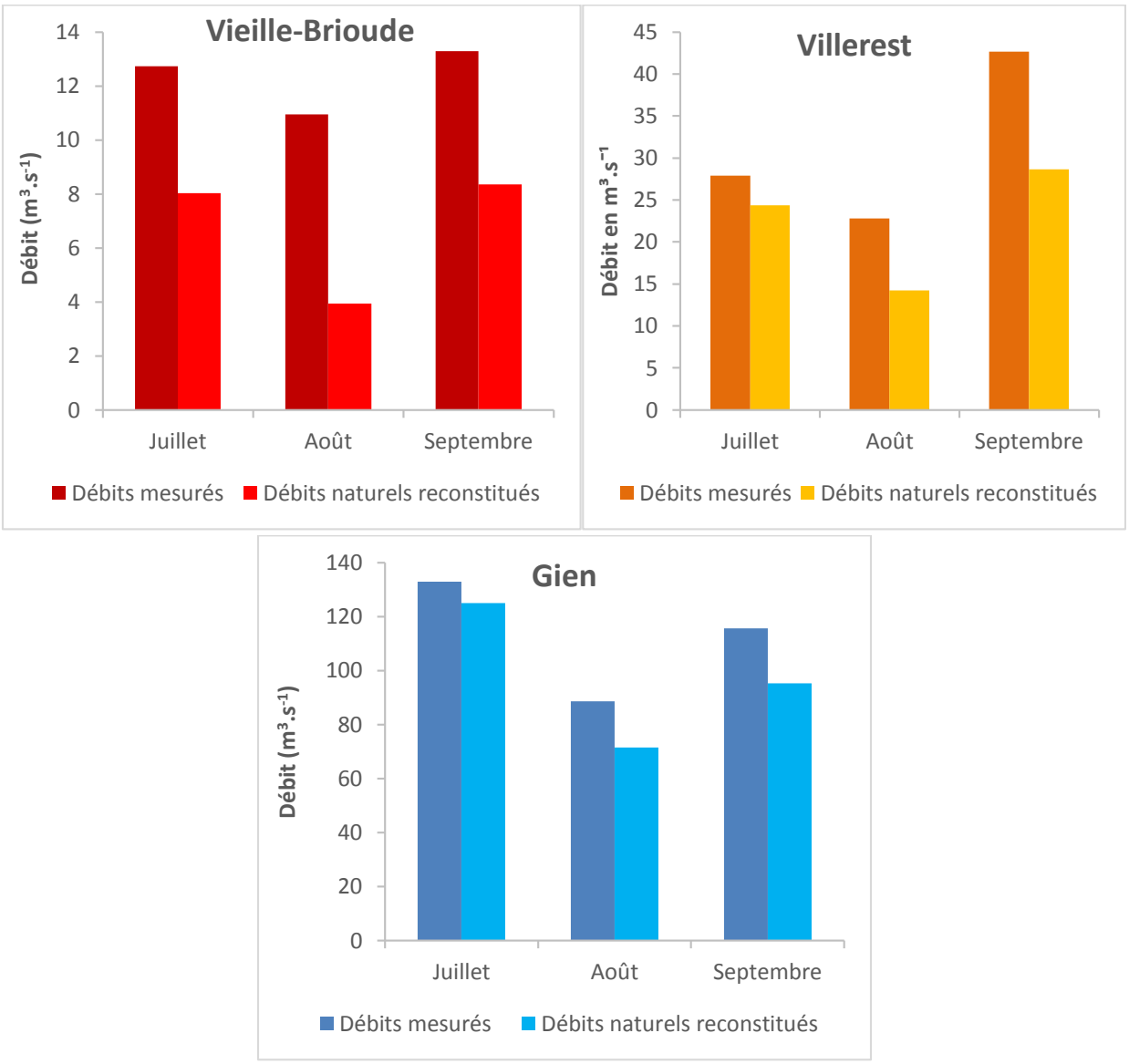


Fig. 45. *Comparaison des débits moyens mensuels mesurés et des « débits naturels reconstitués » pour la période de 1989 à 2011. Source données : Dreal Centre.*

	Vieille-Brioude	Villerest	Gien
Juillet	58,6 %	14,4 %	6,3 %
Août	177,3 %	60,4 %	23,8 %
Septembre	59,0 %	48,8 %	21,3 %

Tab. 16. *Augmentation moyenne des débits moyens mensuels due à la politique de soutien d'étiage entre 1989 et 2011, pour les débits de l'Allier à Vieille-Brioude et de la Loire à Villerest et à Gien pour les mois de juillet, août et septembre. Source données : Dreal Centre.*

La politique de soutien d'étiage augmente donc les débits de la Loire à Gien de près d'un quart en moyenne en août et septembre (respectivement +24 % et +21 %, fig. 45). A l'amont des bassins, ces hausses sont d'autant plus fortes que les cours d'eau sont petits. En effet, le débit de l'Allier à Vieille-Brioude est multiplié par 2,5 en moyenne en août par rapport à son débit « naturel », et augmente de 60 % aux mois de juillet et septembre, grâce au barrage de Naussac.

Si l'on compare les données des tableaux 15 et 16, pour les mois de juillet à septembre, on peut conclure que l'augmentation des débits d'étiage de la Loire à Villerest due au barrage est sous-estimée de juillet à septembre, et surtout au mois d'août, par la comparaison des données moyennes entre les périodes 1919-1975 et 1985-2011 (tab. 15). En effet, entre ces deux périodes, on observe une diminution des débits moyens de la Loire des mois de juin à septembre à Bas-en-Basset de l'ordre de 10 % (observée également à Villerest au mois de juin où le soutien des débits par le barrage est moins fréquent que pour les trois mois suivants). L'augmentation des débits à Villerest entre les périodes 1919-1975 et 1985-2011 est donc due au soutien des débits par le barrage de Villerest, mais elle est diminuée de la baisse « naturelle » d'environ 10 % des débits d'étiage de la haute Loire. Cette baisse « naturelle » des débits d'étiage en haute Loire doit donc être observable pour l'ensemble des gammes de débits, y compris les plus importants qui ne font pas l'objet d'un soutien par le barrage de Villerest, ce qui explique donc les pourcentages d'augmentation des débits plus importants obtenus à partir des données de « débits naturels reconstitués » (tab. 16).

La politique de soutien des débits d'étiage entraine donc une baisse des débits de la Loire et de l'Allier au mois de décembre à l'amont de leur bassin (cette baisse n'est plus perceptible à Gien). Cette baisse des débits moyens de la Loire du mois de décembre à Villerest est accentuée par la baisse « naturelle » des débits de la haute Loire en période de hautes-eaux.

Au contraire des mois d'étiage, de juillet à septembre, la Loire et l'Allier voient leur débit augmenter des lâchers réalisés par les barrages, ce qui peut entraîner une hausse moyenne de plus de 20% des débits des mois concernés à Gien. La première conséquence est donc la disparition à Gien des débits inférieurs à 45-50 $m^3.s^{-1}$, ce que l'on retrouvera un peu plus loin.

3.3. De légères tendances dans les chroniques climatiques

Des évolutions des températures et/ou des précipitations pourraient avoir des implications sur les débits de la Loire.

En effet, les précipitations alimentent en eau le fleuve, soit directement par ruissellement, soit indirectement, par l'intermédiaire des nappes après infiltration, via les échanges nappes-rivière. Ainsi, l'abondance des précipitations ou leur absence, leur variabilité, etc., influencent les débits, avec plus ou moins de retard selon la géologie du bassin versant. Ce temps de réponse du bassin est lui-même irrégulier (dans le temps et dans l'espace), ce qui rend parfois difficile l'interprétation de ces liens, et cela sans compter les prélèvements par la végétation et l'évaporation selon les saisons qui font distinguer les précipitations des précipitations efficaces.

De même, les températures de l'atmosphère peuvent influencer les débits par l'intermédiaire de l'évapotranspiration (Etp). Ainsi, lorsque les températures augmentent, la part de l'Etp sera plus importante et les pluies efficaces plus faibles.

Pour l'ensemble de ces raisons, de ces liens complexes qui lient températures de l'atmosphère, précipitations et débits d'un cours d'eau, il est essentiel de rechercher l'existence d'évolutions au sein des chroniques de précipitations et de températures, même si ces données sont relativement peu nombreuses par rapport à l'étendue du bassin.

Augmentation des minima et des maxima de températures annuelles

Tout d'abord, en ce qui concerne les températures, on ne dispose que des températures maxima et minima mensuelles. Afin de rechercher une évolution potentielle dans ces chroniques, l'analyse de ces températures maximales et minimales annuelles a été réalisée. En effet, il n'est pas possible de travailler sur des températures moyennes. Moyenner des maxima et des minima mensuels ne ferait qu'appauvrir l'information dont on dispose, sans compter que cela ne donnerait pas de température moyenne réaliste.

Il est notable que les températures des différentes stations météorologiques varient conjointement (fig. 46). Elles ne sont pas toutes dans la même gamme de valeurs et cela dépend essentiellement de l'altitude à laquelle elles sont situées (tab. 7, 3.1).

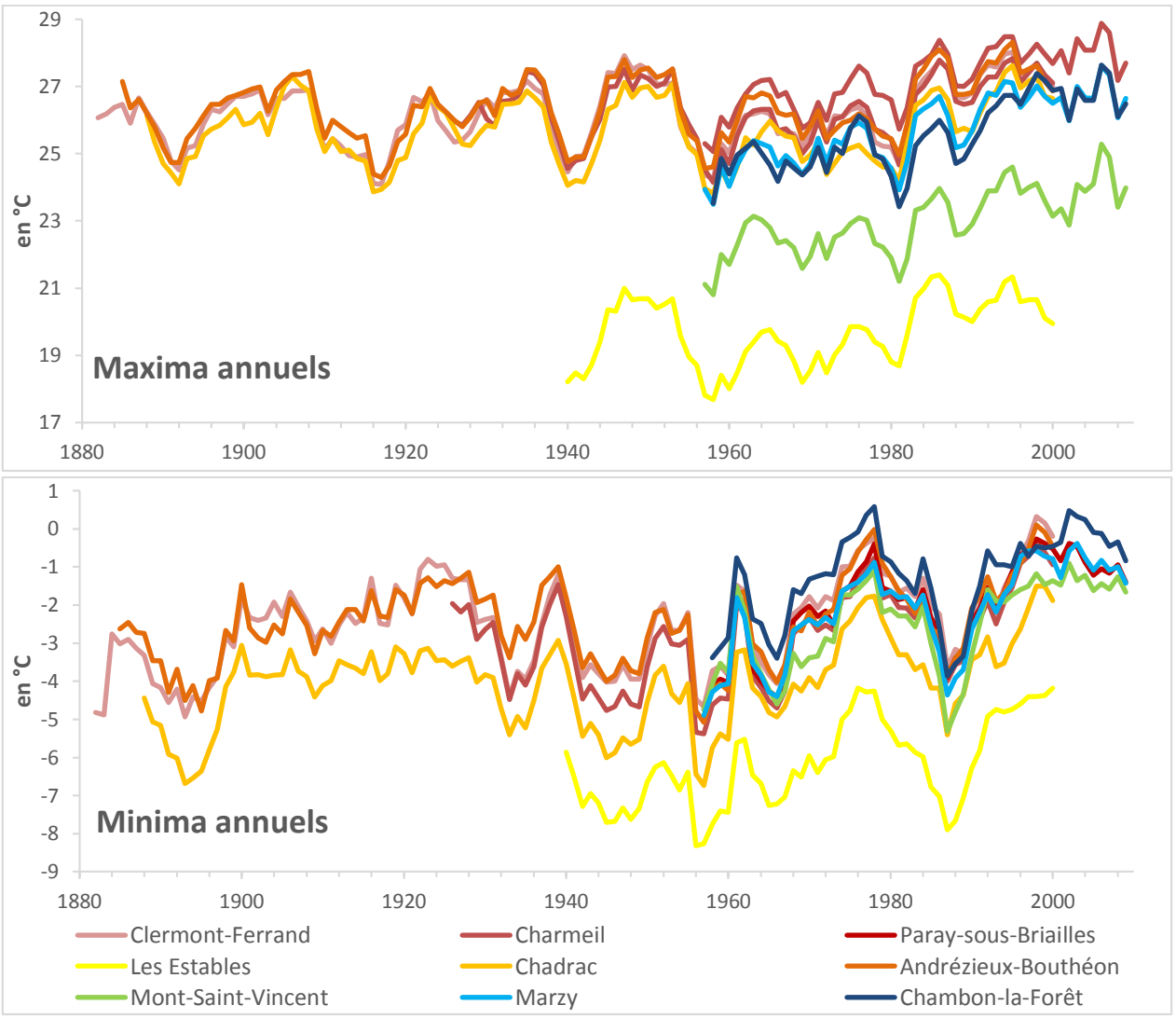


Fig. 46. *Moyennes mobiles de période 5 ans des chroniques de températures maximales et minimales annuelles (en degré Celsius).*

		Début	Fin	Minimum annuel	Maximum annuel
Allier	CLERMONT-FERRAND	1878	2000	0,0181	0,0079
	CHARMEIL	1922	2000	0,0232	0,0124
	PARAY-SOUS-BRIAILLES	1953	2009	0,0537	0,0438
Loire amont	LES ESTABLES	1936	2000	0,0345	0,0237
	CHADRAC	1884	2000	0,0136	0,0042
	ANDREZIEUX-BOUTHEON	1881	2000	0,0116	0,0066
Morvan	MONT-SAINT-VINCENT	1953	2009	0,0472	0,0461
Loire moyenne	MARZY	1953	2009	0,0549	0,0508
	CHAMBON-LA-FORET	1954	2009	0,0421	0,0531

Tab. 17. *Pentes des droites de régression linéaire des chroniques des minima et des maxima annuels de températures en fonction du temps (en °C.an^{-1}).*

D'après la figure 46, la variabilité interannuelle est importante et rend difficile toute interprétation. Il est donc nécessaire d'avoir recours à un degré de simplification supplémentaire des informations contenues dans ces chroniques.

Ainsi, les pentes des droites de régression linéaire des chroniques des minima et des maxima annuels de températures en fonction du temps (tab. 17), démontrent de légères évolutions à la hausse, tant pour les minima que pour les maxima annuels (entre +0,1 et +0,5°C par décade selon les stations). De plus, les données des chroniques les plus courtes semblent augmenter plus, que celles débutant au 19ème siècle, ce qui pourrait démontrer une accélération de cette tendance sur la période récente.

D'après la simplification que représentent ces pentes des droites de régression linéaire, les maxima annuels ont augmenté au moins sur 116 ans de 25,4°C à 25,9, soit +0.5°C ou +2% (à Chadrac) et au plus sur 55 ans de 24°C à 27, soit +3°C ou +12% (à Chambon-la-Forêt). Les minima annuels, eux, augmentent plus : au moins sur 119 ans, de -3°C à -1,6, soit +1,4°C ou +45% (à Andrézieux-Bouthéon) et au plus sur 56 ans de -3,6°C à -0,6, soit +3°C ou +83% (à Marzy). Ceci révèle donc une tendance à la hausse plus marquée depuis les années 1950, mais surtout une variété des évolutions au sein des chroniques.

Grâce à la représentation graphique des pentes des droites de régression linéaire pour ces mêmes chroniques, minima et maxima annuels, en fonction du temps, calculés sur des périodes de 30 ans (fig. 47), il est possible de caractériser en détails l'évolution de ces chroniques de températures. Pendant la première moitié du 20ème siècle, l'augmentation des maxima annuels de température s'est affaiblie (jusque dans les années 1920) puis ces maximas annuels ont connu des tendances à la baisse. L'inversion de ces tendances commence dans les années 1940 avec une diminution de cette tendance à la baisse des maxima annuels de températures. Enfin, à partir des années 1950, ces maxima annuels connaissent une tendance à la hausse (valeurs positives des pentes des droites de régression linéaire), augmentation qui ne cesse de s'accélérer depuis lors.

La même représentation graphique pour les minima annuels (fig. 47) montre globalement des évolutions identiques mais plus précoces. Après des tendances à la baisse, des années 1900 aux années 1930 (qui se sont affaiblies dès les années 1920), depuis les années 1940, la tendance

des températures minimales annuelles est plutôt à une légère hausse. Néanmoins, cette tendance à l'augmentation des minimas annuels ne s'accélère pas, contrairement aux maximas annuels.

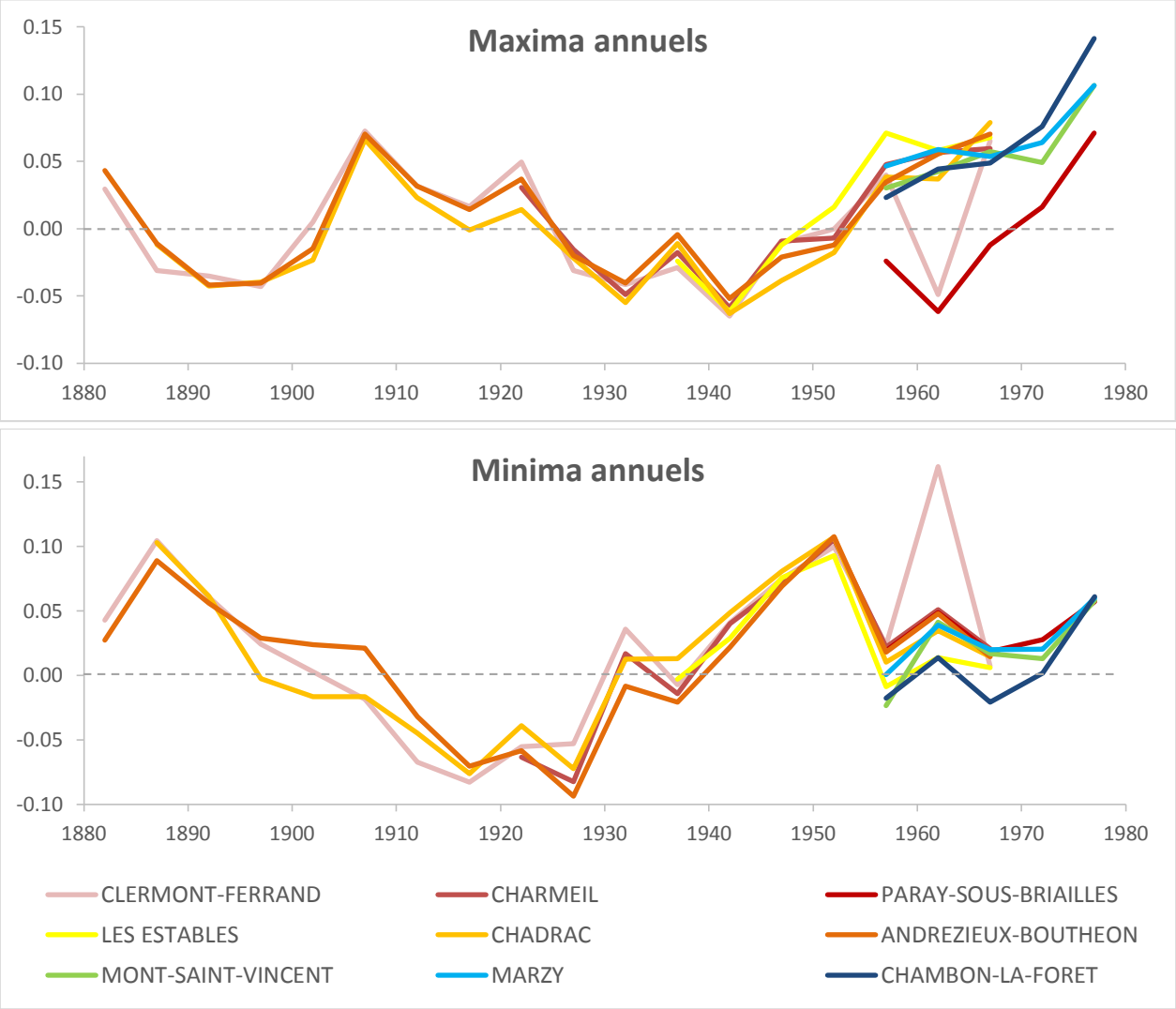


Fig. 47. *Evolutions des pentes des droites de régression linéaire des chroniques des maxima et des minima annuels de températures en fonction du temps (en °C.an⁻¹), calculées pour des périodes de 30 ans (l'année à laquelle est indiqué cette pente correspond à la première année d'une période de 30 ans, légende identique pour les deux graphiques). Une pente négative indique donc une tendance à la baisse des données de températures au cours du temps.*

Ces résultats démontrant une accélération de la tendance à la hausse des maxima annuels de températures depuis 60 ans et une légère augmentation des minima annuels depuis 70 ans

sont à retenir car ils peuvent être révélateurs de tendances globales des températures à la hausse que l'on ne peut mettre en évidence ici. Cependant, l'impact sur le cycle de l'eau à long terme, si ces tendances se confirment, finira par être perceptible à travers l'évapotranspiration, sans compter qu'une hausse des températures induirait également une hausse des prélèvements liés à l'irrigation si les cultures ne sont pas adaptées vers des choix d'espèces moins consommatrices en eau.

Affaiblissement de la tendance à la hausse des précipitations

Ensuite, en ce qui concerne les précipitations, on dispose de données géographiquement plus denses (l'amont du bassin de la Loire cependant fait défaut) mais les chroniques sont plus courtes que celles des températures. On a vu le fonctionnement cohérent des précipitations des différentes stations regroupées par secteur géographique, c'est pourquoi les résultats seront présentés sous cette même forme.

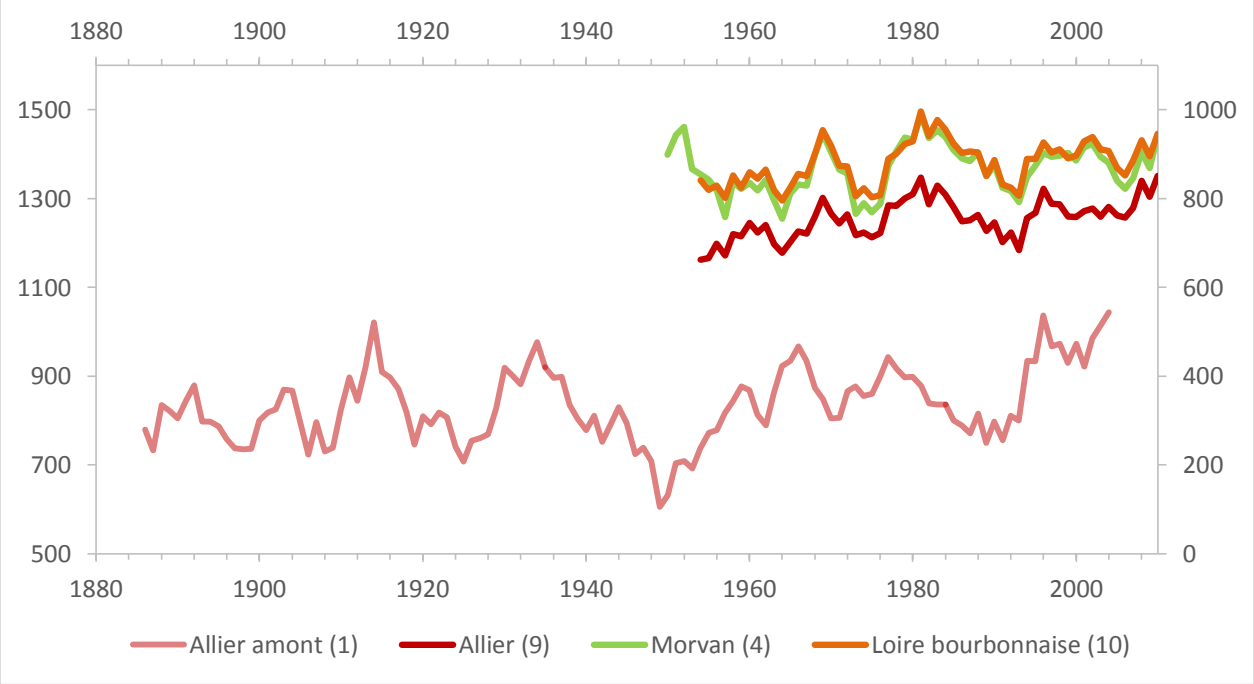


Fig. 48. *Moyennes mobiles sur période de 5 ans des cumuls annuels de précipitations (en mm) pour les stations météorologiques regroupées et moyennées par zone géographique. En légende de cette figure, entre parenthèses, est indiqué le nombre de stations prises en compte pour chaque regroupement géographique. La chronique pour l'Allier amont est la seule utilisant l'axe vertical principal. L'ensemble des données se situe donc dans la même gamme de valeur.*

On remarque de nombreuses similitudes dans les variations des cumuls de précipitations pour les zones de l'Allier, du Morvan et de la Loire bourbonnaise, au contraire de la station dans le secteur de l'Allier amont dont les variations s'individualisent (fig. 48). Cette dernière station est en effet la seule située à plus de 1 000m d'altitude et sa localisation méridionale au sein du haut bassin de l'Allier la soumet à des influences cévenoles importantes.

	Début	Fin	Stations météorologiques	Pentes des droites de régression linéaire
Allier amont	1882	2000	CHATEAUNEUF-DE-RANDON	0,757
	1950	2000	CHATEAUNEUF-DE-RANDON	2,042
Allier	1954	2010	VICHY	2,040
	1954	2010	BROUT-VERNET	1,107
	1954	2010	CHARMEIL	1,670
	1954	2010	PARAY-SOUS-BRIAILLES	1,798
	1954	2010	EBREUIL	1,352
	1954	2010	MONTMARAULT	1,518
	1954	2010	YZEURE	1,706
	1954	2010	MARIGNY	1,726
	1954	2010	VILLENEUVE-SUR-ALLIER	1,823
Arroux	1950	2010	EPINAC	1,107
	1950	2010	PALINGES	1,606
	1950	2010	SAINT-SYMPHORIEN-DE-MARMAGNE	1,049
	1950	2010	TOULON-SUR-ARROUX	0,766
Loire bourbonnaise (aval Villerest)	1950	2010	CHAROLLES	1,255
	1954	2010	LE DONJON	1,466
	1954	2010	DIOU	1,820
	1950	2010	BOURBON-LANCY	1,610
	1950	2010	DECIZE	0,844
	1950	2010	LUZY	0,874
	1950	2010	ONLAY	1,694
	1954	2010	CHEVAGNES	1,267
	1950	2010	LUTHENAY-UXELOUP	1,150
	1950	2010	MARZY	0,659

Tab. 18. *Pentes des droites de régression linéaire des chroniques de cumuls annuels de précipitations, pour chacune des stations disponibles, en fonction du temps (en mm.an^{-1}).*

Les cumuls annuels de précipitations présentent pour l'ensemble des chroniques des tendances à la hausse (tab. 18) de 0,6 à 2 mm.an^{-1}. Cette tendance est à nouveau contrastée. Malgré l'approximation que représentent les pentes des droites de régression linéaire, on peut estimer que le cumul annuel de précipitations augmente au moins, sur 60 ans, de 720mm à

753mm, soit +33mm ou +4,6% (à Marzy), et au plus, sur 60 ans, de 811mm à 913mm, soit +102mm ou +12,6% (à Châteauneuf-de-Randon). Les gradients temporels, sur les soixante dernières années varient donc entre +5,5 et +18,7 mm par décade.

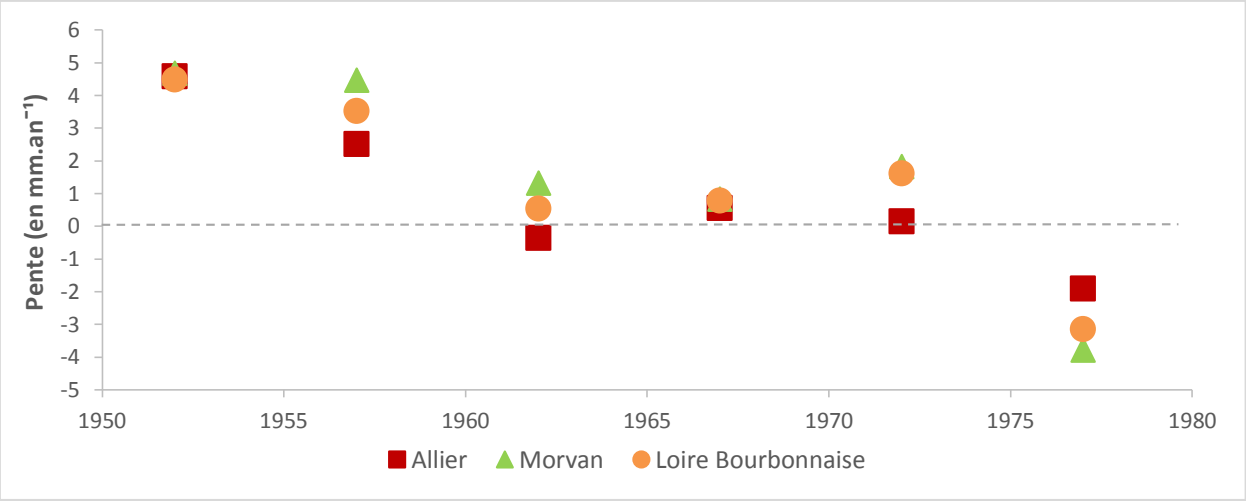


Fig. 49. *Evolutions des pentes des droites de régression linéaire des cumuls annuels de précipitations, regroupés par zone géographique, en fonction du temps, par période de 30 ans (l'année à laquelle est indiquée cette pente correspond à la première année d'une période de 30 ans).*

Bien que sur l'ensemble des chroniques la tendance soit effectivement à la hausse, dans le détail des périodes de 30 ans, on remarque grâce, de nouveau, à l'évolution des pentes des droites de régression linéaire des cumuls annuels de précipitation en fonction du temps, que cette tendance à la hausse ralentit depuis les années 1950, pour aboutir même à une légère baisse pour la dernière période de 1977 à 2006 (fig. 49).

Sur l'ensemble des bassins amont, les précipitations ont donc tendance à légèrement augmenter depuis 60 ans, bien que cette tendance ne soit pas homogène dans le temps. Elle s'affaiblit même au cours du temps pour arriver à une stagnation voir une légère baisse depuis le milieu des années 1970.

Ainsi, de légères tendances peuvent être identifiées au sein des chroniques de températures et de précipitations. Cependant, étant donnée la faiblesse de ces tendances, leur hétérogénéité géographique et enfin l'importance de la variabilité interannuelle des données, il n'est sûrement pas envisageable de pouvoir faire un lien entre de possibles évolutions des débits et ces tendances climatiques.

3.4. Les débits moyens annuels : une stabilité robuste dans le temps

L'indice le plus général pour caractériser le régime de la Loire et ses évolutions potentielles est la moyenne annuelle des débits moyens journaliers (QJM).

La caractéristique qui domine à nouveau est la variabilité interannuelle des données (fig. 50), illustrée par les valeurs des quartiles et de l'écart-type, différentes entre les stations de jaugeage (tab. 19). Il est intéressant de noter ici que les variations de débits de l'Allier à Vieille-Brioude et de l'Arroux à Etang-sur-Arroux diffèrent légèrement de celles de la Loire (fig. 50).

		Données	Moyenne	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Ecart-type
Haute Loire	Bas-en-Basset	1919 – 2011	38	30	37	44	11,8
	Villerest	1920 – 2011	67	53	69	80	19,6
Allier	Vieille-Brioude	1919 – 2011	29	22	29	35	9,1
Arroux (Morvan)	Etang-sur-Arroux	1972 – 2011	22	18	23	26	6,9
Loire moyenne	Blois	1863 - 2011	361	286	364	430	104,0

Tab. 19. *Caractérisation des débits moyens annuels (en $m^3.s^{-1}$) du bassin de la Loire à : Bas-en-Basset et Villerest pour la haute Loire, Vieille-Brioude sur l'Allier, Etang-sur-Arroux pour l'Arroux (le principal affluent drainant le Morvan) et enfin Blois en Loire moyenne.*

La pente des droites de régression linéaire des débits moyens annuels en fonction du temps (tab. 20) permet de confirmer la cohérence de ces débits aux différentes stations, mais demeure un piètre reflet des données. Elle met cependant en lumière la **robustesse de la stabilité des débits moyens annuels de la Loire au cours du temps**. En effet, une diminution des débits moyens annuels entre 0,5 et 1,3 $m^3.s^{-1}$ par décade, ne peut pas être considérée comme significative. Pour la seule station d'Etang-sur-Arroux, la baisse des débits est significative avec une diminution de 1,7 $m^3.s^{-1}$ par décade, soit -7,7% du module par décade sur les quarante dernières années.

		Données	Pentes ($m^3.s^{-1}$ par an)	Gradients temporels ($m^3.s^{-1}$ par décade)	Rapport gradient temporel / module (% par décade)
Haute Loire	Bas-en-Basset	1919 – 2011	-0,1301	-1,3	-3,4 %
	Villerest	1920 – 2011	-0,1335	-1,3	-1,9 %
Allier	Vieille-Brioude	1919 – 2011	-0,0544	-0,5	-1,7 %
Arroux (Morvan)	Etang-sur-Arroux	1972 – 2011	-0,1693	-1,7	-7,7 %
Loire moyenne	Blois	1863 - 2011	-0,1238	-1,2	-0,3 %

Tab. 20. *Pentes des droites de régression linéaire des débits moyens annuels en fonction du temps.*

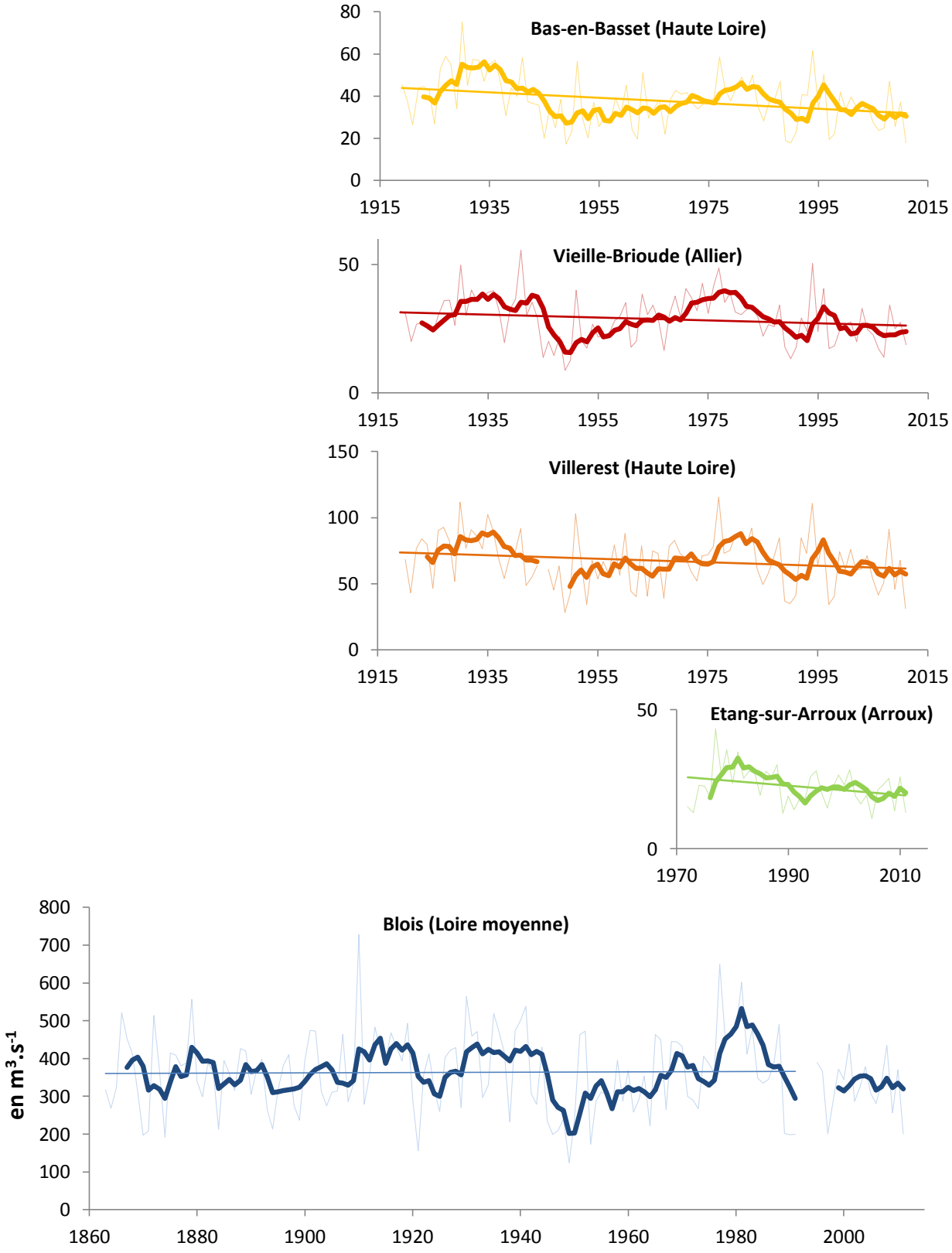


Fig. 50. *Débits moyens annuels au sein du bassin de la Loire (en $m^3.s^{-1}$; moyenne annuelle des débits journaliers, moyenne mobile sur période de 5 ans et droite de régression linéaire pour chaque station).*

Comportement cyclique irrégulier des débits moyens annuels

Faute d'évolution notable dans le temps, cet indice révèle un comportement par cycles où semblent s'alterner des périodes avec des débits plus faibles et des périodes où le débit est plus élevé (fig. 50).

Une analyse spectrale des chroniques de débits annuels a été menée (fig. 51 et 52) afin de définir la durée de ces cycles, s'ils sont réguliers. A partir de la figure 51, l'identification des pics de fréquence (f) permet de définir la période (T) d'un cycle, c'est-à-dire sa durée, grâce à la relation f = 1/T. Ainsi, deux durées différentes de cycle apparaissent au niveau des affluents : pour les stations les plus en amont, à Bas-en-Basset sur la Loire et à Vieille-Brioude sur l'Allier, une période de 45 à 50 ans, et pour l'Arroux, une période de 2-3 ans (peu significative). En Loire moyenne, on retrouve ces deux périodes, atténuées (fig. 52), au milieu d'autres pics de fréquence (particulièrement notable à Blois, fig. 51). Cette analyse révèle donc qu'il n'existe pas, en Loire moyenne, de cycle régulier décrivant les variations des débits annuels.

Néanmoins, graphiquement, il est possible de définir des périodes comprenant une alternance d'années plus « sèches » et d'autres plus « humides » (fig. 53). Les bornes de ces périodes ont été définies grâce aux points bas des moyennes mobiles de période 5 ans des débits moyens annuels. Les périodes ainsi mises en évidence coïncident entre les stations et s'étendent sur des durées très variables (de 20 à 44 ans).

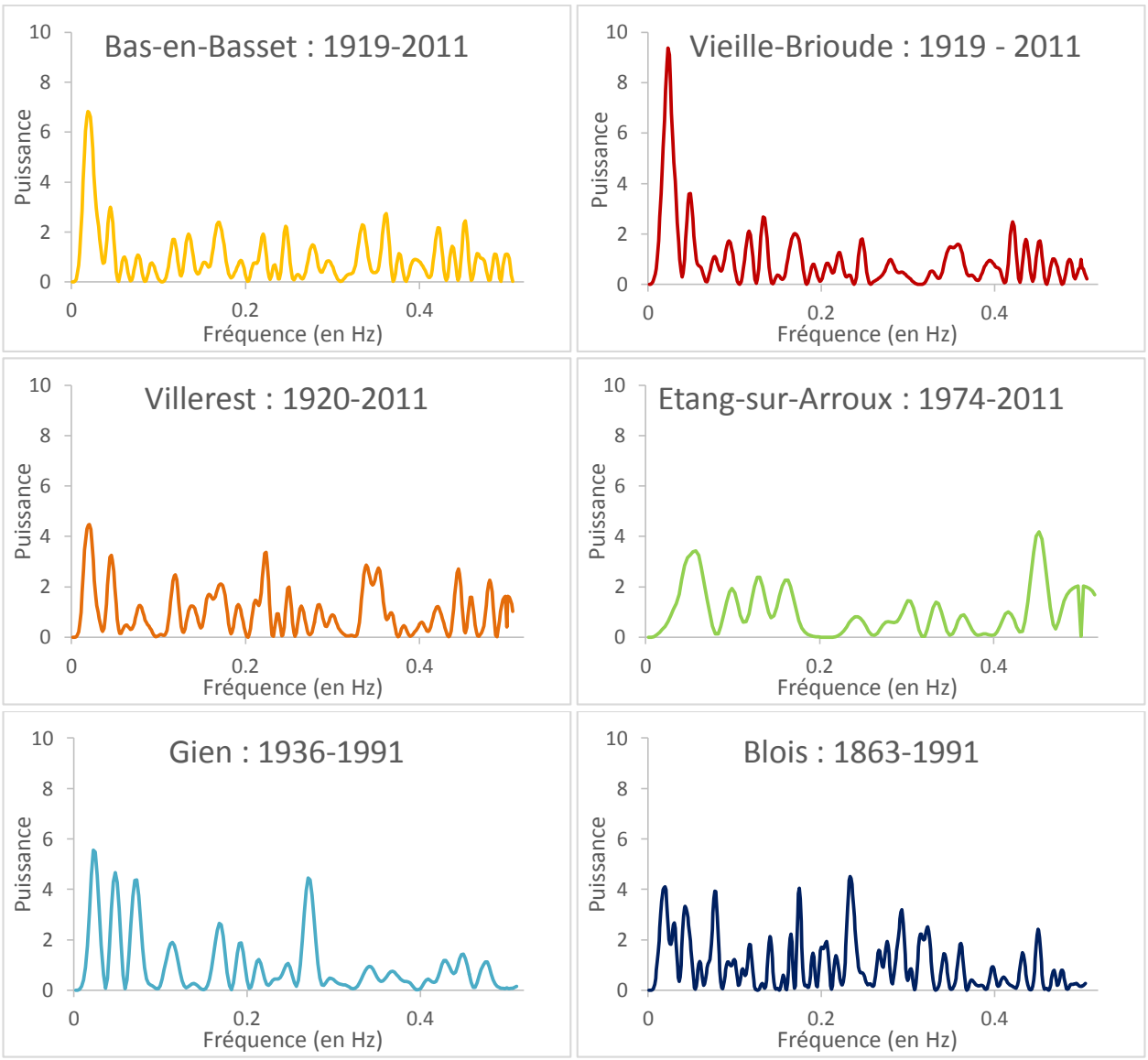


Fig. 51. *Analyse spectrale des chroniques de débits moyens annuels de la Loire, de l'Allier et de l'Arroux.*

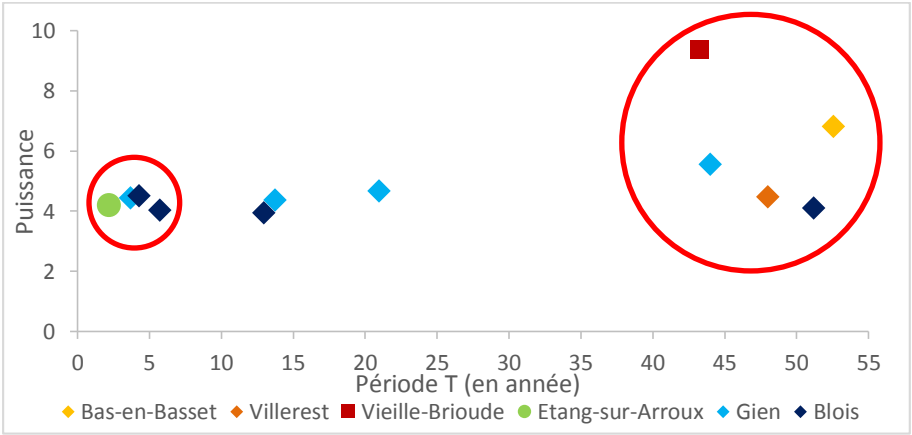


Fig. 52. *Maxima des pics de puissance supérieurs à 4, en fonction de la durée des cycles identifiés dans les débits moyens annuels de six stations hydrométriques du bassin de la Loire (T en années).*

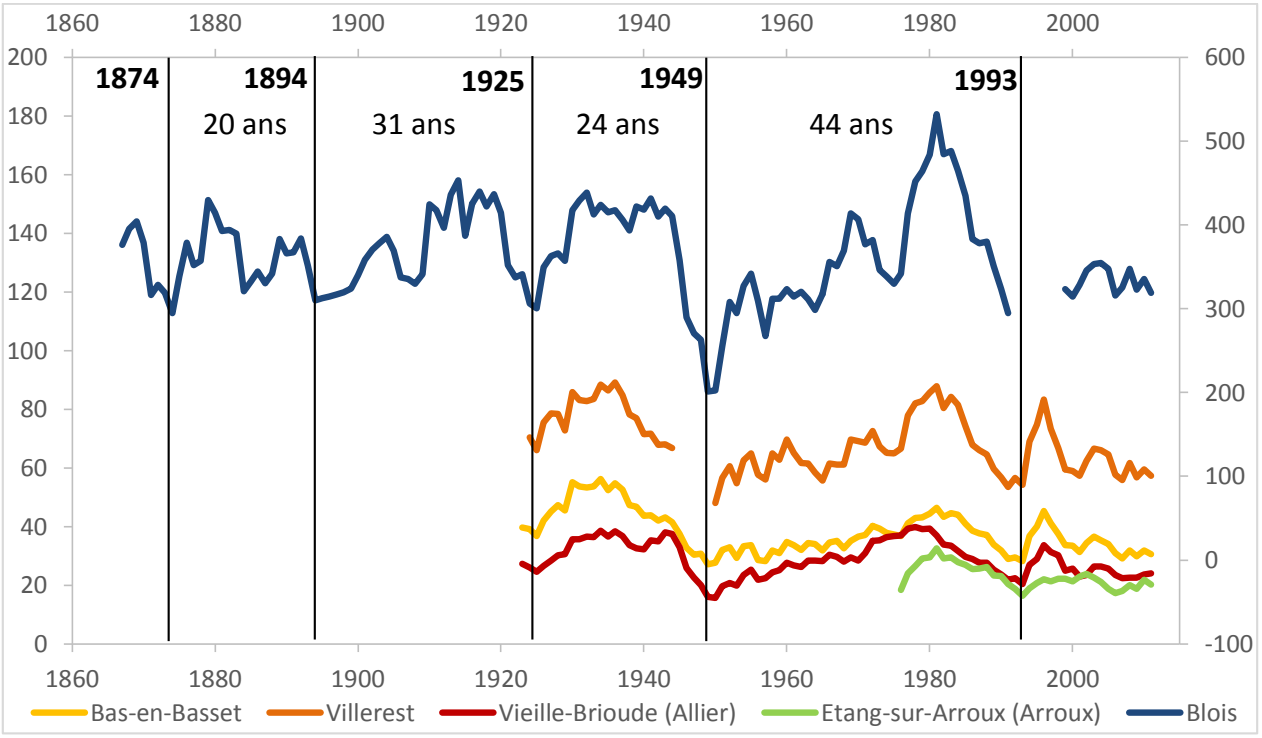


Fig. 53. *Mise en évidence d'alternance de périodes plus ou moins humides à partir des moyennes mobiles de période 5 ans des débits moyens annuels (en $m^3.s^{-1}$). Axe vertical secondaire : Blois.*

Corrélations entre les débits moyens annuels et les données climatiques

Afin de comprendre les facteurs contrôlant ces alternances, dans les débits moyens annuels, de périodes plus « sèches » et de périodes plus « humides », il est intéressant de rechercher des corrélations entre les débits et les données de précipitations et de températures à l'échelle annuelle (fig. 54).

Les cumuls de précipitations et les débits de la Loire à Blois sont effectivement corrélés à l'échelle annuelle. Le coefficient de corrélation r entre les cumuls annuels de précipitations à Châteauneuf-de-Randon (seule chronique de précipitations débutant au 19ème siècle) et les moyennes annuelles des débits de la Loire à Blois, pour les données entre 1882 et 2000, est élevé (r=0,47) puisqu'établi sur une période de 120 ans. Cette corrélation est d'ailleurs d'autant plus significative que la station de Châteauneuf-de-Randon est située à l'amont du bassin de l'Allier (fig. 54).

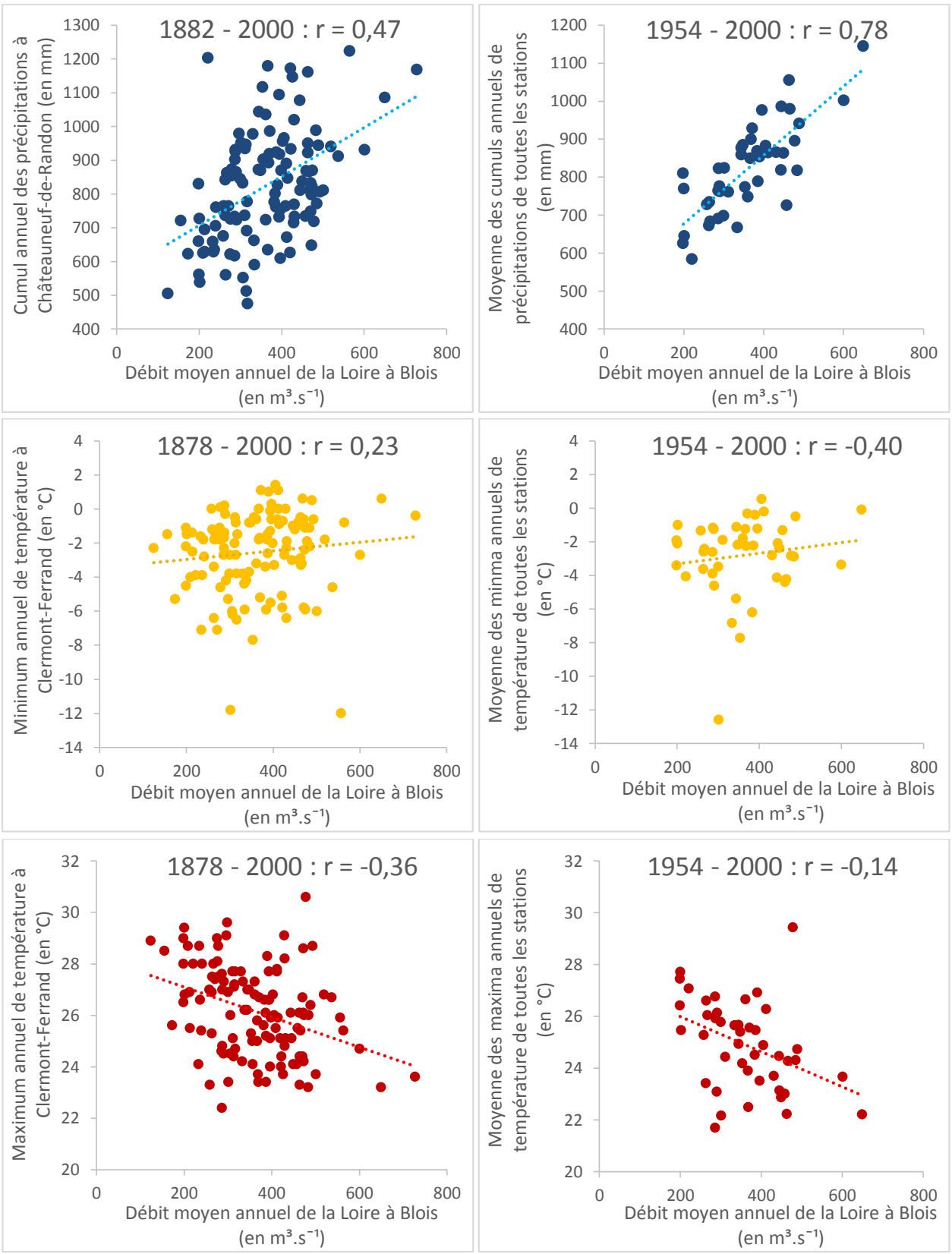


Fig. 54. *Corrélations entre les données climatiques et les débits moyens annuels de la Loire à Blois. r est le coefficient de corrélation entre les deux chroniques représentées sur chaque graphique.*

De même, sur une période plus courte de 1954 à 2000 (selon les données disponibles), le coefficient de corrélation entre les moyennes des cumuls annuels de précipitations de toutes les stations disponibles en Loire amont et moyenne, et les moyennes annuelles des débits de la Loire à Blois, est de 0,78 (fig. 54). Cette corrélation démontre donc le lien étroit entre les cumuls de précipitations à l'échelle du bassin de la Loire amont et de la Loire moyenne, et les débits de la Loire moyenne. En effet, les moyennes des cumuls annuels de précipitations de toutes les stations disponibles permettent de prendre en compte l'hétérogénéité climatique du bassin de la Loire amont.

On peut faire, ici, une synthèse des tendances identifiées au sein des chroniques de débits et de précipitations à l'échelle annuelle. On a vu que, depuis la fin du 19ème siècle, l'augmentation des cumuls annuels de précipitations s'est affaiblie continuellement. Malgré la corrélation entre précipitations et débits, les débits annuels de la Loire moyenne demeurent très stables sur toute la période. La relation précipitations/débits est donc complexe, et sûrement régit par des seuils quantitatifs au-delà desquelles une évolution marquée des précipitations impactera durablement les débits de la Loire, ce qui n'est pas le cas ni aujourd'hui, ni au cours du 20ème siècle.

Au contraire, le lien entre les débits de la Loire moyenne et les températures de l'atmosphère au sein du bassin, n'est pas facilement identifiable à partir des maxima et des minima annuels de températures (seules données homogénéisées de températures dont on dispose). En effet, il n'existe pas de corrélation entre les débits de la Loire à Blois et les maxima ou les minima de températures (sur 120 ans pour une station, ou sur 45 ans pour la moyenne des stations disponibles, fig. 54) à l'échelle annuelle.

Néanmoins, il faut noter que la très faible relation qui lie maxima de températures et débits est inverse, ce qui est tout à fait logique : plus les températures sont importantes, plus l'évaporation sera importante, plus les débits seront faibles.

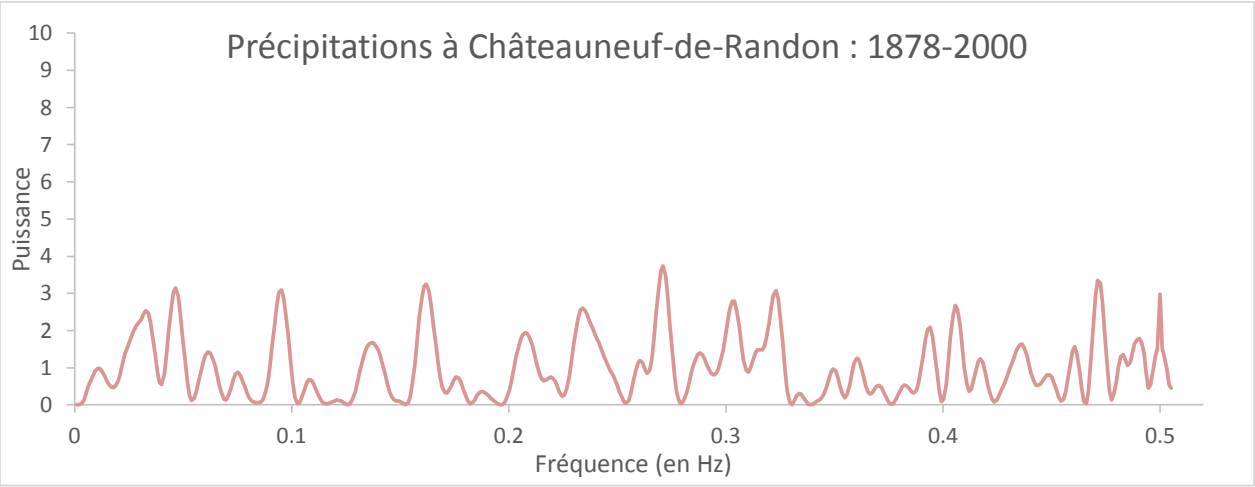


Fig. 55. *Analyse spectrale des cumuls annuels de précipitations à Châteauneuf-de-Randon (haut Allier).*

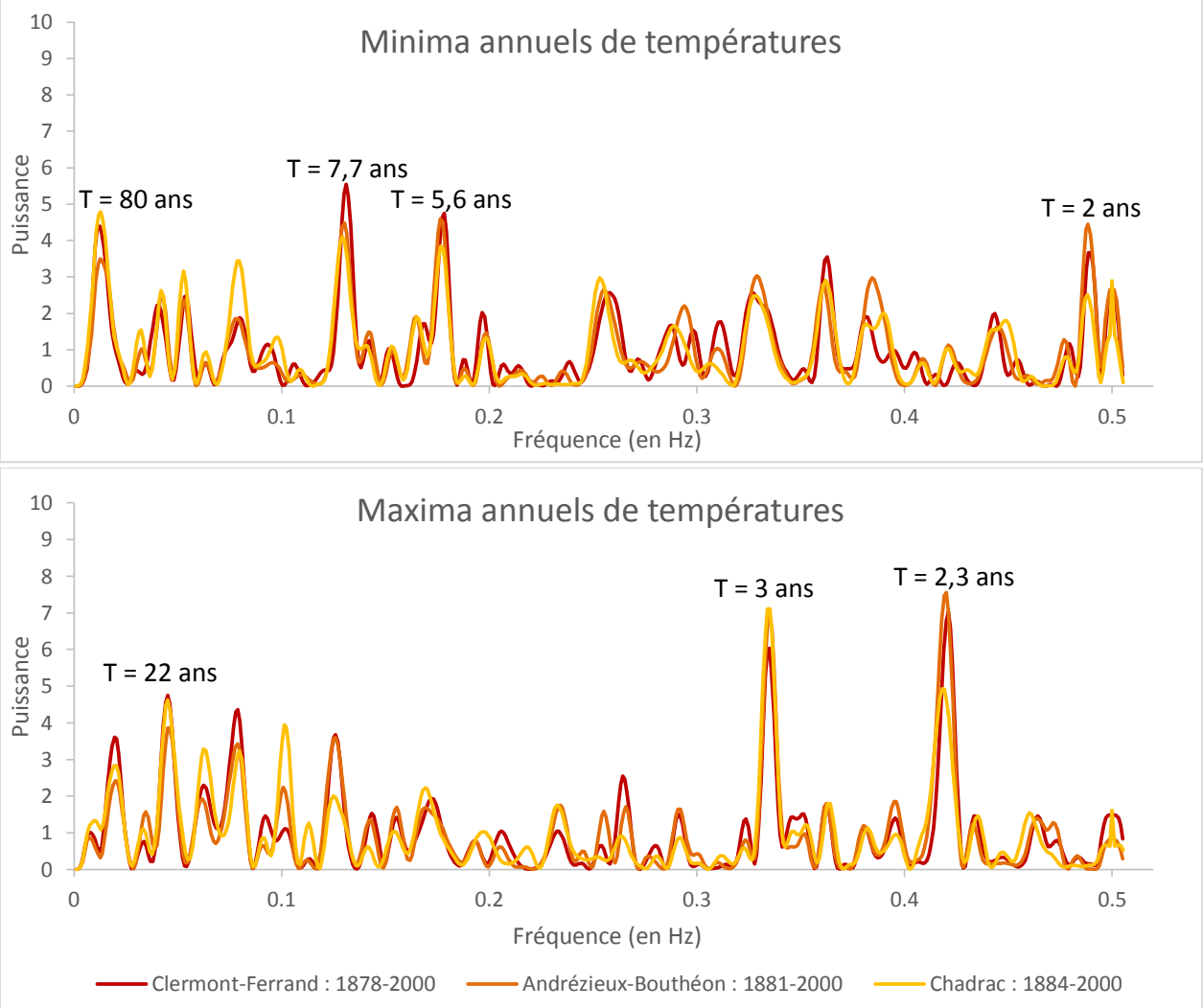


Fig. 56. *Analyse spectrale des minima et maxima annuels de températures à Clermont-Ferrand (bassin de l'Allier), Chadrac et Andrézieux-Bouthéon (bassin de la haute Loire). Légende identique pour les deux graphiques. T est la période (en années) de cycles réguliers mis en évidence par les pics de fréquence.*

L'analyse spectrale des longues chroniques de cumuls annuels de précipitations (fig. 55) et des maxima et minima annuels de températures (fig.56), conformément aux remarques précédentes sur les corrélations entre données climatiques et débits, ne permet pas de mettre en lien des périodes (T) de cycles réguliers identiques aux données climatiques et hydrologiques. Au sein des cumuls annuels de températures, aucun cycle régulier ne peut d'ailleurs être défini (fig. 55). Pour les températures, les deux cycles les plus significatifs sont observables pour les maxima annuels de températures, définis par des périodes (T) de 3 et 2,3 années (fig. 56).

Pour conclure, il est intéressant d'observer la cohérence, pour les débits moyens et les cumuls de précipitations, à l'échelle annuelle, des bornes de périodes irrégulières, comprenant une alternance d'années plus « sèches » et d'autres plus « humides » (fig. 57). Ceci ne fait donc que confirmer le lien étroit entre les débits de la Loire et de ses affluents et les précipitations au sein de ce vaste bassin.

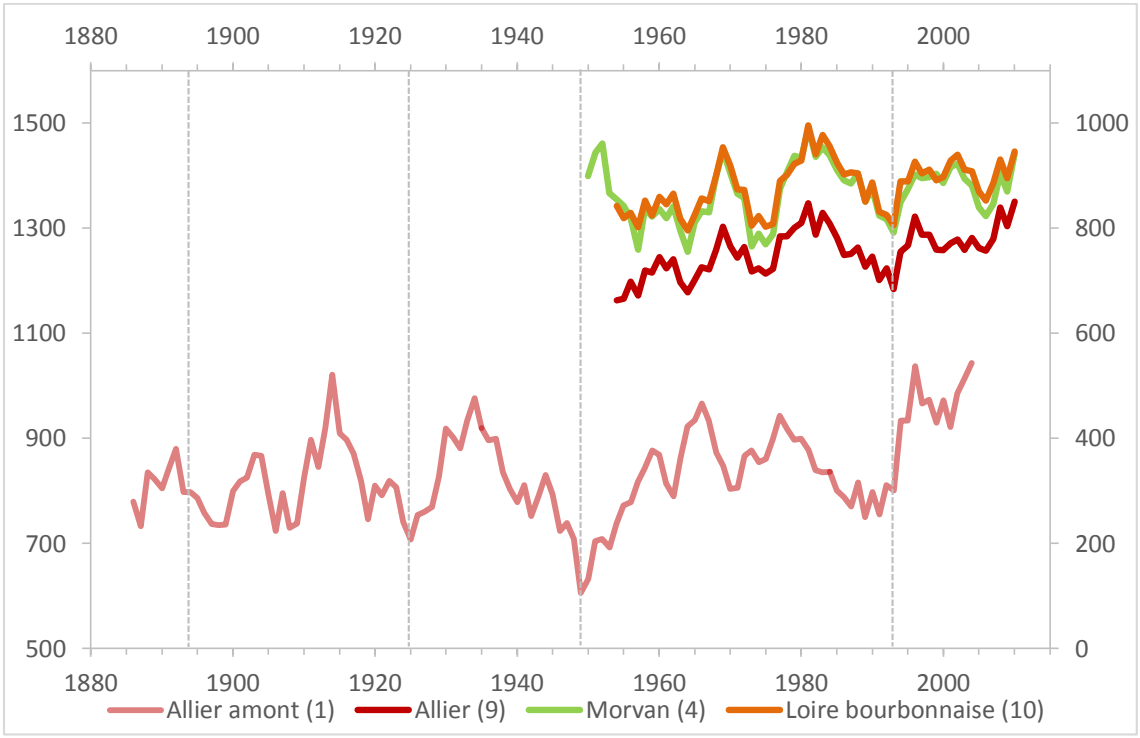


Fig. 57. *Moyennes mobiles par périodes de 5 ans des cumuls annuels moyens de précipitations (en mm) des différentes stations de chaque secteurs géographiques (entre parenthèse : nombre de stations prises en compte par secteur). Sur l'axe vertical principal : Allier amont. Les traits en pointillés correspondent aux bornes des « cycles » irréguliers identifiés à partir des chroniques de débits moyens annuels (fig. 53) : correspondance pour 3 limites de ces périodes (1925, 1949 et 1993).*

3.5. Diversité des évolutions des maxima et stabilité des minima annuels

L'objectif de la thèse étant de travailler sur le fonctionnement moyen de la Loire, les maxima et minima annuels ont leur place dans cette étude. Le problème étant de rechercher des évolutions dans les débits, ces deux indicateurs permettent de compléter les caractéristiques d'une année hydrologique. Comme indice de minimum annuel a été retenu le VCN3, c'est-à-dire le débit minimum atteint trois jours consécutifs dans une année hydrologique, pour cet indice de mars à février. En effet, il est porteur d'un peu plus d'informations que le débit journalier minimum. Le second indice étudié ici est le débit journalier maximum de l'année hydrologique, recherché entre septembre d'une année n et août de l'année n+1.

3.5.1. Des VCN3 stables dans le temps

L'étude des VCN3 n'est toutefois pas aisée parce que l'influence des politiques de soutien d'étiage vient modifier profondément les données d'étiage à partir des années 1980. Ainsi, la chronique à Blois est utilisable jusqu'en 1975. Pour pallier à cela, on utilisera la chronique de Gien, avec, à partir de 1989, les données de « débits naturels reconstitués », calculés par la Dreal Centre. Cependant, le biais introduit dans les données risquerait de ne permettre aucune conclusion. Le raisonnement est le même pour les stations de Villerest et de Vieille-Brioude sur l'Allier.

D'une station hydrométrique à l'autre, il est notable que les VCN3 ne varient pas conjointement (fig.58), excepté Blois et Gien avant 1989 et l'utilisation des données de « débits naturels reconstitués » (Gien QNR). Et en ce qui concerne les quatre stations des bassins amont (Vieille-Brioude sur l'Allier, Etang-sur-Arroux sur Arroux, Bas-en-Basset et Villerest sur la Loire), les caractéristiques spécifiques de leur propre bassin versant doivent influer plus fortement sur les faibles débits que pour des débits plus importants qui dépendent plus des précipitations que de la capacité de rétention du bassin versant par exemple.

Pour cet indice, les chroniques retenues sont donc celles de la Loire à Bas-en-Basset (située en amont des barrages), la Loire à Blois et de l'Arroux à Etang-sur-Arroux, bien que cette dernière chronique soit relativement courte (mais n'est pas influencée par les barrages).

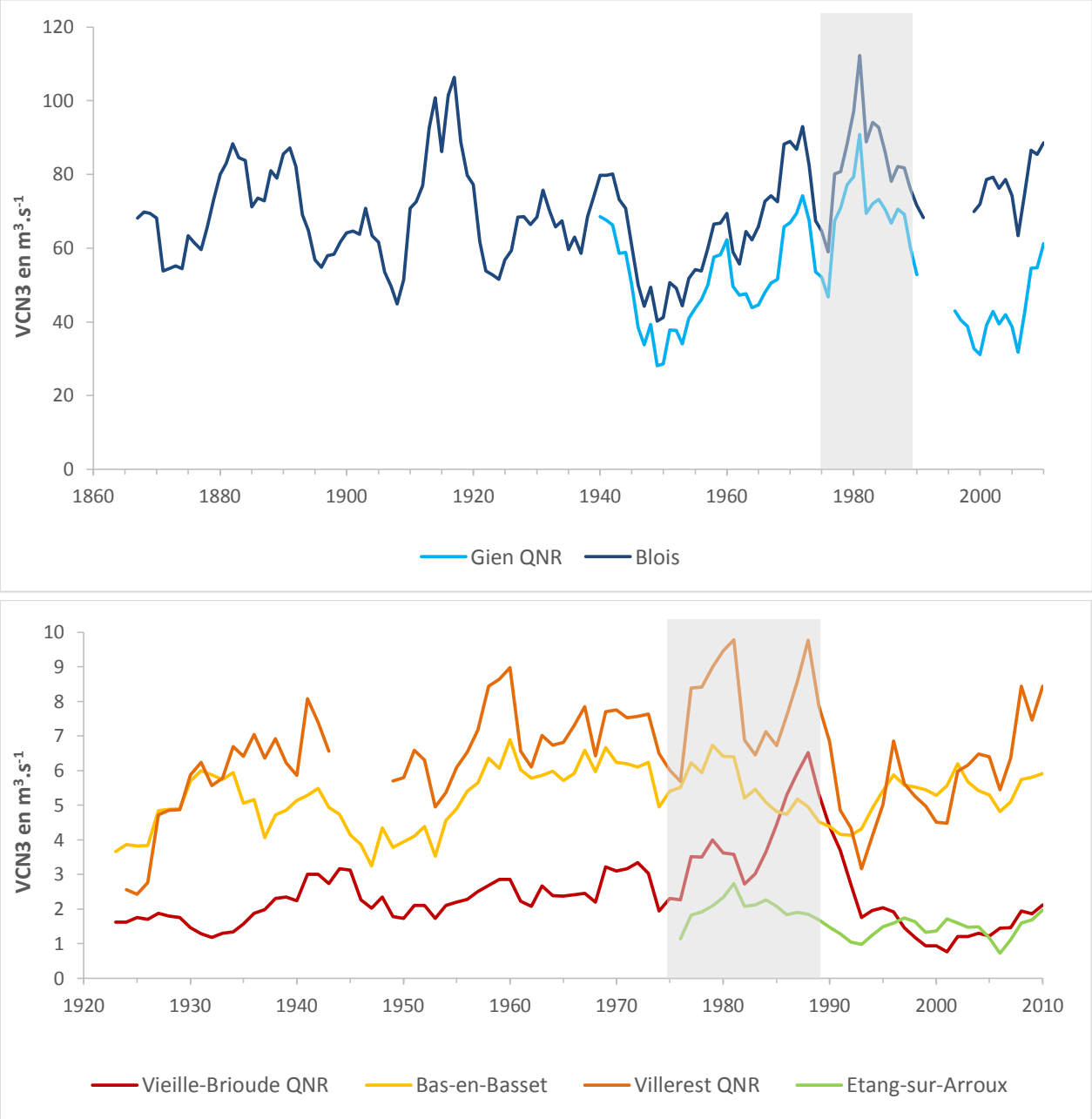


Fig. 58. *Moyennes mobiles de période 5 ans des VCN3 annuels de la Loire, de l'Allier (Vieille-Brioude) et de l'Arroux (Etang-sur-Arroux). La mention QNR après le nom d'une station de jaugeage indique que les données à partir de 1989 sont celles des « débits naturels reconstitués » par la Dreal Centre. En grisé, période du début de la construction des barrages jusqu'au début des données de « débits naturels reconstitués » (1975-1989).*

Ces précautions quant aux données prises en compte, la conclusion est qu'il n'existe pas de tendance significative et cohérente dans ces trois chroniques (fig. 59 et tab. 21). Il est néanmoins intéressant de décrire les données pour différentes périodes de trente ans.

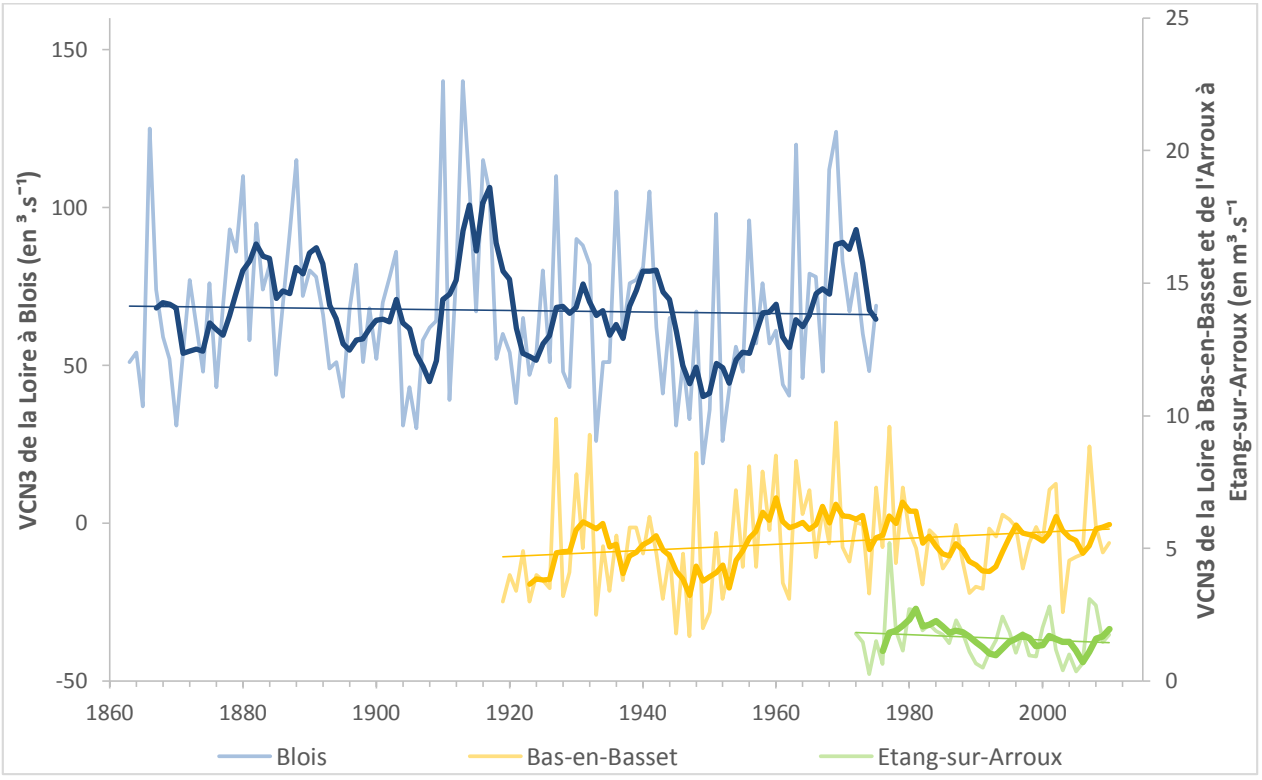


Fig. 59. *Evolutions des VCN3 annuels pour la Loire à Bas-en-Basset et Blois et à Etang-sur-Arroux pour l'Arroux (en m³.s⁻¹).*

	Données	Pentes (en m³.s⁻¹.an⁻²)	Gradient temporel en m³.s⁻¹ par décade
Bas en Basset	1919 – 2010	0,011	+0,11
Etang-sur-Arroux	1972 – 2010	-0,010	-0,10
Blois	1863 - 1975	-0,024	-0,24

Tab. 21. *Pentes des droites de régression linéaire des chroniques de VCN3 en fonction du temps.*

Ces périodes confirment essentiellement l'absence de tendance significative sur l'ensemble des chroniques des VCN3 (tab. 22 et fig. 60). Une légère diminution de la médiane des VCN3 est observable à Blois entre les périodes 1863-1891 et 1892-1981. Néanmoins, les valeurs moyennes ne présentent pas d'évolution identique. La période 1982-2010 illustre l'impact de la

politique de soutien des débits d'étiage sur les VCN3 de la Loire à Blois (augmentation de tous les indicateurs statistiques, excepté l'écart-type et l'écart interquartile qui diminuent). Enfin, on peut noter la réduction de l'écart interquartile (-54%) à Bas-en-Basset (station en amont du barrage de Villerest) entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010. Malgré l'absence de tendance, on retrouve dans ces VCN3 l'impact de la variabilité interannuelle importante des débits de la Loire.

	Bas-en-Basset				Etang-sur-Arroux		
	1919-2010	1922-1951	1952-1981	1982-2010	1972-2010	1972-2001	1982-2010
Moyenne	5,2	4,7	5,9	5,2	1,6	1,7	1,5
Ecart-type	1,8	2,1	1,9	1,3	0,9	0,9	0,7
1er quartile	4,0	3,3	4,5	4,5	1,0	1,1	1,0
Minimum	1,7	1,7	3,1	2,6	0,3	0,3	0,4
Médiane	5,0	4,8	5,7	5,2	1,6	1,8	1,6
Maximum	9,9	9,9	9,8	8,9	5,2	5,2	3,1
3ème quartile	5,9	5,6	7,3	5,8	2,0	2,0	1,9
Ecart interquartile	2,0	2,3	2,8	1,3	0,9	0,9	0,9

	Blois					
	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	70,4	71,1	68,1	63,1	73,9	76,4
Ecart-type	26,5	23,0	28,7	24,7	33,8	18,3
1er quartile	51,0	53,0	51,0	47,3	48,1	64,8
Minimum	19,0	31,0	30,0	19,0	26,0	49,5
Médiane	67,0	72,0	63,0	61,0	65,0	74,3
Maximum	185,0	125,0	140,0	110,0	185,0	124,0
3ème quartile	82,0	82,0	79,5	80,8	85,6	87,1
Ecart interquartile	31,0	29,0	28,5	33,5	37,6	22,3

Tab. 22. *Caractérisation par périodes de 30 ans des chroniques de VCN3 pour la Loire à Bas-en-Basset et Blois et pour l'Arroux à Etang-sur-Arroux.*

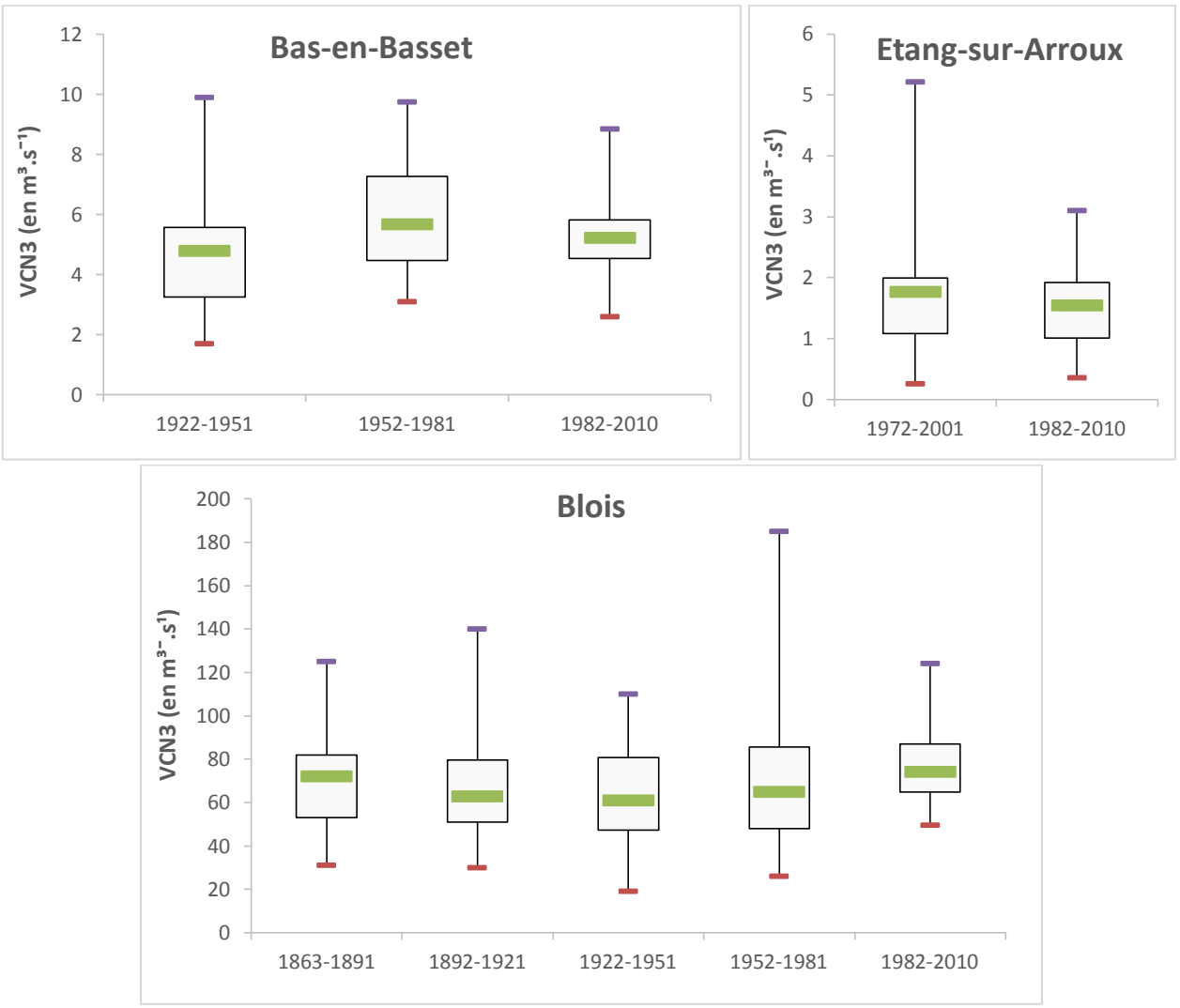


Fig. 60. *Boîtes à moustaches (Tukey, 1997) caractérisant les chroniques de VCN3 (en $m^3.s^{-1}$) pour les stations de Bas-en-Basset et Blois pour la Loire et Etang-sur-Arroux pour l'Arroux. Les boîtes à moustaches représentent en vert foncé dans la partie centrale la valeur médiane de la série, le cadre autour de la médiane a pour limite les 1^{er} et $3^{ème}$ quartiles, et enfin les lignes verticales au-delà du cadre rejoignent le minimum et le maximum de la série. Ce commentaire descriptif des boîtes à moustaches est applicable à l'ensemble des exemples de cette méthode de représentation graphique de ce document.*

Des corrélations entre les VCN3 de la Loire à Blois et les données climatiques ont été recherchées. On observe une certaine cohérence (corrélation inverse) avec les variations des maxima annuels de températures, pour les longues chroniques (fig. 61). Cela signifie donc que plus les maxima annuels des températures sont importants, plus les VCN3 de la Loire à Blois sont faibles. Est illustré ainsi l'impact de l'évapotranspiration (dont les prélèvements augmentent avec

la température) sur les débits journaliers les plus faibles. Aucune corrélation significative n'a pu être déterminée entre les VCN3 et les précipitations (fig. 61).

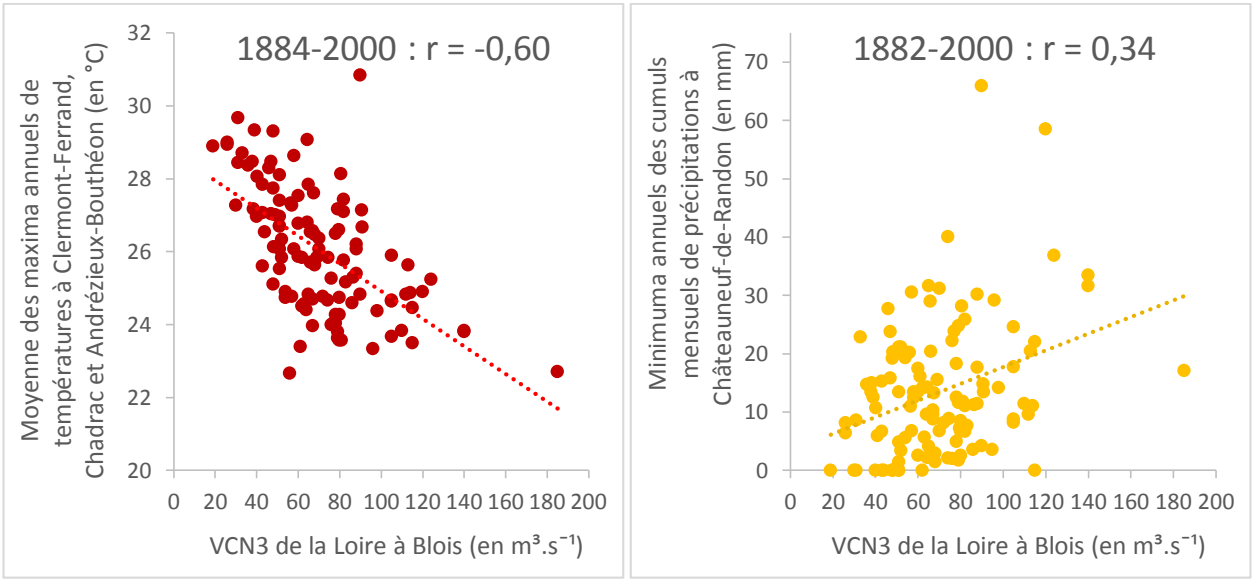


Fig. 61. *Recherche de corrélations entre les VCN3 de la Loire à Blois et les longues chroniques de données climatiques.*

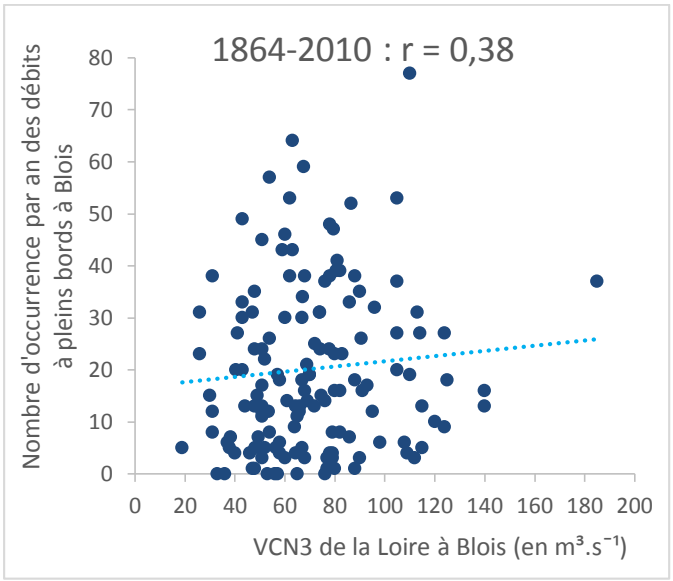


Fig. 62. *Absence de corrélation entre les VCN3 de la Loire et l'occurrence des débits à pleins bords à Blois.*

Enfin, une corrélation a été recherchée entre les VCN3 et le nombre d'occurrence par an des débits à pleins bords (QJM>1000 $m^3.s^{-1}$) à Blois (fig. 62). En effet, ces débits à pleins bords jouent un rôle majeur dans la recharge des nappes alluviales. Une recharge importante des

nappes permet, pendant la saison de basses-eaux suivante, un meilleur soutien des débits de la part des nappes. Plus les débits à pleins bords sont nombreux dans une année, plus les VCN3 pourraient donc être importants. Cette relation n'est néanmoins pas mise en lumière par les corrélations présentées ici (fig. 62).

3.5.2. Maxima annuels des débits journaliers

En ce qui concerne le débit journalier maximum d'une année hydrologique, les problèmes de données sont moins importants. D'après la figure 63 et le tableau 23, cet indice connait des évolutions depuis 150 ans. Il est notable que les chroniques de Gien et de Blois fonctionnent ensemble. La pente de leur droite de régression linéaire, en fonction du temps, diffèrent car les données disponibles à Gien sont plus réduites dans le temps (tab. 23). La chronique de Gien n'apporte donc rien à l'étude. De plus, en comparant les chroniques de Bas-en-Basset, de Villerest et de Vieille-Brioude, il est visible qu'elles ne varient pas de façon synchrone et cela témoigne donc d'influences climatiques et physiques des bassins versants qui diffèrent entre la haute Loire et l'Allier.

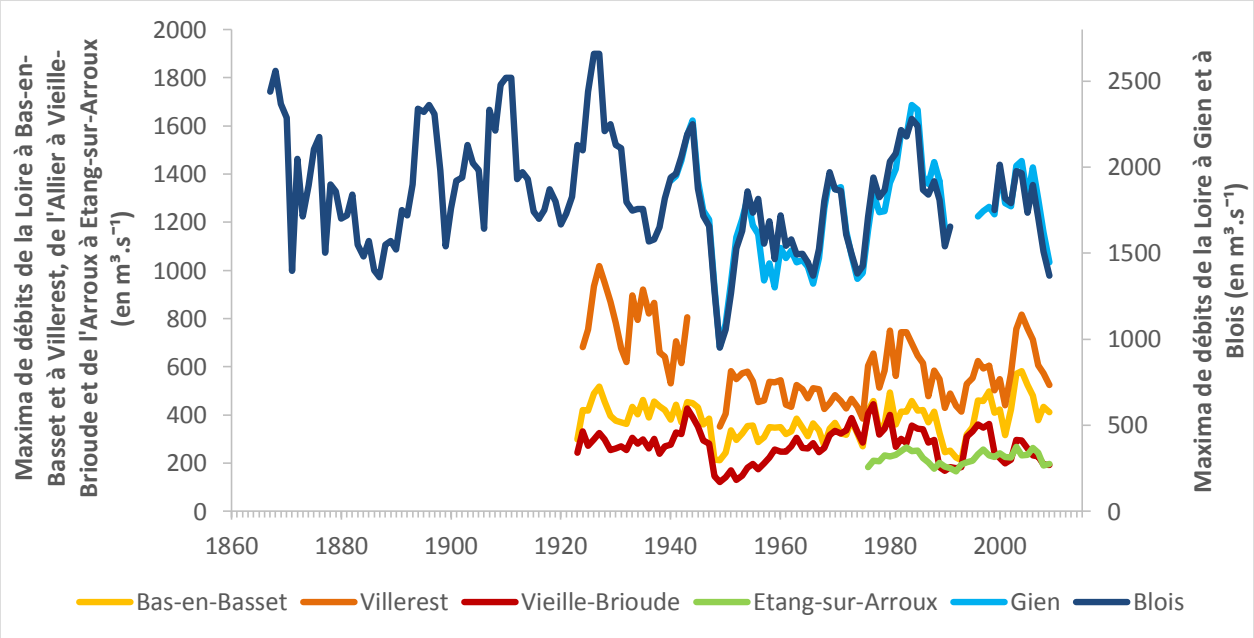


Fig. 63. *Moyennes mobiles de période 5 ans des maxima de débits pour la Loire à Bas-en-Basset, à Villerest, à Gien et à Blois, pour l'Allier à Vieille-Brioude et pour l'Arroux à Etang-sur-Arroux.*

	Données	Pentes (en $m^3.s^{-1}.an^{-2}$)	Gradient temporel (en $m^3.s^{-1}$ par décade)
Bas-en-Basset	1919-2009	0,64	+6,5 (soit +1,7% de la moyenne)
Villerest	1920-2009	-1,80	-18 (soit -3,0% de la moyenne)
Vieille-Brioude	1919-2009	-0,01	-0,1 (soit -0,04% de la moyenne)
Etang-sur-Arroux	1972-2009	0,35	+3,5 (soit +1,6% de la moyenne)
Gien	1936-2009	2,61	+26,1 (soit +1,5% de la moyenne)
Blois	1863-2009	-2,20	-22,0 (soit -1,2% de la moyenne)

Tab. 23. *Pentes des droites de régression linéaire des chroniques des maxima annuels de débits sur la Loire, à Bas-en-Basset, Villerest, Gien et Blois, sur l'Allier à Vieille-Brioude et sur l'Arroux à Etang-sur-Arroux, en fonction du temps.*

Ainsi, trois chroniques ont fait l'objet d'une description plus détaillée (fig. 64) : Bas-en-Basset (1919-2009), Villerest (1920-2009) et Blois (1863-2009).

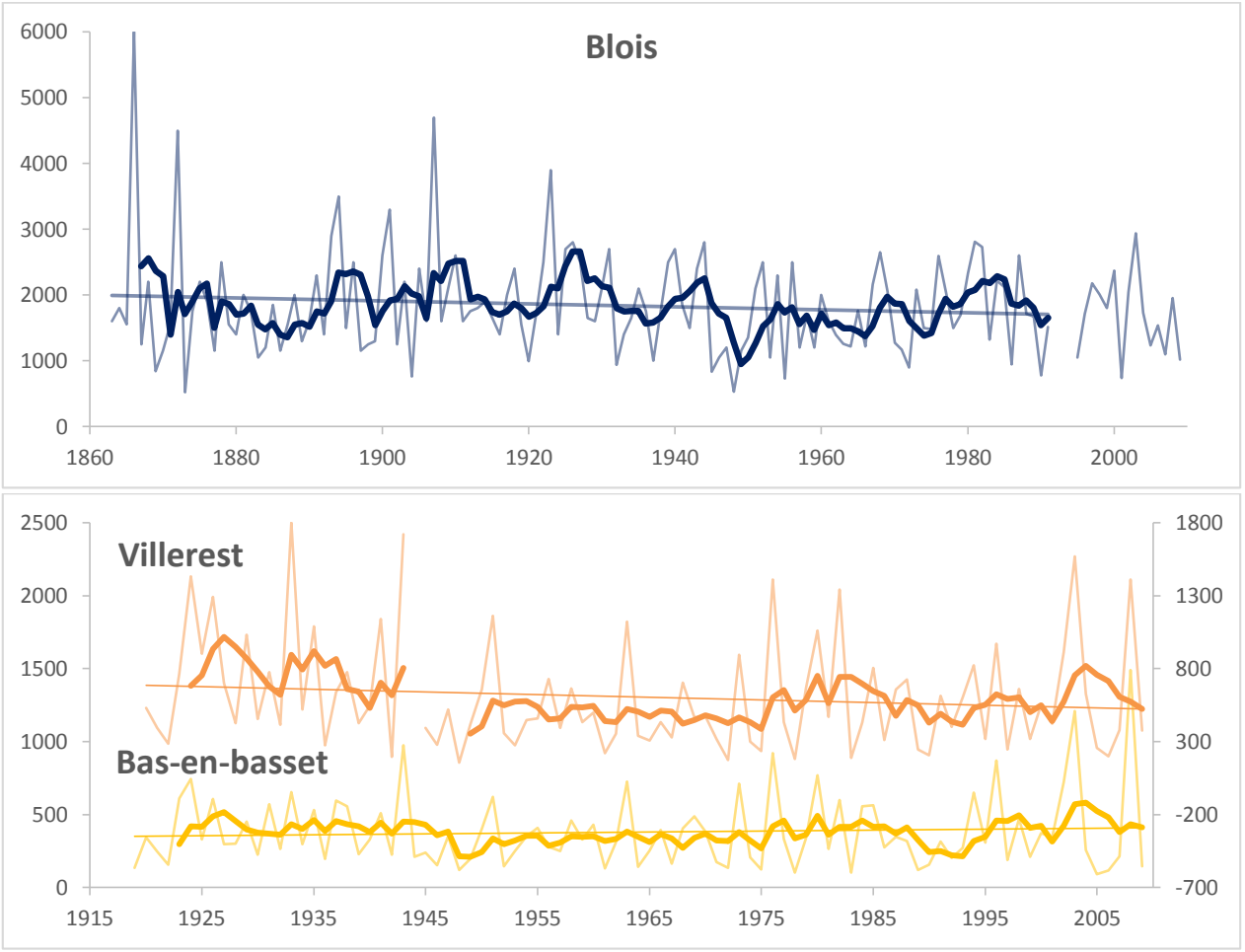


Fig. 64. *Maxima des débits de la Loire à Bas-en-Basset, Villerest et Blois (en $m^3.s^{-1}$) : série de données, moyenne mobile de période 5 ans et régression linéaire. La chronique de Villerest dépend de l'axe vertical secondaire.*

Pour la Loire à Blois (tab.24 et fig. 65), tout d'abord, on peut noter les particularités de la période 1863-1891 qui réunit le minimum et le maximum de la chronique ainsi que la valeur médiane la plus faible. La principale évolution au cours du temps dans la chronique des maxima de débits à Blois réside dans la dispersion des données qui évolue. Depuis le milieu des années 1920, les débits journaliers supérieurs à 3000 $m^3.s^{-1}$ ont disparu, de même que les maxima annuels inférieurs à 700 $m^3.s^{-1}$ depuis les années 1950. A Blois, les valeurs les plus extrêmes des maxima de débits ont perdu de leur variabilité en diminuant fortement, ce qui mène à une certaine homogénéisation de la chronique. Enfin, depuis la fin du 19ème siècle, la moyenne des maxima des périodes de trente ans diminue de façon continue. Entre les périodes 1863-1891 et 1982-2009, elle a baissé de 13%.

	Bas-en-Basset				Villerest			
	1920-2009	1922-1951	1952-1981	1982-2009	1920-2009	1922-1951	1952-1981	1982-2009
Moyenne	382	398	346	410	605	730	505	591
Ecart-type	251	209	207	335	378	442	292	375
Minimum	93	120	101	93	157	157	175	188
1er quartile	210	226	182	198	330	416	322	317
Médiane	316	328	320	310	466	640	434	491
3ème quartile	505	567	409	558	765	1030	623	745
Maximum	1490	973	920	1490	1800	1800	1410	1570
Ecart interquartile	295	341	227	359	435	614	301	428
Médiane – 1er quartile	106	103	138	112	136	224	112	174
3ème quartile - médiane	189	239	89	248	299	390	189	255

	Blois					
	1863-2009	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2009
Moyenne	1832	1833	1978	1880	1730	1720
Ecart-type	787	1067	835	760	572	607
Minimum	520	520	760	530	730	740
1er quartile	1268	1250	1425	1363	1230	1230
Médiane	1700	1600	1725	1750	1655	1710
3ème quartile	2200	2000	2400	2500	2140	2120
Maximum	6000	6000	4700	3900	2810	2940
Ecart interquartile	933	750	975	1138	910	890
Médiane – 1er quartile	433	350	300	388	425	480
3ème quartile - médiane	500	400	675	750	485	410

Tab. 24. *Caractéristiques des chroniques des maxima annuels de débits de la Loire à Blois, Bas-en-Basset et Villerest (en $m^3.s^{-1}$), divisées en périodes de trente ans.*

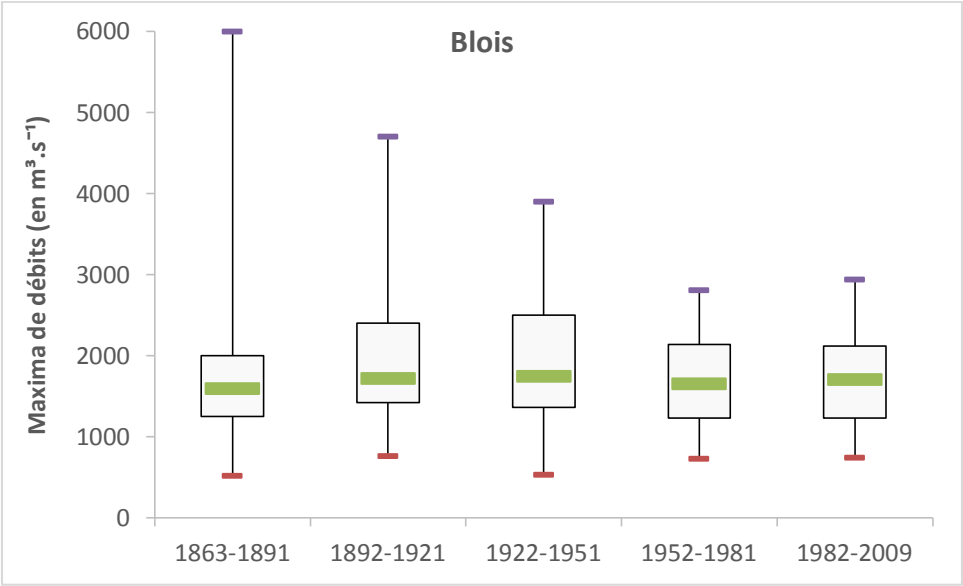


Fig. 65. *Boîtes à moustaches caractérisant des périodes de trente ans de la chronique des maxima des débits de la Loire à Blois (en m³.s⁻¹).*

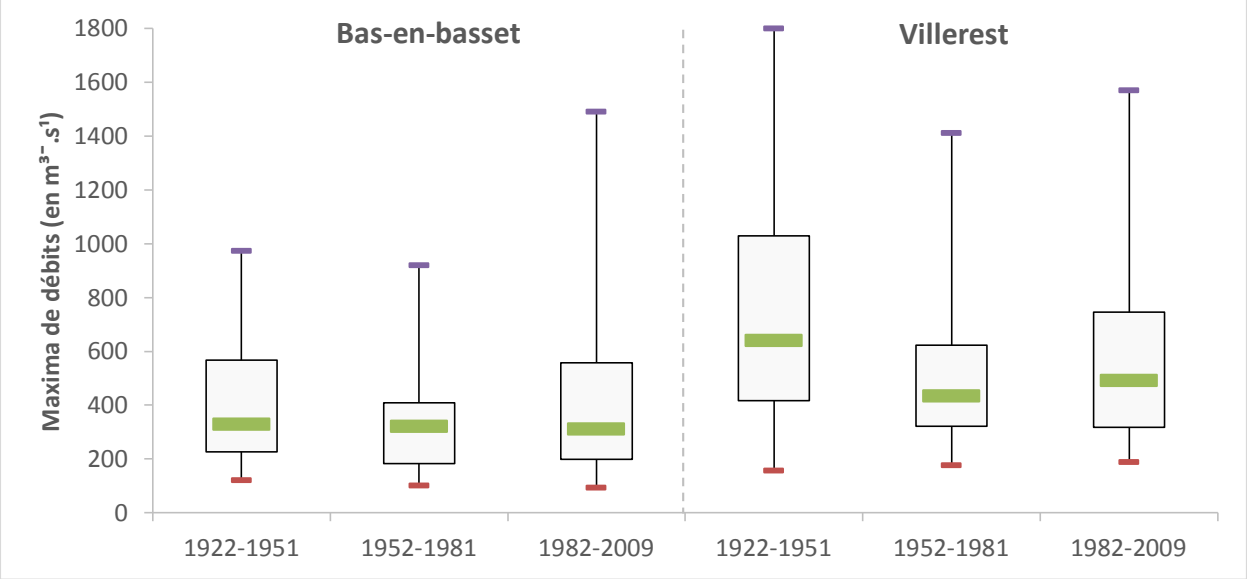


Fig. 66. *Boîtes à moustaches caractérisant des périodes de trente ans des chroniques des maxima de débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest (en m³.s⁻¹).*

Au contraire, à Bas-en-Basset (tab. 24 et fig. 66), la période la plus récente (1982-2009) réunit le maximum et le minimum de l'ensemble de la chronique, la médiane la plus faible des périodes de trente ans, et la moyenne la plus forte. La médiane est la seule caractéristique statistique qui connaît une évolution continue et homogène sur l'ensemble de la chronique : une légère baisse de - 5,5% entre 1922-1951 et 1982-2009.

A Villerest, on constate une situation intermédiaire entre Bas-en-Basset et Blois (tab. 24 et fig. 66). Les maximums des périodes 1922-1951 et 1982-2009 sont importants. Les variations des valeurs moyennes et médianes sont importantes entre les différentes périodes mais pas uniformes dans le temps.

Pour expliquer ces différences entre les stations de Villerest et de Bas-en-Basset, il est possible de se demander si les maxima de débits y surviennent au même moment et appartiennent aux mêmes évènements hydrologiques. En effet, d'après le tableau 25, l'occurrence saisonnière des maxima de débits diffèrent entre les deux stations.

	De janvier à mars	D'avril à juin	De juillet à septembre	D'octobre à décembre
Bas-en-Basset	16 (18%)	26 (29%)	4 (4,5%)	43 (48,5%)
Villerest	28 (31,5%)	23 (26%)	3 (3,5%)	35 (39%)

Tab. 25. *Occurrences saisonnières des maxima annuels de débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest, de 1920 à 2009.*

A Bas-en-Basset, les maxima de débits apparaissent plus fréquemment à l'automne, au détriment des mois d'hiver, où leur occurrence y est plus fréquente à Villerest qu'à Bas-en-Basset. Ces occurrences automnales à Bas-en-Basset sont révélatrices des influences climatiques cévenoles que subit la partie méridionale du bassin versant de la Loire.

On pourrait donc attribuer aux précipitations cévenoles les évolutions des maxima de débits de la Loire à Bas-en-Basset : une analyse des conditions météorologiques de formation de ces maxima de débits pourrait valider (ou non) cette hypothèse. Pour le moment, elle est néanmoins difficile à vérifier puisqu'aucune station météorologique de ce secteur n'a fait l'objet de traitement pour homogénéiser les données. La rapidité avec laquelle ces particularités sont masquées vers l'aval est notable.

L'occurrence par mois des maxima de débits de la Loire à Blois est assez variable (fig.67). Le plus notable est l'allongement de la période, correspondant à l'étiage, où ces maxima ne surviennent pas. De 1863 à 1891, seul le mois d'août n'avait connu aucun maximum de débits. De 1922 à 2009, aucun maximum de débits n'est survenu de juillet à octobre. On peut également

souligner que l'occurrence de ces maxima augmente en mai pour atteindre, pour la période 1982-2009, 20% des occurrences des maxima de débits pendant ce mois.

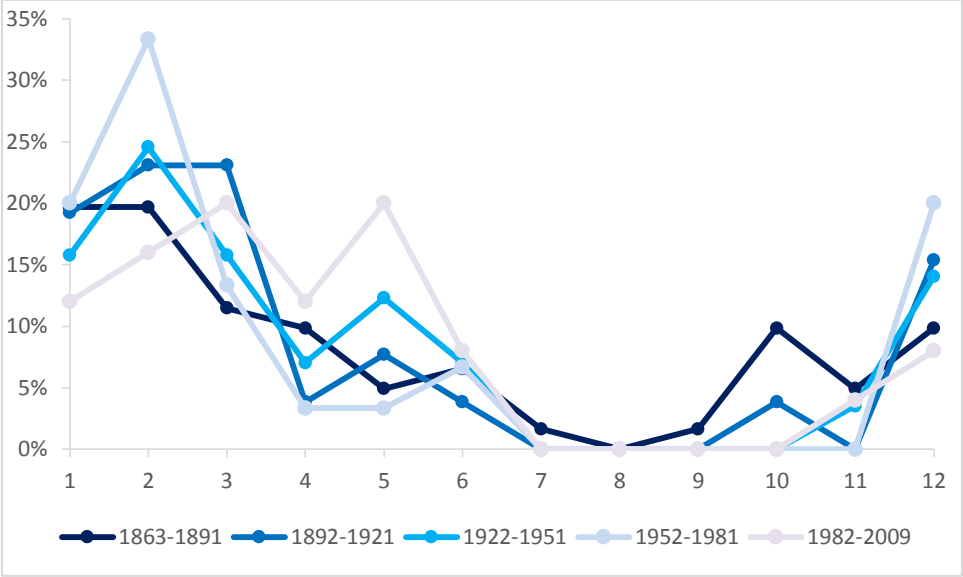


Fig. 67. *Evolutions entre 1863 et 2009 des pourcentages, par mois, des occurrences des maxima de débits de la Loire à Blois.*

Enfin, aucune corrélation significative n'a pu être définie entre la chronique des maxima de débits de la Loire à Blois et les données de précipitations disponibles (fig. 68).

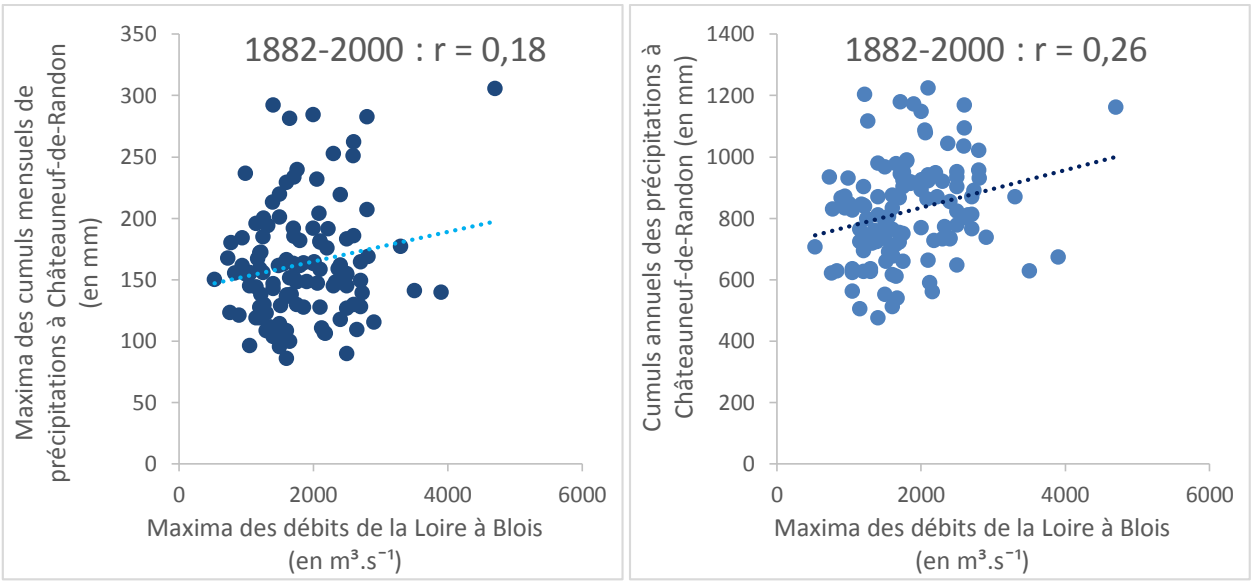


Fig. 68. *Absence de corrélation entre les maxima de débits de la Loire à Blois et les données de précipitations.*

Au sein des chroniques de VCN3 aucune évolution significative n'a pu être démontrée hors de l'influence artificielle des grands barrages. A l'amont de la haute Loire, l'écart interquartile de la chronique des VCN3 de la Loire à Bas-en-Basset a néanmoins été divisé par deux entre les périodes 1952-1981 et 1982-2009. Enfin, le lien entre les maxima de températures et les VCN3 a été démontré pour les longues chroniques de données : une corrélation inverse significative.

En ce qui concerne les maxima annuels des débits journaliers de la Loire, à Blois, la gamme des valeurs évolue vers la diminution de son étendue statistique, notamment pour les valeurs supérieures à la médiane. Ceci traduit, notamment, la disparition des débits supérieurs à 3 000 $m^3.s^{-1}$, dès les années 1920 et celle des maxima annuels de débits inférieurs à 700 $m^3.s^{-1}$, depuis les années 1950. Pour finir, la disparition de l'occurrence de ces maxima de débits à Blois de juillet à octobre a été observée depuis les années 1920.

3.6. Les basses-eaux

A Blois, le débit de basses-eaux correspond à 105 $m^3.s^{-1}$ (débit de fréquence 0.2). Pour étudier les basses-eaux de la Loire, cinq indices statistiques ont été créés à partir des chroniques de débits : le nombre de jours de basses-eaux pour une année hydrologique (ici de mars à février), les dates de début, de milieu et de fin de basses-eaux, ainsi que le volume déficitaire de basses-eaux.

Les débits-seuils de basses-eaux ont été défini empiriquement, à partir des chroniques de débits, de manière à ce que, chaque année, une période de basses-eaux soit définie. Le choix du débit de fréquence 0,2 pour les basses-eaux, s'avère conforme aux attentes, puisque, pour les basses-eaux, à la station de Blois, seulement 11,6% des années n'ont pas de basses eaux (selon cette définition).

Etant donné la variété des indices créés, il a été choisi de ne travailler qu'à partir des données de la station de Blois qui présente la chronique la plus longue (1863-2010), malgré le fait qu'il n'existe pas de données de « débits naturels reconstitués » pour cette station.

La période de basses-eaux est considérée comme un volume d'eau manquant, par rapport au seuil de débit de fréquence 0,2, ce qui permet de varier les indices caractérisant la période. Ainsi, la date de début de basses-eaux est la date à laquelle sont atteints 10% du volume déficitaire, la date de milieu de basses-eaux au bout de 50% du volume déficitaire et enfin la date de fin de basses-eaux au moment où le déficit atteint 90% de son volume annuel total (fig. 69). Il faut noter qu'il existe donc un décalage entre le nombre de jours de basses-eaux et le nombre de jours qui séparent les dates de début et de fin des basses-eaux.

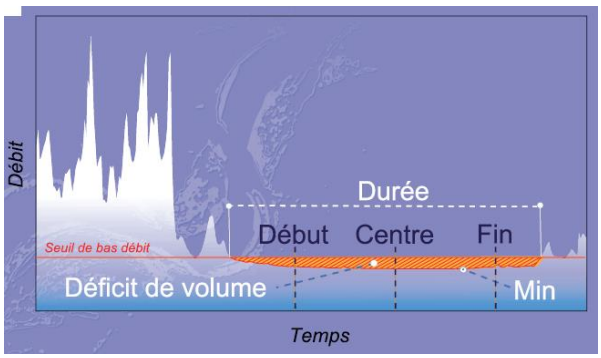


Fig.69. *Illustrations des indices hydrologiques qui caractérisent les basses-eaux. Source : Giuntoli et al., 2012.*

De plus, entre les dates de début et de fin des basses-eaux, pour certaines années, le débit dépassent le seuil de débit de basses-eaux (les chiffres et les exemples développés ici concernent uniquement la chronique des débits de la Loire à Blois). Entre 1863 et 2010, 46% des années connaissent de tels dépassements du débit-seuil entre les dates de début et de fin de basses-eaux. En moyenne, un dépassement du seuil de débit se produit par an, entre les dates de début et de fin de basses-eaux. Enfin, en moyenne, 12% des jours inclus entre la date de début ddes basses-eaux et celle de fin présentent un débit supérieur au débit-seuil des basses-eaux.

Pour illustrer les limites de ces indices caractérisant les dates des basses-eaux, deux années hydrologiques sont présentées comme exemples (fig. 70) : l'année 1875-1876, pendant laquelle le nombre de jours, entre la date de début et de fin des basses-eaux, qui ont un débit supérieur à 105 $m^3.s^{-1}$, est le plus important (77% des jours), et l'année 1948-1949 pendant laquelle le nombre de dépassements du seuil de débit des basses-eaux, entre les dates de début et de fin des basses-eaux, est le plus important (6 dépassements du seuil).

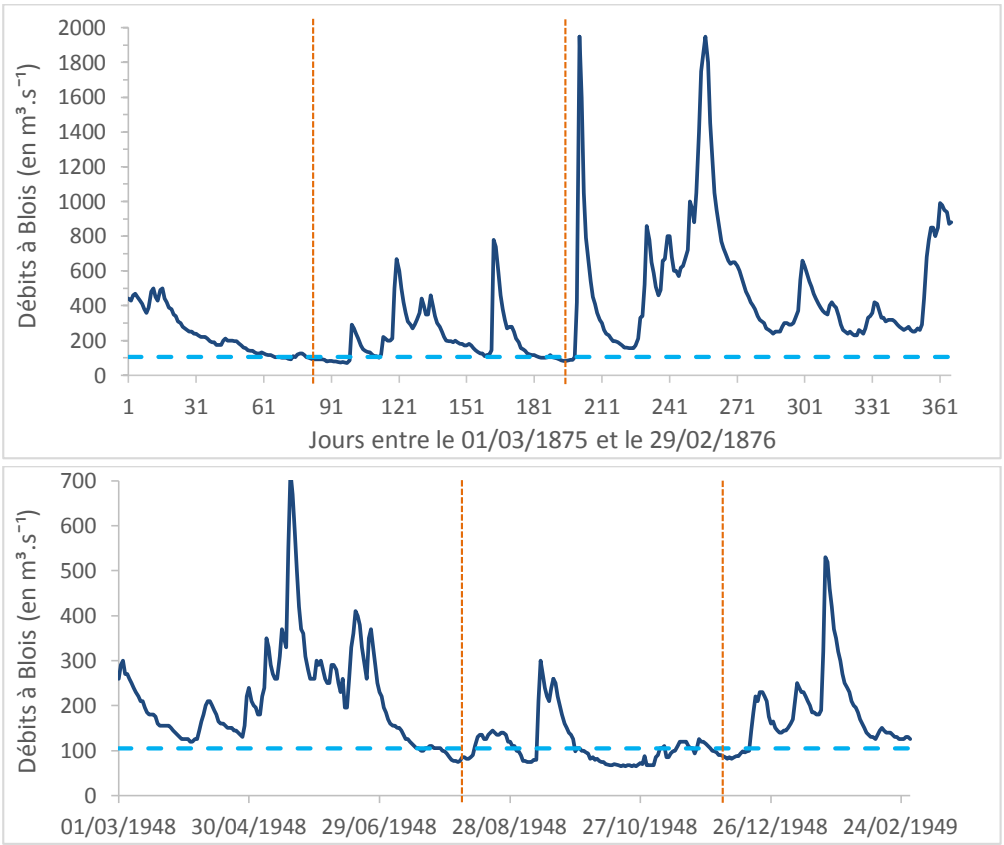


Fig. 70. *Limites des indices des dates de début et de fin des basses-eaux. La ligne en tirets horizontale représente le seuil de débit des basses-eaux de la Loire à Blois (105 $m^3.s^{-1}$). Les lignes verticales indiquent les dates de début et de fin des basses-eaux.*

Enfin, il est important de rappeler que l'objectif de la gestion des deux grands barrages (Naussac et Villerest) est d'empêcher les débits de la Loire moyenne de diminuer sous le seuil de 60 $m^3.s^{-1}$ à Gien. Sur les 5 indices, un seul sera profondément influencé par la politique de soutien d'étiage, celui du volume déficitaire. En effet, les lâchers des barrages modifient les débits les plus faibles. Le déficit de volume de basses-eaux sera donc réduit du volume d'eau lâché par les barrages.

Cependant, la politique de soutien des débits d'étiage n'a peu ou pas d'impacts sur les débits de l'ordre de grandeur de 100 $m^3.s^{-1}$. L'indice du nombre de jours de basses-eaux peut donc être étudié en considérant que l'impact des barrages est modique.

En ce qui concerne les dates de début, milieu et fin des basses-eaux, elles dépendent directement de l'indice de déficit de volume. Comme le déficit de volume d'étiage diminuera sous l'effet des barrages, les dates de début des basses-eaux pourraient être un peu avancées (les 10% du volume déficitaire étant atteints plus tôt). De même, les dates de fin des basses-eaux pourraient être un peu plus tardives. Dans tous les cas, il conviendra d'être prudent dans l'interprétation d'évolutions de l'occurrence des basses-eaux depuis 1975.

Le nombre de jours de basses-eaux par année hydrologique

Les basses-eaux de la Loire durent en moyenne à Blois un peu plus de deux mois. La moitié des années hydrologiques connait un période de basses-eaux qui dure entre un et trois mois et demi (pour les valeurs médianes ; fig. 71 et tab. 26).

Entre les périodes 1863-1921 et 1922-2010, on observe une augmentation des valeurs moyenne et médiane (respectivement +10 jours, soit +15% et +12 jours, soit +21%).

De plus, l'importance du premier quartile de la période 1982-2010 est notable (44,5 jours alors que le premier quartile pour la période 1863-1981 est de 29 jours). Cela signifie que les basses-eaux les plus courtes de cette dernière période durent plus longtemps que celles des périodes précédentes.

Enfin, on peut noter **l'augmentation continue, sur l'ensemble de la chronique, de la durée maximale des basses-eaux** (fig. 72), qui évolue de 166 jours pour la période la plus ancienne (1863-1891) à 201 jours pour la période récente (1982-2010).

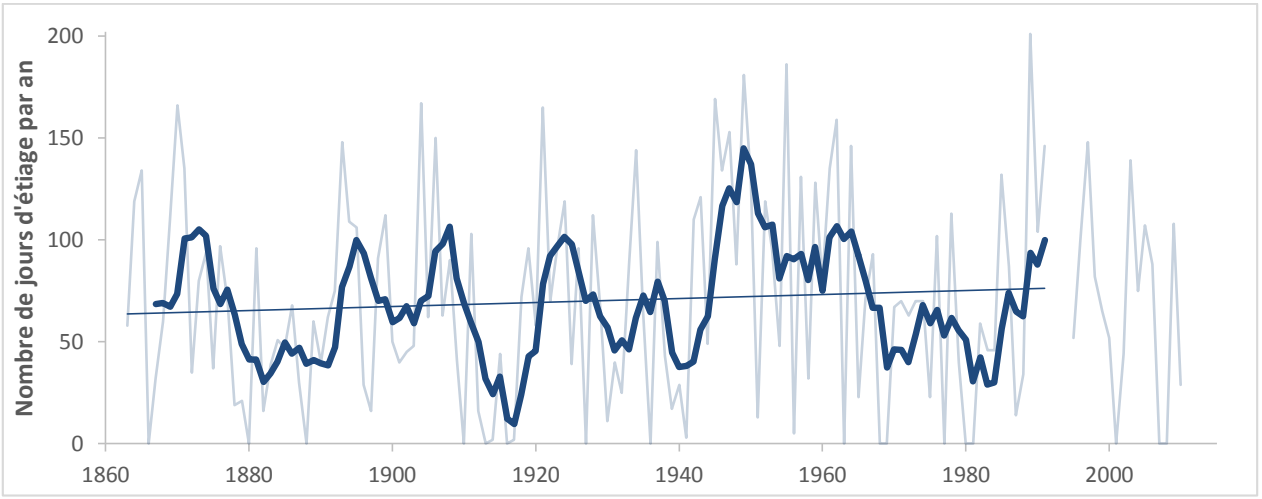


Fig. 71. *Nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à la station de Blois : série de données, moyenne mobile de période 5 ans et droite de régression linéaire (sur la période 1863-1991, à cause de la lacune dans les données de 1992 à 1994 inclus).*

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	69,8	61,2	66,7	77,0	69,0	75,3
Ecart-type	50,4	43,3	50,3	53,4	54,4	51,4
1er quartile	30,0	32,0	31,8	31,5	23,0	44,5
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Médiane	65,0	58,0	60,0	79,0	70,0	70,0
Maximum	201,0	166,0	167,0	181,0	186,0	201,0
3ème quartile	106,0	94,0	101,3	117,3	110,3	106,3
Ecart interquartile	76,0	62,0	69,5	85,8	87,3	61,8
Médiane - 1er quartile	35,0	26,0	28,3	47,5	47,0	25,5
3ème quartile - médiane	41,0	36,0	41,3	38,3	40,3	36,3
Nombre d'années sans étiage	17	3	3	2	6	3

Tab. 26. *Caractérisation des périodes de trente ans et de l'ensemble de la chronique du nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à la station de Blois.*

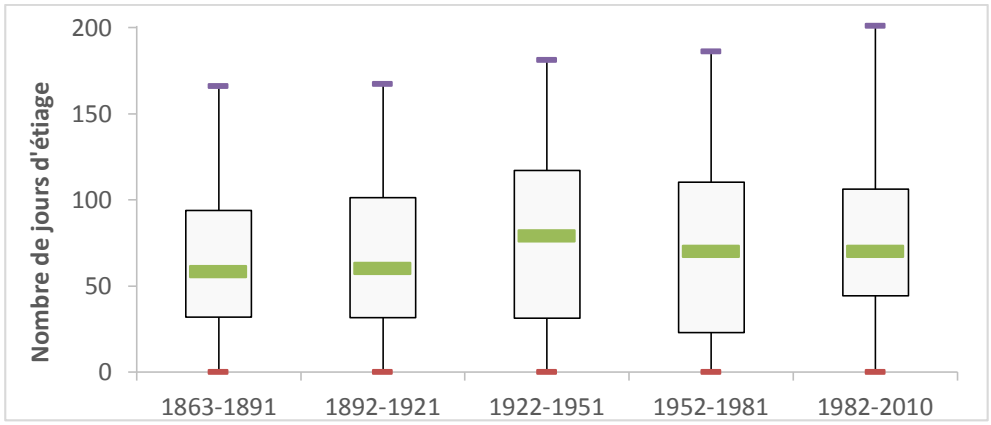


Fig. 72. *Boîtes à moustaches caractérisant les périodes de trente ans de la chronique du nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à Blois.*

Le déficit de volume en période de basses-eaux

La lecture de la description et de l'interprétation de cet indice est compliquée par son caractère inverse : **plus les débits de basses-eaux sont faibles, plus le volume de déficit est important, et vice-versa.**

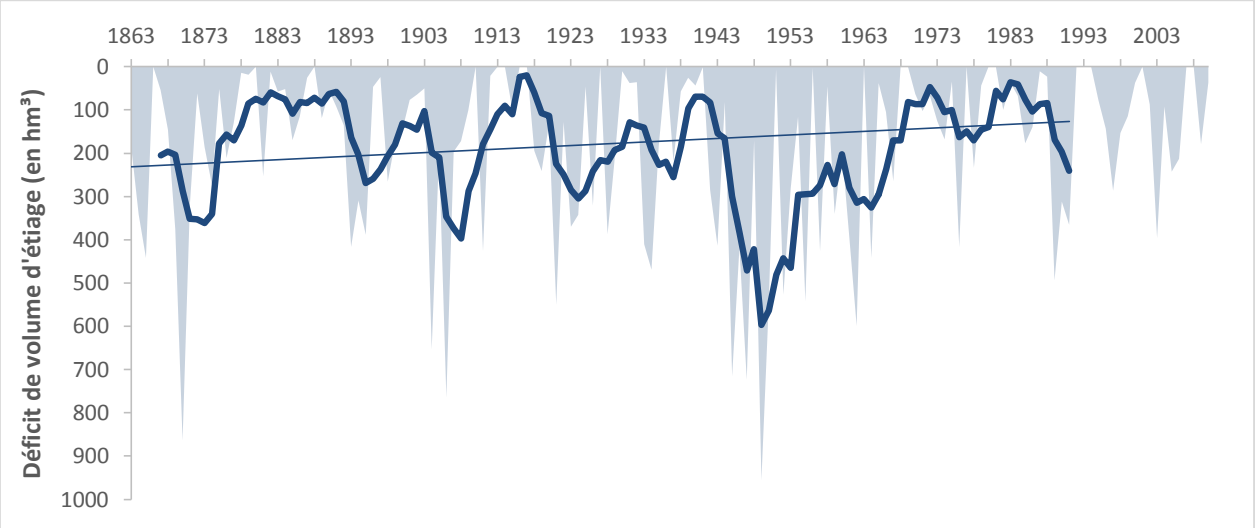


Fig. 73. *Déficit de volume de la Loire en période de basses-eaux à Blois (en hm³) : série de données, moyenne mobile de période 5 ans et régression linéaire (sur la période 1863-1991, à cause de la lacune dans les données de 1992 à 1994 inclus).*

La période 1922-1951 caractérise une période aux basses-eaux plus creuses avec un volume de déficit en forte augmentation par rapport aux périodes précédentes et suivantes (fig. 74). Il est nécessaire de rapprocher ces volumes de déficit importants des nombres de jours de basses-eaux. En effet, pour cette même période de 1922-1951, les valeurs de la médiane, de la moyenne et du 3ème quartile du nombre de jours de basses-eaux sont les maxima des différentes périodes de trente ans.

De plus, **les basses-eaux les plus creuses (dont le déficit de volume dépasse les 500 hm³.an^{-1}) ont disparu depuis 1961** (fig. 73). Cette disparition date d'avant la mise en place de la politique de soutien des débits d'étiage. Néanmoins, l'importance de telles basses-eaux seraient aujourd'hui limitée par les grands barrages.

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	189	159	195	254	186	146
Ecart-type	198	183	201	251	191	134
1er quartile	37	51	47	39	35	37
Minimum	0	0	0	0	0	0
Médiane	128	115	141	195	110	107
Maximum	956	864	765	956	599	494
3ème quartile	287	211	260	405	325	205
Ecart interquartile	249	160	212	365	290	167
Médiane - 1er quartile	90	63	93	155	75	70
3ème quartile - médiane	159	97	119	210	215	97

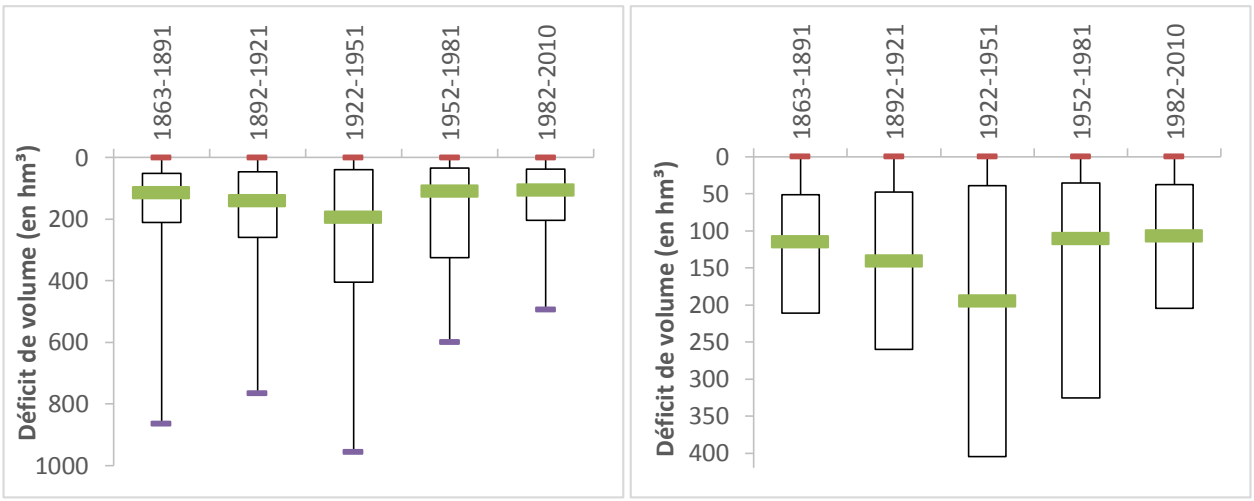


Fig. 74. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les périodes de trente ans de la chronique du déficit annuel de volume de basses-eaux de la Loire à Blois (en hm³). Entre les deux graphiques représentant les boîtes à moustaches, seule l'échelle de l'axe vertical est modifiée.*

L'impact de la politique de soutien d'étiage doit donc entraîner une diminution artificielle des volumes de déficit étant donné que les débits les plus faibles sont augmentés. En effet, la période 1981-2010 présente les plus faibles valeurs de la médiane, de la moyenne, du 3ème quartile et de l'écart-type comparativement aux autres périodes de trente ans. On mesure ainsi l'importance de l'impact de la politique de soutien des débits d'étiage.

Néanmoins, la période 1952-1981, précédant la mise en place des barrages, est caractérisée par des valeurs faibles de la médiane et du 1er quartile. Pour cette période 1952-

1981, la moyenne est proche de la moyenne de l'ensemble de la chronique, ce qui s'explique par les pics de déficit de volume des années 1953, 1955 et 1961 (fig. 73).

Il existe donc **une diminution importante du volume de déficit en période de basses-eaux depuis le début des années 1960**. Entre les périodes 1892-1961 et 1962-2010, la médiane du déficit de volume de basses eaux connaît une baisse de 46% (de 178 à 96 $hm^3.an^{-1}$), et la moyenne de 40% (de 233 à 141 $hm^3.an^{-1}$).

Enfin, sur l'ensemble de la chronique, on observe une diminution du 1^{er} quartile, ce qui indique que les basses-eaux « les plus humides » le sont de plus en plus. Cette évolution des premiers quartiles pourrait indiquer une augmentation des débits de basses-eaux (inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ à Blois), dont les effets viendraient augmenter l'impact de la politique de soutien des débits en période d'étiage. On y reviendra en conclusion de ce sous-chapitre, lorsque que tous les indices caractérisant les basses-eaux auront été présentés, afin d'avoir tous les éléments pour discuter ces remarques.

Occurrence des basses-eaux dans l'année hydrologique

L'occurrence des basses-eaux dans l'année hydrologique permet de déterminer la saisonnalité de ces basses-eaux de la Loire à Blois. La figure 75 permet à nouveau d'appréhender la variabilité interannuelle de ces occurrences. On observe que les basses-eaux débutant au mois de mai ont disparu depuis 1937. De plus, les fins de basses-eaux tardives (au mois de novembre et décembre) sont plus fréquentes des années 1940 aux années 1980.

En moyenne, les basses-eaux de la Loire surviennent à Blois entre fin juillet et début octobre (fig. 76). Parmi les trois indices, les dates de début, milieu et fin des basses-eaux de la Loire à Blois, les dates de milieu de basses-eaux sont les plus révélatrices de la saison hydrologique. Leur date moyenne est le 5 septembre (fig. 76).

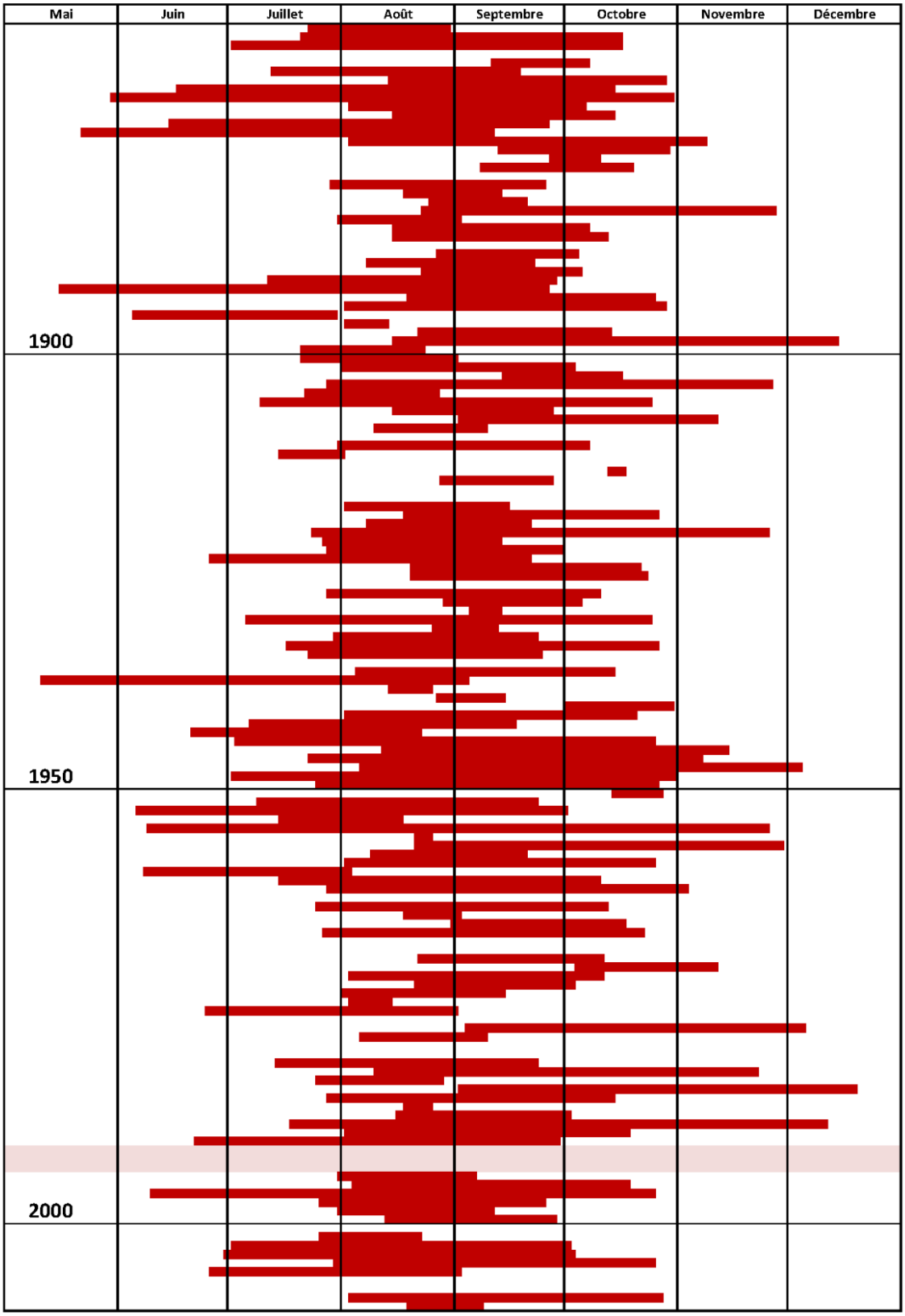


Fig. 75. *Occurrence des basses-eaux (indices des dates de début et de fin de basses-eaux) à Blois de 1863 à 2010. Chaque ligne horizontale représente une année. Pas de données de 1992 à 1994 inclus.*

Il est également remarquable, que l'occurrence des dates interquartiles de fin des basses-eaux connait une dispersion plus importante que pour les deux autres indices (fig. 76). Ainsi, pour les trois indices, les quartiles sont séparés des médianes de 14 à 20 jours, selon l'indice considéré. La moitié des années hydrologiques, incluse entre les deux quartiles, reflète donc bien la saisonnalité des occurrences des basses-eaux. La variabilité de l'occurrence des basses-eaux est essentiellement insufflée par les données plus exceptionnelles, dont les valeurs des indices se situent au-delà des 1er et 3ème quartiles.

	Début	Milieu	Fin
Moyenne	31 juillet	5 septembre	5 octobre
Ecart-type	29	25	29
Minimum	11 mai	3 juin	30 juillet
1er quartile	18 juillet	21 août	15 septembre
Médiane	2 août	4 septembre	5 octobre
3ème quartile	18 août	18 septembre	25 octobre
Maximum	14 octobre	8 novembre	19 décembre
Ecart interquartile	32	28	40
Médiane – 1er quartile	16	14	21
3ème quartile - médiane	16	14	20

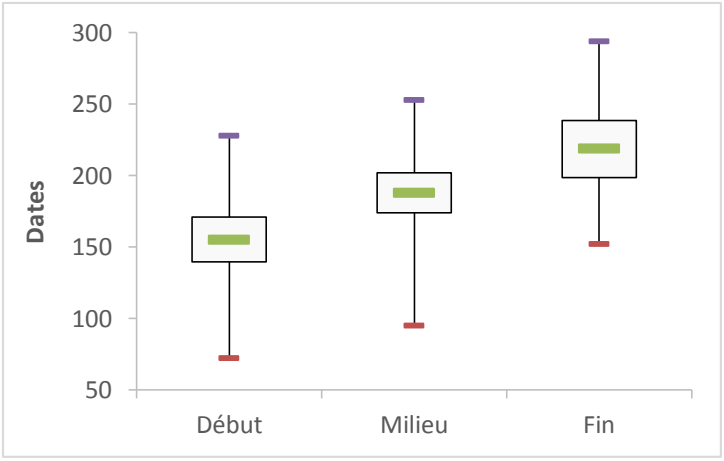


Fig. 76. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les trois indices (dates de début, de milieu et de fin des basses-eaux) définissant l'occurrence des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er mars ; 185 = 1er septembre ; 300 = 25 décembre.*

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	31/07	03/08	03/08	01/08	31/07	26/07
Ecart-type	29	32	29	32	29	21
Minimum	11/05	22/05	16/05	11/05	06/06	10/06
1er quartile	18/07	22/07	21/07	15/07	15/07	16/07
Médiane	02/08	11/08	02/08	29/07	03/08	30/07
3ème quartile	18/08	23/08	17/08	20/08	21/08	07/08
Maximum	14/10	27/09	13/10	14/10	04/10	02/09
Ecart interquartile	32	33	27	37	37	22
Médiane – 1er quartile	16	21	12	15	19	14
3ème quartile - médiane	16	12	15	22	19	8

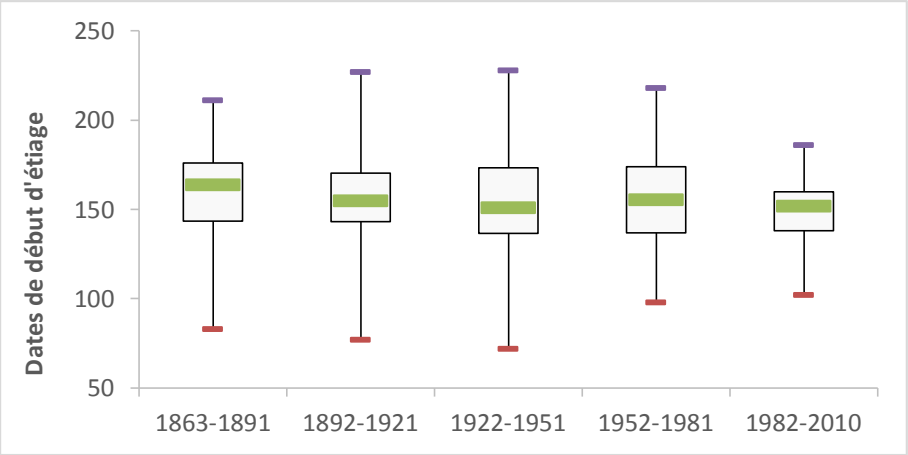


Fig. 77. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de début des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er mars ; 185 = 1er septembre ; 300 = 25 décembre.*

Tout au long de la chronique des dates de début de basses-eaux, les valeurs de la moyenne et de la médiane (fig. 77), sont de plus en plus précoces (respectivement -8 et -12 jours entre les périodes 1863-1891 et 1982-2010), de même que les 1er et 3ème quartiles (respectivement -6 et -16 jours entre les deux mêmes périodes). Il existe donc une évolution légère sur l'ensemble de la chronique qui tend vers **des débuts de basses-eaux un peu plus précoces**.

De plus, en ce qui concerne la variabilité interannuelle, la dispersion des dates de début de basses-eaux au-delà de l'espace interquartile a été réduite au cours du temps. En effet, depuis les années 1950, les basses-eaux les plus précoces, débutant en mai, ont disparu (fig. 75).

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	05/09	07/09	04/09	05/09	04/09	01/09
Ecart-type	25	29	24	19	26	26
Minimum	03/06	03/06	20/07	08/08	07/07	20/07
1er quartile	21/08	24/08	22/08	23/08	21/08	19/08
Médiane	04/09	07/09	06/09	04/09	04/09	28/08
3ème quartile	18/09	20/09	20/09	17/09	17/09	09/09
Maximum	08/11	07/11	20/10	19/10	28/10	08/11
Ecart interquartile	28	27	29	26	27	21
Médiane – 1er quartile	14	14	15	12	14	9
3ème quartile - médiane	14	13	14	14	13	12

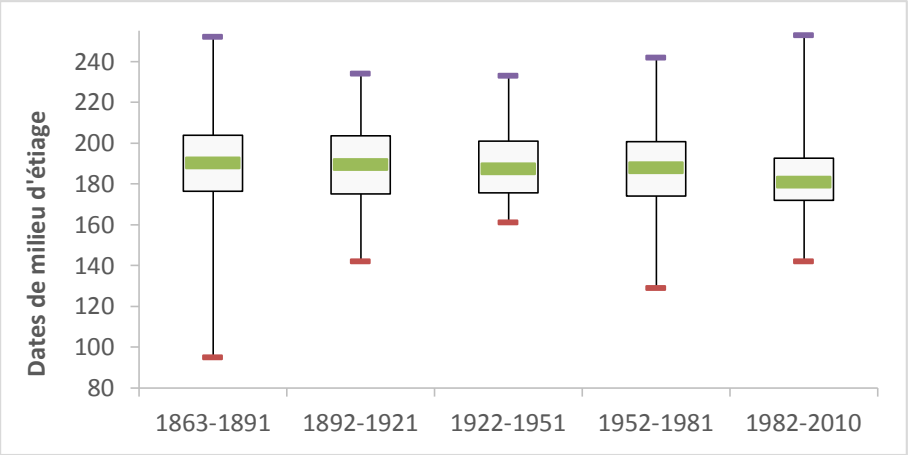


Fig. 78. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de milieu des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er mars ; 185 = 1er septembre ; 300 = 25 décembre.*

De même que les dates de début de basses-eaux, les dates de milieu de basses-eaux (fig. 78) présentent une légère tendance, avec des dates un peu plus précoces tout au long de la chronique. Ainsi, entre les périodes 1863-1891 et 1982-2010, la date moyenne de milieu de basses-eaux avance de 6 jours, la médiane de 10 jours, le 1er quartile de 5 jours et le 3ème quartile de 11 jours.

Enfin, dans la chronique des dates de fin de basses-eaux de la Loire à Blois (fig. 79), aucune tendance n'est définissable. Les dates moyennes de fin de basses-eaux sont très stables. Les dates médianes, les premiers et troisièmes quartiles varient sur des intervalles de 10 à 12 jours.

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	05/10	06/10	02/10	08/10	04/10	05/10
Ecart-type	29	20	35	26	34	32
Minimum	30/07	30/08	30/07	22/08	03/08	22/08
1er quartile	15/09	23/09	11/09	16/09	11/09	10/09
Médiane	05/10	07/10	01/10	12/10	10/10	02/10
3ème quartile	25/10	16/10	25/10	26/10	23/10	22/10
Maximum	19/12	27/11	14/12	04/12	05/12	19/12
Ecart interquartile	40	23	44	40	42	42
Médiane – 1er quartile	21	14	20	26	29	23
3ème quartile - médiane	20	9	24	14	13	20

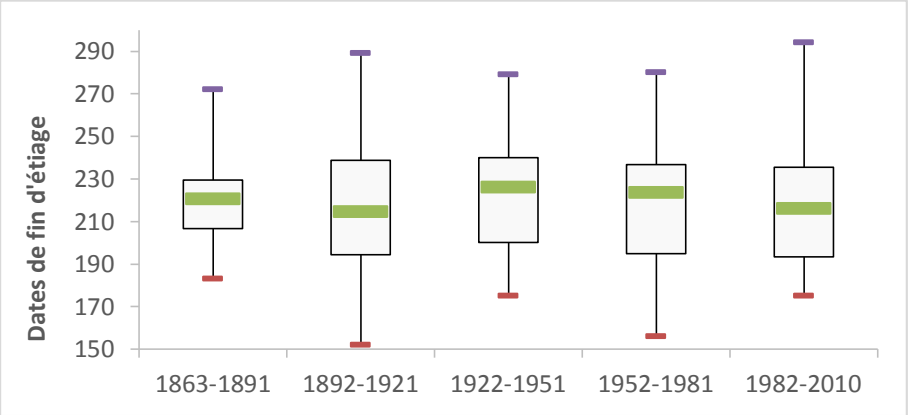


Fig. 79. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de fin des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er mars ; 185 = 1er septembre ; 300 = 25 décembre.*

Interprétation et discussion des résultats sur les basses-eaux de la Loire à Blois

Pour revenir à la baisse importante des volumes de déficit en période de basses-eaux, cette tendance ne peut être expliquée seulement par la politique de soutien d'étiage, étant donné qu'elle débute dans les années 1960.

Comparer les évolutions des déficits de volume en période de basses-eaux, entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010, à Blois et à Gien (avec les données de « débits naturels reconstitués » à partir de 1989), permettra d'identifier l'impact de la politique de soutien des débits d'étiage dans l'évolution entre ces périodes. Il n'est pas possible d'utiliser les données de Gien pour comparer les évolutions plus anciennes car la chronique des débits n'y débute qu'en 1936.

	Gien (QNR)			Evolutions entre 1952-1981 et 1982-2010	
	1936-2011	1952-1981	1982-2010	à Gien (QNR)	à Blois
Moyenne	195	173	171	-1%	-22%
Ecart-type	200	170	162	-5%	-30%
Minimum	0	0	0	0%	0%
1er quartile	40	28	48	41%	6%
Médiane	132	113	139	19%	-3%
3ème quartile	290	267	226	-19%	-37%
Maximum	865	540	593	9%	-18%
Ecart interquartile	250	239	178	-35%	-42%
Médiane – 1er quartile	91	85	91	7%	-7%
3ème quartile - médiane	158	154	86	-78%	-55%

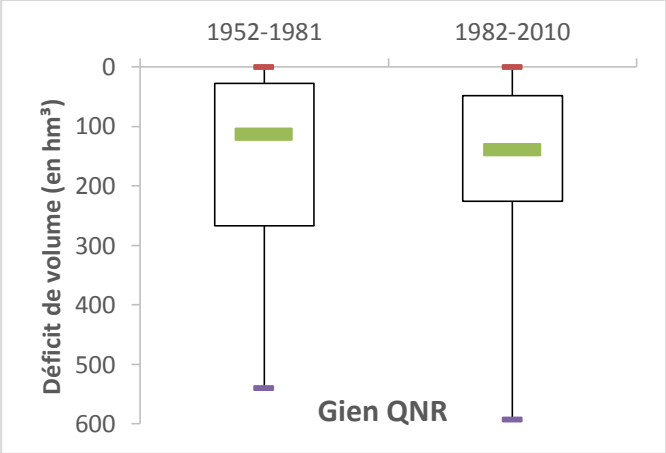


Fig. 80. *Evolutions des déficits de volume de basses-eaux (en hm³) entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010, à Blois (voir fig. 74) et à Gien (de 1989 à 2010, les données de débits prises en compte pour le calcul de l'indice sont celles des « débits naturels reconstitués » par la Dreal Centre).*

A partir de la chronique des déficits « naturels » de volume en période de basses-eaux à Gien, on constate que l'on ne retrouve pas les mêmes évolutions, entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010, des caractéristiques statistiques observées à Blois (fig. 80). En effet, entre ces deux périodes, le 1er quartile et la médiane augmentent à Gien, respectivement de 41% et 19%, alors qu'ils stagnent à Blois ; et la moyenne stagne à Gien, alors qu'elle diminue de 22% à Blois. La baisse du 3ème quartile est également moins importante à Gien (-19%) qu'à Blois (-37%). On peut donc conclure que la politique de soutien d'étiage renforce la diminution de la moyenne et du

3ème quartile des déficits de volume de basses-eaux, et atténue l'augmentation du 1er quartile et de la médiane entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010.

La diminution des déficits de volume en période de basses-eaux constatée à Blois entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010 est donc largement expliquée par la politique de soutien des débits d'étiage.

Or, la faiblesse des déficits de volume de basses-eaux de la période 1952-1981 ne peut être expliquée par la politique de soutien des débits d'étiage car elle n'a été mise en place qu'à partir du milieu des années 1980.

Pour définir l'ensemble des paramètres qui entraînent la baisse des volumes de déficit en période de basses-eaux, il convient donc d'explorer quelques autres éléments qui pourraient renforcer l'impact de la politique de soutien d'étiage.

Tout d'abord, cette diminution des volumes de basses-eaux n'est pas liée à l'évolution du nombre de jours de basses-eaux. On a vu qu'entre les périodes 1863-1921 et 1922-2010, on observe une augmentation de 10 et 12 jours des valeurs moyenne et médiane du nombre de jours de basses-eaux. Cette augmentation devrait donc entraîner aussi celle du volume de déficit de basses-eaux à Blois. L'impact de cette faible augmentation est donc masqué par d'autres tendances plus conséquentes.

Ensuite, une augmentation du nombre d'années sans basses-eaux pourrait expliquer cette baisse des volumes de déficit, car une année sans basses-eaux signifie un déficit de volume égal à 0. On peut considérer que les années sans basses-eaux pèsent lourd sur l'indice de volume de déficit.

Le nombre d'années sans basses-eaux est de 2 pour la période 1922-1951, de 3 pour les périodes 1863-1891, 1892-1921 et 1982-2010 et enfin de 6 pour 1952-1981.

Donc, en refaisant les calculs de caractérisation statistique de l'indice de déficit de volume de basses-eaux de la Loire à Blois, pour les périodes 1892-1961 et 1962-2010 (périodes entre lesquelles est observée la diminution de l'indice la plus importante), en en excluant les années

sans basses-eaux, on estime l'importance de ces années sans basses-eaux dans la baisse du volume de déficit (tab. 27).

	Toute la chronique			Sans les années sans étiage		
	1892-1961	1962-2010	Évolution	1892-1961	1962-2010	Évolution
Moyenne	233	141	-40%	251	175	-30%
1er quartile	46	35	-24%	57	68	19%
Médiane	178	96	-46%	194	126	-35%
3ème quartile	388	205	-47%	395	243	-39%

Tab. 27. *Comparaison des principales caractéristiques statistiques entre les périodes 1892-1961 et 1962-2010, d'une part de l'indice de déficit de volume en période de basses-eaux de la Loire à Blois et d'autre part, de ce même indice dont on a supprimé les valeurs égales à 0 qui correspondent aux années sans étiage.*

Ainsi, on observe que le nombre d'années sans basses-eaux joue un rôle dans l'explication de cette baisse des volumes de déficit, mais il n'explique pas tout. En effet, pour les données où les années sans basses-eaux ont été supprimées (tab. 27), on retrouve la baisse du volume de déficit entre les périodes 1892-1961 et 1962-2010. Cette baisse est cependant moins importante que pour les valeurs calculées sur l'ensemble de la chronique (-30% pour la moyenne au lieu de -40% et -35% pour la médiane au lieu de -46%). Pour le 1er quartile, une augmentation est même observée si l'on ne tient pas compte des années sans basses-eaux. L'influence des années sans basses-eaux sur ce 1er quartile est d'ailleurs tout à fait logique car ces années ont un volume de déficit égal à 0.

La dernière piste pour expliquer la baisse des déficits de volume en période de basses-eaux serait une augmentation des débits pendant les basses-eaux elles-mêmes. Il s'agit donc ici d'étudier exclusivement les débits de la Loire à Blois inférieurs au seuil de 105 $m^3.s^{-1}$ (tab. 28).

Les débits de la Loire à Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ ont connu une augmentation significative (+17% pour la moyenne et +20% pour la médiane) entre les périodes 1892-1961 et 1962-2011 (tab. 28). Le 1er quartile entre ces deux périodes augmente de 27%, et le 3ème quartile de 8%. L'augmentation plus importante du 1er quartile s'explique par le soutien des débits d'étiage par les barrages qui modifie essentiellement les plus faibles débits (disparition des débits inférieurs à 60 $m^3.s^{-1}$ à Gien).

La politique de soutien des débits d'étiage pourrait donc expliquer l'occurrence des maxima des caractéristiques statistiques pour l'ensemble de la chronique pendant la période 1982-2011 (tab. 28). On peut noter également l'augmentation des débits inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ entre les périodes 1892-1951 et 1952-1981. Les caractéristiques statistiques de cette dernière période demeurent néanmoins dans les ordres de grandeur de celles de l'ensemble de la chronique.

Caractéristiques statistiques des débits inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ à Blois									
	1863-2011	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2011	1892-1961	1962-2011	Evolution
Moyenne	73,8	74,9	71,1	66,9	73,8	82,6	69,1	80,7	17%
1er quartile	60,0	62,0	57,3	52,0	59,0	73,7	56,0	71,0	27%
Médiane	76,0	78,0	72,0	67,0	76,0	83,8	69,0	83,0	20%
3ème quartile	89,5	91,0	87,0	85,0	90,0	92,6	86,0	92,5	8%
Moyennes mensuelles des débits inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ à Blois									
Janvier	93,3	_	95,8	100,0	91,5	92,3	96,9	92,2	-5%
Février	_	_	_	_	_	_	_	_	
Mars	_	_	_	_	_	_	_	_	
Avril	88,3	_	93,5	76,8	_	95,5	82,7	95,5	15%
Mai	88,3	88,3	76,7	84,9	91,7	95,9	85,7	95,9	12%
Juin	82,4	72,5	82,6	88,8	80,3	85,7	85,4	84,2	-1%
Juillet	77,1	76,9	77,4	72,6	76,7	81,7	74,9	80,5	7%
Août	71,3	72,0	70,7	63,4	70,1	79,9	67,0	77,4	16%
Septembre	69,5	73,4	64,7	60,6	68,5	82,5	61,8	80,0	29%
Octobre	72,8	74,7	69,7	65,2	73,9	82,1	67,1	80,8	20%
Novembre	78,8	88,7	74,0	65,9	81,0	88,9	72,0	86,1	20%
Décembre	85,2	88,5	83,8	93,0	83,2	85,3	83,5	86,8	4%

Tab.28. *Caractérisation statistique et moyennes mensuelles des débits (en $m^3.s^{-1}$) de la Loire à Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$.*

Il convient également de vérifier, à l'échelle mensuelle, l'évolution de ces débits de la Loire à Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ (tab. 28). En effet, on a vu que la politique de soutien des débits d'étiage entraîne des augmentations des débits moyens mensuels les plus importantes au mois d'août et de septembre (respectivement +24% et +21% pour la période 1989-2011, à Gien, entre les « débits naturels reconstitués » et les débits mesurés, cf. 3.2.2.). Or, les débits de la Loire à

Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ peuvent survenir pratiquement tout au long de l'année hydrologique, sans pour autant atteindre le seuil de 60 $m^3.s^{-1}$ qui déclenche le soutien des débits par les grands barrages.

L'augmentation des moyennes mensuelles des débits de la Loire à Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ entre les périodes 1892-1961 et 1962-2011, est générale (exceptés aux mois de janvier et juin, tab.28). Elle est d'ailleurs la plus importante entre les mois d'août et de novembre (entre +16% et +29%).

De plus, les augmentations des débits moyens, d'août à novembre, entre d'une part, les deux périodes de trente ans de 1892 à 1951 et d'autre part, la période 1952-1981, indiquent que l'augmentation de ces débits est une tendance qui n'est pas seulement liée au soutien artificiel des débits.

Cette tendance à l'augmentation des débits inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ à Blois, explique donc une nouvelle part de la baisse des volumes de déficit des débits de basses-eaux entre les périodes 1892-1961 et 1962-2010.

En résumé, l'évolution la plus notable dans cette étude des basses-eaux de la Loire à Blois est la baisse des volumes de déficit en période de basses-eaux à partir des années 1960. Pour synthétiser les causes de cette diminution, on peut dire qu'elle est en partie expliquée par (i) une augmentation des débits de basses-eaux, c'est-à-dire des débits inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ à Blois, (ii) pour la période 1952-1981, une augmentation des années sans basses-eaux (telles que définies dans ce travail), et enfin (iii) pour la période 1982-2010, la politique de soutien des débits d'étiage.

De plus, les basses-eaux de la Loire à Blois sont légèrement plus précoces. Les valeurs moyennes et médianes des dates de début et de milieu des basses-eaux sont avancées d'une dizaine de jours sur l'ensemble de la chronique.

3.7. Les hautes-eaux

Les hautes-eaux de la Loire ont été définies par rapport à un débit-seuil, fixé ici à 550 $m^3.s^{-1}$ à Blois (fréquence 0,8). De nouveau, 5 indices ont permis de mieux les caractériser (fig. 81) : le nombre de jours de hautes-eaux par année hydrologique (de septembre à août de l'année suivante), l'excédent de volume par rapport au débit-seuil défini, ainsi que les dates de début, de milieu et fin de hautes-eaux, qui correspondent respectivement au moment où l'excédent de volume atteint 10% de sa valeur totale annuelle, 50% et 90%.

Le débit-seuil défini empiriquement, a permis la définition d'au moins un épisode de hautes-eaux par année hydrologique (de 1863 à 2010, seuls 1,4% des années ne connaissent pas de période de hautes-eaux à Blois).

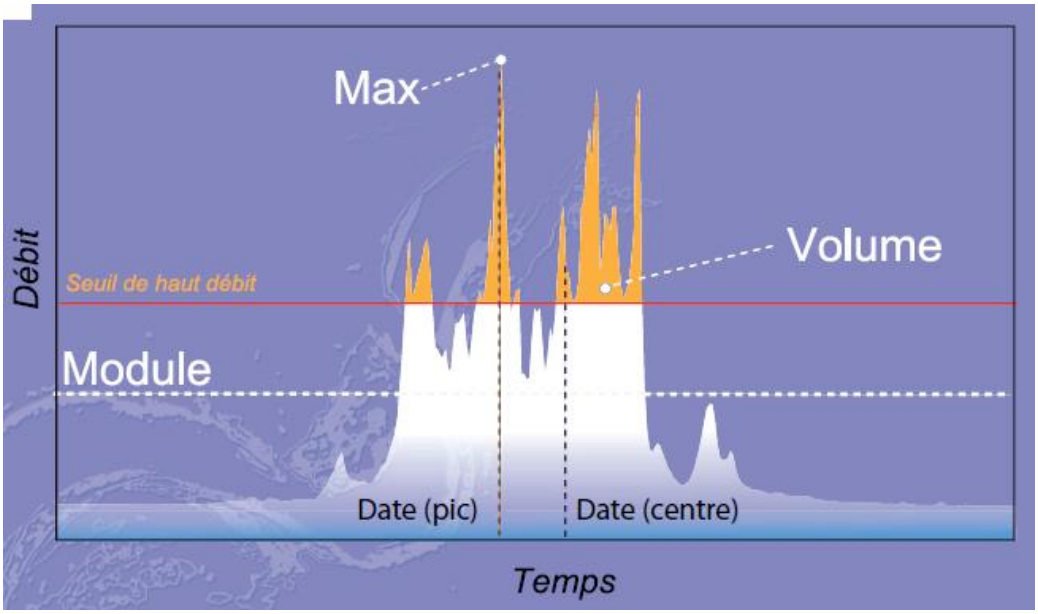


Fig.81. *Illustration des indices hydrologiques qui caractérisent les hautes-eaux. Source : Giuntoli et al., 2012.*

Les limites des indices des dates de début et de fin de hautes-eaux sont identiques à celles présentées pour les étiages (les exemples cités ci-dessous sont uniquement issus de la chronique des débits de la Loire à Blois). 10% des années connaissent une période de hautes-eaux continue, c'est-à-dire que le débit ne repasse pas sous le débit-seuil entre les dates de début et de fin de hautes-eaux. En moyenne, il y a trois intervalles de temps où les débits sont inférieurs au débit-

seuil entre les dates de début et de fin de hautes-eaux. Enfin, en moyenne, 43% des jours inclus entre les dates de début et de fin des hautes-eaux présentent un débit inférieur au débit-seuil de hautes-eaux.

Pour illustrer les limites de ces indices caractérisant les dates de hautes-eaux, deux années hydrologiques sont présentées comme exemples (fig. 82) : l'année 1920-1921, pendant laquelle le nombre de jours, entre les dates de début et de fin des hautes-eaux, dont le débit est inférieur au débit-seuil, est le plus important (96% des jours), et l'année 1914-1915, pendant laquelle le nombre de passages des débits sous le débit-seuil de hautes-eaux, entre les dates de début et de fin de hautes eaux, est le plus important (10 intervalles de temps sous le débit-seuil).

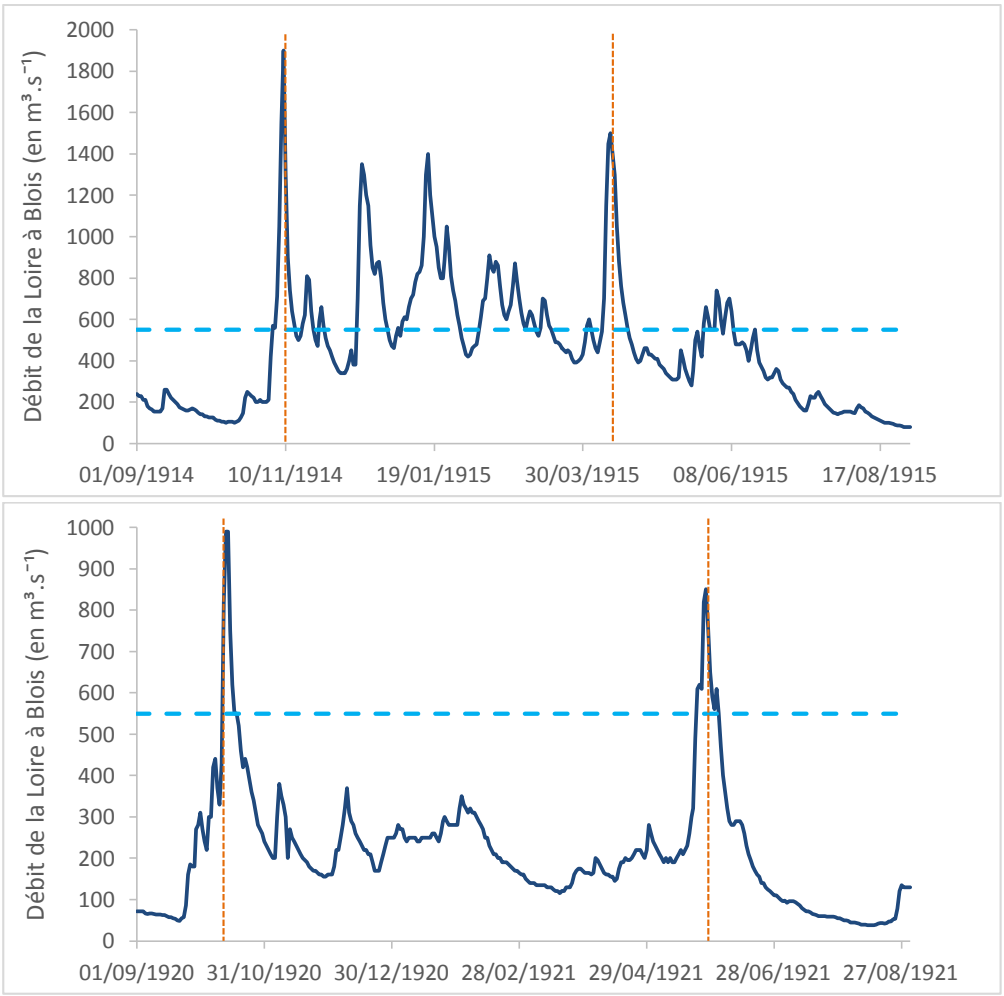


Fig. 82. *Limites des indices des dates de début et de fin des hautes-eaux. La ligne en tirets horizontale représente le seuil de débit de hautes-eaux de la Loire à Blois (550 m³.s⁻¹). Les lignes verticales indiquent les dates de début et de fin de hautes-eaux.*

Nombre de jours de hautes-eaux

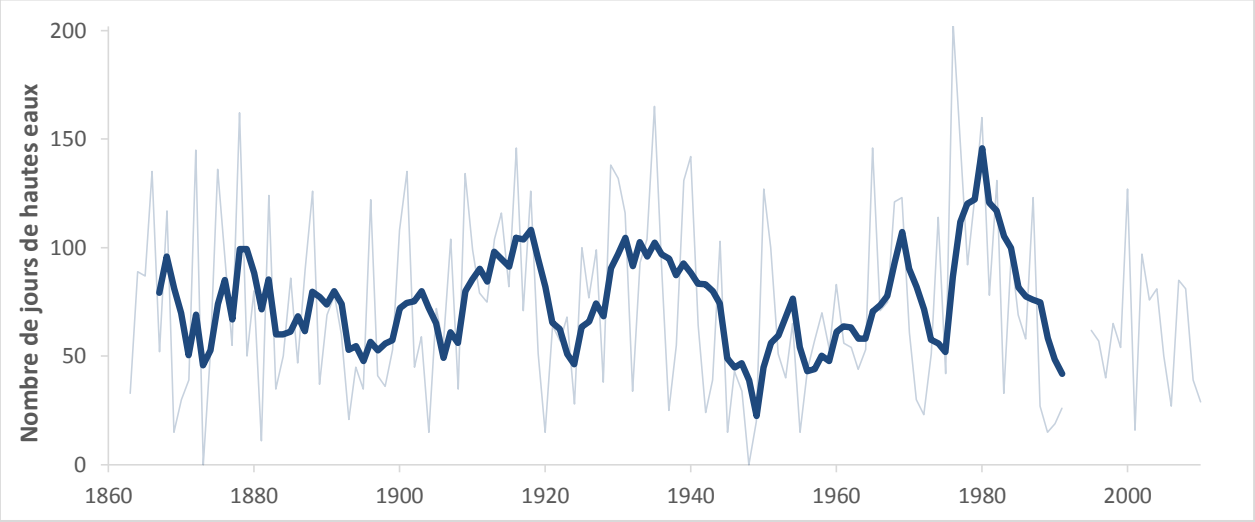


Fig. 83. *Evolution du nombre de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois : série de données et moyenne mobile sur période de 5 ans (limitée à la période 1864-1991 : à cause de la lacune dans les données de 1992 à 1994).*

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	73	73	73	75	78	61
Ecart-type	41	43	38	45	45	34
Minimum	0	0	15	0	15	15
1er quartile	40	39	45	35	51	30
Médiane	64	69	68	73	63	58
3ème quartile	100	94	104	104	109	81
Maximum	203	162	146	165	203	131
Ecart interquartile	60	55	59	69	58	51
Médiane – 1er quartile	24	30	23	38	12	28
3ème quartile - médiane	36	25	37	31	46	24

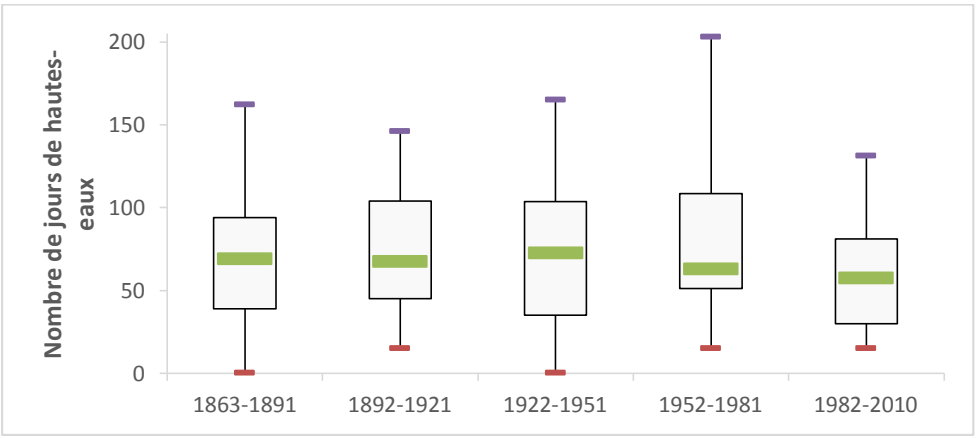


Fig. 84. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois.*

Pour la Loire à Blois, le nombre de jours de hautes-eaux était stable entre les périodes 1863-1891 et 1922-1951 (fig. 83 et 84). La pente de la droite de régression linéaire du nombre de jours de hautes-eaux entre 1863 et 1951, en fonction du temps, est de 0,040 jour.an^{-1}.

Puis, à partir de la période 1952-1981, la valeur médiane du nombre de jours de hautes-eaux diminue (fig. 84). Entre les périodes 1863-1951 et 1952-2010, la médiane évolue de 69 à 60 jours, soit une baisse de 14%. La diminution de la moyenne et du 3ème quartile n'est sensible qu'à partir de la période 1982-2010. En effet, le maximum de la période 1952-1981 (203 jours) est tellement important que son influence sur la moyenne et le 3ème quartile empêche la mise en évidence de la baisse des valeurs du nombre de jours de hautes-eaux sur cette période.

La diminution importante du nombre de jours de hautes-eaux est illustrée par tous les indicateurs statistiques de la période 1982-2010 : entre les périodes 1863-1981 et 1982-2010, diminution de 19% de la moyenne, de 15% de la médiane, de 29% du 1er quartile et de 22% du 3ème quartile. Le gradient temporel du nombre de jours de hautes-eaux pour la période 1982-2010 est de -4,1 jours par décade.

On peut remarquer que le nombre maximal connu de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois (203 jours) s'est produit pendant l'année hydrologique 1976-1977. Bien que l'on ait vu précédemment que les débits de la Loire supérieurs à 3 000 m³.s^{-1} ont disparu depuis les années 1920, l'immodération des débits de la Loire s'exprime donc de bien des manières.

Volume d'excédent en période de hautes-eaux

Les volumes excédentaires en période de haute- eaux par rapport au débit seuil de 550 m³.s^{-1}, sont en baisse depuis les années 1950 (fig. 85 et 86). La pente de la droite de régression linéaire, pour l'ensemble de la chronique du volume d'excédent en période de hautes-eaux, en fonction du temps, atteint -0.638 hm³.an^{-1}, soit un gradient temporel de -6,4 hm³ par décade.

A nouveau, cette baisse est plus sensible pour la période 1982-2010. Entre les périodes 1863-1981 et 1982-2010, les valeurs moyenne et médiane, connaissent une baisse respective de 29% et 38%. Entre ces deux mêmes périodes, le 1er quartile diminue de 32% et le 3ème quartile de 33%.

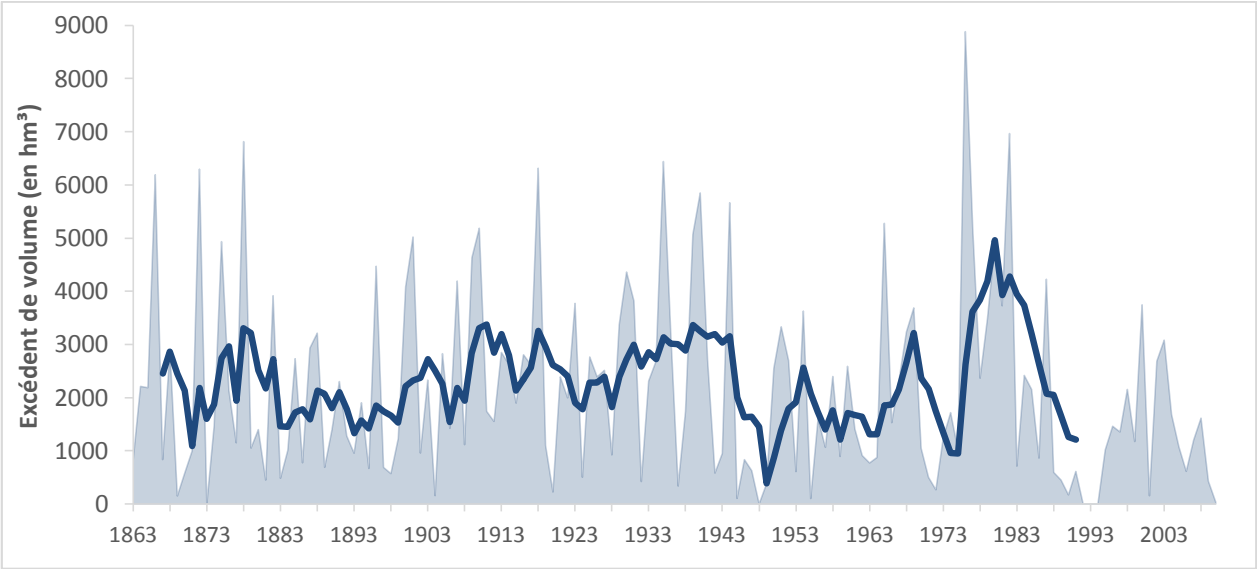


Fig. 85. *Evolution de l'excédent de volume par rapport au débit-seuil de 550 m³.s⁻¹ en période de hautes-eaux de la Loire à Blois : série de données et moyenne mobile sur période de 5 ans (limitée à la période 1864-1991 : à cause de la lacune dans les données de 1992 à 1994).*

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	2184	2139	2328	2408	2332	1641
Ecart-type	1770	1885	1635	1832	1919	1543
Minimum	0	0	156	0	102	37
1er quartile	835	824	1105	678	938	613
Médiane	1684	1400	1901	2452	1661	1188
3ème quartile	2932	2887	2845	3361	3422	2155
Maximum	8884	6815	6315	6441	8884	6967
Ecart interquartile	2098	2062	1739	2683	2484	1542
Médiane – 1er quartile	849	575	795	1774	723	576
3ème quartile - médiane	1248	1487	944	908	1761	967

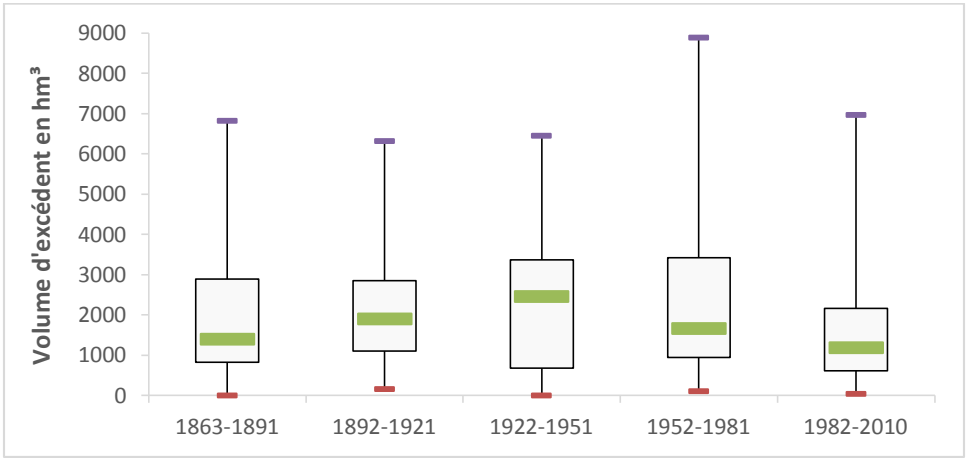


Fig. 86. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le volume excédentaire par rapport au débit-seuil de 550 m³.s⁻¹ en période de hautes-eaux de la Loire à Blois (en hm³).*

La recherche des causes de cette diminution du volume excédentaire, dans l'évolution des débits de la Loire à Blois, sera à nouveau discuter après la présentation de l'ensemble des indices statistiques concernant les hautes-eaux.

Occurrences des hautes-eaux de la Loire à Blois

La saisonnalité moyenne des hautes eaux de la Loire à Blois s'étend de fin décembre à mi-avril (fig. 87).

	Début	Milieu	Fin
Moyenne	27 décembre	18 février	14 avril
Ecart-type	50,0	49,2	49,4
Minimum	20 septembre	15 octobre	29 décembre
1er quartile	18 novembre	16 janvier	8 mars
Médiane	29 décembre	19 février	15 avril
3ème quartile	30 janvier	23 mars	23 mai
Maximum	13 juillet	14 juillet	29 août
Ecart interquartile	72,25	65,75	75,25
Médiane – 1er quartile	40,75	33,5	37,25
3ème quartile - médiane	31,5	32,25	38

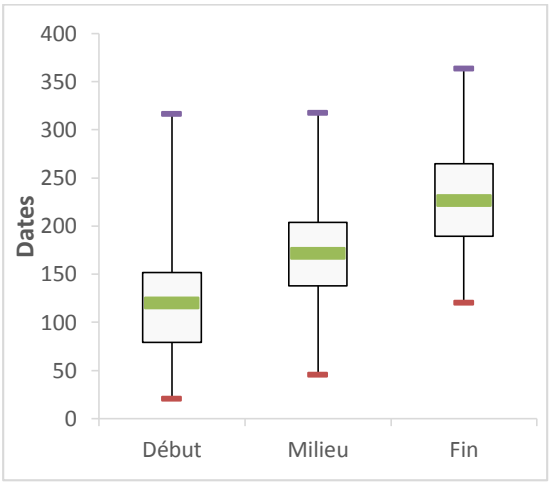


Fig. 87. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les trois indices (dates de début, de milieu et de fin) définissant l'occurrence des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er septembre ; 123 = 1er janvier ; 304 = 1er juillet. L'écart-types et les écarts interquartiles sont en jours.*

De même que pour les étiages, **on remarque que les hautes-eaux les plus précoces et les plus tardives ont disparu** (fig. 88). Depuis 1925, les hautes-eaux ne débutent pas avant fin octobre, et depuis 1917, elles se terminent avant fin juin. Pour les débuts comme pour les fins de hautes-eaux, il s'agissait déjà de phénomènes exceptionnels, mais pour l'instant, ils n'existent plus. Il convient de rappeler ici qu'une crue printanière ou même estivale retarde la date de fin de hautes-eaux dans la mesure où le volume excédentaire que représente cette crue est supérieur à 10% du volume excédentaire total des hautes eaux de l'année hydrologique en question.

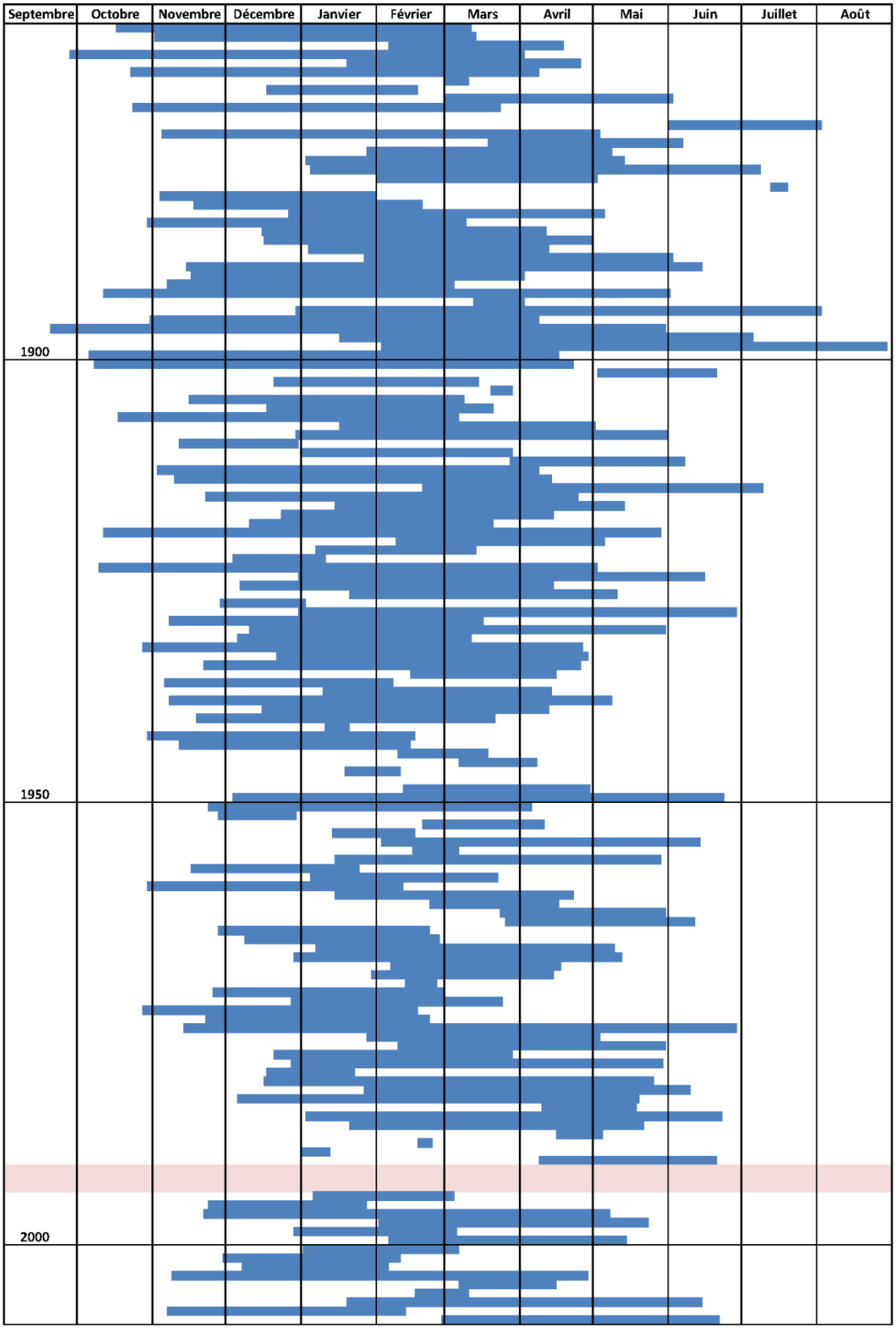


Fig. 88. *Occurrence des hautes-eaux de la Loire (indices des dates de début et de fin) à Blois de 1863 à 2010. Une ligne horizontale par année hydrologique. Il n'existe pas de donnée de 1992 à 1994 inclus.*

En ce qui concerne les dates de début des hautes-eaux, on observe une diminution de la dispersion des données à partir des années 1920, en termes de dates extrêmes et des écarts interquartiles (fig. 89). **En effet, les débuts des hautes-eaux très précoces (septembre ou début octobre) ou très tardives (juin ou juillet), qui étaient dans ce dernier cas de courte durée, ont disparu de la chronique depuis le milieu des années 1920.**

De plus, les dates de début de hautes-eaux, moyennes et médianes, sont retardées respectivement de 23 et 21 jours entre les périodes 1863-1951 et 1952-2010 (fig. 89). Il faut noter que, sur l'ensemble de la chronique, le 1er quartile est plus tardif de presque un mois et demi (de début novembre à mi-décembre).

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	29/12	25/12	18/12	15/12	06/01	18/01
Ecart-type	50	60	58	37	40	45
Minimum	20/09	28/09	20/09	10/10	28/10	07/11
1er quartile	18/11	05/11	04/11	19/11	01/12	17/12
Médiane	29/12	23/12	20/12	07/12	06/01	20/01
3ème quartile	30/01	27/01	17/01	10/01	06/02	17/02
Maximum	13/07	13/07	03/05	07/03	26/03	16/04
Ecart interquartile	72	84	74	52	67	62
Médiane – 1er quartile	41	48	46	18	36	34
3ème quartile - médiane	32	36	29	34	31	28

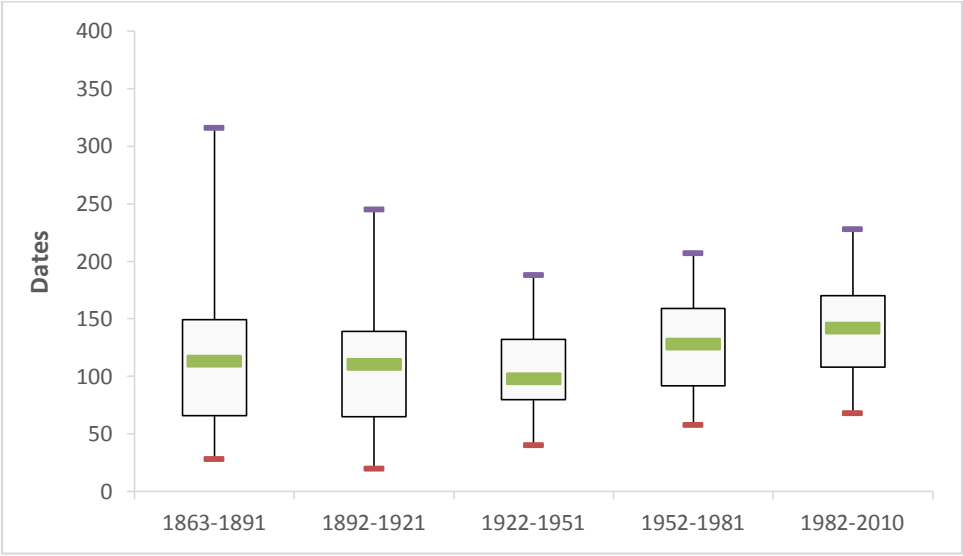


Fig. 89. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de début des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er septembre ; 123 = 1er janvier ; 304 = 1er juillet. L'écart-types et les écarts interquartiles sont en jours.*

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	18/02	23/02	17/02	12/02	13/02	03/03
Ecart-type	49	57	53	45	38	51
Minimum	15/10	23/10	15/10	15/10	09/12	06/12
1er quartile	16/01	22/01	24/01	16/01	10/01	20/01
Médiane	19/02	18/02	24/02	06/02	18/02	22/02
3ème quartile	23/03	01/04	27/03	11/03	18/03	11/04
Maximum	14/07	14/07	14/07	10/05	08/05	15/06
Ecart interquartile	66	69	67	54	67	81
Médiane – 1er quartile	34	27	37	21	39	33
3ème quartile - médiane	32	43	30	33	28	48



Fig. 90. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de milieu des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er septembre ; 123 = 1er janvier ; 304 = 1er juillet. L'écart-types et les écarts interquartiles sont en jours.*

Les dates de milieu des hautes-eaux connaissent de petites variations dans la dispersion des données au sein de l'espace interquartile ou dans les valeurs moyenne et médiane entre les différentes périodes (fig. 90).

Mais, globalement, les dates de milieu de hautes-eaux font preuve d'une relative stabilité tout au long de la chronique. Cet indice indique le cœur de la saison des hautes-eaux : le mois de février.

	1863-2010	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2010
Moyenne	14/04	17/04	29/04	03/04	07/04	15/04
Ecart-type	49	44	51	47	52	52
Minimum	29/12	31/01	30/12	02/01	29/12	12/01
1er quartile	08/03	13/03	28/03	11/03	23/02	04/03
Médiane	15/04	15/04	19/04	12/04	12/04	04/05
3ème quartile	23/05	09/05	31/05	29/04	29/05	23/05
Maximum	29/08	19/07	29/08	28/06	06/07	22/06
Ecart interquartile	75	58	64	49	95	80
Médiane – 1er quartile	37	34	22	32	48	61
3ème quartile - médiane	38	24	42	17	47	19

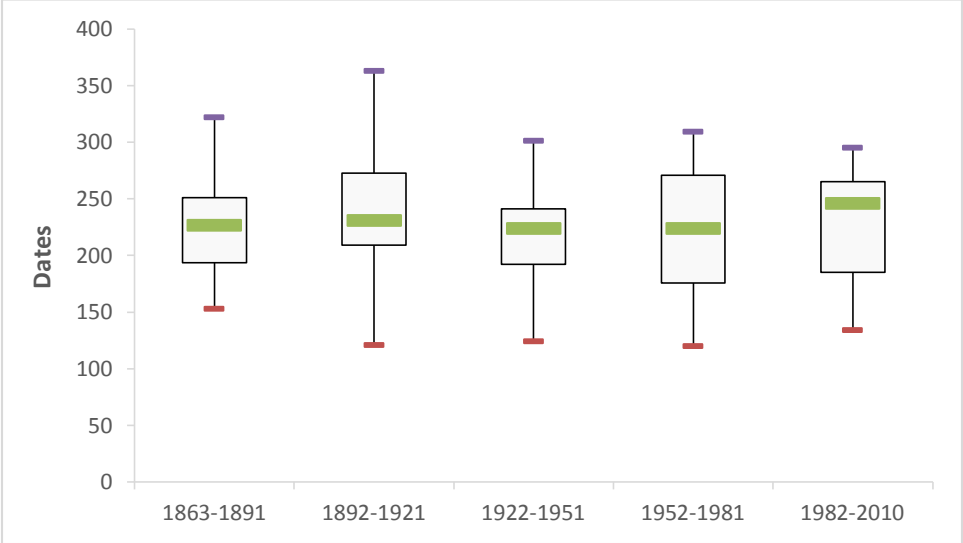


Fig. 91. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de fin des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010. Pour lire l'axe vertical des boîtes à moustaches : 1 = 1er septembre ; 123 = 1er janvier ; 304 = 1er juillet. L'écart-types et les écarts interquartiles sont en jours.*

Enfin, on observe une variabilité importante de tous les indicateurs de la dispersion des données de dates de fin des hautes-eaux (fig. 91). Aucune tendance n'est observable sur l'ensemble de la chronique. Il existe néanmoins une plus grande dispersion des valeurs interquartiles due à l'augmentation de la différence entre la médiane et le 1er quartile à la fin de la chronique (période 1952-2010). Cela signifie que les fins de hautes-eaux les plus précoces connaissent une variabilité plus importante. Ces dernières surviennent également un peu plus tôt dans l'année hydrologique depuis les années 1950.

Interprétation et discussion des résultats sur les hautes-eaux de la Loire à Blois

Tout d'abord, on a vu que les moyennes du volume d'excédent et du nombre de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois, diminuent entre les périodes 1863-1981 et 1982-2010 (-19% pour le nombre de jours de hautes-eaux et -29% pour le volume d'excédent). Le volume d'excédent connaît donc une baisse plus importante que le nombre de jours de hautes-eaux.

Ces baisses ne sont pas liées à une évolution du nombre d'années sans hautes-eaux. Pour l'ensemble de la chronique, seules deux années n'ont pas connu de hautes-eaux (telles que définies ici) : 1873 et 1948.

	1863-2011	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2011
Moyenne	900	885	915	923	893	879
1er quartile	650	650	660	650	650	634
Médiane	785	780	810	800	780	756
3ème quartile	1010	1000	1050	1050	1010	982

Tab. 29. *Evolutions des débits de la Loire à Blois supérieurs à 550 m³.s⁻¹.*

	1863-2011	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2011
Janvier	924	935	874	941	960	905
Février	934	854	1000	1002	960	851
Mars	884	905	904	937	824	848
Avril	846	849	906	858	771	843
Mai	896	783	850	945	833	1039
Juin	801	822	761	826	783	795
Juillet	753	824	763	749	641	608
Août	845	703	799	699	1008	_
Septembre	1019	1859	845	622	778	682
Octobre	967	1005	1158	858	798	717
Novembre	885	831	918	924	894	804
Décembre	940	931	931	918	1025	888

Tab. 30. *Moyennes mensuelles des débits de la Loire à Blois supérieurs à 550 m³.s⁻¹.*

La diminution du volume d'excédent en hautes-eaux est liée à l'évolution des débits supérieurs au seuil de 550 m³.s⁻¹ (tab. 29) et notamment à celle des mois où ils sont les plus fréquents (de décembre à avril, tab. 30). Pour la période 1952-1981, où seulement la médiane indique une baisse des volumes d'excédent, on observe une diminution importante des débits moyens supérieurs à 550 m³.s⁻¹ au mois de mars (entre 1863-1951 et 1952-1981, -10%) et d'avril

(pour les mêmes périodes, -11%). Pour la période suivante, 1982-2011, la moyenne de ces mêmes débits diminue pour les mois de décembre à février (entre 1863-1981 et 1982-2011, les moyennes mensuelles des débits supérieurs à 550 $m^3.s^{-1}$, pour ces trois mois, diminuent de 3 à 11%).

La baisse, depuis les années 1950, du volume d'excédent de hautes-eaux s'explique donc par une diminution du nombre de jours de hautes eaux combinée à une baisse de la moyenne des débits supérieurs à 550 $m^3.s^{-1}$ pendant les mois où ils sont les plus fréquents.

Enfin, pour l'ensemble de la chronique, les dates médiane et moyenne du début des hautes-eaux, se sont décalées, des alentours du 25 décembre, à mi-janvier. Or, ce décalage du début des hautes eaux révèle en fait le décalage de l'atteinte des 10% du volume excédentaire, ce que l'on considère ici comme le début des hautes-eaux. Ainsi, le décalage du début des hautes-eaux pourrait être expliqué par une évolution de ces premiers 10% d'excédent de volume, donc pendant l'automne.

En effet, pour le mois d'octobre, les moyennes des débits de hautes-eaux diminuent continuellement depuis la fin du 19ème siècle (entre 1892-1922 et 1982-2010, -38% ; tab. 30). Au mois de septembre et de novembre, ces valeurs moyennes diminuent également pour la dernière période 1982-2010. Ces baisses des débits de hautes-eaux des mois de septembre à novembre impliquent donc que les 10% d'excédent de volume de hautes-eaux sont atteints un peu plus tardivement dans l'année hydrologique.

L'évolution des dates de début de hautes-eaux est donc imputable à la baisse des débits de hautes-eaux des mois de septembre à novembre.

3.8. Occurrences des débits à pleins bords à Blois

Le dernier élément du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne abordé est l'occurrence des débits à pleins bords. En effet, l'importance morphologique de ces débits a été démontrée (Grivel, 2008). Le débit à pleins bords en Loire moyenne est d'environ 1000 $m^3.s^{-1}$ (Gautier et *al*., 2001). Il représente donc un débit de crue moyenne (correspond à une fréquence de 0,95 à Blois, calculée sur l'ensemble de la chronique).

En ce qui concerne le nombre de jours par an où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse les 1000 $m^3.s^{-1}$, les données sont relativement stables entre 1863 et 1981 (fig. 92 et 93). Il est important de noter que **la dernière période 1982-2011 est la période de 30 ans qui a connu le moins de débits à pleins bords à Blois depuis 1863** (15 jours par an en moyenne, contre 21 jours en moyenne pour la période 1863-1981, soit une baisse de 29% de la moyenne). Cette période 1982-2011 est également celle ayant connu le plus d'années sans occurrence de débits supérieurs à 1000 $m^3.s^{-1}$ à Blois (3 années, contre 1 par période de 30 ans entre 1863 et 1921, et 2 entre 1922 et 1981). Enfin, l'écart interquartile connait des variations importantes tout au long de la chronique, mais sans tendance homogène.

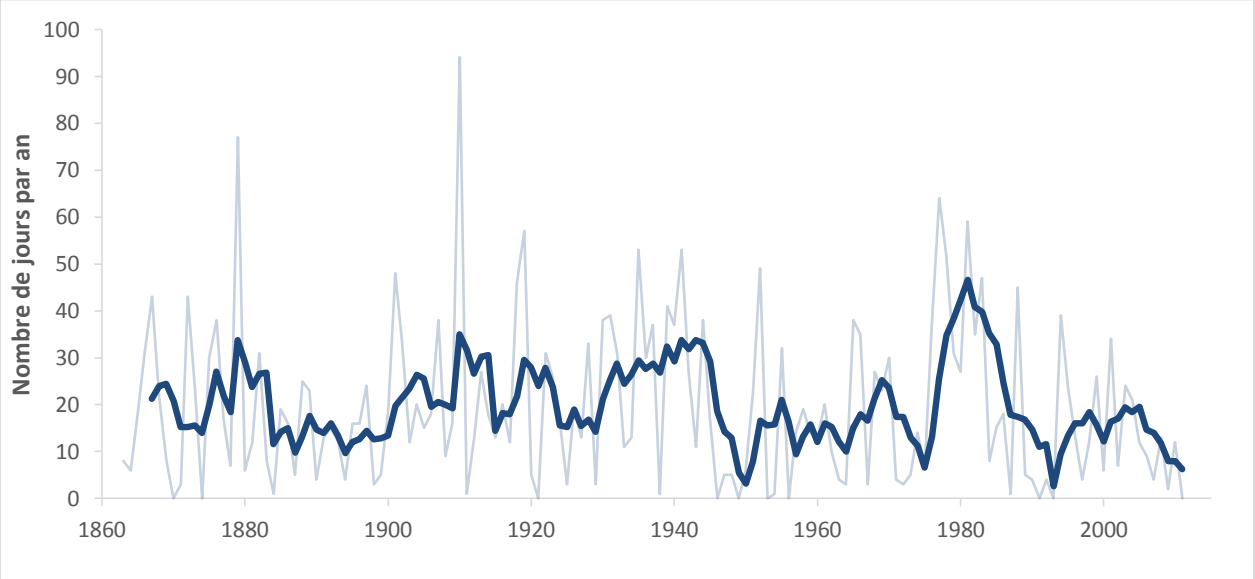


Fig. 92. *Nombre de jours par an où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$: série de données et moyenne mobile sur période de 5 ans.*

	1863-2011	1863-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2011
Moyenne	19,5	18,6	21,0	22,0	21,3	14,8
Ecart-type	17,0	16,9	19,6	15,9	18,4	13,7
1er quartile	5,0	6,0	12,0	7,3	4,3	4,0
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Médiane	15,0	16,0	16,0	21,0	16,5	12,0
Maximum	94,0	77,0	94,0	53,0	64,0	47,0
3ème quartile	30,0	25,0	23,0	36,0	31,8	23,3
Ecart interquartile	25,0	19,0	11,0	28,8	27,5	19,3
Médiane -1er quartile	10,0	10,0	4,0	13,8	12,3	8,0
3ème quartile -médiane	15,0	9,0	7,0	15,0	15,3	11,3

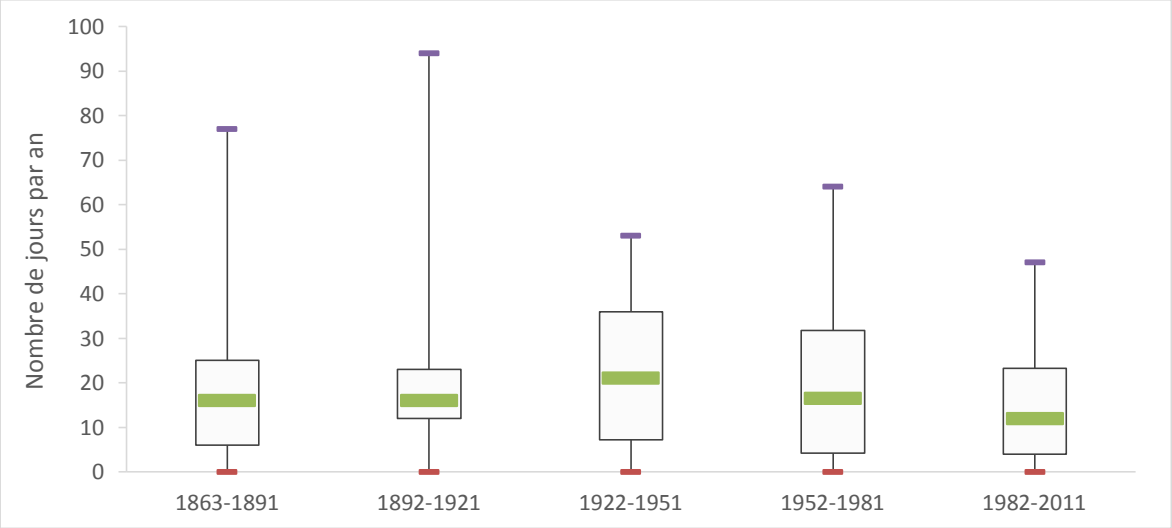


Fig. 93. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jours où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$ entre 1863 et 2011.*

L'occurrence mensuelle des débits à pleins bords à Blois a évolué (fig. 94). On observe tout d'abord un décalage du pic d'occurrences maximum des débits à pleins bords de mars (1863-1921), à février (1922-1981), puis janvier (1982-2011). De plus, la durée de la baisse estivale des occurrences des débits à pleins bords s'est allongée. De juin à novembre, les occurrences de ces débits ont diminué entre le début et la fin de la chronique. On peut noter également que pendant la période 1982-2011, leurs occurrences sont plus importantes au mois de mai. Il existe donc une évolution de la saisonnalité de l'occurrence des débits à pleins bords.

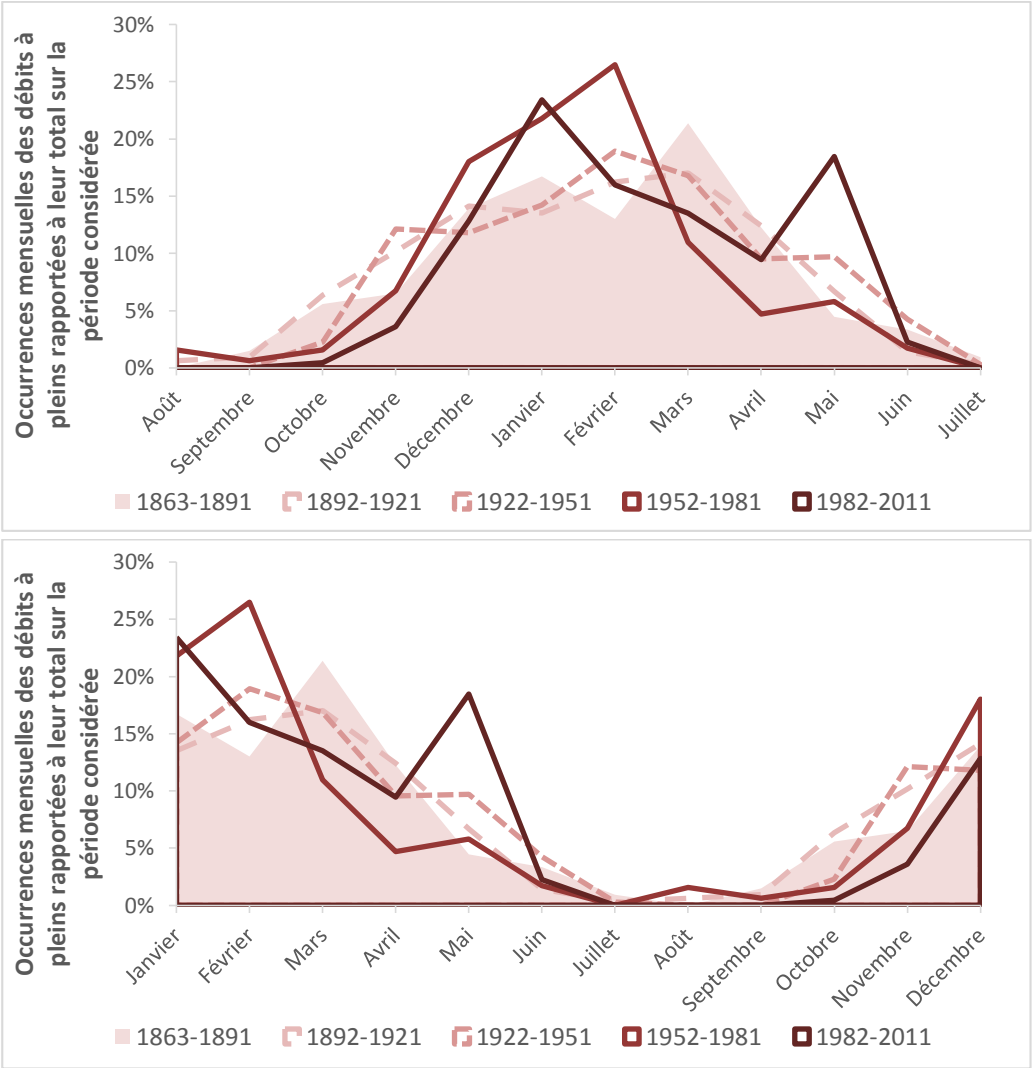


Fig. 94. *Occurrences mensuelles des débits à pleins bords, à Blois, rapportées à leur total sur la période de trente ans considérée, entre 1863 et 2011. Les deux graphiques sont identiques, l'un est centré sur la période des hautes-eaux et le second sur celle des basses-eaux.*

De 1863 à 1981, la moyenne annuelle des occurrences des débits à pleins bords entre les mois de décembre et mars était en augmentation (entre 1864-1891 et 1952-1981, la moyenne augmente de 28%, c'est-à-dire de 4 jours, fig. 95 et 96).

De plus, **depuis les années 1950, les débits à pleins bords surviennent plus fréquemment entre les mois de décembre à mars qu'auparavant** (fig. 96).

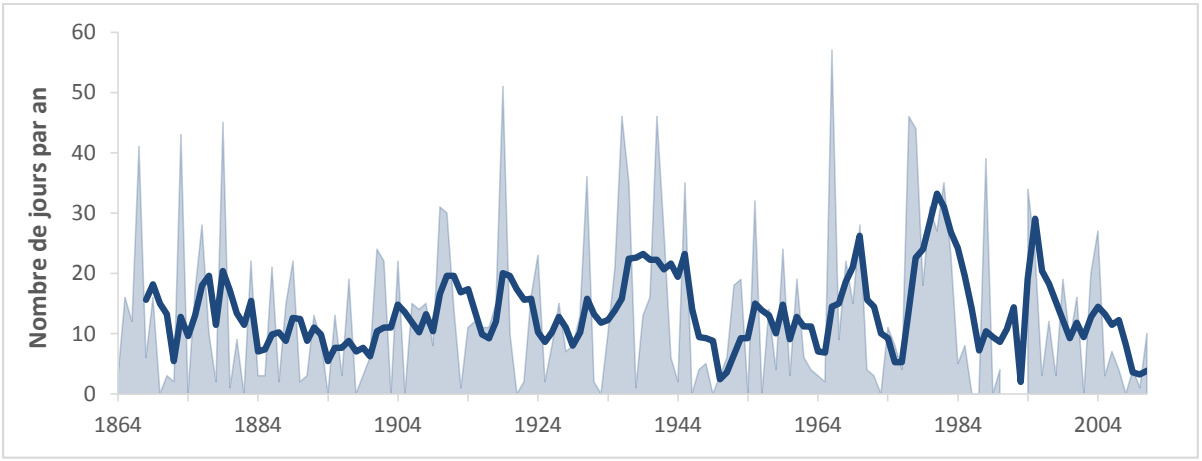


Fig. 95. *Nombre de jours où les débits moyens journaliers de la Loire à Blois dépassent le seuil de 1000m³.s⁻¹ entre les mois de décembre d'une année n-1 et de mars de l'année n (les quatre mois où de tels débits sont les plus fréquents).*

	1864-2011	1864-1891	1892-1921	1922-1951	1952-1981	1982-2011
Moyenne	13,3	12,4	12,8	13,6	15,8	11,5
Rapport à la moyenne annuelle des occurrences des débits à pleins bords	67%	67%	61%	62%	74%	75%
Ecart-type	13,1	13,5	11,3	13,9	15,0	12,0
1er quartile	3,0	2,0	3,8	2,3	4,0	3,0
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Médiane	10,0	7,5	11,5	8,0	12,5	7,0
Maximum	57,0	45,0	51,0	46,0	57,0	39,0
3ème quartile	20,0	18,0	15,0	19,8	23,5	19,5
Ecart interquartile	17,0	16,0	11,3	17,5	19,5	16,5
Médiane -1er quartile	7,0	5,5	7,8	5,8	8,5	4,0
3ème quartile -médiane	10,0	10,5	3,5	11,8	11,0	12,5

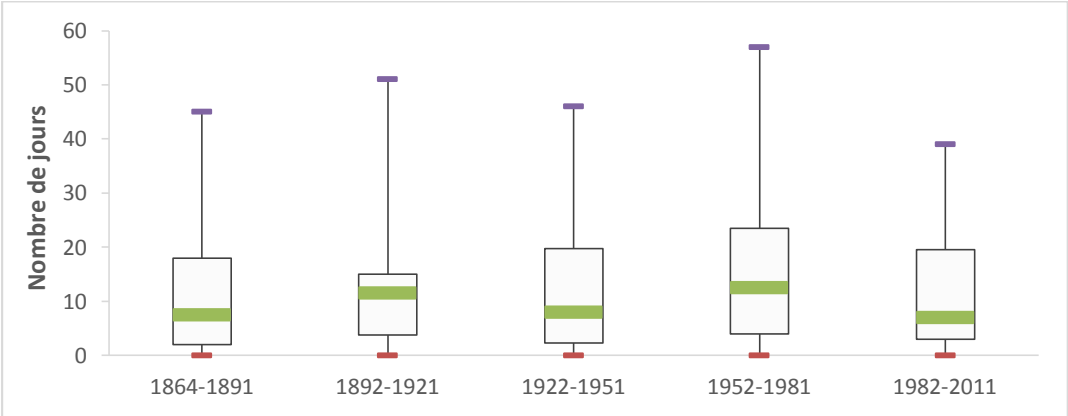


Fig. 96. *Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jour où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000m³.s⁻¹ entre le mois de décembre d'une année n-1 et celui de mars de l'année n.*

Enfin, **une évolution est également notable en ce qui concerne l'occurrence des débits à pleins bords en période estivale**, entre les mois de juillet et septembre (fig. 97). En effet, avant 1929, elles étaient relativement peu fréquentes. Elles survenaient en moyenne tous les 7 ans. Or, après cette date, une seule année a connu, pendant l'été, un épisode de crue où les débits de la Loire à Blois ont dépassé 1000 $m^3.s^{-1}$ (en 1976).

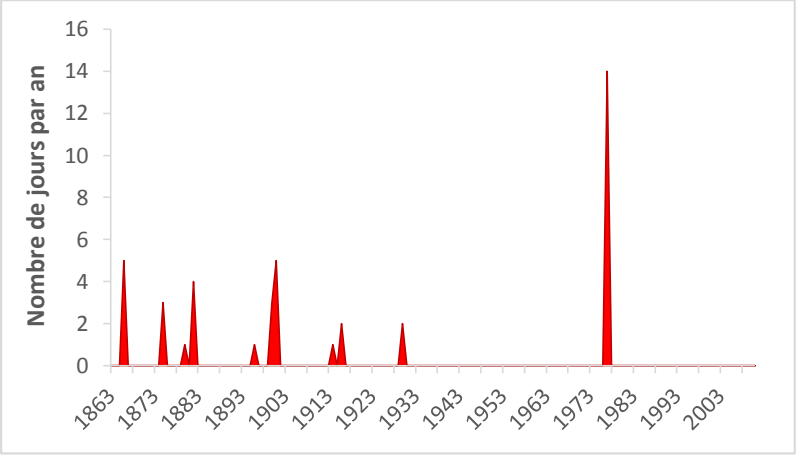


Fig. 97. *Nombre de jours par an entre les mois de juillet et septembre où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse les 1000 $m^3.s^{-1}$.*

Pour conclure, le nombre d'occurrences des débits à pleins bords a connu une baisse importante lors de la dernière période de 30 ans (1982-2011) par rapport au reste de la chronique. De plus, leur répartition dans l'année hydrologique s'est modifiée : d'une part avec la quasi disparition des tels débits en été, mais également avec un décalage du pic d'occurrences de mars à janvier.

3.9. Synthèse des changements environnementaux imbriqués au sein du bassin qui pourraient impacter l'hydrologie de la Loire moyenne

Après avoir étudié les différents éléments qui composent le régime de la Loire, même si les évolutions restent des tendances, on remarque que pour la majorité, leur origine reste encore à définir, même si quelques pistes ont été évoquées.

De plus, les données, notamment climatiques, dont on dispose, ne permettent pas en l'état actuel d'identifier clairement les causes. Il est évident que d'autres facteurs environnementaux ont également perturbé les débits de la Loire sans que l'on soit capable de les quantifier. Le tableau 31 synthétise les changements environnementaux ayant pu avoir un impact sur les débits de la Loire.

Tab. 31. Synthèse théorique des changements environnementaux ayant une influence sur les débits de la Loire moyenne

Changements environnementaux		Période de changement	Impacts				
			Mécanismes	Débit annuel	Basses eaux	Hautes eaux	Pics de crue
Occupation du sol	Reforestation et déprise agricole dans le Massif Central (1)	à partir du milieu du 19ème siècle	Modification des valeurs de l'évapotranspiration (augmentation des prélèvements pendant les périodes de croissance de la végétation)	?	Augmentation des prélèvements par la végétation donc baisse des débits	–	Diminution de la vitesse de propagation du pic de crue
	Urbanisation (2)	Intensification à partir de 1945	Imperméabilisation des sols donc augmentation du ruissellement	Augmentation du débit annuel	–	Augmentation du ruissellement	Pics de crue augmentés et plus rapides
Changement climatique	Augmentation des températures (3)	à partir du 19ème siècle	Modification des valeurs de l'évapotranspiration (augmentation des prélèvements liés à l'augmentation des températures)	?	Baisse des débits les plus faibles et augmentation de la durée de la période d'étiage	?	?
Gestion de la ressource en eau	Augmentation des prélèvements (irrigation et eau potable) (4)	Intensification à partir de 1945	Impacts sur le niveau des nappes, notamment en période de basses eaux	–	Baisse du niveau des nappes donc diminution de leur rôle de soutien d'étiage	–	–
Construction des grands barrages de Naussac et Villerest	Politique de soutien d'étiage et d'écrêtement des crues (5)	Mise en service au début des années 1980	Eau retenue en période de hautes eaux et relâchés petit à petit en période de basses eaux, afin de maintenir un débit minimum à Gien de 60 $m^3.s^{-1}$	Inchangé	Augmentation des débits d'étiage et disparition des débits inférieurs à 50$m^3.s^{-1}$ à Gien	Remplissage des retenues	Ecrêtement des crues : peu d'impact sur les crues les plus puissantes
Extractions de granulats en lit mineur (6)		Intensification à partir de 1945 jusqu'à leur interdiction en 1993	Concentration des flux, augmentation des processus d'érosion du lit mineur, enfoncement du lit de la Loire, impacts sur le niveau des nappes alluviales	Réduction du débit annuel	Réduction du soutien des débits d'étiage par la nappe alluviale (7)	–	Augmentation des vitesses d'écoulement, augmentation des vitesses de propagation des ondes de crues

(1) et (2) voir chap. 2, A-2, p.65-67 ; (3) Moatar, 2010 ; (4) voir introduction p.16-18 et chap. 2, A-3, p.67-69 ; (5) voir chap. 3 B ; (6) Nabet, 2013 ; (7) ces processus seront abordés dans le chapitre 5.

Synthèse des résultats du 3ème chapitre

- Impacts des grands barrages : baisse des débits à l'aval des barrages au mois de décembre, et hausse des débits en période d'étiage de l'ordre de 20% à Gien.

- Tendance à une légère hausse des maxima et minima annuels de température depuis les années 1950, augmentation qui s'accélère au cours du temps pour les maxima annuels.

- Affaiblissement de la tendance à la hausse des cumuls annuels de précipitations en amont de la Loire moyenne depuis les années 1950, pour arriver à une baisse de ce cumul sur les trente dernières années.

- Pas de tendance significative dans les débits moyens annuels, ni dans les VCN3, outre, pour ces derniers, l'influence artificielle des grands barrages.

- Pour les débits maximums de la Loire à Blois, l'étendue statistique des données a diminué à cause de l'augmentation des minima de la chronique et de la forte baisse de ses maxima.

- Disparition des débits supérieurs à 3 000 $m^3.s^{-1}$ à Blois.

- Diminution de la variabilité de l'occurrence des hautes-eaux avec un certain resserrement de leurs occurrences autour du cœur de leur saison (disparitions des dates de début très précoces et de fin très tardives dans l'année hydrologique).

- Les basses-eaux sont un peu plus précoces, avec l'avancé d'une dizaine de jours des dates médianes de début et de milieu de basses-eaux sur l'ensemble de la chronique.

- En période de basses-eaux, diminution du volume de déficit, par rapport au débit-seuil défini, depuis les années 1960 due à une augmentation des années sans basses-eaux puis à la politique de soutien des débits d'étiages (qui augmentent les débits les plus faibles de façon artificielle), et d'une façon générale à l'augmentation de la moyenne des débits de basses-eaux (selon la définition utilisée ici).

- Débits à pleins bords : relative stabilité de leur nombre d'occurrence par an de 1863 à 1981, puis forte baisse pour la période 1982-2011 ; et modification de leur saisonnalité (augmentation en période hivernale et quasi disparition en période estivale).

Pour conclure ce chapitre, on peut synthétiser les résultats présentés ici comme ne révélant pas d'évolutions majeures dans les chroniques de débit de la Loire. En effet, le signal est complexe et très variable d'une année à l'autre. Ceci dit, il revient plusieurs fois comme conclusion un certain resserrement de l'occurrence des saisons hydrologiques sur elles-mêmes, avec la disparition de leur apparition très décalée ou bien la quasi disparition des débits à pleins bords en période estivale.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Giuntoli et al. (2012) qui ont recherché des évolutions dans les chroniques de débits entre 1968 et 2007, à l'échelle de la France, à partir des mêmes indices hydrologiques que ceux utilisés dans cette étude (fig.98).

Toutefois, en allant plus dans le détail des chroniques, il serait sûrement possible d'affiner les résultats qui ouvrent de nombreuses pistes à explorer. Ainsi, à partir des données d'ores et déjà disponibles, un travail important est nécessaire sur les débits des stations de jaugeage du bassin de la Loire amont.

D'une part, les stations les plus méridionales ont un fonctionnement atypique par rapport au reste du bassin où certaines évolutions pourraient être démontrées. En effet, les altitudes plus importantes, l'évolution de l'enneigement dans le Massif Central, les influences du climat méditerranéen, plus contrasté, pourraient permettre d'identifier des tendances plus marquées dans les chroniques de débit. On peut d'ailleurs remarquer que dans l'étude de Giuntoli et al. (2012), les rares évolutions significatives observées au sein du bassin de la Loire depuis quarante ans se situent dans cette zone (pour la période 1968-2007 : aggravation de la sévérité de l'étiage, léger avancement de la date de début d'étiage et augmentation du maximum annuel).

D'autre part, l'étude des chroniques de débits pour des stations intermédiaires, comme celle de Villerest sur la Loire ou celle de Vieille-Brioude sur l'Allier, qui sont influencées par des facteurs plus variés, pourrait illustrer notamment l'impact de l'évolution de l'occupation du sol dans le Massif Central, dans la mesure où les modifications amenées par la politique de soutien d'étiage sont bien identifiées.

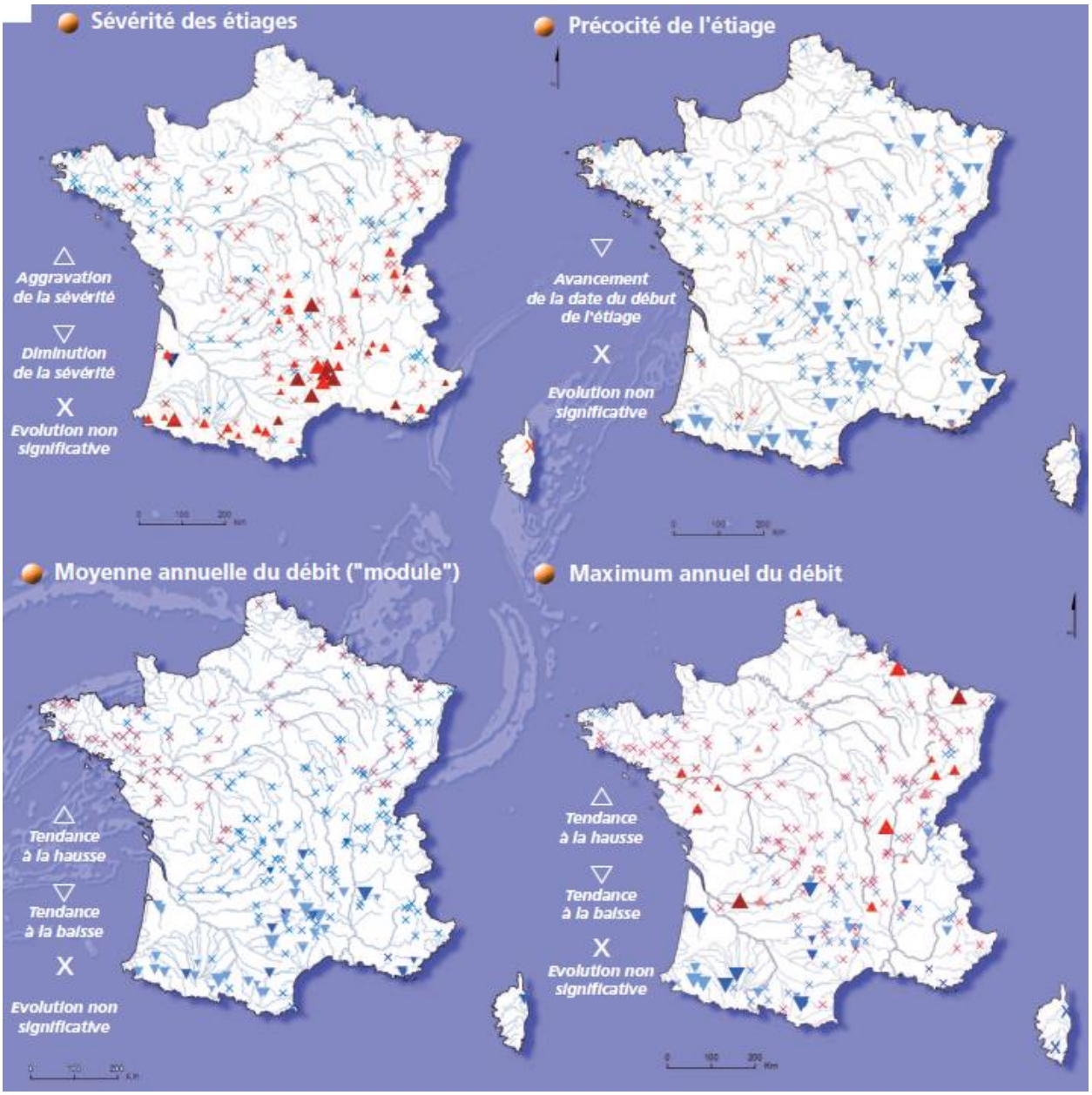


Fig. 98. *Tendances détectées à l'échelle de la France métropolitaine pour quatre indices hydrologiques : sévérité des étiages, précocité des étiages, moyenne annuelle du débit et maximum annuel du débit. Source : Giuntoli et al., 2012.*

Chapitre 4 : Contribution des trois bassins amont principaux (haute Loire, Allier et Morvan) aux débits de la Loire moyenne (au Bec d'Allier)

Après avoir étudié les longues chroniques de débits en Loire moyenne, il convient d'aborder l'origine des flux d'eau. Comme cela a été montré, le débit de la Loire moyenne n'est pas soutenu par l'apport d'affluents importants localement. Il est donc le résultat d'apports du secteur amont du fleuve.

Il s'agit ici, dans ce chapitre, d'étudier la variabilité saisonnière de ces apports des bassins amont majeurs : la haute Loire, le Morvan et l'Allier. En effet, les apports de l'Allier ont pu être étudiés auparavant à partir des données de débit. Cependant, en ce qui concerne l'hydrologie de la Loire bourbonnaise, les connaissances sont moins précises, en particulier les apports fournis par le Morvan. En appui à cette étude, un suivi géochimique mensuel des eaux de la Loire et de ses principaux affluents a été effectué pendant une année hydrologique. De plus, certains évènements hydrologiques (crues et étiages) ont été également suivis selon le même protocole.

L'enjeu d'une bonne connaissance des apports des bassins amont réside dans une meilleure compréhension de la variabilité des débits complexes et composites en Loire moyenne. Il s'agit d'un enjeu important pour les gestionnaires, notamment pour la gestion des extrêmes hydrologiques, que ce soient des crues ou des étiages sévères.

De plus, comme cela a été précisé dans le chapitre précédent, les causes des évolutions présentes ou possibles des chroniques de débits en Loire moyenne sont souvent à rechercher au niveau de ces bassins amont. Ce chapitre a donc toute son importance dans ce travail sur les débits de la Loire moyenne.

4.1. Données disponibles et méthodes

Données de débits disponibles

Les données disponibles sont des débits moyens journaliers, fournis par la Dreal Centre, qui ont été largement présentées au chapitre précédent (cf. 3.1.1).

Il convient ici de noter que, pour l'Arroux, c'est la station de Rigny-sur-Arroux qui a été utilisée malgré les problèmes de fiabilité des données à cause de la confluence de cet affluent avec la Loire. En effet, la station d'Etang-sur-Arroux n'a pas été retenue car la station, très en amont, ne totalise pas l'ensemble des apports de l'Arroux avant sa confluence avec la Loire (fig. 99). Néanmoins, la station d'Etang-sur-Arroux peut être utilisée autant que possible, lorsque les aspects quantitatifs ne sont pas l'objet de la démonstration (par exemple pour l'abondance mensuelle). De plus, lorsqu'il est nécessaire de comptabiliser les apports des affluents du Morvan, la station de Digoin sur l'Arroux est prise en compte, car elle seule quantifie les apports de l'Arroux et de la Bourbince avant la confluence avec la Loire.

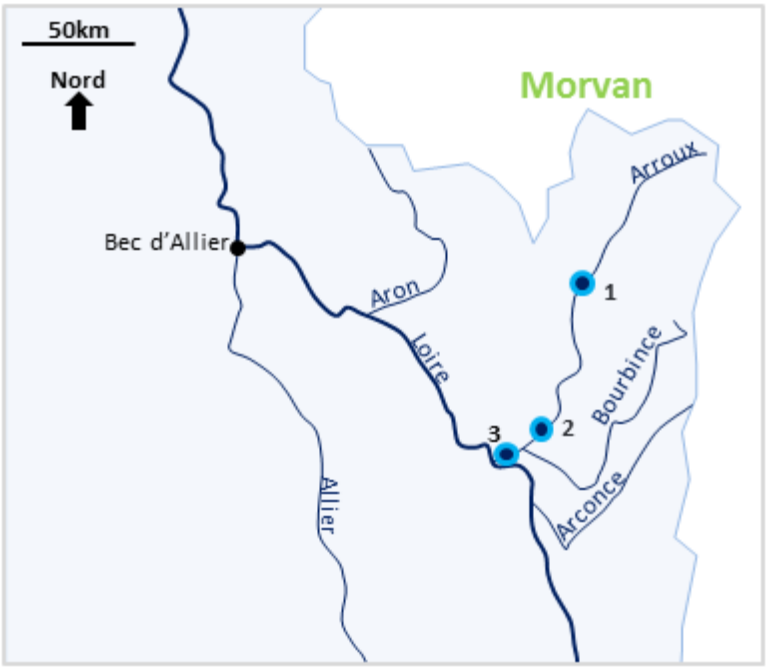


Fig. 99. *Affluents drainant le Massif du Morvan et stations de jaugeage de l'Arroux (1 : Etang-sur-Arroux ; 2 : Rigny-sur-Arroux ; 3 : Digoin). Source fond de carte : DREAL.*

Données géochimiques nouvelles

Du point de vue chimique et isotopique, ce chapitre s'appuie essentiellement sur des données nouvelles, obtenues dans le cadre de cette thèse. Des campagnes de prélèvements d'eaux de la Loire et de ses principaux affluents, ont été réalisées, pendant une année

hydrologique, au pas de temps mensuel, et aussi en fonction des évènements hydrologiques qui se produisaient.

Plusieurs types d'analyses ont été réalisés :

- Sur le terrain, les paramètres physico-chimiques (température, pH, conductivité électrique, potentiel redox, oxygène dissous) ont été directement mesurés ;
- Après prélèvement et filtration, la concentration des éléments majeurs ainsi que les teneurs isotopiques ($\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$) de ces eaux ont été analysées en laboratoire.

Ainsi, des prélèvements mensuels ont été réalisés afin de se servir des caractéristiques géochimiques des eaux de la Loire et de ses différents affluents pour mieux comprendre l'origine des eaux et des mélanges de la Loire moyenne. Un protocole de mesure a donc été mis en place afin d'effectuer ces prélèvements mensuels pendant une année hydrologique, sur différents secteurs de la Loire et de ses principaux affluents, entre Roanne et Orléans.

Ce sont donc 12 campagnes des prélèvements, qui ont été réalisées de 2009 à 2010 de façon mensuelle sur les sept sites retenus, auxquelles il faut ajouter une campagne en période de crue (janvier 2012 : campagne partielle) et deux campagnes en période de basses eaux (juillet et novembre 2011), soit un total de 109 échantillons des eaux de la Loire et de ses affluents analysés. Ainsi, trois étiages ont été suivis (2009, 2010 et 2011) ainsi que deux crues ordinaires de la Loire (février 2010 et janvier 2012 ; débits à Gien inférieurs à la fréquence 0,98).

Ces prélèvements ont permis d'obtenir une base pour analyser les principaux éléments composant les eaux de la Loire et une première approche de leurs variations saisonnières. Dans un deuxième temps, des évènements hydrologiques (crues et étiages) ont fait l'objet de campagnes de prélèvements ponctuelles. Il faut toutefois noter ici, qu'aucune crue moyenne de la Loire n'a pu faire l'objet d'un suivi complet car aucune crue majeure n'a eu lieu pendant l'année hydrologique 2009-2010.

Choix des sites de prélèvements

Pour les prélèvements, sept sites ont donc été sélectionnés (fig. 100) : sur la Loire à la sortie du Massif Central (Vindecy), après la confluence avec l'Arroux (le principal affluent drainant les eaux du Morvan) (Diou), juste avant la confluence avec l'Allier (Imphy), après la

confluence avec l'Allier (La-Charité-sur-Loire) et après l'entrée de la Loire dans le Bassin parisien, en amont d'Orléans (à Châteauneuf-sur-Loire), mais également sur l'Arroux (Rigny-sur-Arroux) et l'Allier (Le Guétin) en amont de leur confluence avec la Loire.



Fig. 100. *Situation des stations de mesure de débits (carrés noirs) sur la Loire à Villerest (1), à Digoin (2), à Gilly-sur-Loire (3), à Nevers (4), à Gien (5), à Orléans (6), à Blois (7), sur l'Arconce à Montceaux-l'Etoile (8), sur la Bourbince à Vitry-en-Charollais (9), sur l'Arroux à Rigny-sur-Arroux (10), sur l'Aron à Verneuil (11), sur l'Allier à Moulins (12) et à Cuffy (13) et sites de prélèvements (carrés rouges) sur la Loire au pont de Vindecy (a), au pont de Diou (c), au pont d'Imphy (d), au pont de La-Charité-sur-Loire (f) et au pont de Châteauneuf-sur-Loire (g), sur l'Arroux au pont de Rigny-sur-Arroux (b) et sur l'Allier au pont du Guétin (e). Source fond de carte : DREAL.*

Il faut ajouter que l'un des critères de sélection a été la proximité d'une station de mesure de débit fiable. En ce qui concerne le site choisi pour prélever après le Bec d'Allier, les possibilités de prélever en amont de la Charité-sur-Loire (à plus de 25 km du Bec d'Allier) ont été écartées car, lorsque les débits sont importants, les eaux de la Loire et de l'Allier mettent de longues distances à se mélanger, étant donnée la puissance des deux cours d'eau.

Les points de prélèvements choisis sont tous des ponts, ce qui permet un accès aux eaux des cours d'eau, là où le flux est le plus important. Toutefois, pour sélectionner les ponts, il faut vérifier que la tranche d'eau, au niveau du pont concerné, est bien chimiquement homogène d'une rive à l'autre afin que, pour chaque prélèvement en un unique point du pont, l'échantillon soit représentatif des eaux de l'ensemble du cours d'eau. Des tests basés sur la mesure de la conductivité et du pH, mesurés grâce à une sonde multi-paramètres Horiba, tous les 10 mètres en huit ponts (d'amont en aval : Vindecy, Rigny-sur-Arroux, Diou, Imphy, Nevers, Le Guétin, La-Charité-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire), ont donc été réalisés en début de thèse (fig. 101).

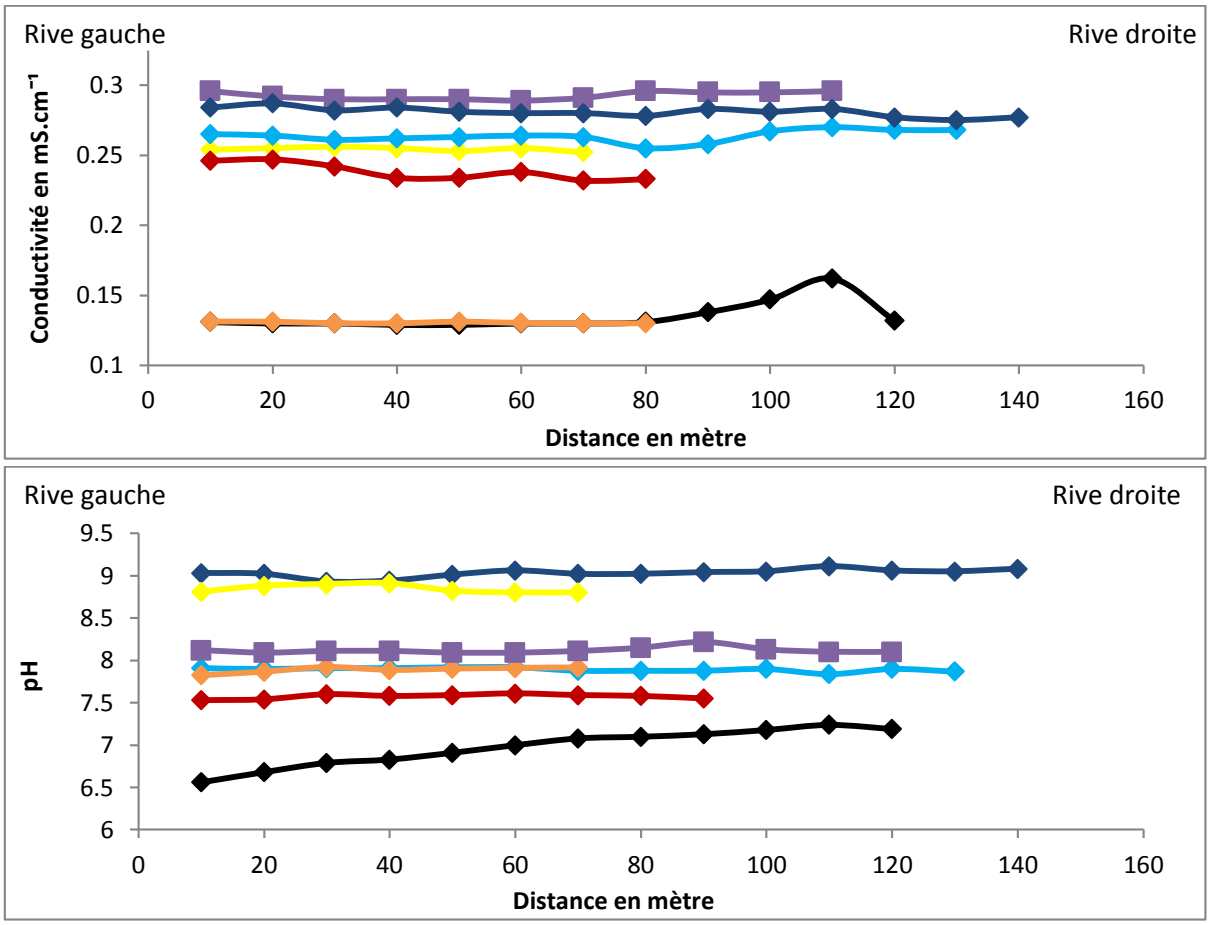


Fig. 101. *Résultats des tests d'homogénéité des tranches d'eau, basés sur la conductivité électrique et le pH, des différents sites de prélèvements : pont de Vindecy (losanges jaunes, test réalisé le 15/08/2010), pont de Diou (losanges oranges, test réalisé le 15/12/2009), pont d'Imphy (losanges rouges, test réalisé le 27/02/2010), pont de Nevers (losanges noirs, test réalisé le 4/01/2010), pont du Guétin sur l'Allier (carrés violets, test réalisé le 21/07/2009), pont de la Charité-sur-Loire (losanges bleus, test réalisé le 24/07/2009) et pont de Châteauneuf-sur-Loire (losanges bleus foncés, test réalisé le 23/07/2009). La conductivité électrique et le pH sont assez stables sauf pour le pont de Nevers, ce qui peut s'expliquer par la confluence en amont de la Nièvre ainsi que l'influence des rejets de la ville.*

C'est ainsi que le point sur la Loire à Nevers (losanges noirs sur la figure 101) a été rejeté. La présence de la confluence de la Nièvre, juste en amont du pont, implique que les eaux de la Loire n'y sont pas homogènes (fig. 101).

Suite à ces vérifications, sept sites ont été retenus pour effectuer les prélèvements mensuels (fig. 100 et 101). Ils sont situés sur les communes suivantes : Vindecy, Rigny-sur-Arroux, Diou, Imphy, Le Guétin, La-Charité-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire.

Caractéristiques hydrologiques de la période d'étude (2009-2010)

En parallèle des prélèvements, les débits moyens mensuels des années 2009 et 2010 ont été étudiés. Ils ont donc été comparés aux quantiles Q10 (les 10% des données de débit les plus faibles de la chronique se situent sous cette valeur, idem pour les autres en changeant le pourcentage), Q25, Q50, Q75 et Q90 calculés à partir des données disponibles de débits entre 1970 et 2010, donc sur une période de 40 ans (fig.102).

On observe que cette période, pour toutes les stations de mesure, est hétérogène et atypique. Entre octobre et décembre 2009, les débits moyens mensuels se situent entre les Q10 et Q25, et de janvier à mai 2010 entre les Q25 et Q50, révélant une période de hautes eaux plutôt sèche. La période de juin à septembre est, elle, plutôt humide avec des débits mensuels se situant aux alentours de Q75. Le débit mensuel d'octobre 2010 se situe aux alentours de Q25. La période des basses eaux a en fait été décalée après une augmentation des débits fin juin. Par contre, les hautes eaux ont commencé soudainement début novembre et tous les débits mensuels des mois de novembre et décembre sont supérieurs à Q75, voire supérieurs à Q90.

On se retrouve donc avec une année hydrologique contrastée où les hautes-eaux de l'hiver 2009-2010 ont été faibles et sans crue, où les basses-eaux de l'été 2010 ont été relativement humides mais ont duré jusqu'au mois d'octobre inclus, et enfin, où les hautes-eaux de l'hiver 2010-2011 ont été très humides. Pour conclure, il faut noter ici que la période d'étude « particulière » est représentative des débits de la Loire, étant donné que la variabilité interannuelle des débits est une constante sur la Loire.

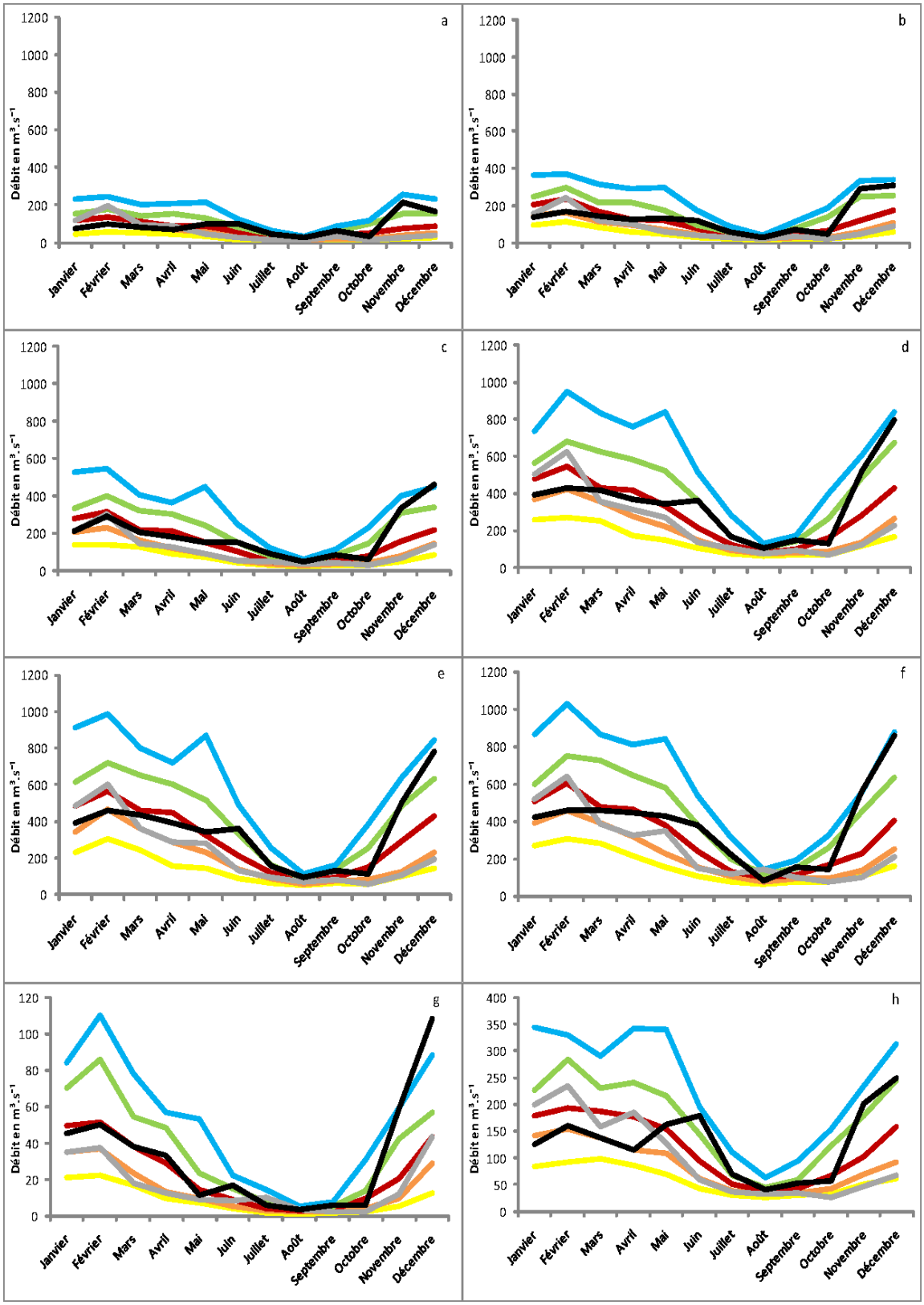


Fig. 102. *Particularités hydrologiques des années 2009 et 2010 de la Loire à Digoin (a), à Gilly (b), à Nevers (c), à Gien (d), à Orléans (e), à Blois (f), de l'Arroux à Rigny-sur-Arroux (g) et de l'Allier à Moulins (h). Pour chaque station, en gris les débits moyens mensuels de 2009, en noir ceux de 2010 ainsi que en jaune Q10, en orange Q25, en rouge Q50, en vert Q75 et en bleu Q90 (Q10, Q25, Q50, Q75 et Q90 sont calculés sur la période 1970-2010). Le plus frappant demeure la variabilité interannuelle et l'hétérogénéité au sein d'une même année.*

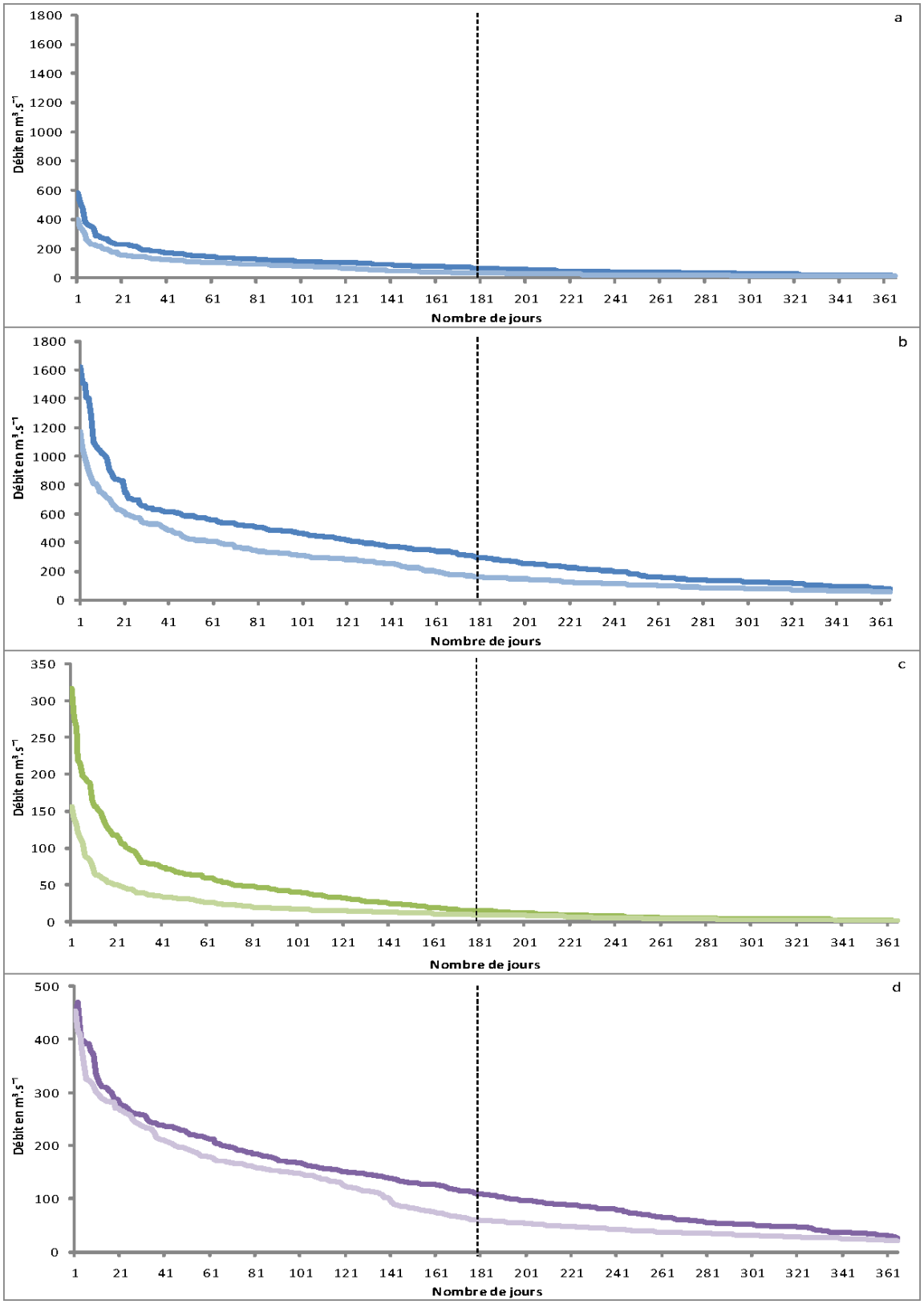


Fig. 103. *Courbes des débits classés pour les années 2009 (couleurs claires) et 2010 (couleurs sombres) pour les stations sur la Loire de Digoin (a) et de Gien (b), sur l'Arroux à Rigny-sur-Arroux (c) et sur l'Allier à Moulins (d). En pointillé est représenté le DC 180. On remarque que ces courbes des débits classés sont très concaves, ce qui révèle des années relativement sèches, sécheresse plus marquée pour l'année 2009. Seules les courbes des débits classés de l'Allier paraissent révéler une tendance un peu plus humide.*

La représentation graphique des débits cumulés pour quatre stations de jaugeage (Digoin et Gien sur la Loire, Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux et Moulins sur l'Allier), représente les débits moyens journaliers classés en ordre décroissant, pour 2009 et 2010 (fig. 103).

L'année 2009 est une année relativement sèche à tous les niveaux du bassin versant, les débits maxima restant assez faibles. Les prélèvements mensuels, réalisés de novembre 2009 à août 2010, sont donc représentatifs d'une année hydrologique « sèche ». Les débits maximaux de l'année de 2010 sont survenus seulement au mois de décembre 2010 (fig. 102). Ceci est un atout pour l'étude de la période des étiages mais, aucune crue ordinaire n'a pu faire l'objet d'un suivi pendant cette période. Les campagnes de prélèvements suivantes, de mi-2010 à début 2012, se sont donc concentrées sur la caractérisation des étiages de la Loire ainsi que sur ses crues ordinaires (tab. 32 et fig. 104).

	Campagnes de prélèvements	Débit de la Loire à Gien pendant la campagne (en $m^3.s^{-1}$)
Étiages	Juillet 2009	147 - 132
	Novembre 2009	117 – 139 (fin d'étiage)
	Juillet 2010	99 - 103
	Août 2010	92 - 93
	Juillet 2011	93
	Novembre 2011	72 – 491 (fin d'étiage)
Crues ordinaires	Février 2010	837 - 1020
	Janvier 2012	1250 (campagne partielle)

Tab. 32. *Synthèse des campagnes de prélèvements réalisées qui concernent des évènements hydrologiques particuliers, les étiages et les crues ordinaires. Est ici indiquée une gamme de débits car chaque campagne de prélèvements s'est déroulée sur 2 à 3 jours consécutifs.*

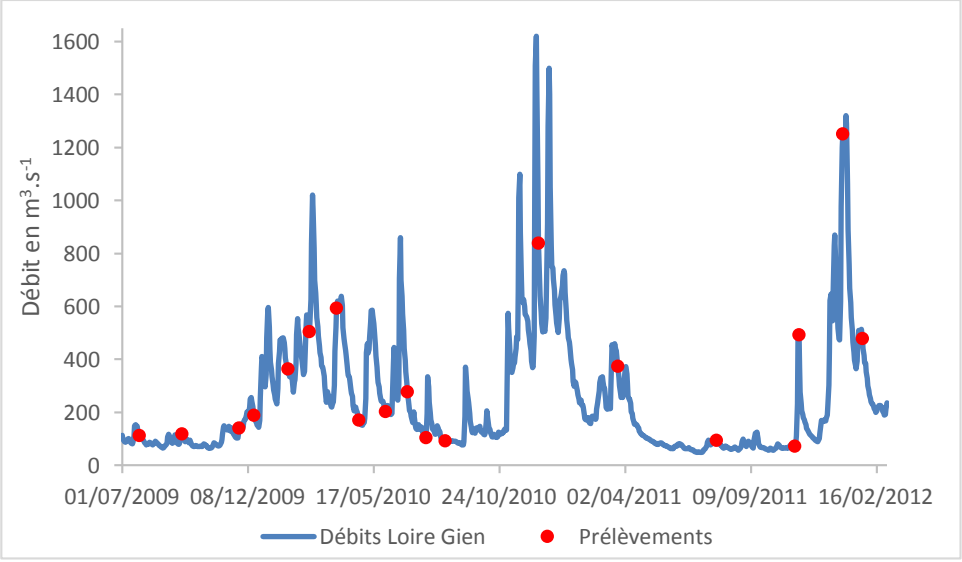


Fig.104. *Débits de la Loire à Gien et dates de prélèvements entre juillet 2009 et janvier 2012.*

Protocole de prélèvement et d'analyse

Les prélèvements sont effectués, grâce à une bouteille de prélèvement descendue des ponts à un point fixe, avec une corde, dans le flux le plus vif, souvent au milieu du pont (fig. 105). Pour chaque échantillon, sont mesurés, au moment du prélèvement, les caractéristiques physico-chimiques principales des eaux, qui changent rapidement après le prélèvement et doivent donc être mesurées sur le terrain : le pH, la température, la conductivité, le potentiel redox, l'oxygène dissout (fig. 106).



Prélèvements au milieu des ponts du Guétin (à gauche) et de Châteauneuf-sur-Loire (à droite)



Préleveur accroché à une corde et lesté par un poids de pêche à brochet

Fig. 105. *Illustration du protocole de prélèvement des eaux de la Loire et de ses affluents. Source : SR, août 2010.*



Fig. 106. *Sonde multi-paramètres Horiba et son système d'étalonnage sur le terrain.*

Chaque prélèvement est séparé en deux échantillons (fig. 107) : d'une part un bidon de 500 ml dédié à l'analyse des éléments majeurs et d'autre part, pour les analyses isotopiques, un flacon de 15 ml en verre ambré, fermé avec du parafilm pour éviter les échanges avec l'air, stocké à l'envers, à l'abri de la lumière et à température ambiante.



Fig. 107. *Kit de prélèvement, bidon de 500 ml et bouteille en verre ambré pour l'analyse des isotopes.*

Le soir même du prélèvement, les échantillons de 500 ml sont filtrés (seuil de filtration à 0,45 µm) grâce à une unité de filtration réutilisable et à une pompe à vide (fig. 108). A 250 ml du filtrat, est ajouté 1 ml d'acide nitrique (HNO_3) concentré à 65% pour obtenir une solution à pH entre 1 et 2. L'échantillon ainsi stabilisé permet l'analyse des concentrations des différents cations en présence. L'autre moitié de l'échantillon filtré, est placée dans un nouveau bidon pour l'analyse des anions.

A partir de ce dernier filtrat, est mesurée l'alcalinité (fig. 108), dont la mesure doit également être réalisée rapidement après le prélèvement. La mesure de l'alcalinité est

effectuée par dosage acido-basique par l'acide sulfurique (1,6N) placé dans un titrateur digital en présence d'un indicateur mixte, du vert de bromocrésol - rouge de méthyle. L'ensemble des échantillons filtrés a été conservé à 4°C au réfrigérateur.



Fig. 108. Unité de filtration avec sa pompe à vide et kit de mesure de l'alcalinité.

Ensuite, en laboratoire, on mesure :

- la concentration de 5 anions (fluorure, chlorure, nitrite, nitrate, sulfate) par chromatographie ionique en phase liquide (chromatographie ionique ICS1000 Dionex, laboratoire GEOPS, Orsay), en suivant les recommandations de la norme NF EN ISO 10304-1 de juin 1995 (indice de classement T90-042) ;

- la concentration des 4 cations majeurs (magnésium, calcium, sodium et potassium) par spectrométrie d'absorption atomique (AA240FS Varian, laboratoire LGP, Meudon), en suivant les recommandations des normes NF EN ISO 7980 de mars 2000 (indice de classement T 90-005) pour le calcium et le magnésium, et NF T90-020 d'août 1984 pour le sodium et le potassium ;

- la concentration des silicates solubles par spectrométrie d'absorption moléculaire (Genesys 20 Thermo Scientific, laboratoire LGP, Meudon), en suivant les recommandations de la norme NF T90-007 de février 2001 (indice de classement T90-007) ;

- les rapports isotopiques des isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$ et le $\delta^{2}H$) par spectrométrie de masse (Finnigan Delta+, laboratoire GEOPS, Orsay) après filtration.

Ces analyses ont été réalisées en collaboration avec l'ingénieur chimiste du LGP, Vincent Robert ainsi qu'avec les ingénieurs Marc Massault, Gaël Monvoisin et Aurélie Noret du laboratoire Geops pour les analyses isotopiques.

Alcalinité : prédominance des ions HCO_3^-

Grâce au calcul du CITD (Carbone Inorganique Total Dissous), il est possible de déterminer la prédominance des espèces alcalines (tab. 33).

	H_2CO_3	HCO_3^-	CO_3^{2-}
Vindecy, Loire (12)	18,0	81,4	0,6
Diou, Loire (12)	10,1	89,1	0,8
Rigny, Arroux (12)	12,3	87,5	0,2
Imphy, Loire (13)	8,5	91,0	0,4
Le Guétin, Allier (13)	7,2	92,6	0,2
La Charité, Loire (13)	8,2	91,6	0,2
Châteauneuf, Loire (15)	4,0	94,6	1,4

Tab. 33. *Abondances moyennes (en %) des substances alcalines pour chaque site de prélèvements. Entre parenthèses est indiqué, pour chaque site de prélèvements, le nombre d'échantillons pris en compte dans le calcul de ces moyennes.*

Pour tous les sites de prélèvements, l'alcalinité est donc attribuable essentiellement aux bicarbonates vu que le pH des eaux est entre 7 et 8. Les autres espèces seront donc négligées.

Bilans ioniques des échantillons prélevés

Pour les campagnes pour lesquelles il a été possible de réaliser l'ensemble des analyses chimiques, le bilan ionique a été réalisé pour chaque échantillon (fig. 109), d'après la formule suivante : (Σ anions – Σ cations) / (Σ anions + Σ cations) x 100.

Sur 90 échantillons : pour 44 échantillons, le bilan ionique est compris entre 0 et 5% (positif ou négatif), soit 49% des échantillons ; pour 32 échantillons, il est compris entre 5 et 10%, soit 36% des échantillons ; et pour 12 échantillons, il est compris entre 10 et 15%, soit 13% des échantillons. Les analyses effectuées sont, à quelques exceptions près, exploitables.

On peut toutefois remarquer que pour 67% des échantillons, le bilan ionique est négatif. Ce déficit en charge négative, qui est plus accentué en période hivernale, pourrait venir de l'absence du dosage des phosphates. En effet, leur concentration est plus importante dans les eaux de la Loire moyenne en hiver qu'en été (Grosbois, 1998). Malgré leur faible concentration, même en hiver, leur charge négative (PO_4^{3-}) peut faire défaut dans le bilan ionique.

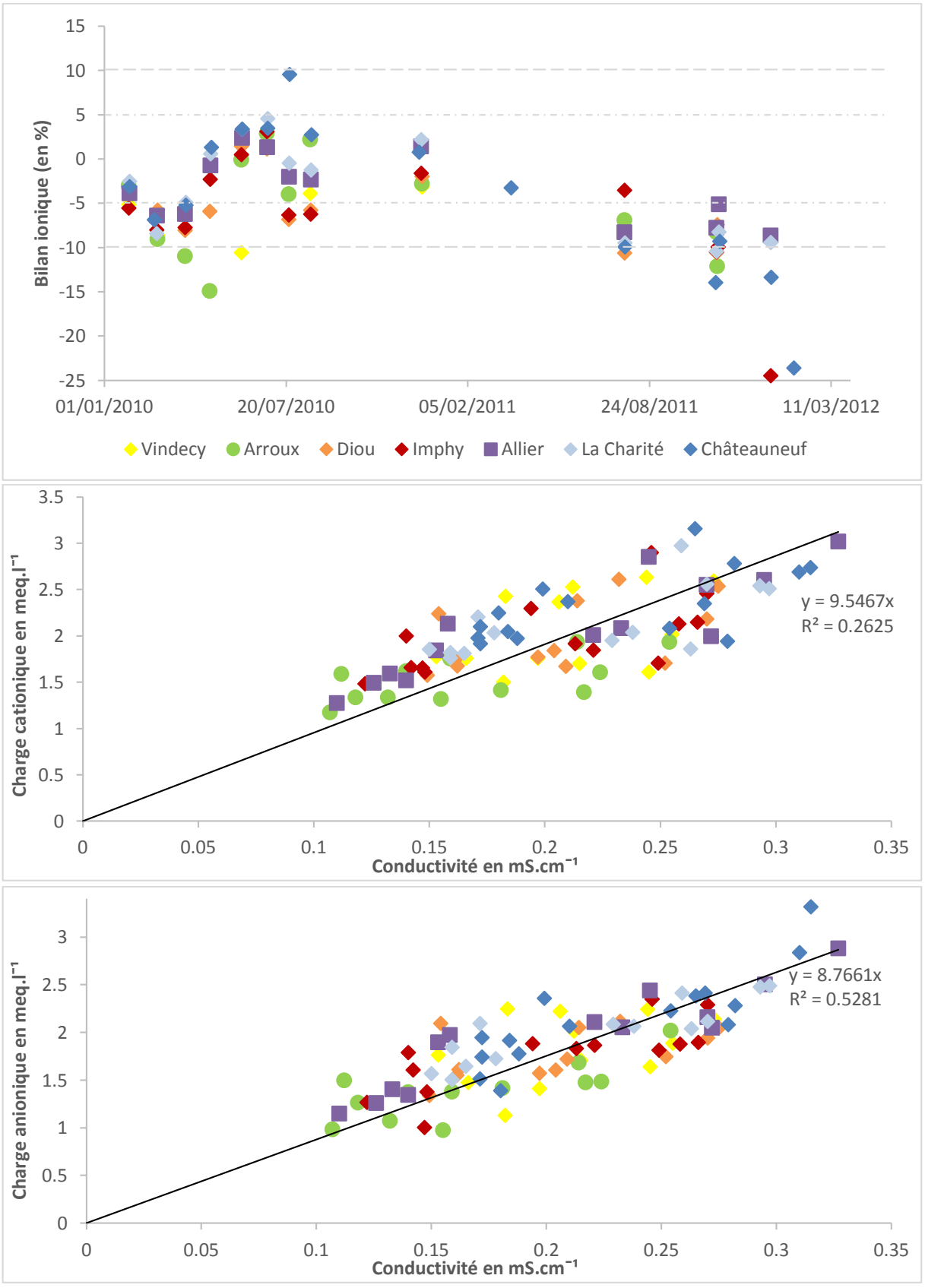


Fig. 109. *Bilan ionique des échantillons prélevés dans la Loire au pont de Vindecy, au pont de Diou, au pont d'Imphy, au pont de La-Charité-sur-Loire, au pont de Châteauneuf-sur-Loire, dans l'Arroux au pont de Rigny-sur-Arroux et dans l'Allier au pont du Guétin. L'erreur semble provenir d'un excédent de cations.*

Les graphiques représentant d'une part la charge cationique, et d'autre par la charge anionique, en fonction de la conductivité (fig. 109), montrent que les résultats des analyses chimiques sont cohérents avec la minéralisation ionique totale des eaux, dont la conductivité électrique est un indicateur.

Signatures isotopiques des précipitations

Afin de pouvoir déterminer différents pôles de mélange des eaux de la Loire et d'en définir les origines à partir des teneurs en ^{18}O et ^{2}H ([1]), il convient de disposer de données isotopiques des précipitations locales pour les différents bassins amont. Si de telles données existent pour le Massif Central (Bertrand, 2009) et pour la Loire moyenne (Chéry et al., 2004), il n'en est rien pour le massif du Morvan. En effet, d'après la figure 110, la composition annuelle isotopique varie en France, sans compter les variations saisonnières.

Par conséquent, un pluviomètre a été installé au cœur du Massif du Morvan (pluviomètre homologué par Météo France Spiea, et protocole selon recommandations Météo France, réf. : Civiate et Mandel, 2008), dans la commune de Saint-Brisson (47°16'30.8"N, 4°05'51.2"E), afin de collecter les précipitations et de réaliser des prélèvements. Entre janvier 2011 et février 2012, 19 prélèvements ont été réalisés, tous les quinze jours (excepté les jours de gel ou de neige), par Laurent Paris de la Maison du Parc naturel du Morvan.

En ce qui concerne les données issues de la bibliographie, pour les secteurs du Massif Central et de la Loire moyenne, les équations des droites de régression linéaire entre $\delta^{2}H$ et $\delta^{18}O$ varient peu, et sont, d'ailleurs, proches de celle de la droite météoritique mondiale (Craig,

[1] La molécule d'eau, composée d'hydrogène et d'oxygène, comporte des isotopes légers et des isotopes lourds. Leur proportion respective dans les précipitations varie de façon saisonnière, mais également en fonction de la latitude et de l'altitude. Ce rapport entre isotopes lourds et légers est lié à la température à laquelle se produit un changement de phase de l'eau (évaporation ou condensation). Ainsi, les précipitations se produisant proche des pôles ou bien en altitude sont enrichies en isotopes légers, comparées aux précipitations en plaine ou proche de l'équateur. La composition isotopique d'une eau s'exprime donc par l'écart relatif (en ‰) du rapport entre isotopes légers et lourds, par rapport à un étalon (composition moyenne de l'eau de mer, Craig, 1961). Cet écart est noté $\delta^{18}O$ pour l'oxygène et $\delta^{2}H$ pour l'hydrogène, ou deutérium (paragraphe d'après Négrel et al., 2001).

1961) dont l'équation est $\delta^2H = 8\ \delta^{18}O + 10$ (fig. 111). Celle du massif du Morvan, issue des mesures réalisées dans le cadre de cette étude, diffère des deux précédentes (fig. 112). Cela peut provenir du faible nombre de données. Les données en période estivale pourraient être évaporées, malgré la présence d'huile de paraffine dans le pluviomètre pour éviter l'évaporation des précipitations une fois dans le pluviomètre.

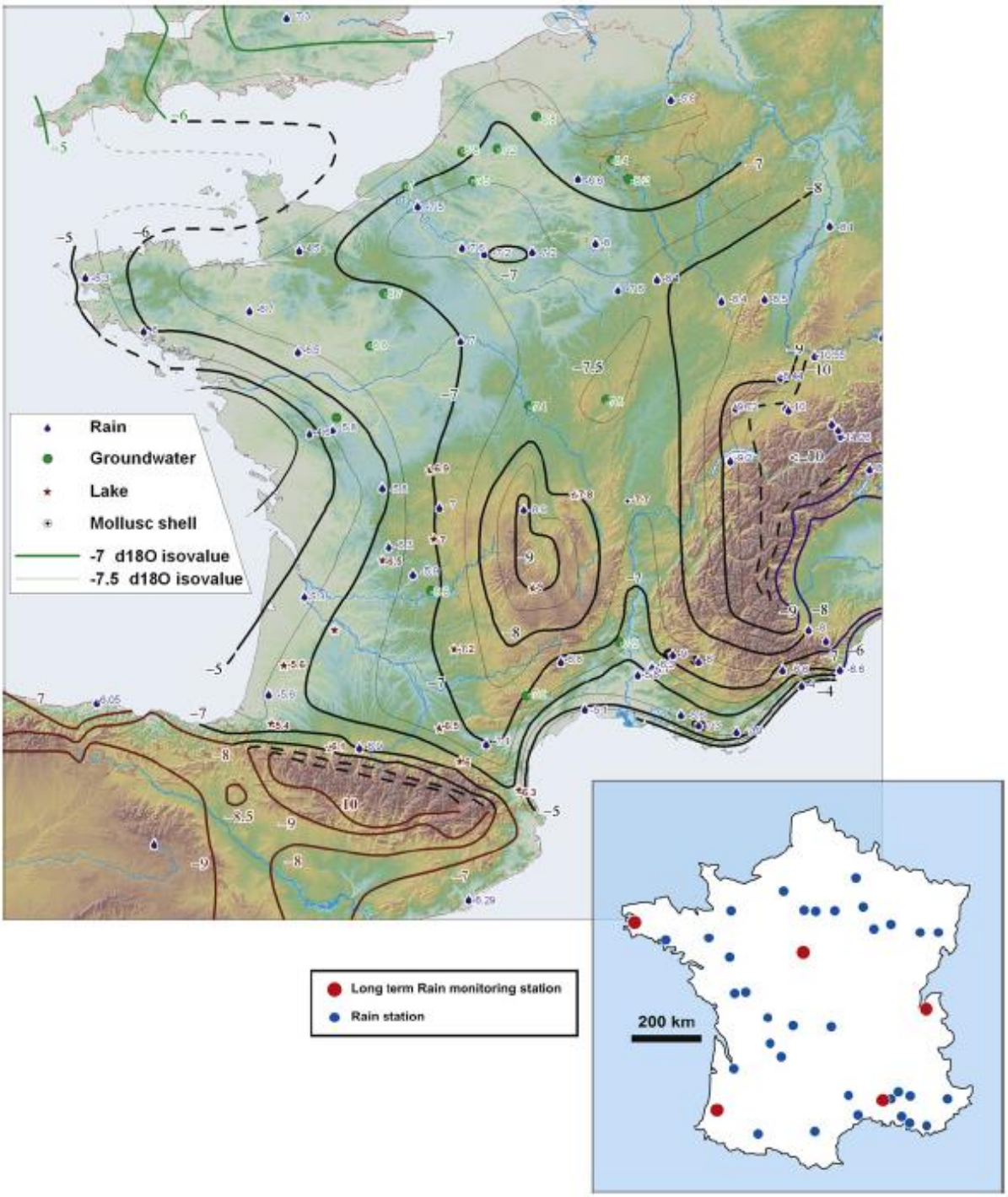


Fig. 110. Isolignes de la composition isotopique moyenne annuelle en ^{18}O des précipitations en France. Source : Millot et al., 2010.

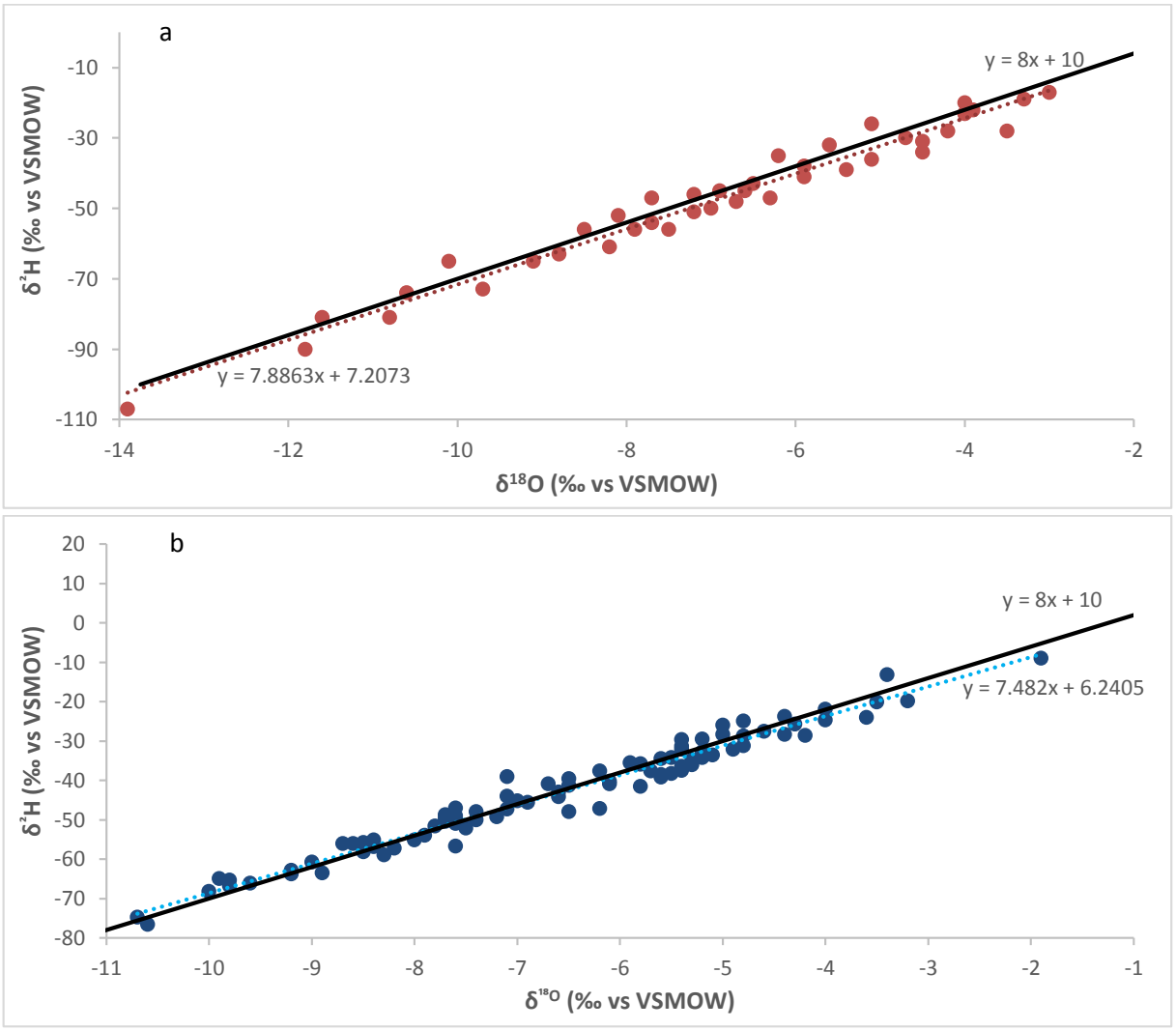


Fig. 111. *Composition isotopique des précipitations à Sayat (a) (Massif Central ; Bertrand, 2009) et à Orléans (b) (Loire moyenne ; Chéry et al., 2004).*

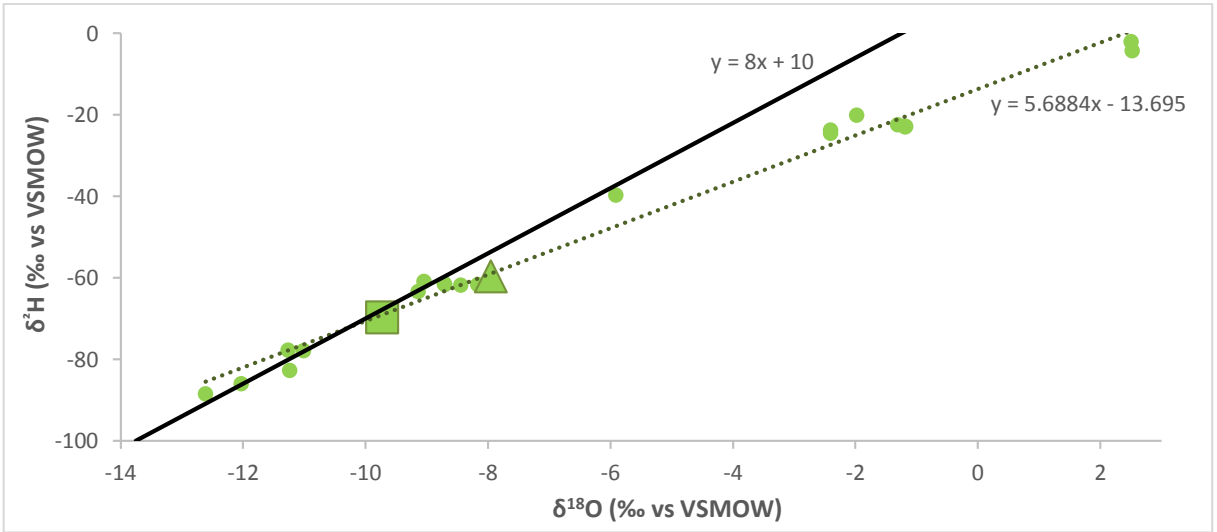


Fig. 112. *Composition isotopique des précipitations, à Saint-Brisson, dans le Massif du Morvan. Le figuré triangulaire représente la moyenne annuelle, pondérée par la hauteur des précipitations, de la composition isotopique des précipitations. Le figuré carré représente la moyenne, pondérée par la hauteur des précipitations, de la composition isotopique des précipitations des mois d'octobre à mars.*

		Altitude (en m)	Moyenne annuelle		Moyenne pour les mois d'octobre à mars	
			$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{2}H$ (‰)
Loire moyenne	Orléans	109	-6,9	-45,0	-7,7	-50,9
Massif Central	Sayat	550	-6,9	-47,2	-8,0	-56,4
Morvan	Saint-Brisson	617	-8,0	-59,6	-9,7	-69,6

Tab. 34. *Moyennes des compositions isotopiques des précipitations pondérées par les hauteurs de précipitations à Orléans, Sayat et Saint-Brisson.*

Les compositions isotopiques des précipitations sont influencées par l'altitude des stations où elles sont prélevées. D'après le tableau 34, on observe une organisation en fonction de l'altitude des stations. Les précipitations à Saint-Brisson (617 m) sont appauvries par rapport à celles de Sayat (550 m) et encore plus par rapport à celle d'Orléans (109 m). Grâce au gradient du $\delta^{18}O$ en fonction de l'altitude, défini par Blavoux (1978), de l'ordre de -0,3‰ / 100 m, on calcule la différence théorique entre les données des différentes stations de prélèvement. En fonction de l'altitude des stations, les valeurs de $\delta^{18}O$ d'Orléans et de Sayat devraient présenter une différence de 1,3‰, de Sayat et de Saint-Brisson de 0,2‰, d'Orléans et de de Saint-Brisson de 1,5‰. Il ne s'agit toutefois que d'ordres de grandeur car l'effet d'altitude n'est pas le seul paramètre en jeu dans les variations isotopiques des précipitations.

Les moyennes pondérées des compositions isotopiques des précipitations entre les mois d'octobre et mars, c'est-à-dire pendant la période de recharge des aquifères, serviront par la suite pour définir la signature isotopique des précipitations locales dans l'étude de celles des eaux de la Loire et de ses affluents. En effet, les précipitations contribuent directement aux débits des cours d'eau, essentiellement, entre les mois d'octobre et de mars. Ils correspondent aux mois où les prélèvements par la végétation sont réduits et où les pluies efficaces ne sont donc pas nulles.

Analyse des données

Pour l'analyse des données, le diagramme de Piper permet de visualiser rapidement les principales caractéristiques chimiques des eaux échantillonnées.

Les graphiques représentant l'évolution des éléments majeurs d'amont en aval et dans le temps, ainsi que leur concentration en fonction du débit, mettent en évidence les variations des espèces chimiques, qu'il conviendra d'expliquer en fonction des réactions chimiques ou des mélanges.

Les graphiques représentant $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$ permettent l'analyse des origines des eaux de la Loire moyenne après avoir défini les différents pôles de mélange (précipitations et apports des bassins amont et des affluents).

En parallèle, des bilans hydrologiques ont été réalisés au niveau des confluences de la Loire et des affluents drainants le Morvan, et d'autre part, de la confluence de la Loire et de l'Allier, pour vérifier la cohérence entre les chroniques hydrologiques et les résultats obtenus à partir des données isotopiques.

Enfin, pour discuter de la généralisation de ces résultats sur les apports des bassins amont dans la formation des débits de la Loire moyenne, les coefficients d'abondance mensuelle, calculés sur la période de 1970 à 2011, ont été utilisés.

4.2. Caractéristiques chimiques des eaux la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan

L'objectif de cette partie sera de caractériser les signatures chimiques des eaux (i) de la Loire en amont des confluences avec les affluents drainant le Morvan, (ii) des eaux du Morvan et (iii) des eaux de l'Allier. Il s'agit de déterminer quels éléments pourront être utilisés comme traceurs de mélanges, en complément des isotopes stables de l'eau, afin d'étudier les contributions relatives des bassins amont dans la formation des débits en Loire moyenne. Les éléments retenus devront remplir deux conditions : (1) avoir des différences de concentrations marquées entre les différents cours d'eau des bassins amont , et (2) présenter des variations saisonnières importantes afin de permettre l'étude de ces apports des bassins amont pour des situations hydrologiques différentes.

4.2.1. Impacts d'un gradient amont-aval sur le faciès chimique des eaux de la Loire moyenne et de ses principaux affluents

Les eaux prélevées dans la Loire et ses affluents présentent un **faciès chimique** bicarbonaté calcique en accord avec la géologie, dominé par les carbonates. Les bassins versants étant essentiellement agricoles, un part significative de la minéralisation anionique est assurée par les nitrates. Dans le diagramme de Piper (fig. 113), ces eaux sont ainsi relativement regroupées avec une évolution entre les pôles Ca^{2+} et Na^{+} en cations (sans variation du Mg^{2+}) et entre les pôles HCO_3^- et NO_3^- en anions (sans variation des SO_4^{2-}). De plus, tant dans la représentation des anions que dans celle des cations, une organisation amont-aval apparaît.

La **conductivité électrique**, qui reflète la minéralisation ionique totale des eaux, montre que les apports du Massif Central sont relativement plus minéralisés (moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010, 203 et 211 $\mu S.cm^{-1}$ respectivement pour la Loire à Vindecy et pour l'Allier au Guétin ; fig. 114) que les autres eaux.

Les apports d'eaux provenant du Morvan, plus faiblement minéralisées (moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010, 167 $\mu S.cm^{-1}$ pour l'Arroux à Rigny-sur-Arroux), entraîne une

baisse de la conductivité électrique des eaux de la Loire après la confluence, à Diou comme à Imphy.

Plus en aval, les données de conductivité électrique augmentent en Loire moyenne, ce qui s'explique par les apports plus minéralisés de l'Allier puis par les apports des nappes alluviales en Loire moyenne (voir chapitre 5). La conductivité électrique moyenne de la Loire sur pour l'année hydrologique 2009-2010 atteint ainsi 242 µS.cm^{-1} à Châteauneuf-sur-Loire.

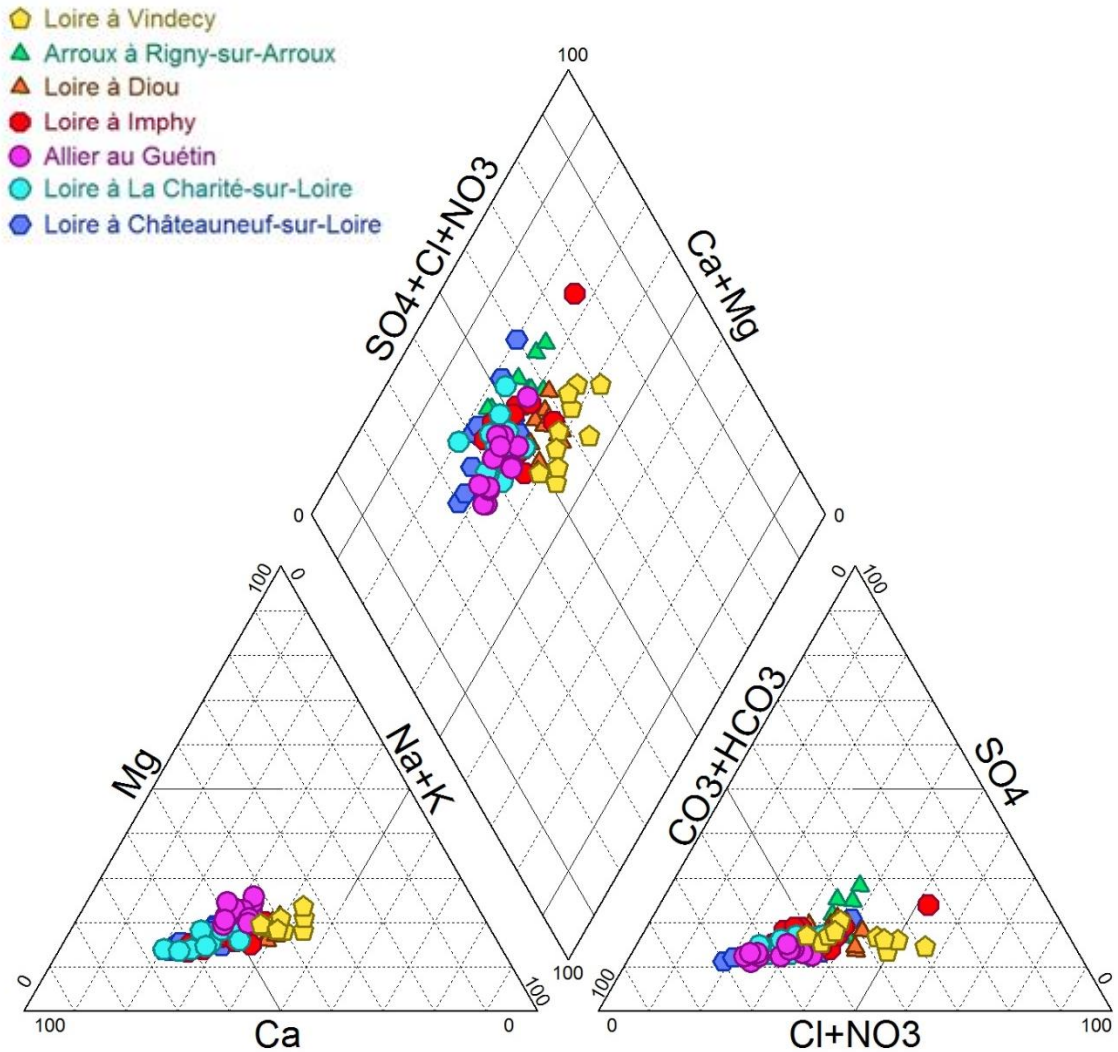


Fig. 113. *Diagramme de Piper réunissant les résultats de l'ensemble des prélèvements effectués dans la Loire et ses affluents.*

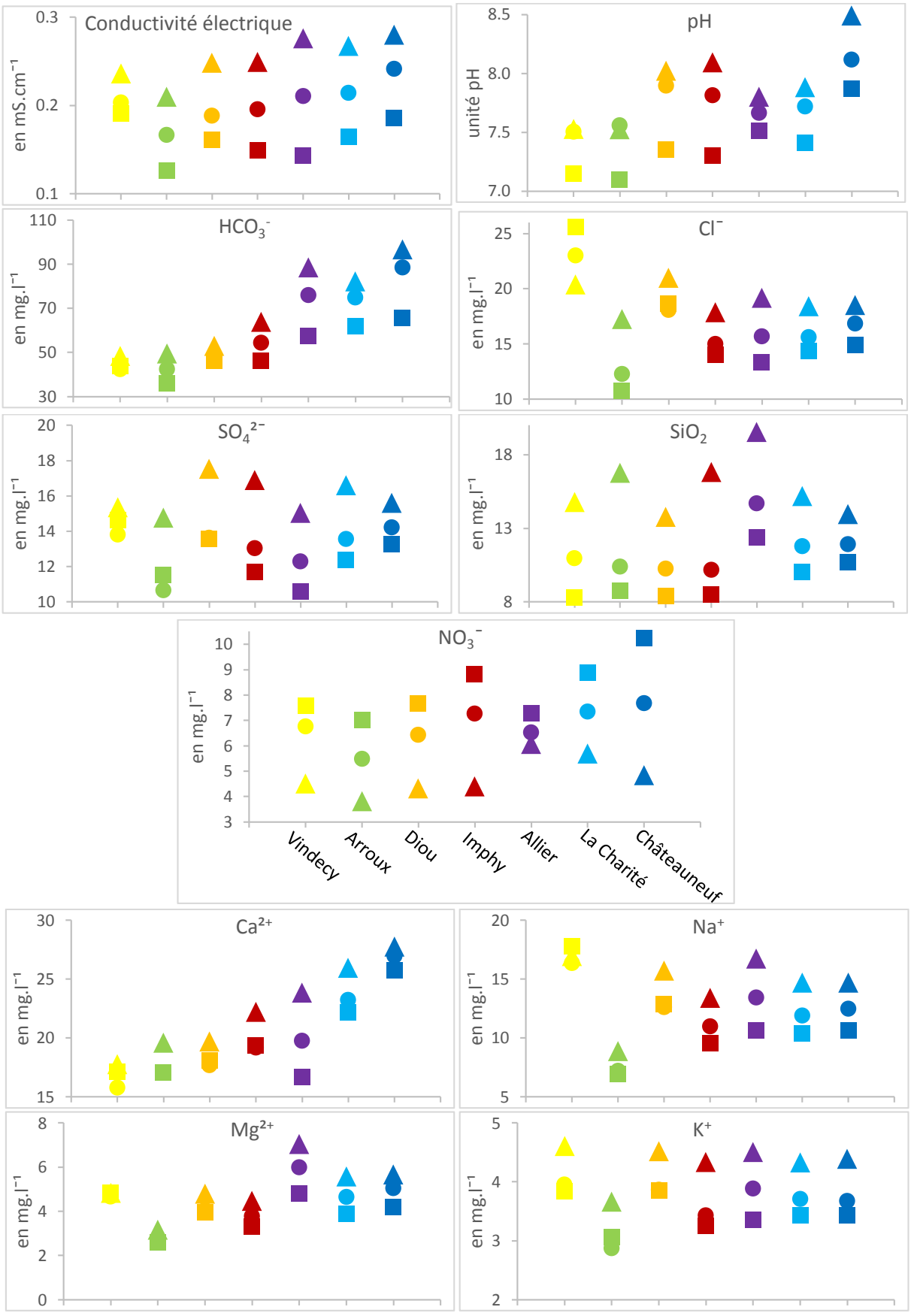


Fig. 114. *Moyennes sur une année hydrologique (ronds, année 2009-2010), moyennes des eaux d'été (triangles, de 2009 à 2011) et moyennes des eaux d'hiver (carrés, de 2009 à 2012) de la conductivité électrique, du pH et de la concentration en éléments majeurs pour chaque site de prélèvements.*

Le **pH**, ou potentiel hydrogène, reflet de la concentration des ions H^+ d'une eau, évolue aussi d'amont en aval. Le long de la Loire, il révèle à nouveau l'évolution de la géologie du bassin d'amont en aval et/ou de l'équilibre de l'eau du fleuve avec le CO_2 de l'atmosphère ou du sous-sol (fig. 114).

Le pH des eaux de la Loire présente des variations qui reflètent des mélanges entre les eaux du fleuve et celles de ses affluents. Les pH les plus faibles ont été obtenus pour les eaux de l'Arroux et celles de la Loire à Vindecy. Le pH des eaux de la Loire baisse au niveau de la confluence avec l'Allier, étant donné le pH plus faible des eaux de ce dernier, puis augmente en Loire moyenne. Les apports provenant du Massif Central et du Morvan, à dominante de silicates, possèdent donc un pH plus faible que les eaux en milieu calcaire de la Loire moyenne, où les eaux ont eu plus le temps de s'équilibrer partiellement avec le CO_2 de l'atmosphère et celui du sol (eaux souterraines), ce qui a pour conséquence, en milieu calcaire, d'augmenter le pH par déplacement des équilibres calco-carboniques.

Dans l'ordre, les éléments les plus abondants au moins abondants dans les eaux de la Loire et de ses affluents sont en moyenne, pour les cations $Ca^{2+}>Na^+>Mg^{2+}>K^+$, et pour les anions $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$.

Du point de vue des anions, les eaux ne sont pas seulement dominées par les ions bicarbonates. Ainsi, en moyenne, les ions **HCO_3^- et NO_3^-** sont aussi abondants dans les eaux de la Loire et de ses affluents (tab. 35 et fig. 115), même si les comportements saisonniers de ces deux éléments sont contrôlés par des phénomènes différents. Ce sont les ions **Ca^{2+}** qui dominent partout avec des concentrations parfois importantes de Na^+, qui pourraient être issus d'échange cationique Ca-Na avec les argiles et/ou provenir de l'hydrolyse des silicates sodiques dans les bassins de nature silicatés en Loire amont.

	NO_3^-	SiO_2	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Ca^{2+}
Loire Vindecy	0,74	0,18	0,31	0,67	0,75	0,11	0,40	0,76	0,87
Arroux Rigny	0,65	0,19	0,26	0,36	0,66	0,08	0,23	0,33	0,89
Loire Diou	0,79	0,17	0,31	0,55	0,80	0,11	0,35	0,60	0,96
Loire Imphy	0,88	0,18	0,29	0,45	0,89	0,10	0,32	0,51	1,09
Allier Guétin	1,12	0,25	0,26	0,44	1,13	0,10	0,48	0,58	1,01
Loire La Charité	1,12	0,20	0,29	0,45	1,14	0,10	0,37	0,53	1,18
Loire Châteauneuf	1,23	0,20	0,30	0,47	1,25	0,10	0,39	0,54	1,36

Tab. 35. *Concentration moyenne en éléments majeurs dans les eaux de la Loire et de ses affluents (moyenne de tous les prélèvements réalisés de 2009 à 2012, soit 15 échantillons), en meq.l^{-1}.*

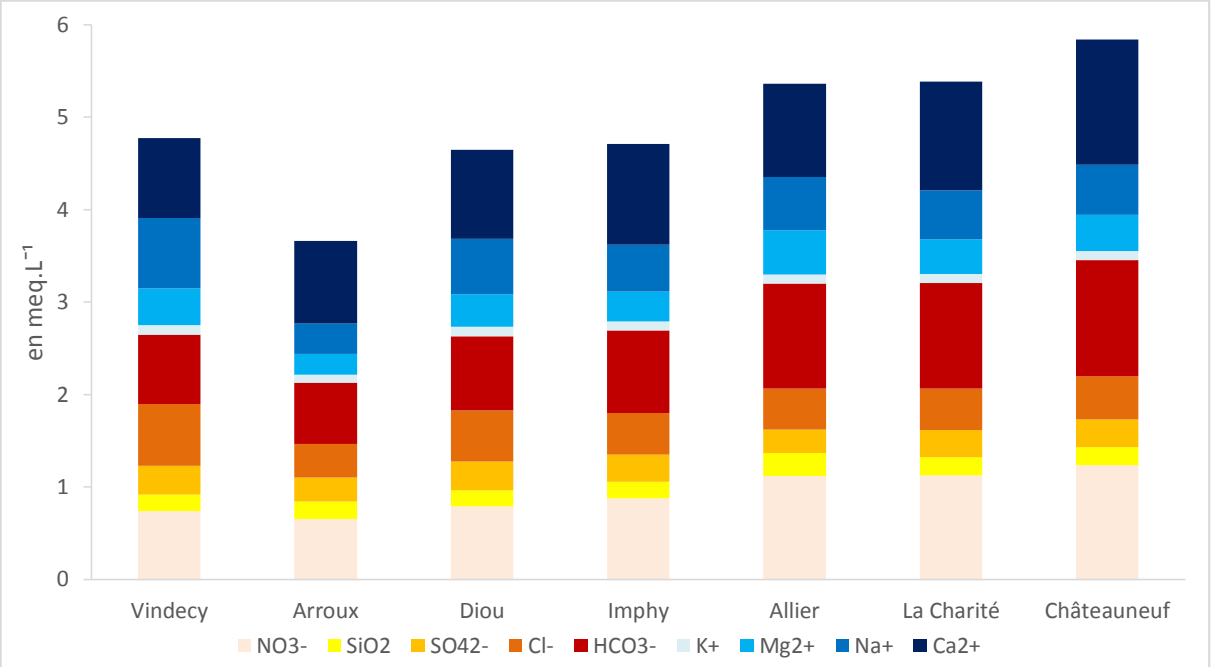


Fig. 115. *Abondance des éléments majeurs dans les eaux de la Loire et de ses affluents (moyenne de tous les prélèvements réalisés de 2009 à 2012, soit 15 échantillons).*

La concentration en **HCO_3^- et Ca^{2+}** augmente d'amont en aval (fig. 114). Les apports du Massif Central (la Loire à Vindecy et l'Allier au Guétin), plus pauvres en ions Ca^{2+}, sont enrichis petit à petit au sein du Bassin Parisien par dissolution des carbonates. Le comportement des ions HCO_3^- est similaire excepté pour l'Allier dont les eaux sont plus riches que celles de la Loire amont au niveau du Bec d'Allier.

Les concentrations des ions **Cl^- et Na^+** dans les eaux de la Loire diminuent faiblement d'amont en aval. En effet, les eaux de la Loire à Vindecy en sont riches (23 $mg.l^{-1}$ pour les chlorures et 16,3 $mg.l^{-1}$ pour le sodium en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010) puis, avec des apports plus pauvres provenant du Morvan (12,3 $mg.l^{-1}$ pour les chlorures et 7,2 $mg.l^{-1}$ pour le sodium en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010), leur concentration diminue jusqu'à la confluence avec l'Allier. En Loire moyenne, les concentrations de ces mêmes éléments stagnent ou augmentent légèrement (à Châteuneuf-sur-Loire, 16,8 $mg.l^{-1}$ pour les chlorures et 12,5 $mg.l^{-1}$ pour le sodium en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010).

La représentation graphique des concentrations de ions Na^+ en fonction des ions Cl^- permet de déterminer l'influence des précipitations et celle du socle sur la chimie des eaux prélevées (fig. 116). Ainsi, tous les sites de prélèvements de la Loire et de l'Allier présentent

une influence plus marquée du subtrat géologique (au-dessus de la bissectrice) que des précipitations (représentées par la bissectrice). Seules les eaux de l'Arroux semblent clairement plus influencées par les précipitations. Comme mentionnées précédemment, l'excès de Na^+ par rapport au Cl^- peut provenir d'échanges de cations avec les argiles et/ou d'hydrolyse avec les silicates, les deux processus conduisant à un enrichissement des eaux en Na^+ indépendamment des ions Cl^-.

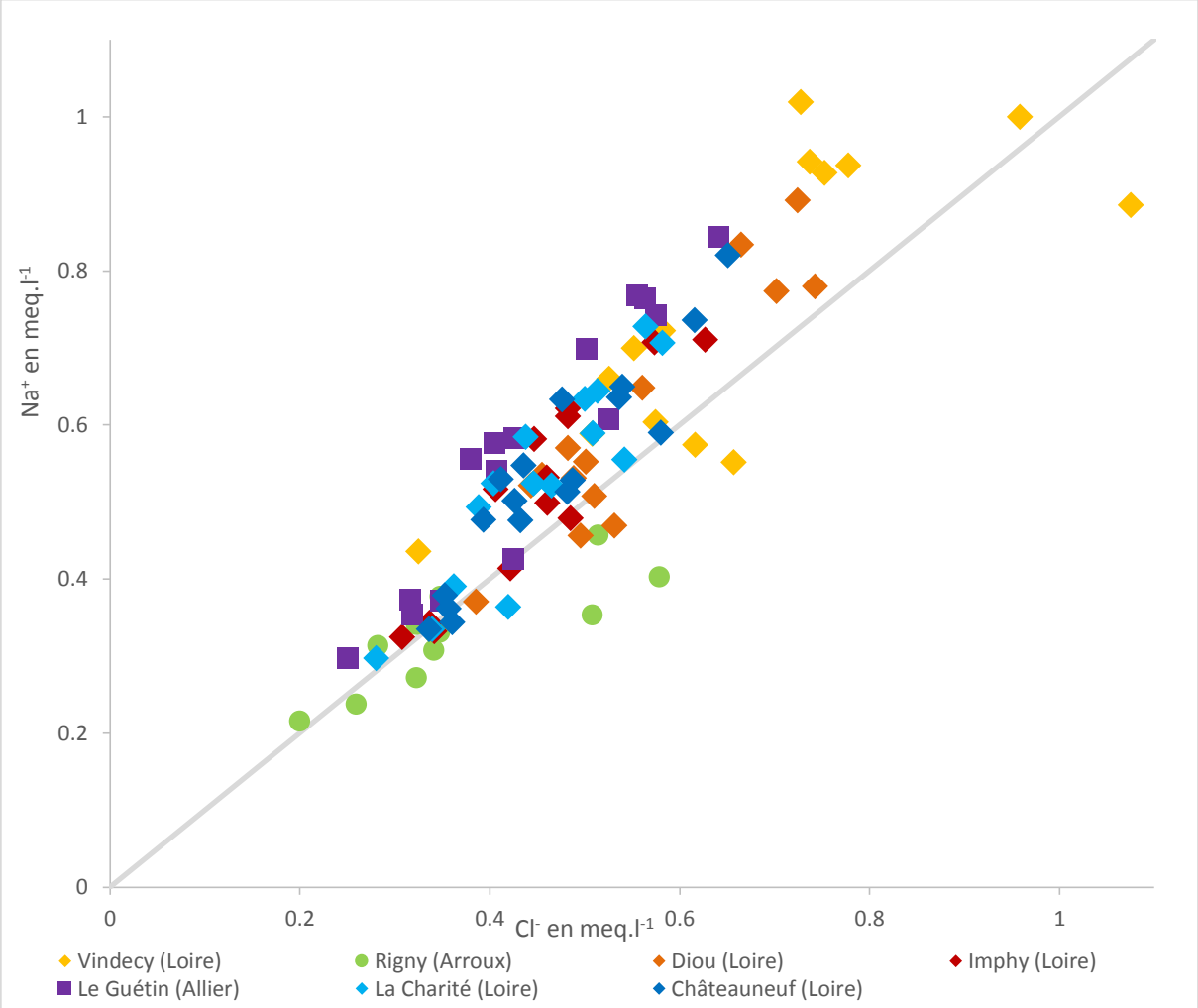


Fig. 116. *Relation Na^+ / Cl^- dans les eaux de la Loire et de ses affluents (représentation de tous les échantillons disponibles entre 2009 et 2012 pour chaque site de prélèvements).*

Le comportement des ions **SO_4^{2-}**, est très similaire à ceux des ions Cl^-, même si les variations de la concentration de ce premier sont moins importantes (fig. 114). Pour les ions **Mg^{2+} et K^+**, on peut considérer que les tendances d'amont en aval sont les mêmes que pour les ions Cl^- et Na^+, bien que leurs variations soient beaucoup plus faibles. En effet, les concentrations des ions Mg^{2+} et K^+ ne varient quasiment pas dans les eaux de la Loire d'amont

en aval. Cependant, les eaux de l'Arroux présentent des concentrations plus faibles que celles des eaux de la Loire, contrairement aux eaux de l'Allier où elles sont plus fortes.

Les apports en **silice dissoute** proviennent essentiellement du Massif Central, dominé par les formations silicatées (Grosbois, 1998). Leur concentration dans les eaux de la Loire diminue donc légèrement entre Vindecy (11 $mg.l^{-1}$ en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010) et le Bec d'Allier (à Imphy, 10,2 $mg.l^{-1}$ en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010) où elles reçoivent un nouvel apport des eaux de l'Allier (14,7 $mg.l^{-1}$ en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010). Leur concentration est ensuite stable en Loire moyenne (à Châteauneuf-sur-Loire, 11,9 $mg.l^{-1}$ en moyenne sur l'année hydrologique 2009-2010).

Enfin, l'évolution d'amont en aval de la concentration des ions $\mathbf{NO_3^-}$ est singulière (fig. 114). Elle augmente légèrement dans les eaux de la Loire de l'amont vers l'aval. Les apports du Morvan et de l'Allier sont un peu moins riches en nitrates que les eaux de la Loire dans le même secteur. Cependant, au vu de l'inversion de leurs variations saisonnières par rapport aux autres éléments, les concentrations en ions NO_3^- sont contrôlés par des paramètres différents, qui sont les apports agricoles, et dans une moindre part l'activité biologique (fig. 114 et tab. 35).

Le gradient amont-aval est donc étroitement lié aux différences de substratum géologique que draînent les eaux de la Loire et de ses affluents. La transition entre le Massif Central et le Bassin Parisien est un élément primordial de la compréhension de l'évolution de la chimie des eaux au sein du bassin ligérien (tab. 36). Notons aussi que l'activité agricole au sein des bassins versants a un impact sur la chimie des cours d'eau étudiés.

	Riche	Intermédiaire	Pauvre
Loire amont	Cl^- et Na^+		HCO_3^- et Ca^{2+}
Morvan			Faible minéralistation en général en HCO_3^-, Ca^{2+}, Cl^- et Na^+
Allier	SiO_2 et Mg^{2+}	HCO_3^-, Ca^{2+}, Cl^- et Na^+	
Loire moyenne	HCO_3^- et Ca^{2+}		

Tab. 36. *Synthèse des caractéristiques chimiques qui distinguent les eaux de la Loire amont, du Morvan, de l'Allier et de la Loire moyenne.*

Corrélations entre les éléments majeurs sur chaque site de prélèvements

Des corrélations ont été recherchées entre les éléments majeurs composant les eaux d'un même site de prélèvement (tab. 37). L'ensemble des échantillons disponibles, prélevés entre 2009 et 2012, a donc été utilisé (entre 12 et 18 échantillons selon le site de prélèvement). Ces corrélations entre les différentes espèces chimiques permettent de rapprocher le comportement de certains éléments ou d'en individualiser certains autres.

La silice et les nitrates par exemple ne sont corrélés avec aucun autre élément. On peut remarquer ici, que contrairement à l'étude réalisée sur les eaux de la Loire à Orléans et à Bréhémont, à l'aval de Tours (Grosbois, 1998), les ions bicarbonates et le calcium sont corrélés de façon médiocre entre eux bien qu'ils aient une origine commune par les équilibres calco-carbonates. Les bicarbonates, à Châteauneuf-sur-Loire, sont néanmoins bien corrélés au magnésium. De plus, les espèces chimiques, exceptés la silice et les nitrates, sont corrélés entre eux dans les eaux de l'Allier au Guétin, ce qui ne se vérifie pas pour les autres sites de prélèvements.

Tab. 37. *Coefficients de corrélation linéaire entre les espèces ioniques (en mg.l^{-1}) pour chaque site de prélèvements de tous les échantillons disponibles (entre 12 et 18 échantillons, de juillet 2009 à janvier 2012).*

La Loire à Vindecy (15 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,26	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,17	-0,18	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,79	0,49	-0,02	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,46	0,49	-0,14	-0,29	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,45	0,70	-0,17	0,82	-0,04	1,00	Na^+		
Na^+	0,70	0,77	-0,20	0,84	-0,06	0,83	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,85	0,67	0,04	0,91	-0,20	0,78	0,93	1,00	K^+
K^+	0,26	-0,14	0,17	0,47	-0,31	0,31	0,24	0,23	1,00

L'Arroux à Rigny-sur-Arroux (12 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,49	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,30	0,74	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,15	0,68	0,50	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,43	-0,38	-0,18	-0,01	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,34	0,75	0,62	0,78	-0,01	1,00	Na^+		
Na^+	0,56	0,83	0,46	0,82	-0,35	0,66	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,50	0,73	0,43	0,89	-0,14	0,74	0,92	1,00	K^+
K^+	0,05	0,50	0,26	0,77	0,13	0,46	0,66	0,70	1,00

La Loire à Diou (15 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,64	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,27	0,07	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,67	0,71	0,32	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,42	0,00	-0,34	-0,44	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,35	0,77	0,13	0,75	-0,27	1,00	Na^+		
Na^+	0,78	0,93	0,07	0,84	-0,17	0,71	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,88	0,78	0,37	0,92	-0,41	0,63	0,90	1,00	K^+
K^+	0,41	0,61	0,14	0,72	-0,21	0,58	0,70	0,65	1,00

La Loire à Imphy (14 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,59	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,04	0,34	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,65	0,87	0,45	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,54	-0,30	-0,33	-0,45	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,55	0,42	-0,18	0,53	0,07	1,00	Na^+		
Na^+	0,69	0,92	0,30	0,94	-0,44	0,47	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,80	0,75	0,36	0,90	-0,50	0,47	0,90	1,00	K^+
K^+	0,32	0,64	0,18	0,75	-0,13	0,49	0,78	0,62	1,00

L'Allier au Guétin (16 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,71	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,32	0,41	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,85	0,85	0,52	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,20	0,09	0,18	0,09	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,82	0,91	0,40	0,94	-0,04	1,00	Na^+		
Na^+	0,84	0,95	0,40	0,89	-0,13	0,93	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,96	0,84	0,49	0,93	-0,02	0,90	0,91	1,00	K^+
K^+	0,85	0,84	0,40	0,88	-0,23	0,91	0,94	0,88	1,00

La Loire à La-Charité-sur-Loire (15 échantillons)

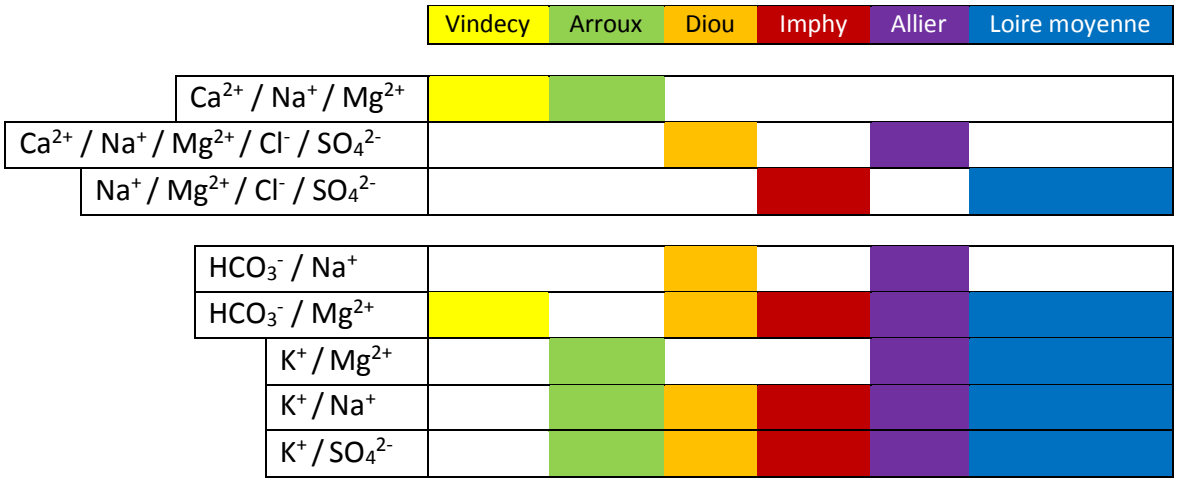
	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,56	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,14	0,28	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,68	0,81	0,33	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,61	-0,35	-0,15	-0,48	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,32	0,48	-0,18	0,58	-0,17	1,00	Na^+		
Na^+	0,66	0,91	0,21	0,87	-0,60	0,49	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,87	0,77	0,44	0,88	-0,65	0,31	0,85	1,00	K^+
K^+	0,43	0,64	0,35	0,86	-0,51	0,41	0,81	0,73	1,00

La Loire à Châteauneuf-sur-Loire (18 échantillons)

	HCO_3^-								
HCO_3^-	1,00	Cl^-							
Cl^-	0,43	1,00	SiO_2						
SiO_2	0,08	-0,09	1,00	SO_4^{2-}					
SO_4^{2-}	0,60	0,75	0,13	1,00	NO_3^-				
NO_3^-	-0,52	-0,60	-0,14	-0,67	1,00	Ca^{2+}			
Ca^{2+}	0,21	0,57	-0,07	0,65	-0,16	1,00	Na^+		
Na^+	0,51	0,94	-0,04	0,86	-0,74	0,51	1,00	Mg^{2+}	
Mg^{2+}	0,82	0,75	0,20	0,87	-0,74	0,43	0,85	1,00	K^+
K^+	0,44	0,62	0,21	0,82	-0,66	0,35	0,76	0,68	1,00

Le tableau de synthèse 38 permet de mettre en évidence les corrélations entre les éléments majeurs. La partie supérieure de ce tableau réunie le maximum d'éléments tous corrélés entre eux. Les corrélations les plus fréquentes des deux ions qui ne sont pas présents dans ce premier groupement, les bicarbonates et le potassium, sont présentées dans la seconde partie du tableau.

L'identification d'un groupe d'éléments dont les comportements chimiques sont liés (partie supérieure du tableau 38) permet de mettre en évidence une nouvelle logique amont-aval. En effet, les espèces chimiques composant ce groupe évolue le long du profil.



Tab. 38. *Synthèse des corrélations entre les espèces ioniques au sein de la zone d'étude.*

Pour les eaux de la Loire à Vindecy et de l'Arroux, seuls trois éléments composent ce groupe : le calcium, le sodium et le magnésium. Ces corrélations sont en accord avec l'étude de la géochimie de petits bassins versants silicatés du Massif Central (Négrel, 1997) qui a mis en évidence les comportements chimiques similaires des calcium, sodium, magnésium et potassium. Ces éléments viennent de l'hydrolyse des minéraux alumino-silicatés composant les formations du bassin amont.

Dans les eaux de la Loire à Diou et de l'Allier au Guétin, s'ajoutent à ce groupe les chlorures et les sulfates.

Puis dans les eaux de la Loire à Imphy et aux deux sites de prélèvements en Loire moyenne, ce groupe se réduit à quatre éléments (sodium, magnésium, chlorures et sulfates) en perdant le calcium. Ce dernier groupement en Loire moyenne est en adéquation avec l'étude de la chimie des eaux de la Loire à Orléans et Bréhémont (Grosbois, 1998), où les comportements des chlorures, sulaftes, potassium, sodium et magnésium sont similaires.

4.2.2. Varibilité saisonnière des principaux paramètres physico-chimiques et de la concentration en éléments majeurs

En ce qui concerne la variabilité saisonnière de la chimie des eaux, présentée en figure 117, on observe que les valeurs de conductivité électrique, de pH et les concentrations des éléments majeurs sont plus importantes en période d'été qu'en période hivernale, excepté pour la concentration des ions NO_3^-. De plus, il est notable, que globalement, ces variations saisonnières sont observables sur tous les points de prélèvements et dans des ordres de grandeur équivalents.

Les graphiques de la figure 117 permettent d'étudier en détail ces variations saisonnières et leurs causes, notamment, leurs relations avec les variations du débit des cours d'eau. Le comportement saisonnier des différentes espèces chimiques sera étudié par groupes d'éléments, constitués à partir des corrélations identifiées précédemment : les ions HCO_3^- et Ca^{2+}, éléments constitutifs de la calcite, seront d'abord étudiés indépendamment ; le comportement des ions Cl^-, SO_4^{2-}, Na^+, Mg^{2+} et K^+ sera analysé ensemble, et enfin les ions NO_3^- et la silice dissoute, indépendamment, car leurs comportements sont contrôlés par des processus particuliers.

Fig. 117. ***Evolutions de la conductivité électrique (a), du pH (b) et de la concentration en éléments majeurs (c : HCO_3^- ; d : Ca^{2+} ; e : Cl^- ; f :SO_4^{2-} ; g : Na^+ ; h : Mg^{2+} ; i : K^+ ; j : SiO_2 ; k : NO_3^-) dans les eaux de la Loire et de ses principaux affluents, et relations entre ces paramètres et les débits.***
Légende identique pour tous les graphiques des pages suivantes.

La figure se compose d'une page par paramètre physico-chimique ou élément chimique. Sur cette page :

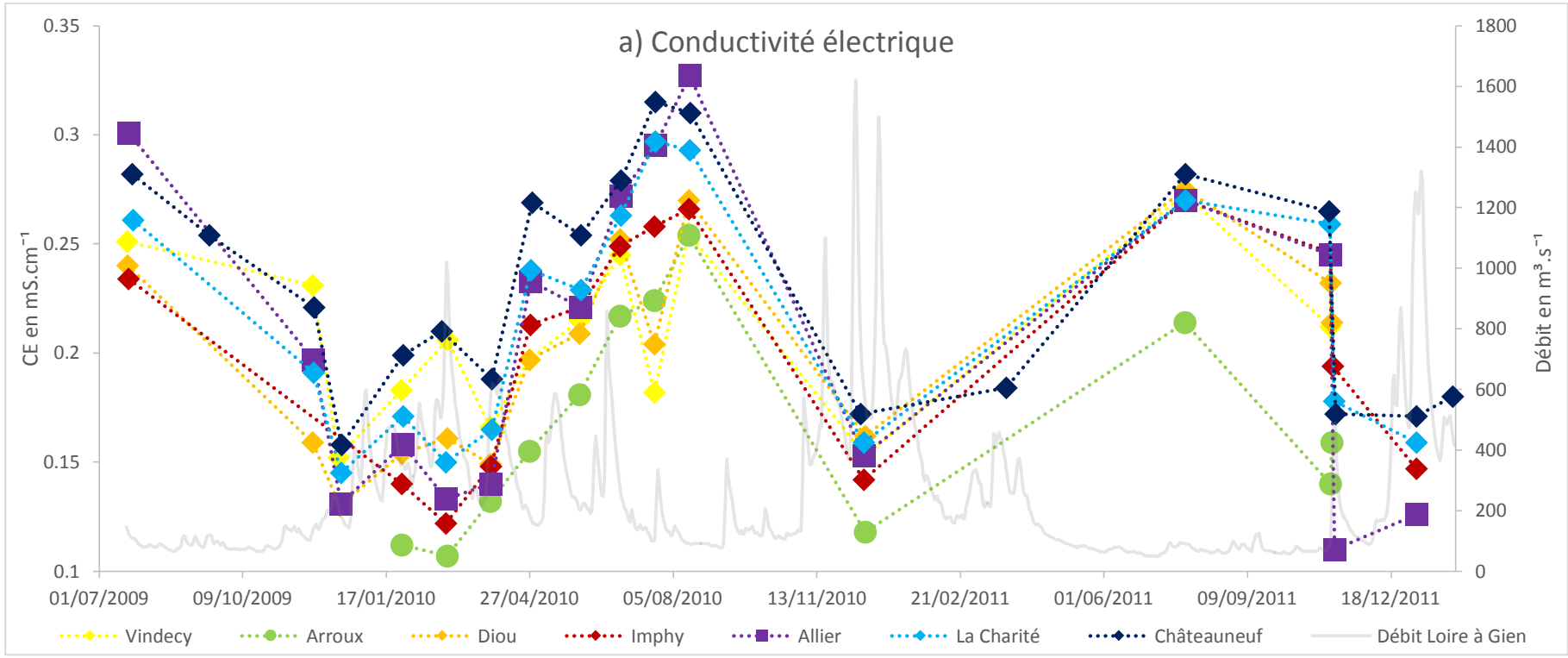
- *le premier graphique représente l'ensemble des mesures en fonction du temps pour chaque site de prélèvements. A ce graphique est ajouté, en gris clair, le débit de la Loire à Gien (à lire sur l'axe vertical secondaire),*
- *les deux graphiques suivants, en bas de page, sont les mêmes, seule l'échelle de l'axe des X changent. Il s'agit de graphiques du paramètre considéré en fonction du débit de la Loire à la station de jaugeage la plus proche du site de prélèvements.*

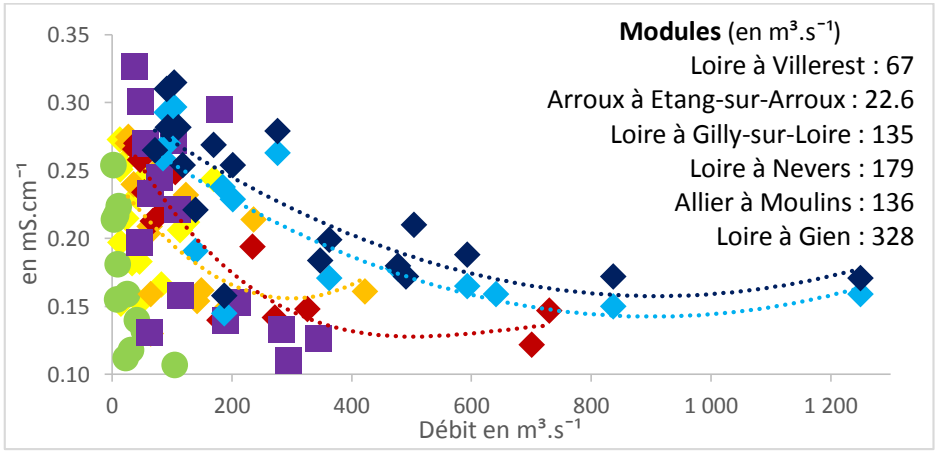
Différentes stations de jaugeage utilisées selon les sites de prélèvements :

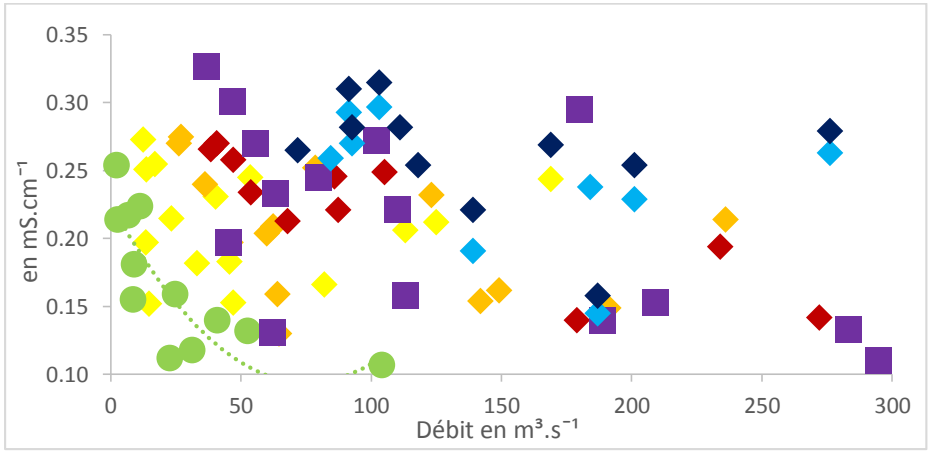
- *débits à Villerest pour les prélèvements dans la Loire à Vindecy,*

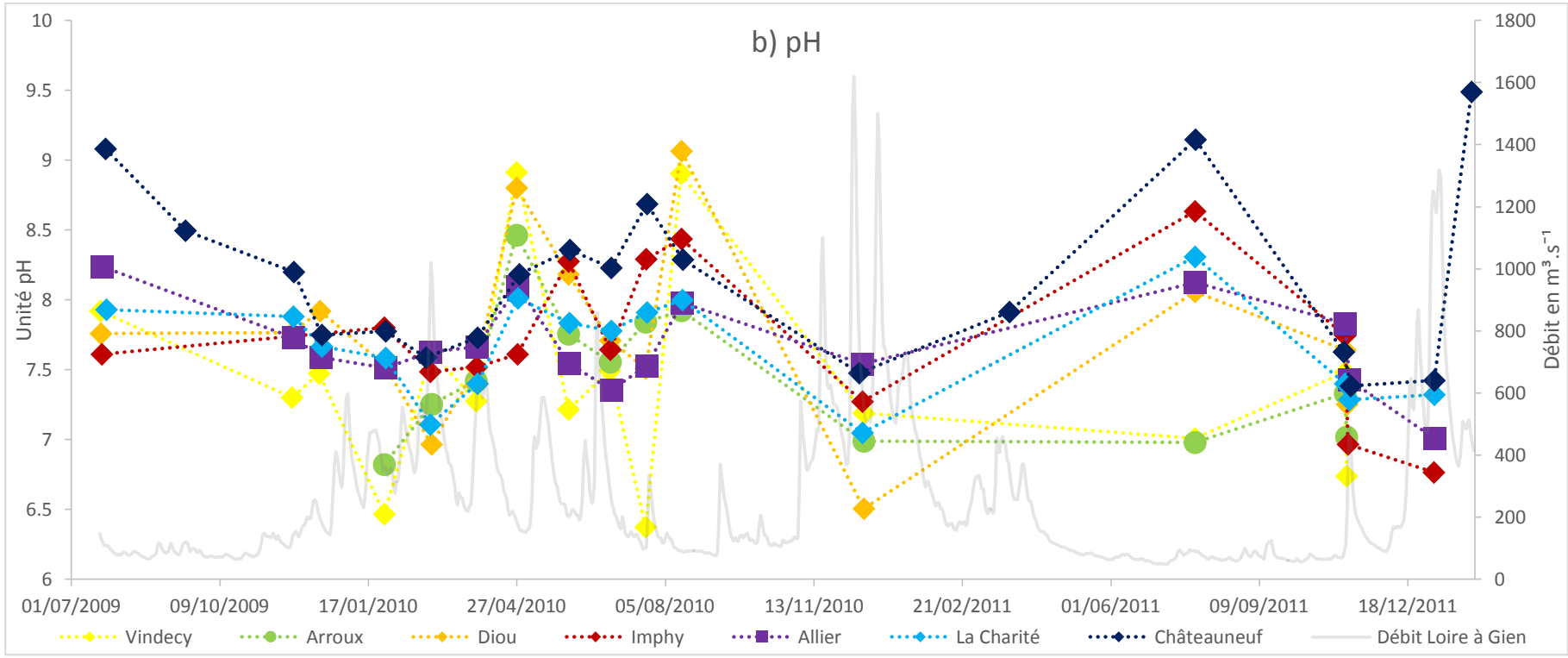
- *débits à Etang-sur-Arroux pour les prélèvements dans l'Arroux à Rigny-sur-Arroux,*
- *débits à Gilly-sur-Loire pour les prélèvements dans la Loire à Diou,*
- *débits à Nevers pour les prélèvements dans la Loire à Imphy,*
- *débits à Moulins pour les prélèvements dans l'Allier au Guétin,*
- *débits à Gien pour les prélèvements dans la Loire à La-Charité-sur-Loire et à Châteauneuf-sur-Loire.*

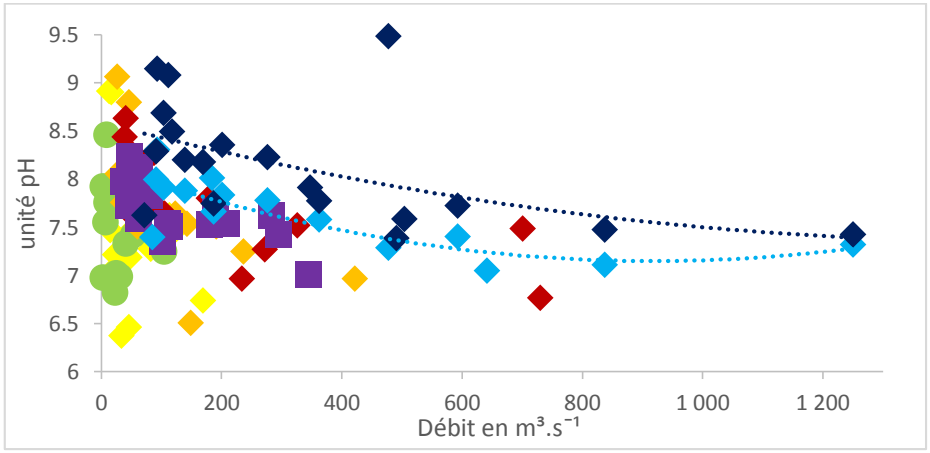
<u>Remarque</u> : les lignes pointillées qui relient les données d'un même site de prélèvements, dans les graphiques représentant l'évolution d'un élément en fonction du temps, ont été ajoutées pour faciliter la lecture. Ces lignes ne doivent en aucun cas faire penser que l'évolution du paramètre représenté est linéaire entre deux points de mesure, d'autant plus s'ils sont espacés de plusieurs mois.

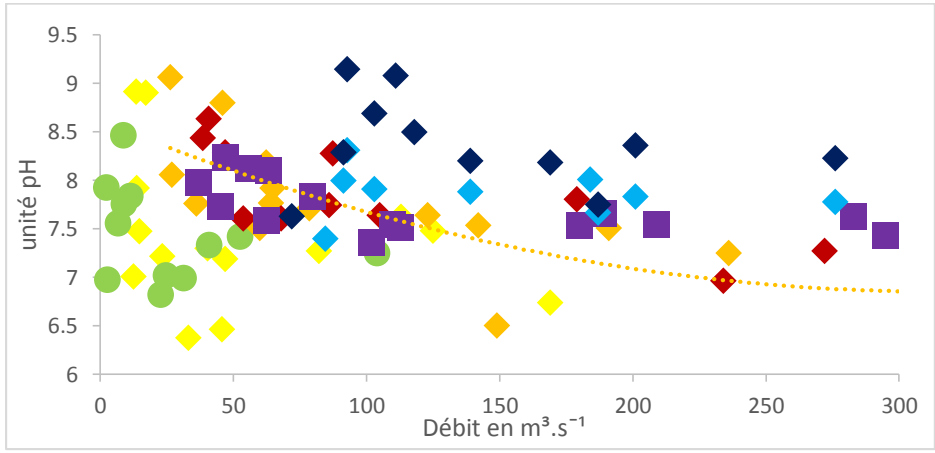

a) Conductivité électrique
CE en mS.cm⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

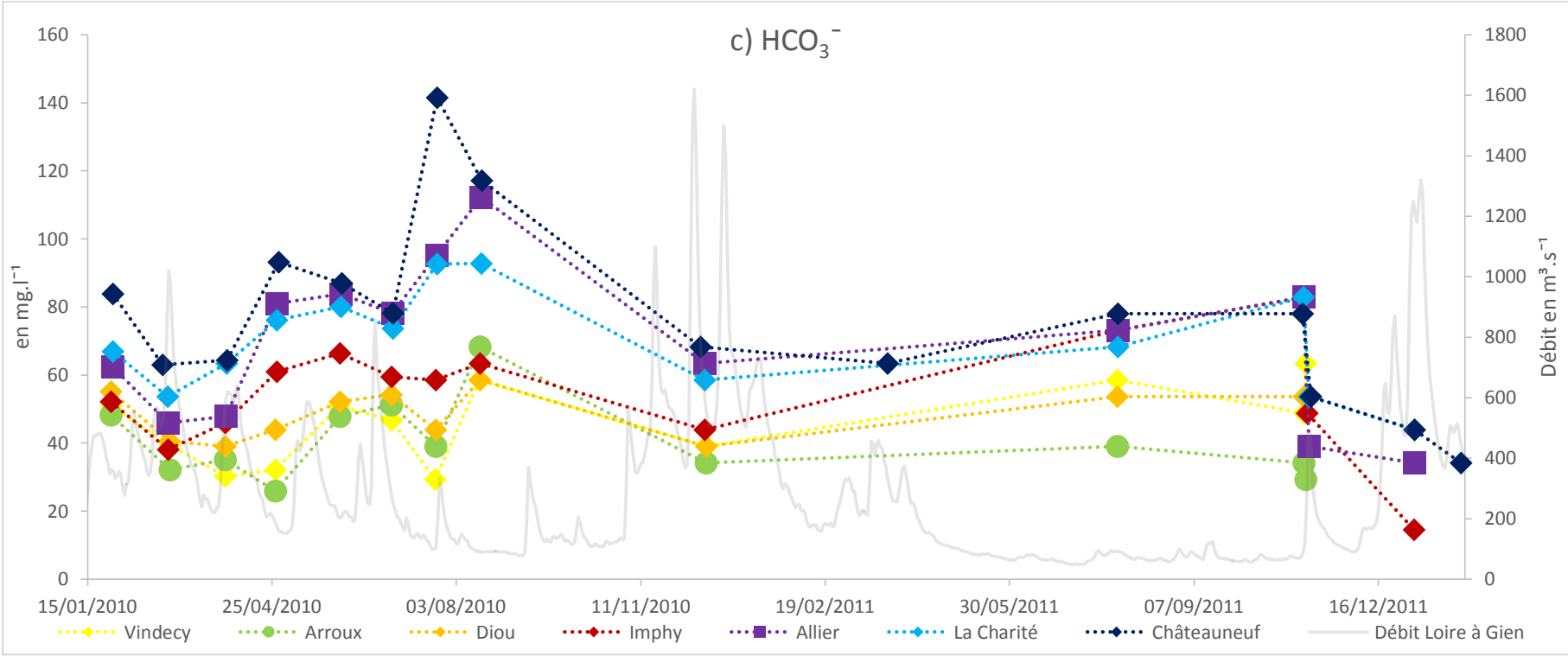

Modules (en m³.s⁻¹)
Loire à Villerest : 67
Arroux à Etang-sur-Arroux : 22.6
Loire à Gilly-sur-Loire : 135
Loire à Nevers : 179
Allier à Moulins : 136
Loire à Gien : 328
en mS.cm⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0
200
400
600
800
1 000
1 200

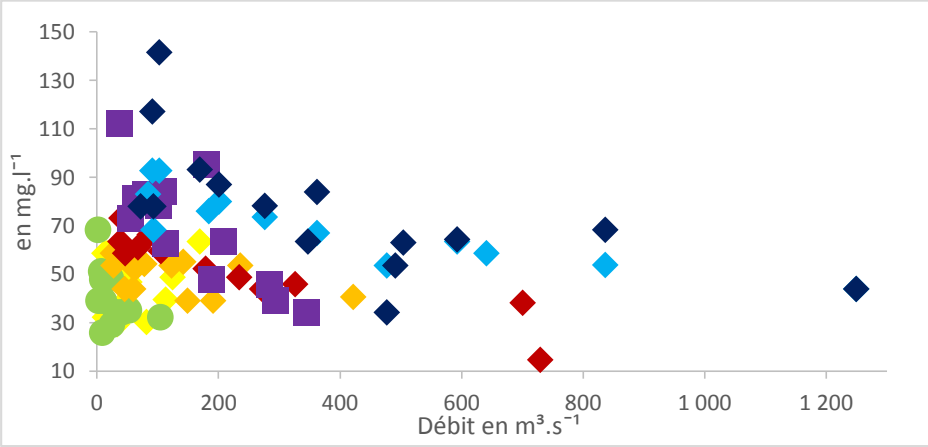

en mS.cm⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0
50
100
150
200
250
300

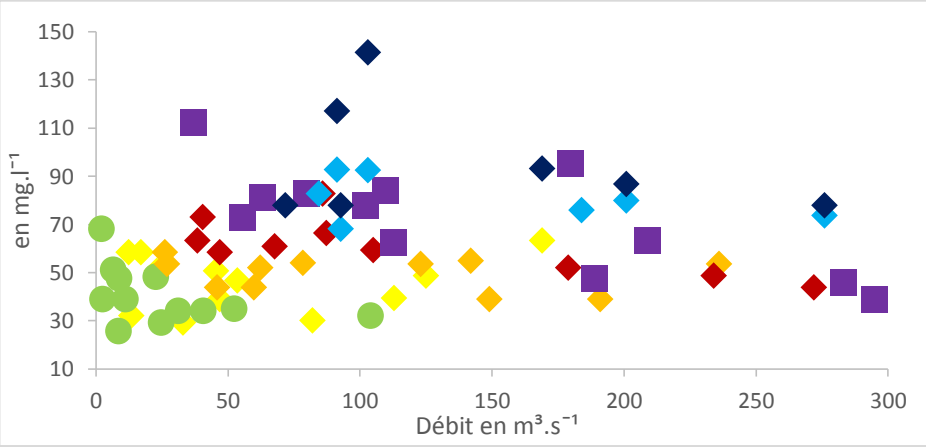

b) pH
Unité pH
Débit en m³.s⁻¹
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

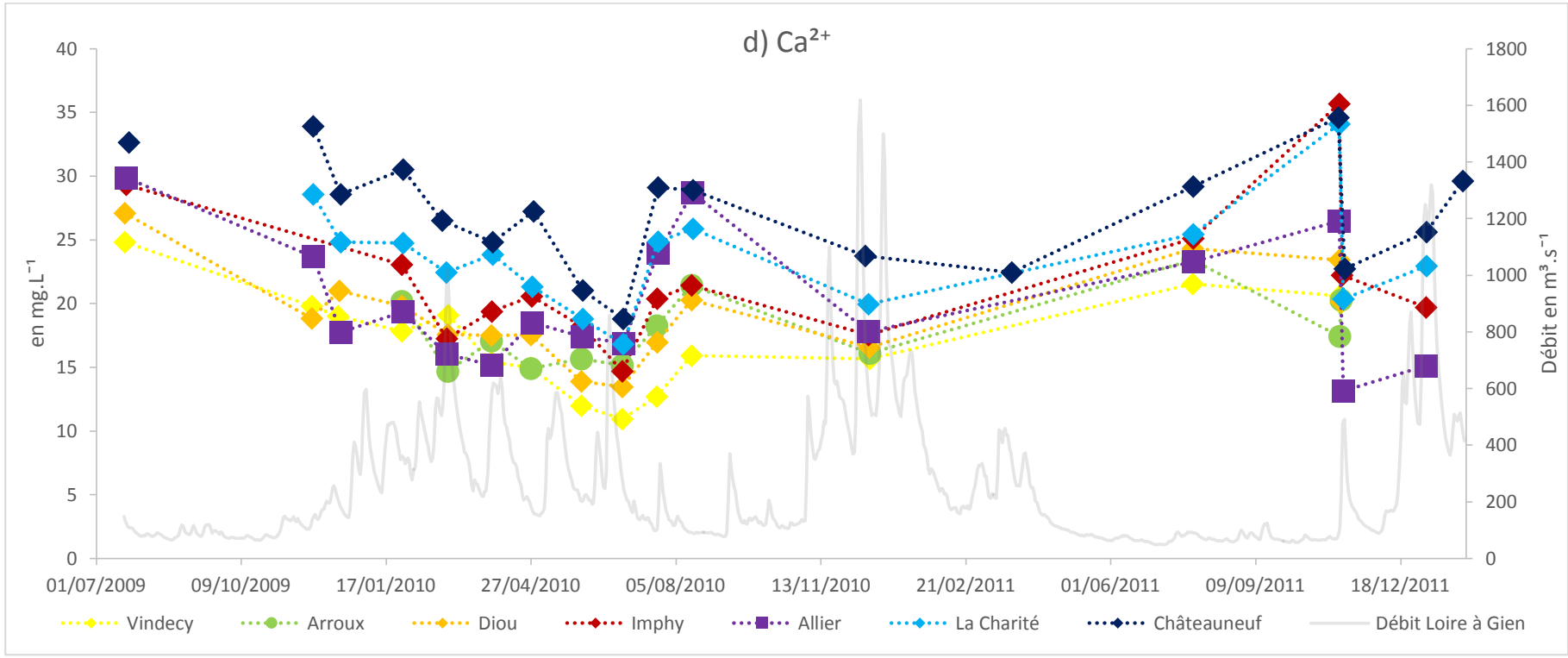

unité pH
Débit en m³.s⁻¹

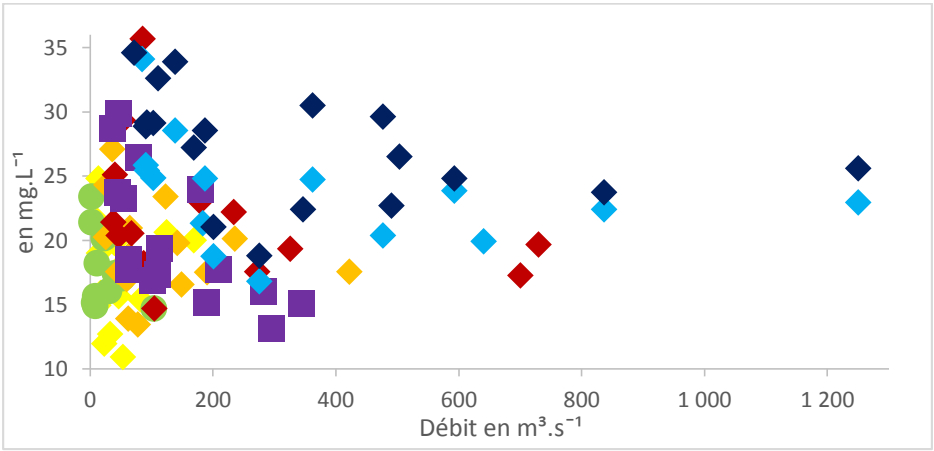

unité pH
Débit en m³.s⁻¹

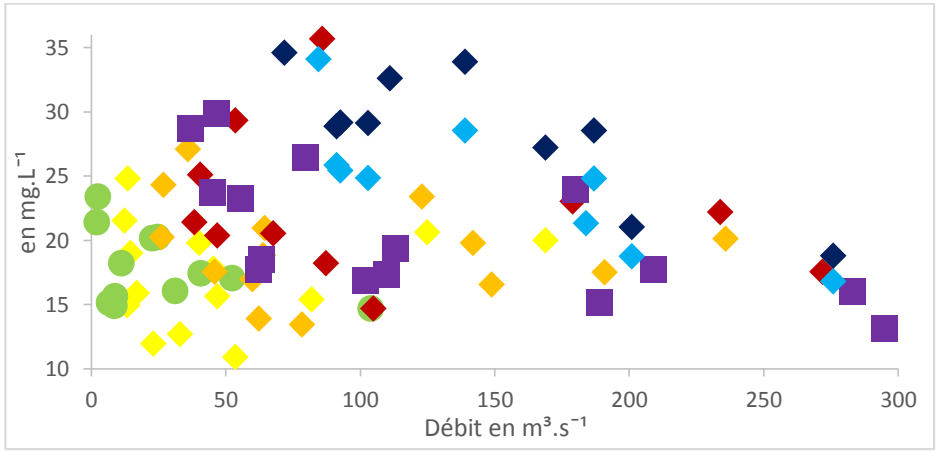

c) HCO3-
en mg.l-1
Débit en m³.s-1
15/01/2010
25/04/2010
03/08/2010
11/11/2010
19/02/2011
30/05/2011
07/09/2011
16/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

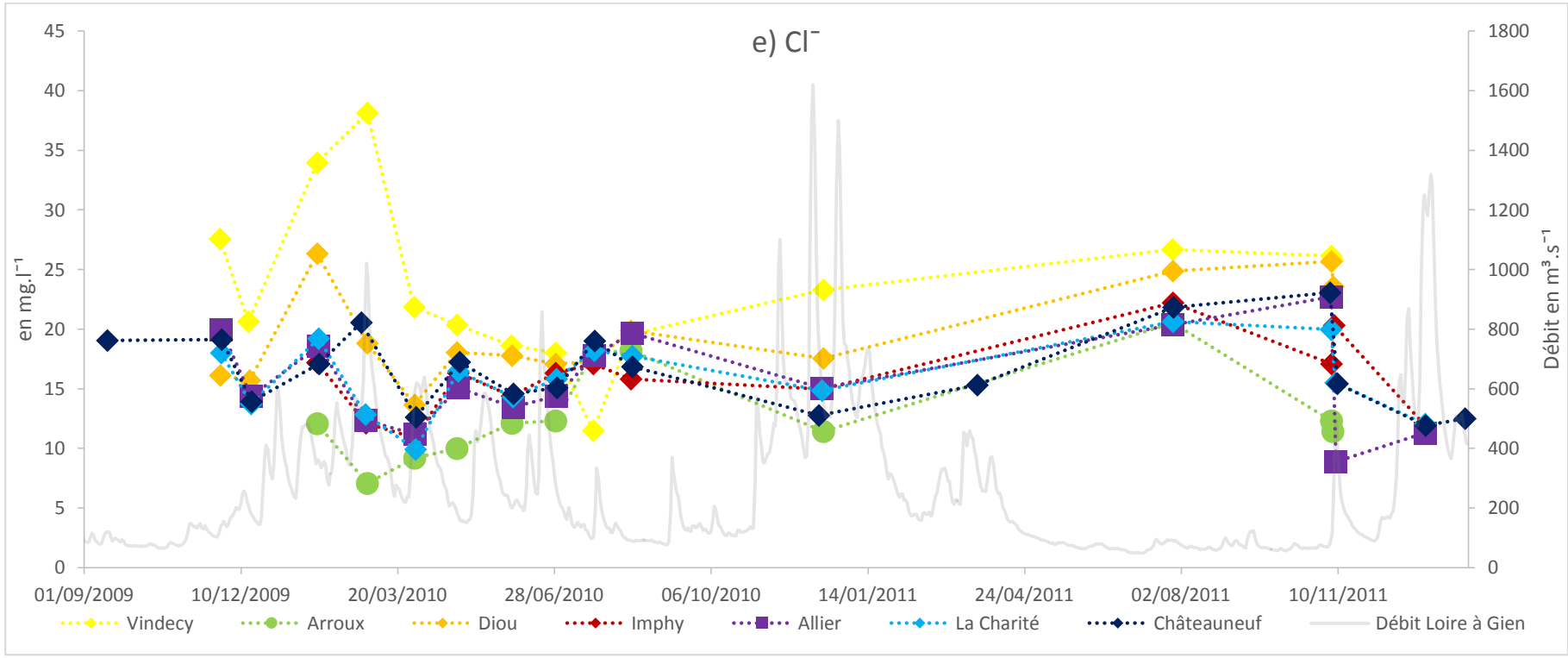

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

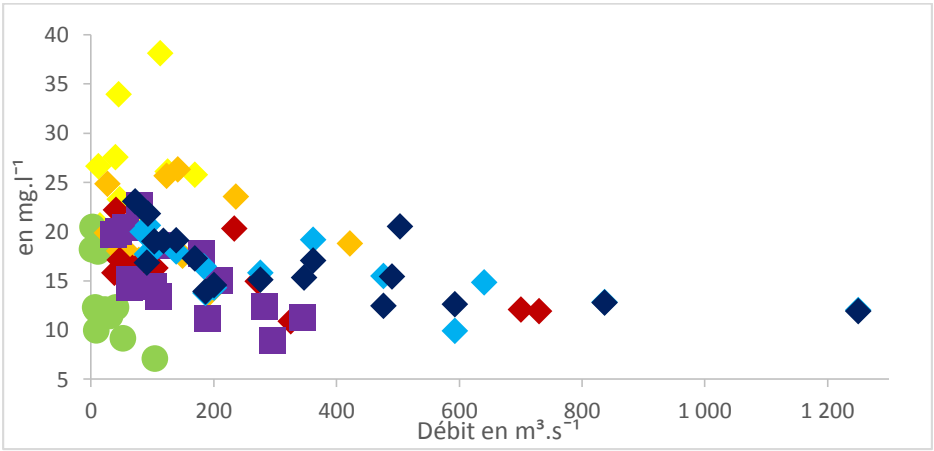

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

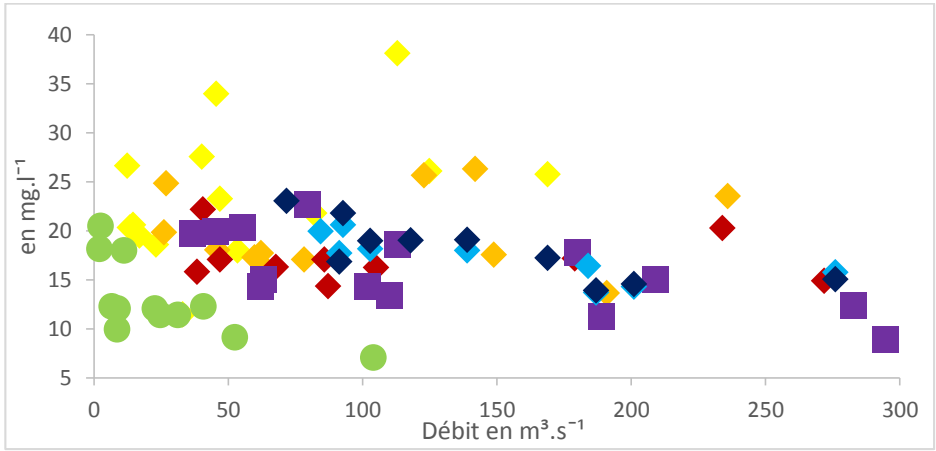

d) Ca²⁺
en mg.L⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

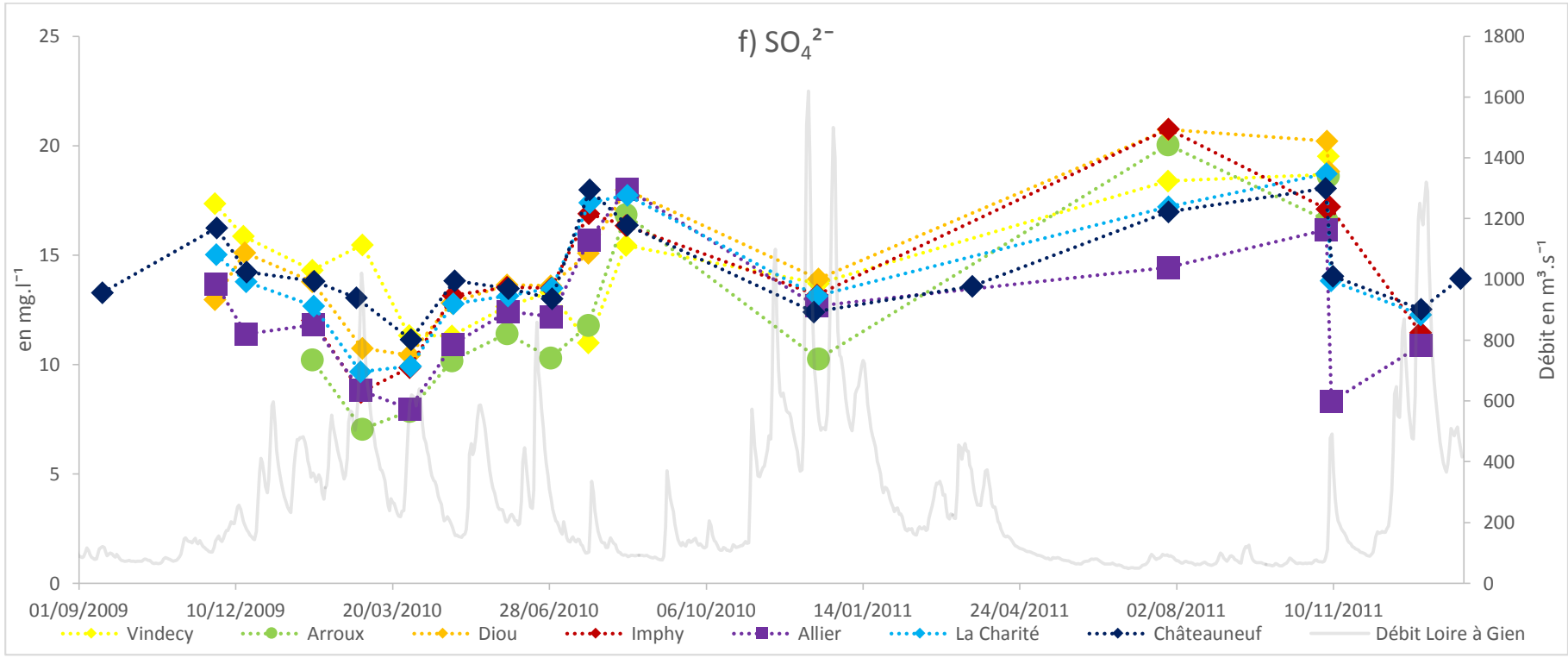

en mg.L⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

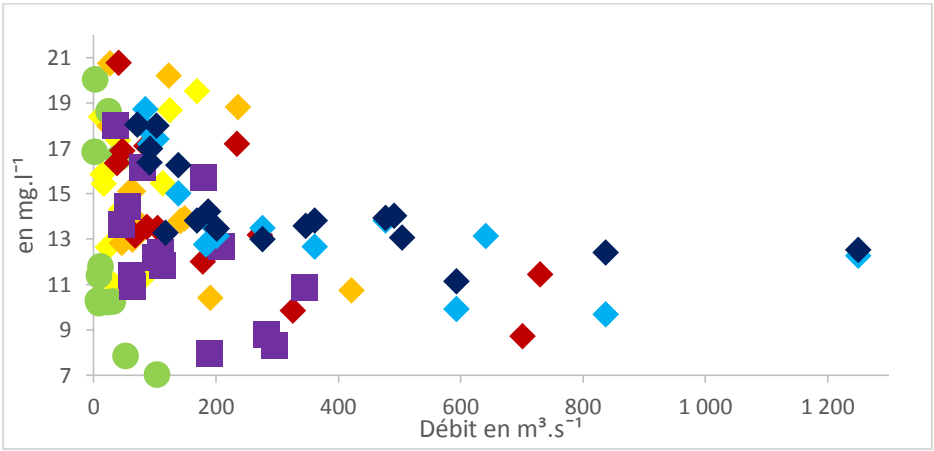

en mg.L⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

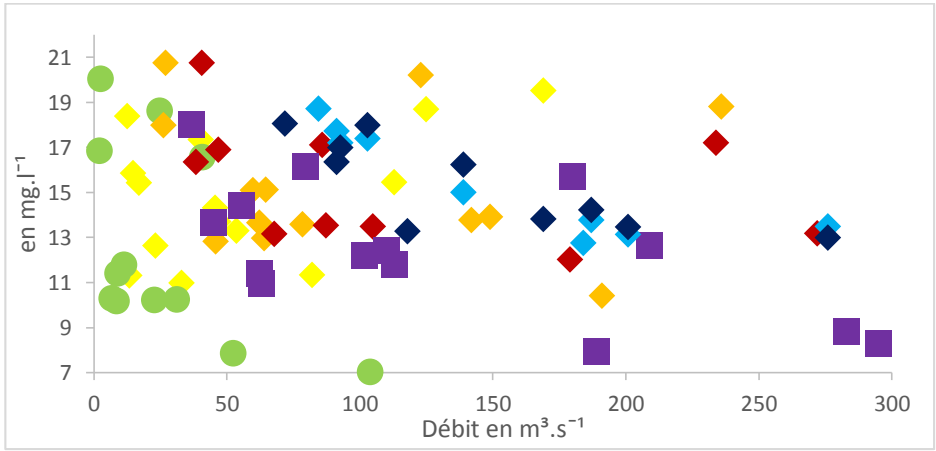

e) Cl⁻
en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

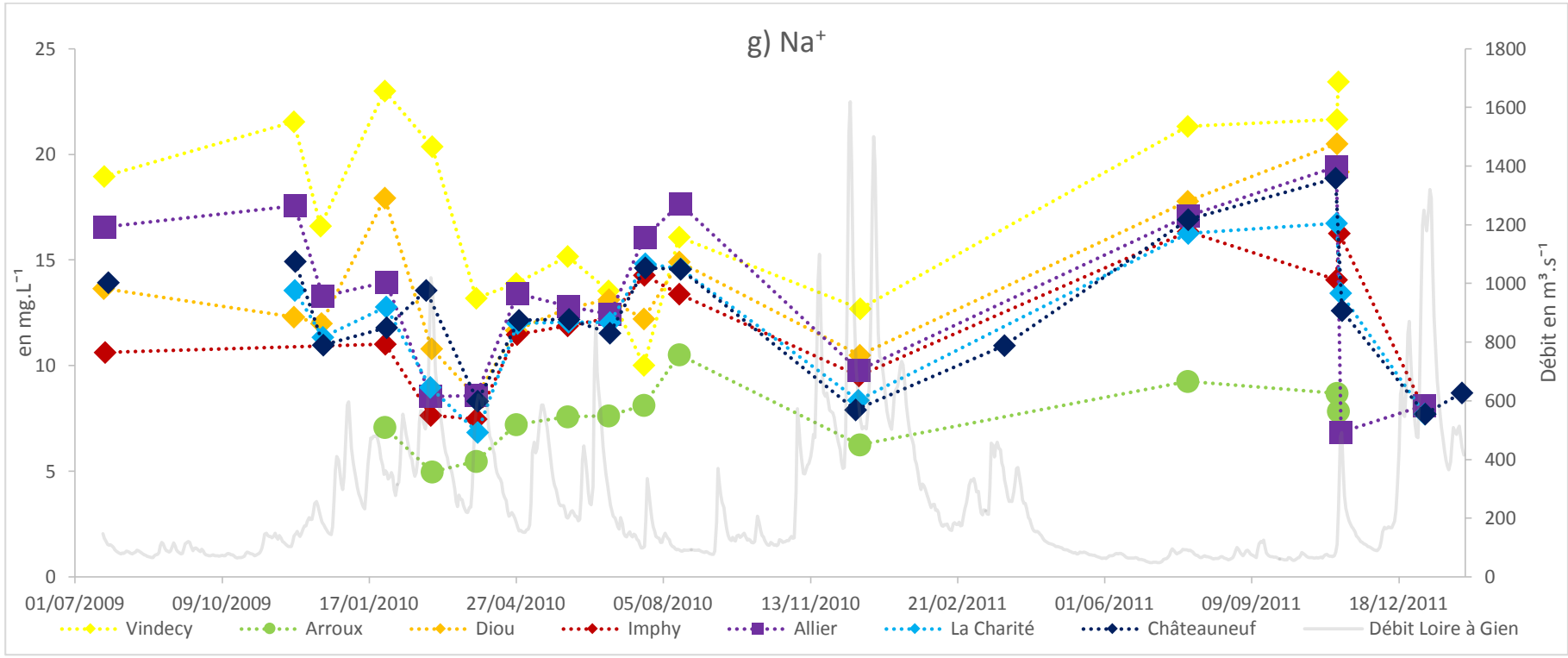

en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

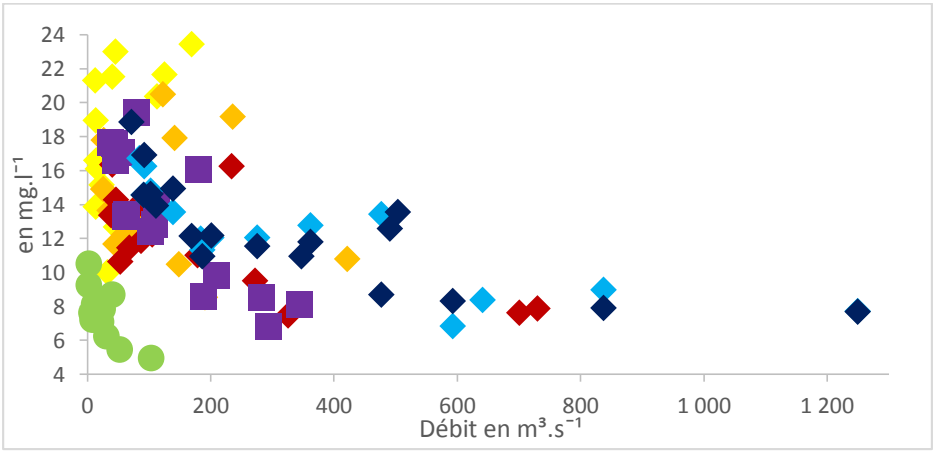

en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

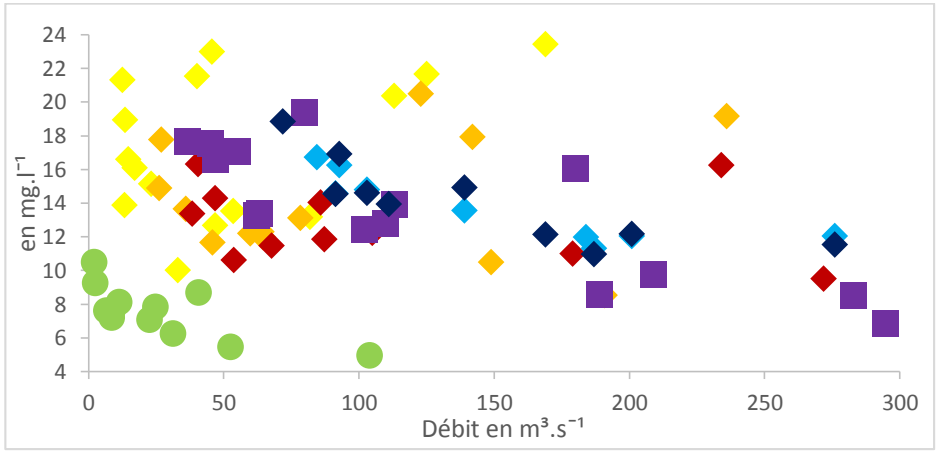

f) SO_4^{2-}
en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

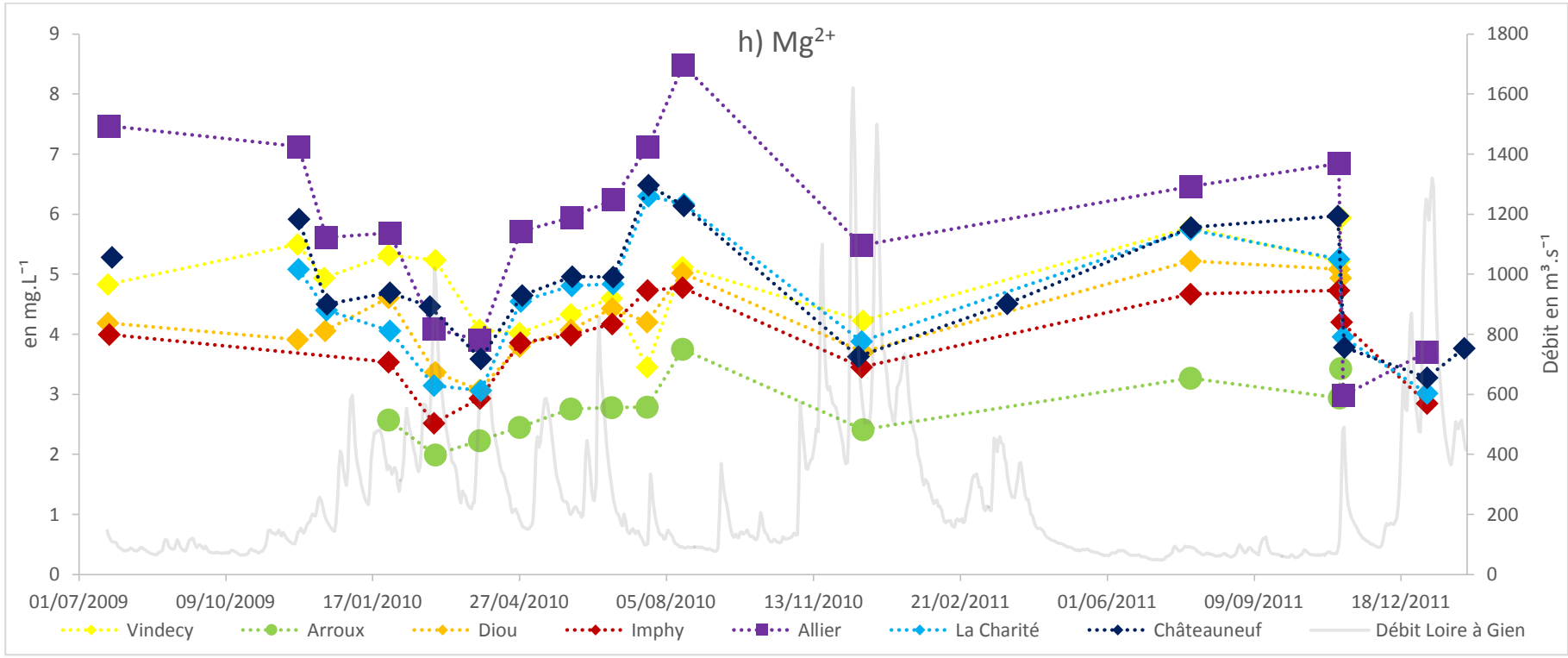

en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

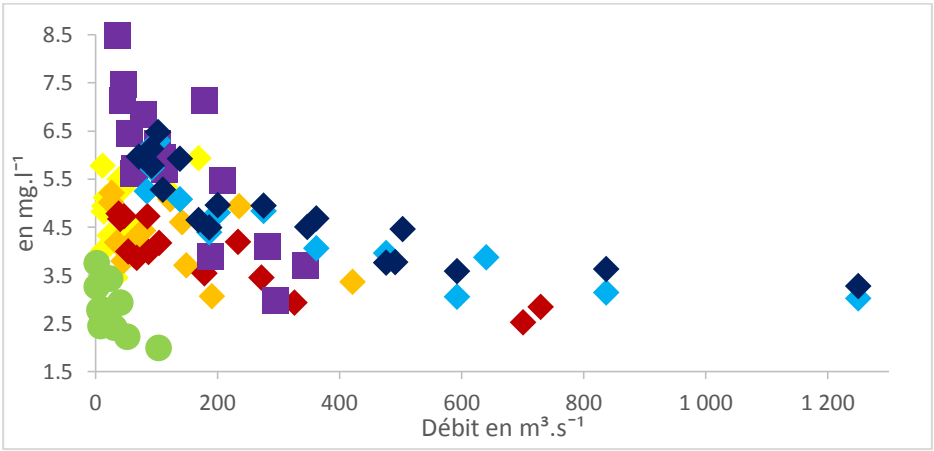

en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹

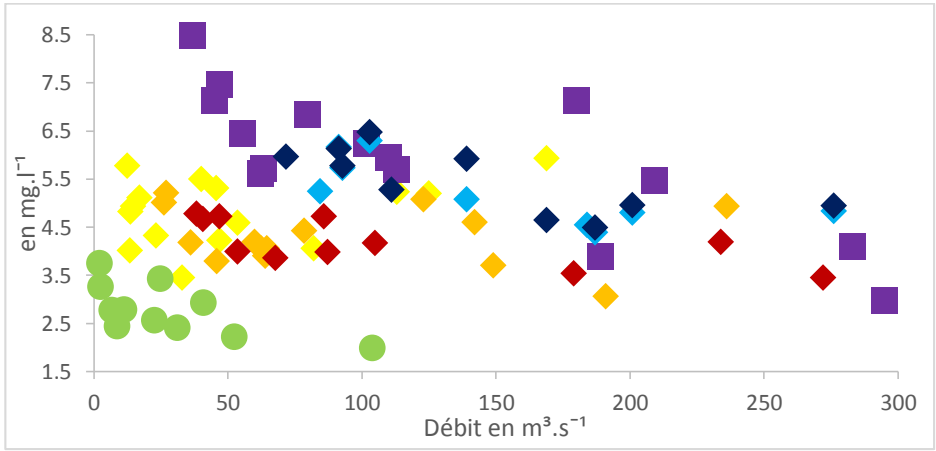

g) Na+
en mg.L-1
Débit en m³.s-1
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

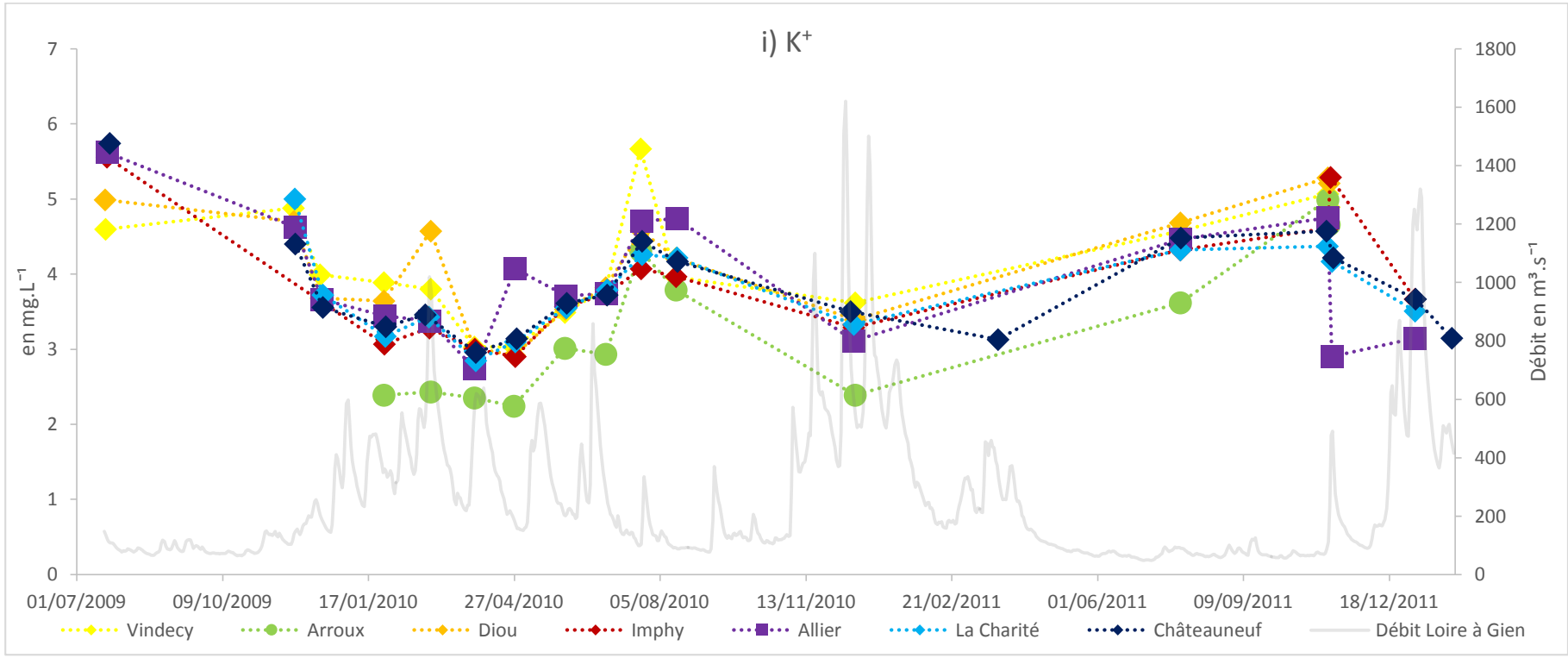

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

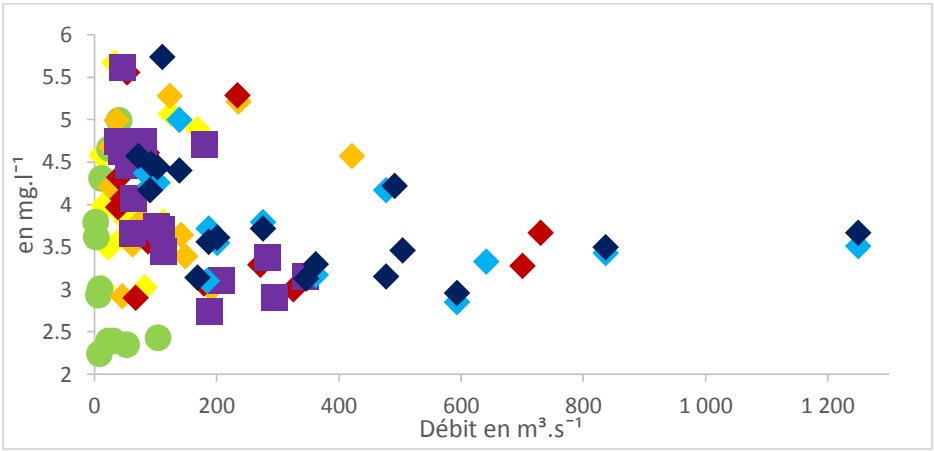

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

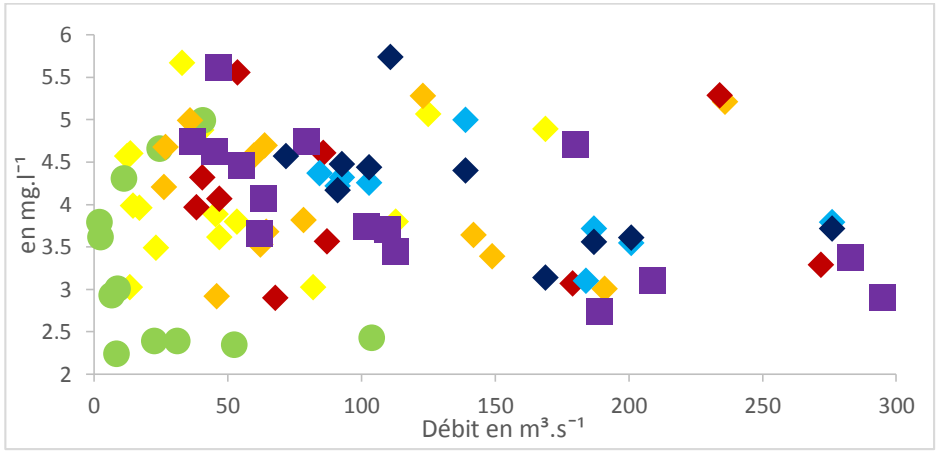

h) Mg2+
en mg.L-1
Débit en m³.s-1
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

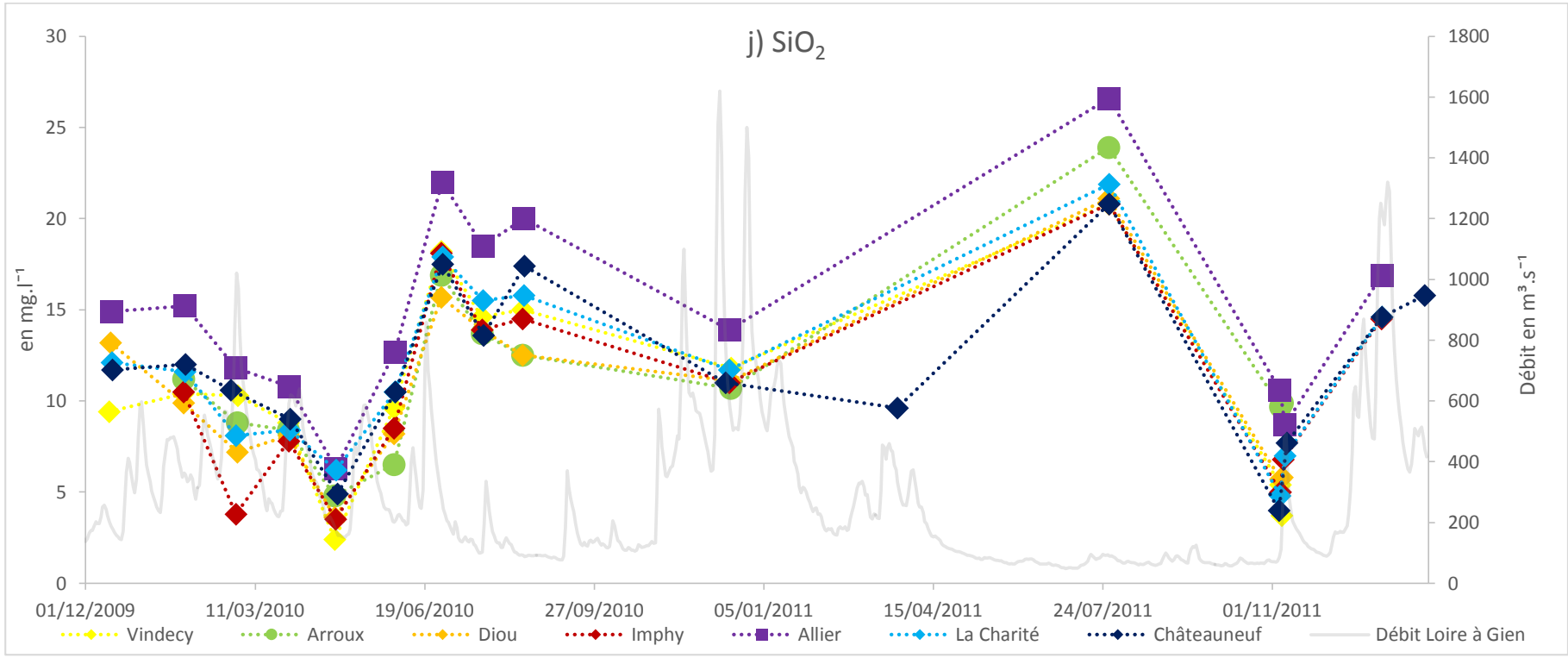

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

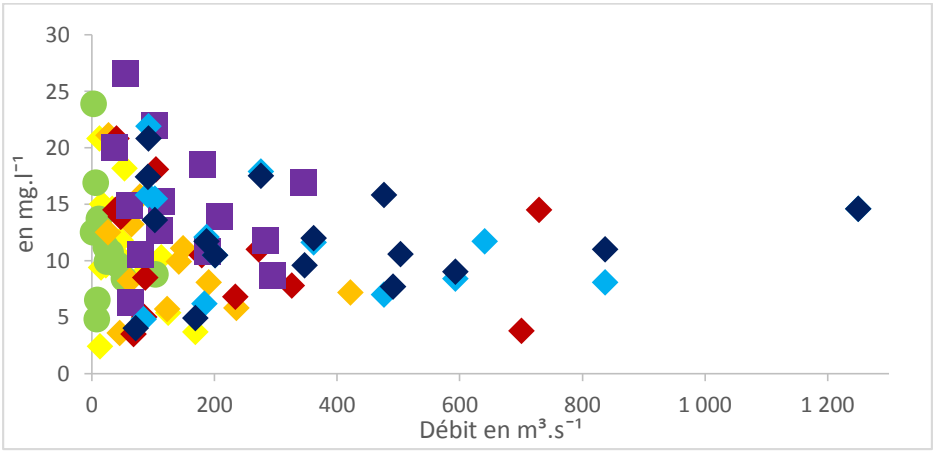

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

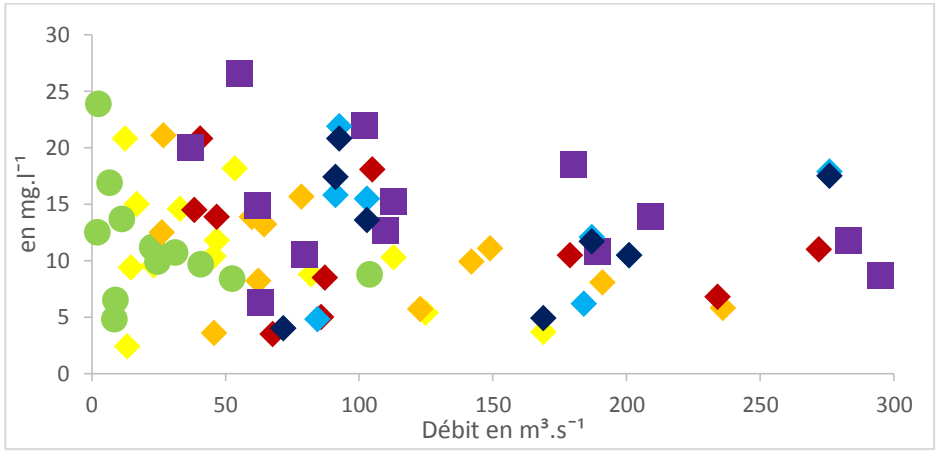

i) K+
en mg.L-1
Débit en m³.s-1
01/07/2009
09/10/2009
17/01/2010
27/04/2010
05/08/2010
13/11/2010
21/02/2011
01/06/2011
09/09/2011
18/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien

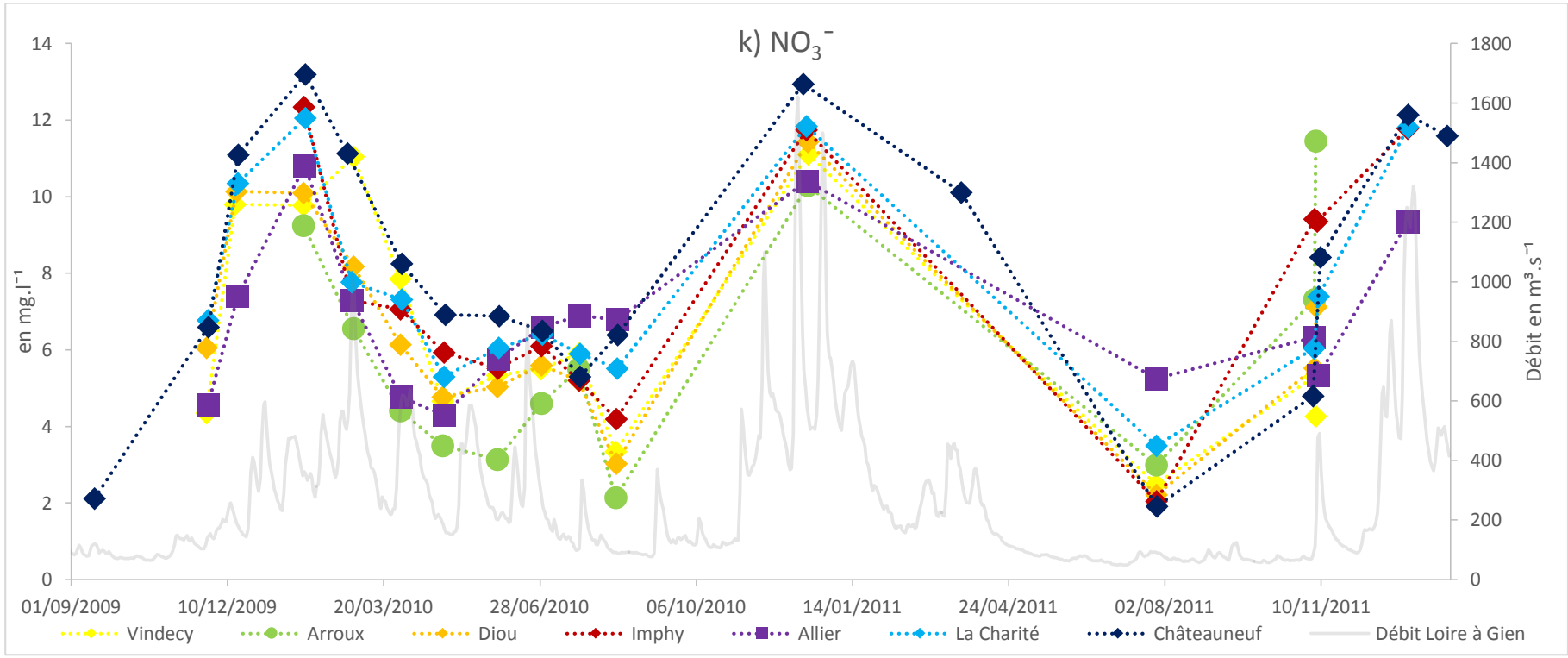

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

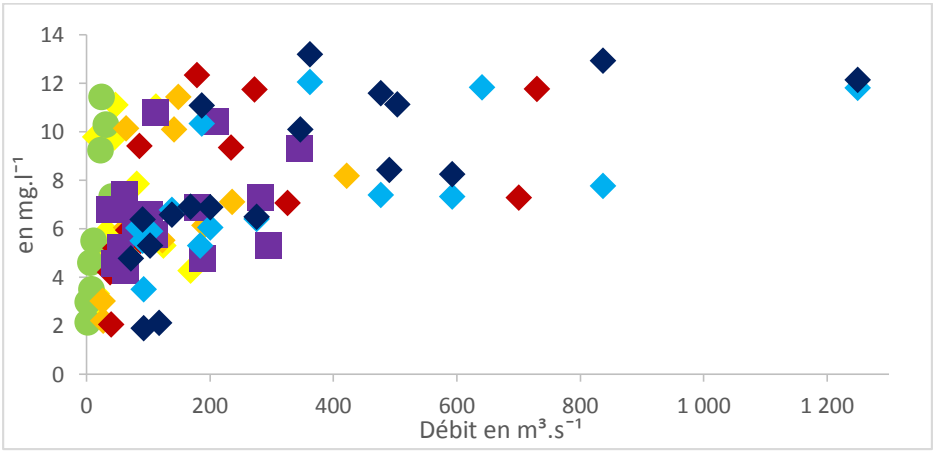

en mg.l-1
Débit en m³.s-1

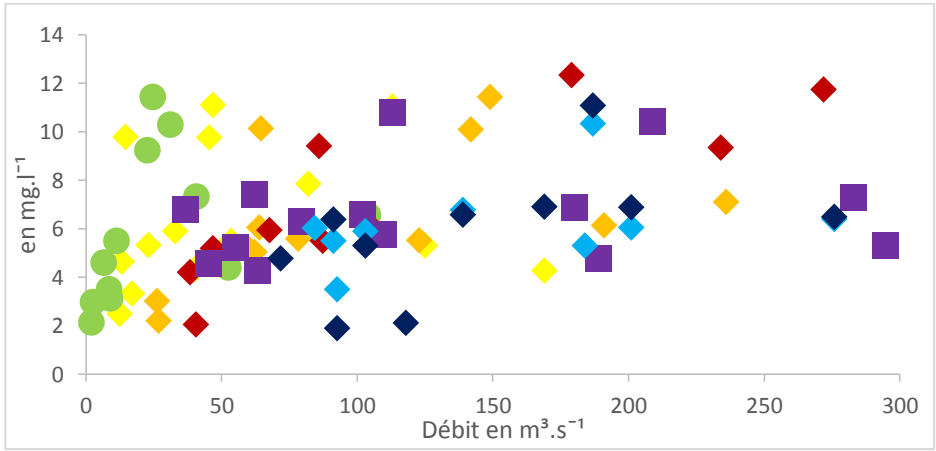

j) SiO2
en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
01/12/2009
11/03/2010
19/06/2010
27/09/2010
05/01/2011
15/04/2011
24/07/2011
01/11/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien


en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹


en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹


k) NO3-
en mg.l-1
Débit en m³.s-1
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien


en mg.l-1
Débit en m³.s-1


en mg.l-1
Débit en m³.s-1

La conductivité électrique (fig. 117a)

Comme déjà rappelé, la conductivité électrique d'une eau reflète sa minéralisation ionique totale. Elle est fortement liée à la géologie du bassin et donc à la réactivité des minéraux composant le substratum géologique des cours d'eau, mais également aux débits et à certaines sources anthropiques.

La conductivité électrique connaît donc des variations saisonières importantes (fig. 117a). Ces variations sont observables dans l'ensemble du bassin. Des maxima hivernaux de débit, où la conductivité atteint ses valeurs minimales, jusqu'au milieu de l'étiage, où elle atteint ses valeurs maximales, la conductivité augmente régulièrement, bien qu'avec quelques irrégularités (par exemple, cf les données mensuelles du 1er semestre 2010).

Ce pic de la conductivité électrique pendant l'étiage ne survient pas à sa fin. Au contraire, il semble qu'après qu'un seuil maximum soit atteint, elle diminue, même si les débits restent faibles par la suite (cf les données de l'automne 2009). Les premiers pics de débit au-dessus du module, en fin d'étiage, font chuter la conductivité jusqu'à un seuil bas, autour duquel elle varie peu même si les débits augmentent encore.

Ainsi, dans les graphiques représentant la conductivité en fonction du débit, les courbes de tendance polynomiale pour différents sites de prélèvements ont toutes une forme en arc de cercle. Pour prendre l'exemple des eaux de l'Allier au Guétin, la conductivité électrique, pour un même débit, relativement faible, 63 $m^3.s^{-1}$, peut avoir des valeurs très différentes : 131 $\mu S.cm^{-1}$ (décembre 2009, situation de fin d'étiage) et 233 $\mu S.cm^{-1}$ (fin avril 2010) ; ou encore pour un débit de 45 $m^3.s^{-1}$, 197 et 301 $\mu S.cm^{-1}$. Par contre, au-delà d'un seuil de débit, qui semblerait approcher du module pour chacun des sites de prélèvements, la conductivité varie peu. Ainsi, pour les eaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire, au-delà de 350 $m^3.s^{-1}$ (module de la Loire à Gien : 328 $m^3.s^{-1}$), la conductivité électrique ne varie qu'entre 171 et 220 $\mu S.cm^{-1}$. Ce seuil de débit, que représenterait le module, fonctionne globalement pour tous les sites, mais paraît un peu approximatif, en particulier à Imphy.

Pour expliquer ces variations, au moment de la fin d'étiage, il faut invoquer les parts de mélange qui constituent les débits, entre les apports de nappes (fortement minéralisés) et

les précipitations (faiblement minéralisées) qui changent, et souvent de façon brusque, ce qui entraîne la baisse de la conductivité électrique.

Pendant les hautes eaux, le lessivage des sols et plus largement des formations superficielles par les précipitations d'hiver, puis les apports croissants par des nappes alluviales quand le débit baisse, font progressivement augmenter la minéralisation des eaux de surface. Cette hausse moyenne de la conductivité connaît néanmoins des variations qui sont étroitement liées aux débits et plus particulièrement à l'occurrence de crues.

A l'étiage, les apports de nappes, plus importants, et la forte diminution des précipitations efficaces sont responsables des maxima de conductivité électrique. Mais, survient, pendant cette même situation hydrologique, une baisse de la conductivité, durant l'étiage, expliquée par la précipitation estivale de calcite, liée aux équilibres calco-carboniques (Moatar et al., 2009 ; Grosbois, 1998 : Manickam et al., 1985).

Le pH (fig. 117b)

Le pH des eaux de surface continentales rend compte de nombreux processus biologiques, physiques et géochimiques comme l'équilbre avec le CO_2 atmosphérique ou le CO_2 biogénique (sol), la photosynthèse, la respiration des végétaux, la dégradation de la matière organique, le substrat, des pollutions et l'hydrolyse des minéraux composants les roches encaissantes (Moatar et al., 1999). Les inter-relations entre ces différents processus et leurs impacts sur le pH sont complexes et difficilement expliqués.

Une chronique continue du pH en Loire moyenne, réunissant plus de 15 ans de données (Moatar et al., 2009), a démontré l'importance des variations cycliques de 24h, entre les mois de mars et octobre, (caractéristiques des milieux aquatiques très eutrophes) et des variations interranuelles (liées à la variabilité interannuelle des débits de la Loire et de la distribution de l'ensoleillement) du pH en Loire moyenne en comparaison de ses variations saisonières.

Les données collectées dans le cadre de cette thèse ne peuvent prendre en compte ces deux biais. En ce qui concerne la variabilité saisonière, au vu des résultats obtenus sur des chroniques de données longues et continues (fig. 118 ; Moatar et al., 2009), on ne retrouve

dans les données de pH présentées ici qu'une partie du cycle des variations saisonnières (fig. 117b) :

- la baisse du pH au deuxième semestre (par exemple, cf le 2ème semestre 2009),

- l'augmentation progressive du pH durant le 1er semestre de l'année 2010 est, certes détectable, mais en partie masquée par la variabilité interannuelle.

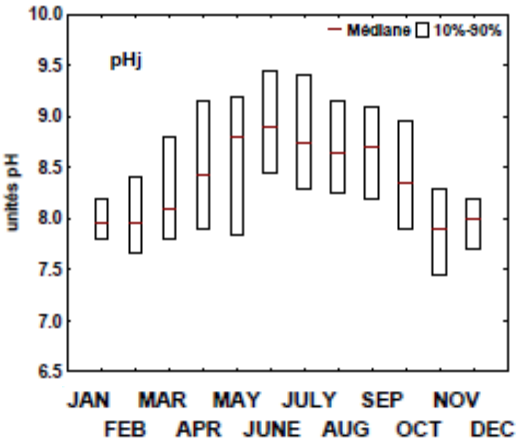


Fig. 118. *Saisonnalité des moyennes journalières de pH (1990-2005) de la Loire à Avoine (entre Tours et Angers). Source : Moatar et al., 2009.*

Cependant, l'influence du débit sur le pH est visible. La variabilité du pH, pour les plus faibles débits, est importante et se réduit avec l'augmentation du débit. En effet, pour les débits au-delà d'un seuil différent selon le site de prélèvement (débit seuil qui semble à nouveau avoisiner les valeurs du module), le pH se stabilise autour de valeurs minimales.

L'exemple de l'augmentation brusque des débits de début novembre 2011, qui marque également la fin de l'étiage, illustre bien cette baisse du pH avec l'augmentation du débit. Dans la Loire, à Vindecy et à Imphy, le pH baisse respectivement de 0,8 unités pH en 24 heures et de 0,7 unités en 48 heures. Dans l'Allier, au Guétin, le pH connaît une baisse de 0,4 unités pH en trois jours. La variabilité inter-sites est notable ici.

En effet, la variabilité du pH semble, en général, plus importante dans les eaux de la Loire à Vindecy (6,4<pH<8,9) et à Diou (6,5<pH<9,1), comparée à la variabilité des mesures effectuées au Guétin dans l'Allier (7<pH<8,2) ou dans la Loire à La-Charité-sur Loire (7,1<pH<8,3). Le pH varie donc dans une gamme de valeurs deux fois plus étendue à Vindecy et Diou (étendue statistique = 2,6 unités pH) qu'au Guétin ou à la Charité (étendue statistique

= 1,2 unités pH), alors que les prélèvements d'eau au niveau des différents sites ont été effectués avec la même variabilité horaire.

Ces variations d'extension de la gamme de valeurs du pH pourraient être contrôlées par les différents substrats. En effet, les temps de réactions sont plus rapides en milieu carbonaté que dans les milieux cristallins du Massif Central, c'est-à-dire que le pH est plus vite équilibré avec la calcite qu'avec d'autres minéraux.

La majorité des éléments chimiques présents dans les eaux provient, dans des proportions variables, des apports atmosphériques et de l'altération des roches (Meybeck, 1986). La plupart d'entre eux est également impactée par les activités agricoles et les rejets d'eau urbaine (Négrel, 1997).

Les ions HCO_3^- (fig. 117c)

Les ions HCO_3^- ne présentent pas un comportement homogène au sein de la zone d'étude (fig. 117c), dans le sens où il est difficile de définir des tendances dans l'évolution des concentrations.

Globalement, pendant l'étiage, les concentrations des ions bicarbonates commencent par augmenter puis se stabilisent (précipitation estivale de la calcite). Au début des hautes eaux, elles diminuent. Puis de la fin des hautes eaux jusqu'à l'étiage, elles présentent de faibles variations sans tendance particulière.

Pour affiner cette analyse, il faut diviser les sites de prélèvements en deux groupes.

- D'une part, les stations en amont du Bec d'Allier, de Vindecy à Imphy sur la Loire ainsi que l'Arroux, présentent globalement de faibles variations des concentrations en ions HCO_3^- : entre 30 et 60 $mg.l^{-1}$ à Vindecy, 40 et 60 $mg.l^{-1}$ dans l'Arroux, 30 et 70 $mg.l^{-1}$ à Diou et entre 15 et 85 $mg.l^{-1}$ à Imphy.
- D'autre part, dans les eaux de l'Allier au Guétin et en Loire moyenne, l'amplitude des variations de concentration est plus importante : pour l'Allier entre 35 et 110 $mg.l^{-1}$, pour la Loire, à La Charité entre 40 et 95 $mg.l^{-1}$ et à Châteauneuf entre 35 et 140 $mg.l^{-1}$.

Plus que deux groupes aux caractéristiques chimiques distincts, il s'agit d'un gradient amont-aval, le long duquel l'amplitude des variations de concentrations augmente. Cependant, il existe un saut quantitatif et qualitatif entre les deux groupes dans le sens où, dans le groupe de la Loire amont, il est difficile de définir des tendances, alors que pour le groupe Allier-Loire moyenne, elles sont plus marquées.

En effet, dans les relations entre les bicarbonates et le débit, en Loire amont, on observe l'effet d'un débit seuil (30 $m^3.s^{-1}$ pour l'Arroux, 50 $m^3.s^{-1}$ pour la Loire à Vindecy et 100 $m^3.s^{-1}$ à Imphy). Pour les débits inférieurs à ce seuil, aucune organisation des données n'apparaît, bien que les concentrations des ions HCO_3^- varient sur l'ensemble de leur gamme de valeurs, différentes pour chaque site. Au-delà de ce débit seuil, les concentrations des bicarbonates varient peu ou augmentent faiblement avec l'augmentation du débit (cf Loire à Vindecy).

A l'aval, cet effet de seuil de débit existe également. Dans les eaux de l'Allier au Guétin, pour les débits inférieurs à 300 $m^3.s^{-1}$, les concentrations baissent quand les débits augmentent. Au-delà du débit seuil, les concentrations atteignent un minimum et varient peu. En Loire moyenne, pour les débits inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$, aucune tendance ne se dessine, mais au-delà, les concentrations en HCO_3^- augmentent avec les débits.

Les ions Ca^{2+} (fig. 117d)

A l'inverse, le comportement du calcium est assez homogène à l'échelle de la zone d'étude (fig. 117d). Ses variations saisonnières sont franches.

Du début des hautes eaux hivernales jusqu'au début de l'étiage suivant, les concentrations de calcium baissent. Dans une première partie de l'étiage, la concentration remonte pour baisser à nouveau, comme indiqué par la conductivité électrique.

En ce qui concerne l'évolution des concentrations de calcium en fonction du débit, pour la gamme la plus faible des débits, le calcium a tendance à décroître avec l'augmentation du débit (effet de dilution par des eaux de pluie de transfert rapide), jusqu'à un seuil de débit différent pour chaque site de prélèvements.

On peut noter que pour les eaux de la Loire à Diou et pour celles de l'Arroux à Rigny-sur-Arroux, on n'observe pas de tendance franche concernant ces concentrations de calcium pour les plus faibles débits. Cependant, il existe bien un seuil de débit à partir duquel une

autre logique apparaît. En effet, au-delà de ce seuil de débit, la concentration de calcium atteint un minimum et stagne.

Pour l'ensemble des sites de prélèvements, lorsque les débits augmentent, la concentration du calcium ne varie que de 2 à 5 $mg.l^{-1}$ autour de ce minimum, ce qui est négligeable. Le seuil de débit, qui sépare une tendance à la baisse du calcium, de faibles variations autour d'un minimum de concentration, est pour les différents sites de prélèvements : 50 $m^3.s^{-1}$ pour la Loire à Vindecy, 25 $m^3.s^{-1}$ pour l'Arroux à Rigny-sur-Arroux, 100 $m^3.s^{-1}$ et 275 $m^3.s^{-1}$ pour la Loire respectivement à Diou et à Imphy, et enfin 300 $m^3.s^{-1}$ pour l'Allier au Guétin et la Loire moyenne. Les minima de concentrations de calcium, pour les débits les plus forts, sont dans la même gamme : 16 $mg.l^{-1}$ pour l'Arroux, 17 $mg.l^{-1}$ pour la Loire à Vindecy, 15 $mg.l^{-1}$ pour l'Allier au Guétin et entre 20 et 25 $mg.l^{-1}$ en Loire moyenne.

Phénomènes de dissolution et de précipitation de la calcite

L'indice de saturation de la calcite (logiciel Diagramme, fig.119) montre que, globalement, les eaux de la Loire et de ses affluents, en amont de La-Charité-sur-Loire sont soit sous-saturées vis-à-vis de la calcite, soit à l'équilibre ($IS \sim 0$).

En Loire moyenne, à Châteauneuf-sur-Loire, le signal est plus complexe. Pour des débits de plus de 300 $m^3.s^{-1}$ à Gien, les eaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire sont sous-saturées ($IS<0$), montrant des eaux peu évoluées. Pour les débits inférieurs à 300 $m^3.s^{-1}$, elles sont globalement à l'équilibre, excepté en période d'étiage, où elles sont sur-saturées vis-à-vis de la calcite.

De plus, par sites de prélèvements, comme déjà indiqué, les ions Ca^{2+} et HCO_3^- ne sont pas corrélés (fig. 120). Néanmoins, cette dernière figure montre une organisation amont/aval et haute-eaux/basses-eaux assez marquée.

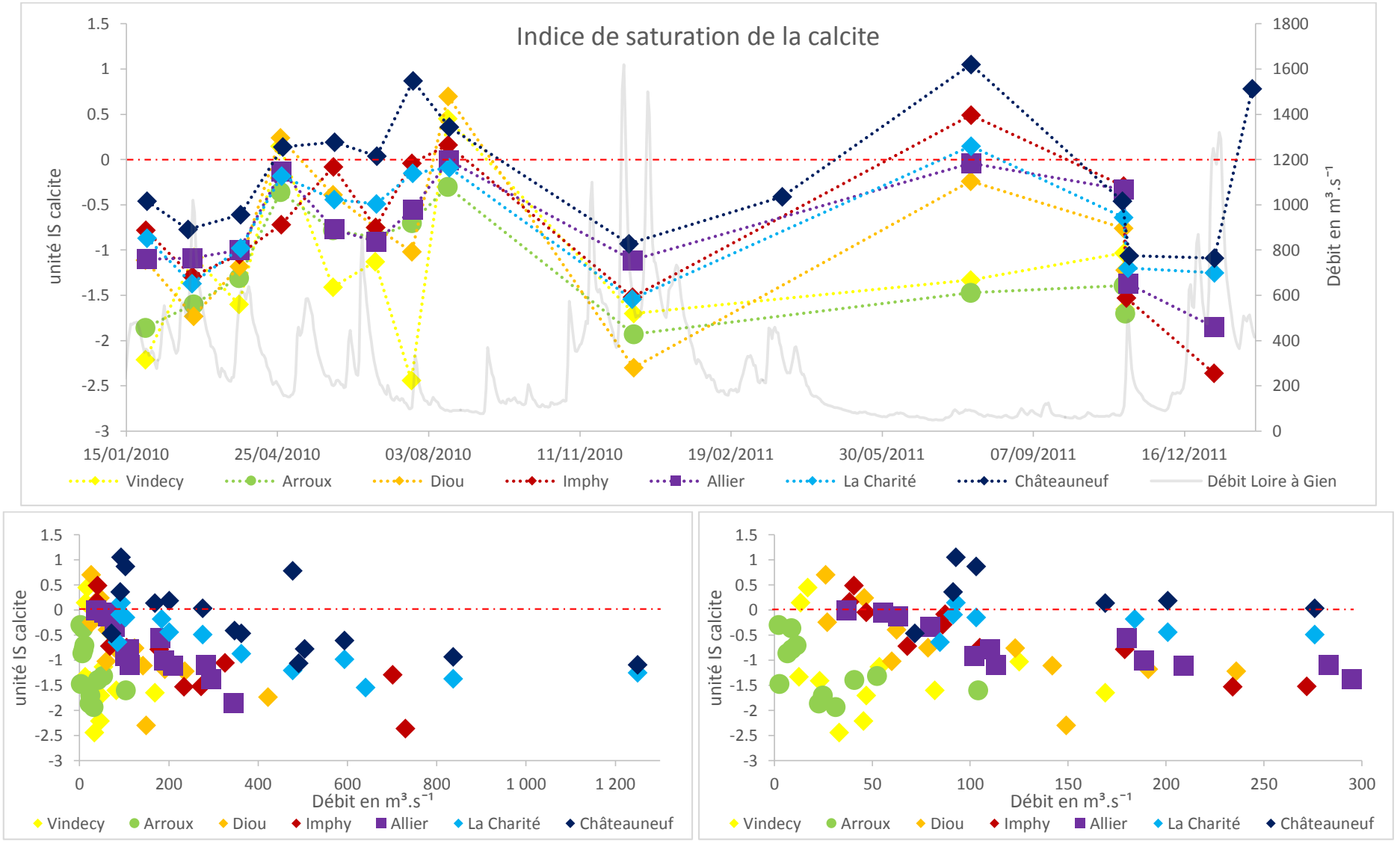


Fig. 119. *Evolutions de l'indice de saturation de la calcite des eaux de la Loire et de ses affluents, en fonction du temps et des débits (détails : voir titre de la figure 96).*

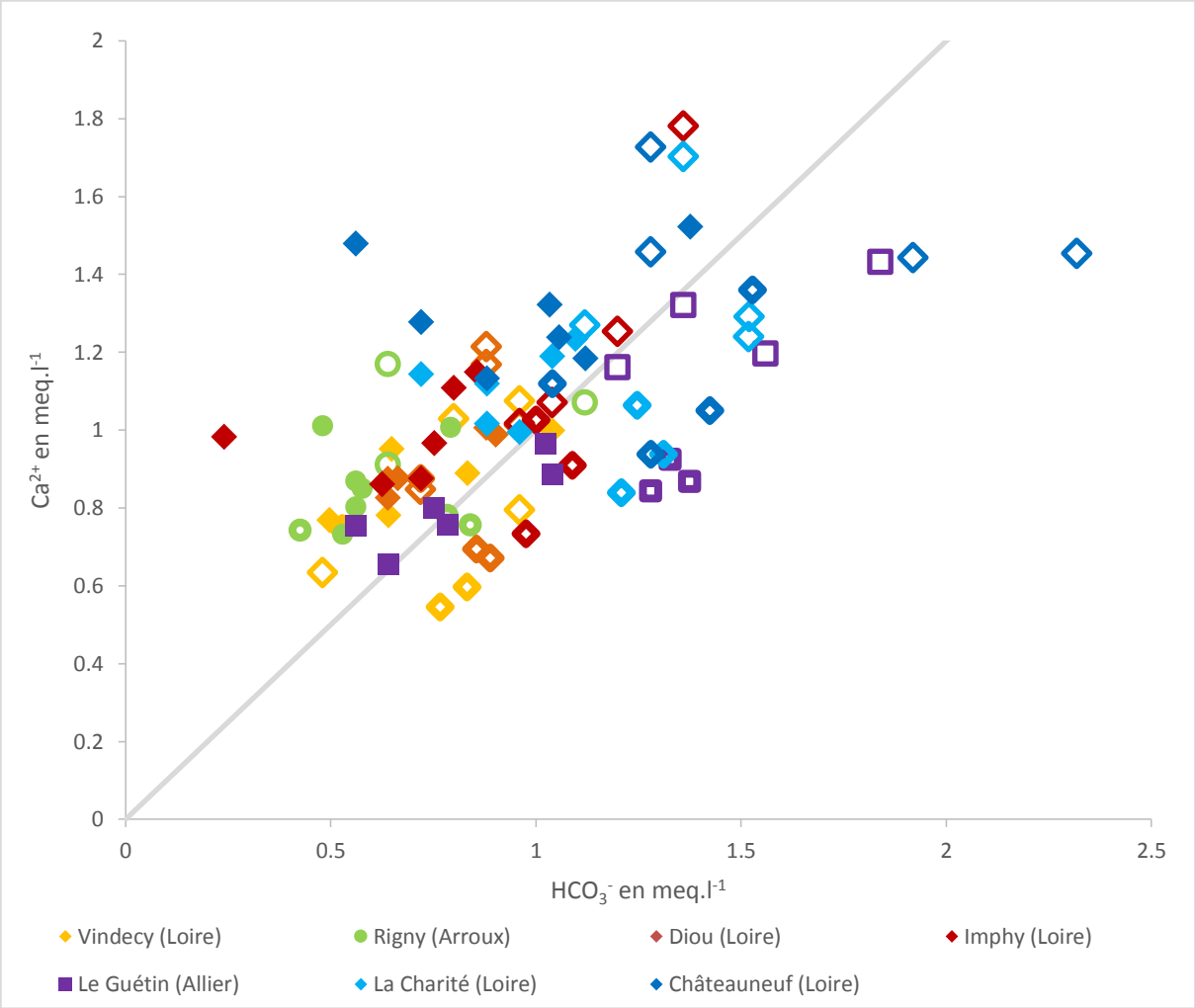


Fig. 120. *Relation Ca^{2+} / HCO_3^- dans les eaux de la Loire et de ses affluents (représentation de tous les échantillons disponibles entre 2009 et 2012 pour chaque site de prélèvements). Les figurés pleins représentent les échantillons prélevés en hautes-eaux, les vides en période d'étiage et les intermédiaires au printemps.*

Les ions Cl^- (fig. 117e)**, SO_4^{2-}** (fig. 117f)**, Na^+** (fig. 117g)**, Mg^{2+}** (fig. 117h) **et K^+** (fig. 117i)

Le chlorure est un élément dit conservé, c'est-à-dire qu'il n'intéragit pas avec le milieu (Négrel, 1997). Il est ainsi un bon traceur des flux naturels d'eau. Les deux sources du chlorure sont atmosphérique et anthropique (Berner-Kay et Berner, 1987). Dans les eaux étudiées, les comportements des sulfates, sodium, magnésium et potassium s'apparentent à celui du chlorure (fig. 117, e à i).

Globalement, leurs variations saisonnières sont identiques : une augmentation des concentrations en étiage (en lien avec les apports des nappes), une baisse en début de période de hautes eaux liée à une dilution par les eaux de pluie et enfin une diminution et/ou une stagnation en fin de hautes-eaux et au printemps. Les quelques particularités élément par élément de ces variations saisonières sont synthétiser dans la tableau 39.

Les relations entre les concentrations de ces différents éléments et les débits sont également très similaires. Pour les sites de prélèvements dans la Loire de Vindecy à Imphy, il n'existe pas de relation entre leurs concentrations et les débits. Pour l'Arroux, l'Allier et la Loire moyenne, au contraire, la relation de la chimie avec les débits est très marquée. Les concentrations décroissent avec l'augmentation des débits.

On peut noter néanmoins une exception à ce comportement global. En Loire moyenne, pour les deux sites de La-Charité-sur-Loire et de Châteauneuf-sur-Loire, le sodium a une relation un peu plus complexe au débit. Le sodium diminue avec l'augmentation des débits jusqu'à un seuil de débit à 500 $m^3.s^{-1}$.

L'absence de relation entre le débit et les concentrations de ces cinq éléments pour les trois sites de prélèvements dans la Loire amont indique que les apports ne proviennent pas seulement des précipitations (qui contrôlent une partie importante des variations du débit). Le chlorure faisant partie de ce groupe d'espèces chimiques, on peut supposer que des apports d'origine anthropique influencent les concentrations de ces éléments à l'amont du bassin. Les apports en chlorures provenant d'épandages d'engrais et de rejets urbains a d'ailleurs été mis en évidence pour de petits bassins versants du Massif Central (Négrel, 1997).

La silice dissoute (fig. 117j)

La silice dissoute est l'espèce chimique qui présente la plus grande stabilité en terme de concentration le long du transect de la Loire (fig. 117j). Seule la concentration dans les eaux de l'Allier se détache avec des valeurs plus importantes qu'ailleurs.

Les apports en silice proviennent effectivement du lessivage des sols des bassins silicatés du Massif Central (Négrel, 1997). Il s'agit d'un des rares éléments non liés aux sources d'origines anthropiques (Négrel, 1997).

Les variations de la silice dissoute présentent une diminution des concentrations depuis l'étiage jusqu'à une première partie des hautes eaux. Les concentrations de silice augmentent ensuite en fin de période de hautes eaux.

Ce cycle saisonnier particulier est lié au développement de la végétation aquatique qui consomme une partie de la silice dissoute disponible. Cette diminution de la silice avait été observé dans les eaux de la Loire au Bec d'Allier entre les mois d'avril à octobre (Négrel et al.,

2001). Durant les hautes-eaux, la silice dissoute n'est plus consommée par la biomasse et l'augmentation des débits procure aux cours d'eau un pouvoir érosif plus important. Ce dernier phénomène entraîne le lessivage des sols silicatés du Massif Central et l'augmentation des concentrations en silice.

Ces particularités expliquent une organisation singulière des résultats au sein des graphiques représentant la concentration de la silice en fonction du débit. Pour l'ensemble des sites de prélèvements, les variations de la concentration de silice pour les plus faibles débits sont importantes. Lorsque les débits augmentent, la seule tendance significative est la diminution de la dispersion des données, et donc une diminution des variations des concentrations en silice.

Les ions NO_3^- (fig. 117k)

Les variations saisonières des nitrates présentent une inversion par rapport aux autres espèces chimiques (fig. 117k). Leurs concentrations diminuent pendant l'étiage, puis augmentent et stagnent pendant la période des hautes eaux.

La concentration des nitrates est contrôlée par le cycle des saisons, l'importance du lessivage des sols, mais aussi par l'apport d'engrais azotés. Les valeurs minima observées en étiage correspondent au maximum de l'activité biologique d'avril à octobre (Grosbois, 1998 ; Négrel et al., 2001). L'augmentation des concentrations en nitrates au début des hautes eaux correspond à la disparition des organismes consommant les nitrates ainsi qu'à l'augmentation du ruissellement qui lessive les sols chargés en nitrate.

Pour les débits les plus faibles, les valeurs de concentration en nitrate sont donc très faibles (minima pendant l'étiage). Mais dès que les débits augmentent un peu, l'organisation de la dispersion des données semble être régie par deux seuils de concentration (6-8 $mg.l^{-1}$ et 10-13 $mg.l^{-1}$), sans rapport spécifique avec les valeurs de débit.

Ce variations semblent être essentiellement contrôlées par les apports en nitrates d'origine agricole. En effet, en début de hautes-eaux, les sols agricoles sur lesquels ont été utilisés des engrais azotés (de type NPK) sont lessivés. Ainsi, l'excès de nitrates, mais également de potassium couplé aux chlorures (sylvite), sont entraînés vers les cours d'eau et les nappes. L'étude des transports des constituants dissous par les eaux de la Loire à Orléans,

menée par C. Grosbois (Grosbois, 1998), démontre d'ailleurs l'importance des pollutions agricoles dans la région d'Orléans (au cœur de la Beauce) dans l'explication des concentrations des nitrates.

	CE	pH	HCO_3^-	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	NO_3^-	SiO_2
Etiage	↗↘	↘	↗→	↗→	↗	↗	↗	↗	↗↘	↘	↘
Début des hautes eaux	↘	↘	↘	↘	↘↗	↘	↘	↘	↘	↗	↘
Fin des hautes eaux et printemps	↗	↗	→	↘	↘→	↗	↗→	→	→	→	↗

Tab. 39. *Synthèse des variations saisonnières des différents paramètres physico-chimiques et espèces chimiques.*

Globalement, les données produites dans le cadre de cette thèse correspondent à des résultats déjà obtenus dans des études précédentes en Loire moyenne (Grosbois, 1998 ; Moatar et al., 2009) ou dans le Massif Central (Négrel, 1997). Les limites des résultats présentés ici résident dans le protocole de prélèvement. Le suivi mensuel sur une année hydrologique, engendre des difficultés à retrouver les variations saisonnières moyennes de certains paramètres, notamment pour le pH, à cause de la variabilité interannuelle des débits de la Loire. Néanmoins, la validation des données par la comparaison avec des études précédentes, permet de renforcer le poids des différences observées à l'échelle de la zone d'étude, synthétisées dans le tableau 36. La signature chimique des apports de la haute Loire, du Morvan et de l'Allier a donc pu être définie, ainsi que leur synthèse en Loire moyenne, dont les eaux sont aussi marquées par leur entrée dans le Bassin Parisien.

D'après ces résultats, les chlorures, en tant qu'élément conservé, pourraient être de bons indicateurs des parts de mélange des eaux d'origines différentes, au sein de la Loire amont et à son entrée en Loire moyenne. De plus, pour l'étude de la confluence Loire – Allier, la silice dissoute, dont les concentrations importantes dans les eaux de l'Allier les caractérisent, pourra être également utilisée. Ses variations saisonières significatives devraient également permettre d'étudier les apports de l'Allier pour des situations hydrologiques différentes.

4.3. Signatures isotopiques (^{18}O et ^{2}H) des eaux en la Loire moyenne et des apports des bassins amont principaux : haute Loire, Allier et Morvan

Les isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^{2}H) sont des marqueurs de l'origine des eaux. Sans processus évaporatoire, les teneurs isotopiques des eaux de rivière sont représentatives de la composition de la fonction-entrée des cours d'eau, à savoir les précipitations et/ou les eaux souterraines, qui, elles-mêmes, dérivent des précipitations. En schématisant, on peut dire qu'un cours d'eau aura la composition isotopique des précipitations l'alimentant.

Les différences de composition isotopique des pluies étant dues à des phénomènes de fractionnement isotopique thermo-dépendant lors des changements de phases, les précipitations qui alimentent un cours d'eau seront isotopiquement marquées différemment selon la saison, la quantité d'eau précipitée et/ou selon l'altitude des formations des précipitations.

Les teneurs isotopiques des cours d'eau peuvent être modifiées par rapport aux précipitations par évaporation des eaux, ce qui a pour conséquence d'enrichir les rapports isotopiques. Il est néanmoins possible de retrouver la signature initiale des précipitations (composition avant évaporation) si les eaux évaporées s'alignent sur une droite d'évaporation dans un graphique $\delta^{2}H = f(\delta^{18}O)$. L'intersection entre la droite d'évaporation et la droite météorique mondiale (Craig, 1961), définit la signature isotopique des précipitations à l'origine des eaux étudiées. Une comparaison avec les teneurs des précipitations locales peut alors être faite. Rappelons ici les marges d'erreur liées aux analyses : pour $\delta^{18}0$, ± 0,15 ‰ ; pour $\delta^{2}H$, ± 2 ‰.

Gradient amont-aval dans les teneurs isotopiques des eaux de la Loire

La signature isotopique des eaux de la Loire varie d'amont en aval, en fonction des apports des différents affluents (fig.121), dont l'altitude moyenne des bassins versants diffère. La signature des eaux de la Loire à Vindecy et de celles de l'Allier au Guétin sont très proches (dans les marges d'erreur). Elles révèlent ainsi l'importance de l'influence des bassins amont situés dans le Massif Central. Il faut noter également la particularité des eaux de l'Arroux, qui proviennent du Morvan, dont la composition isotopique est relativement élevée, surtout l'été.

D'amont en aval, les eaux de la Loire révèlent donc les mélanges liés à des apports successifs. A Diou et à Imphy, les eaux de la Loire possèdent des signatures isotopiques intermédiaires entre celles de l'Arroux et de Vindecy situés en amont. Les eaux de la Charité-sur-Loire intègrent à nouveau l'influence du Massif Central après la confluence avec l'Allier à proximité de Nevers. Cependant, on observe que les eaux en Loire moyenne (à Châteauneuf-sur-Loire) sont légèrement enrichies par rapport aux eaux de la Loire à Imphy et de l'Allier (au-delà des marges d'erreur). Pour expliquer ces valeurs en Loire moyenne, un pôle de mélange manque à ce graphique : les nappes alluviales (voir chapitre suivant).

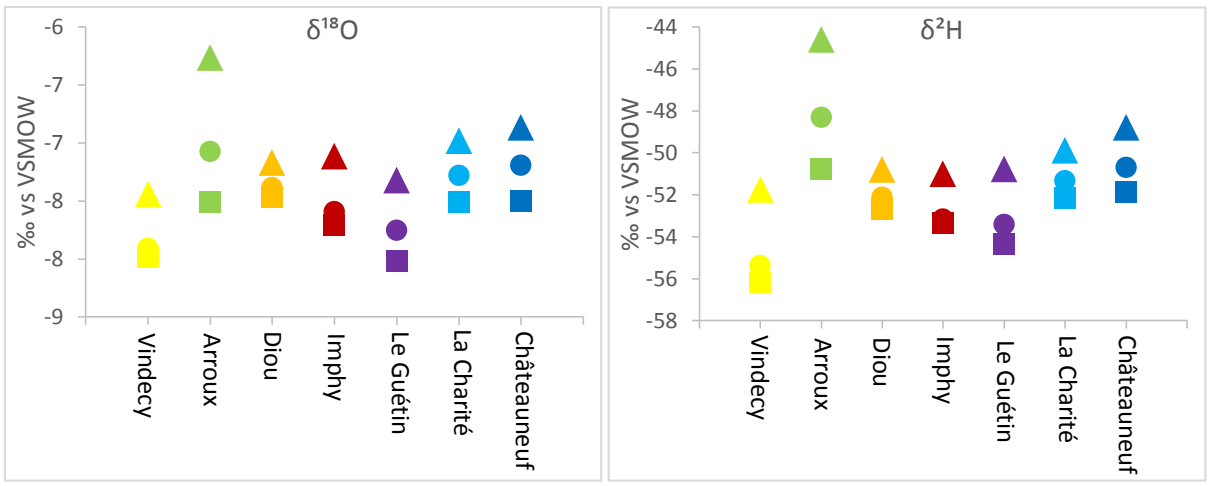
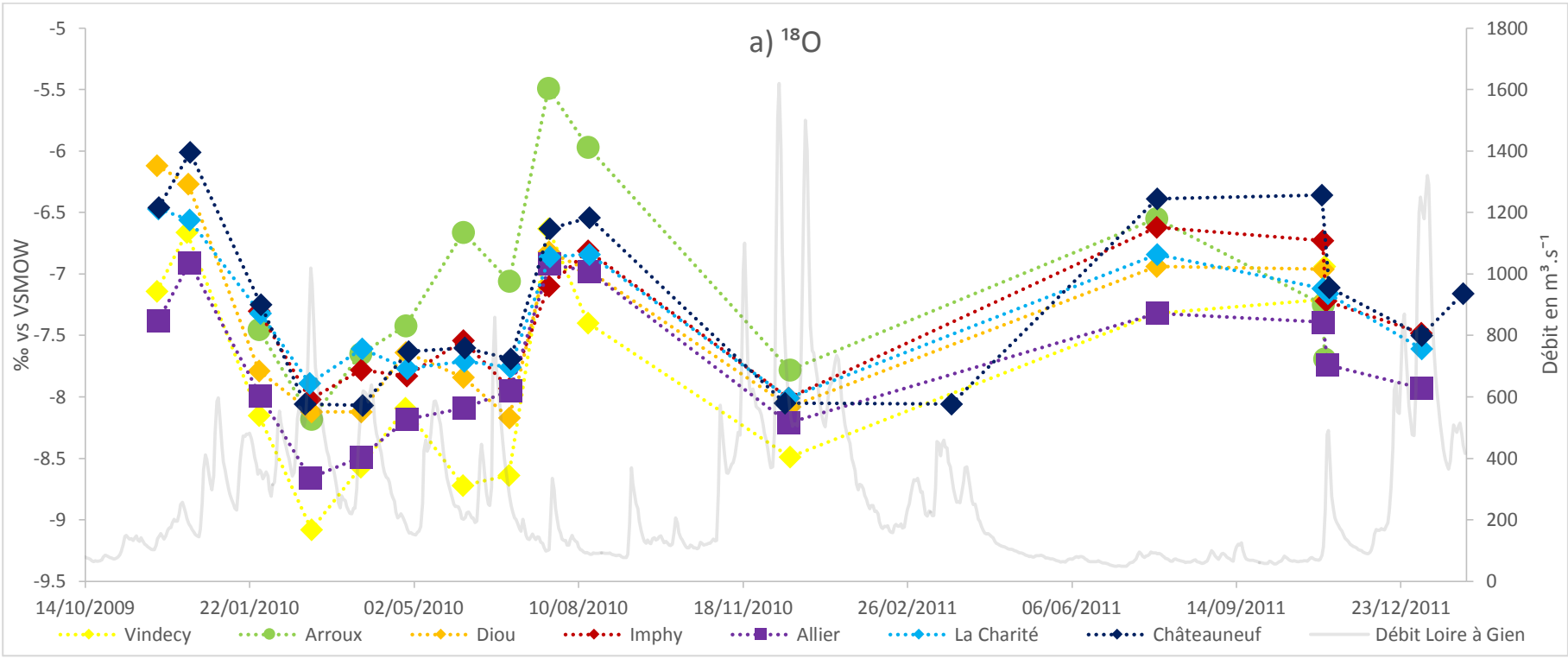


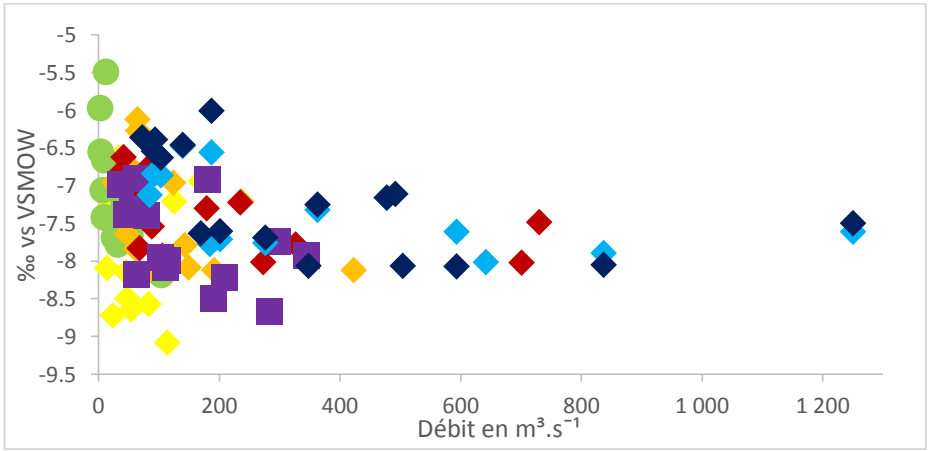
Fig. 121. *Moyennes sur une année hydrologique (ronds, année 2009-2010), moyennes des eaux d'été (triangles, de 2009 à 2011) et moyennes des eaux d'hiver (carrés, de 2009 à 2012) des valeurs $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ pour chaque site de prélèvements.*

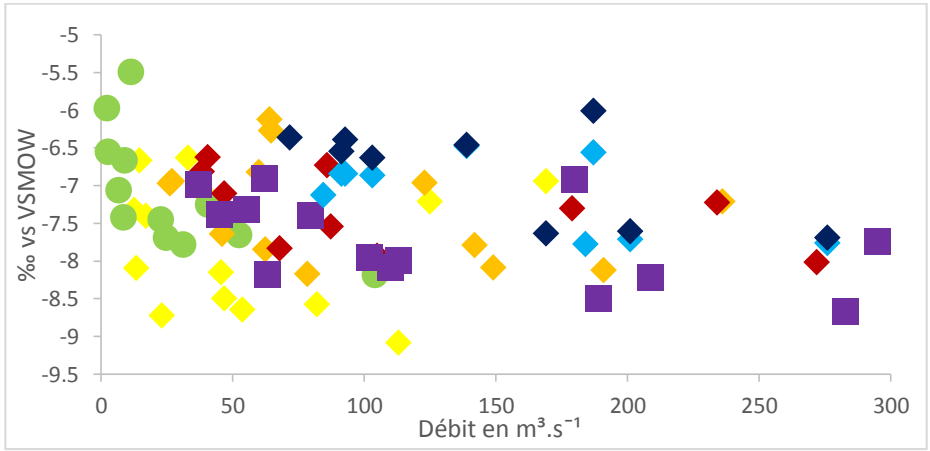
Saisonnalité et relation aux débits des signatures isotopiques des eaux de la Loire

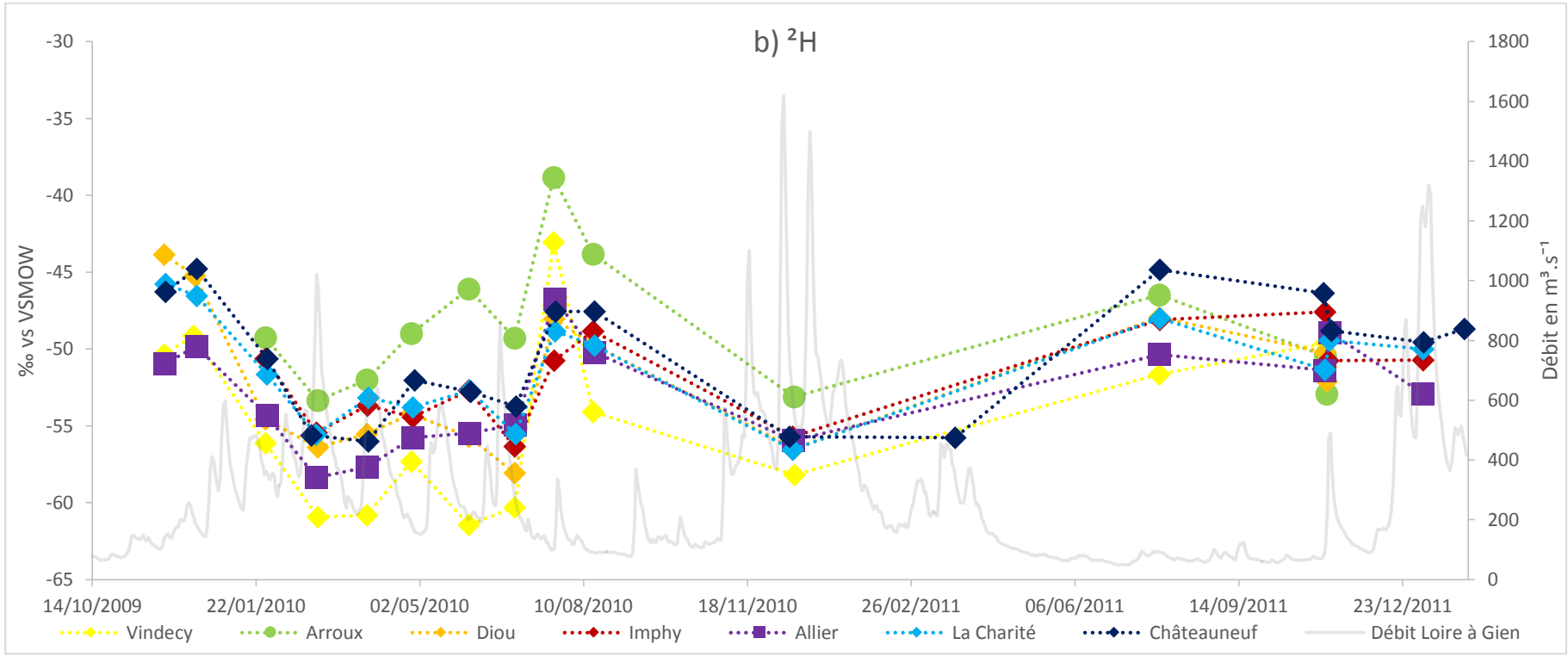
La saisonnalité des signatures isotopiques est homogène pour l'ensemble de la zone d'étude (fig. 122). Les eaux sont enrichies en été et appauvries en hiver. Ces variations sont liées aux effets de l'évaporation des eaux et présentent une cyclicité similaire et synchrone à celles que l'on observe classiquement dans les précipitations. Ceci indique qu'il y aurait une restitution rapide des pluies par les eaux de la Loire (peu ou pas de stockage des précipitations avant écoulement).

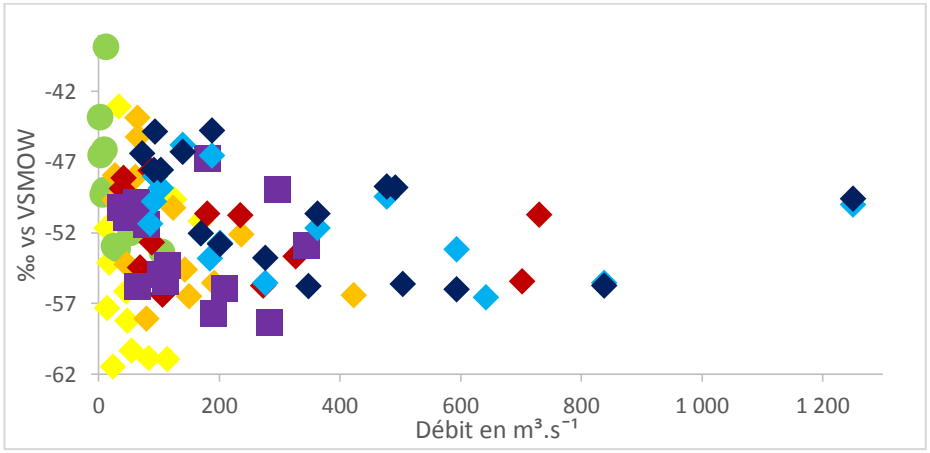
Fig. 122. ***Evolutions de la signature isotopique (a : ^{18}O ; b : ^{2}H) des eaux de la Loire et de ses principaux affluents, en fonction du temps et des débits (détails : voir titre de la figure 117 ; légendes identiques pour tous les graphiques des deux pages suivantes).***

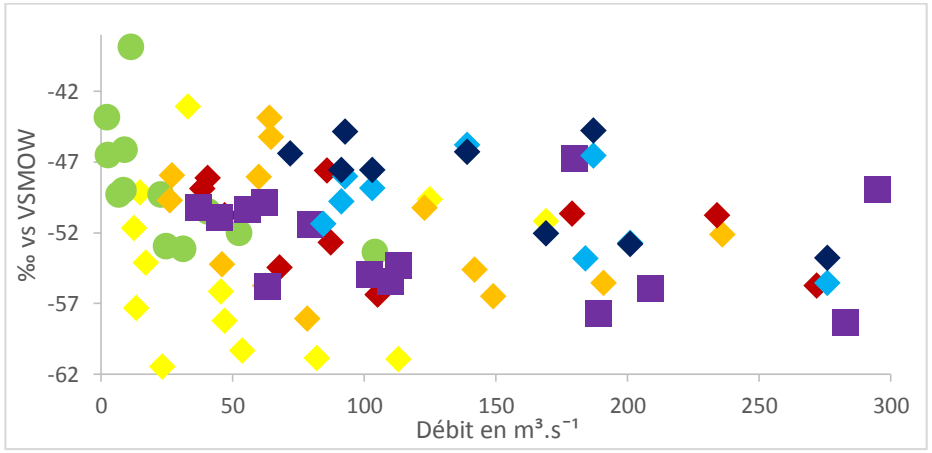

a) ¹⁸O
‰ vs VSMOW
Débit en m³.s⁻¹
14/10/2009
22/01/2010
02/05/2010
10/08/2010
18/11/2010
26/02/2011
06/06/2011
14/09/2011
23/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien


‰ vs VSMOW
Débit en m³.s⁻¹


‰ vs VSMOW
Débit en m³.s⁻¹


b) ²H
‰ vs VSMOW
Débit en m³.s⁻¹
-30
-35
-40
-45
-50
-55
-60
-65
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
14/10/2009
22/01/2010
02/05/2010
10/08/2010
18/11/2010
26/02/2011
06/06/2011
14/09/2011
23/12/2011
Vindecy
Arroux
Diou
Imphy
Allier
La Charité
Châteauneuf
Débit Loire à Gien


‰ vs VSMOW
-42
-47
-52
-57
-62
0
200
400
600
800
1 000
1 200
Débit en m³.s⁻¹


‰ vs VSMOW
-42
-47
-52
-57
-62
0
50
100
150
200
250
300
Débit en m³.s⁻¹

Les graphiques de la figure 122 mettent en relation les signatures isotopiques avec les débits. Ils permettent d'identifier des situations de mélange des eaux différentes en fonction des débits. Ainsi, deux seuils de débits, pour les débits à Gien, ont été définis pour caractériser trois situations hydrologiques. Pour les débits inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$, les signatures isotopiques sont enrichies et varient peu (étiage). Pour les débits entre 150 et 500 $m^3.s^{-1}$, les valeurs sont plus faibles mais varient d'avantage. Et enfin, pour les débits supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$, les eaux sont les plus appauvries et varient peu en fonction du débit. La définition de ces seuils de débits sera utile pour l'étude des parts de mélange pour des situations hydrologiques différentes (cf. sous-chapitre 4.4.).

Liens entre les teneurs isotopiques des précipitations et celles des eaux de la Loire

Les relations entre les signatures isotopiques des précipitations et celles de la Loire ou de ses affluents sont parfois complexes (fig. 123).

Pour les eaux de la Loire à Vindecy, la signature est plus appauvrie que celle des précipitations du Massif Central. Il est à noter, que le site de prélèvement des précipitations pour le Massif Central se trouvant à Sayat à une altitude de 550 m, est significativement à plus basse altitude que le Mont-Gerbier-de-Jonc, où la Loire prend sa source à 1408 m d'altitude. Sayat est de surcroit à plus de 200 km en amont de Vindecy.

Les eaux de la Loire à Vindecy (235 m d'altitude) seraient donc le résultat d'un mélange de précipitations issues d'altitudes variées. L'influence de ces précipitations entraîne donc des signatures isotopiques de la Loire à Vindecy appauvries par rapport aux données de précipitations du Massif Central dont on dispose.

Les mêmes mélanges sont observables pour les eaux de l'Allier au Guétin comparativement aux précipitations du Massif Central. En effet, l'Allier prend sa source à 1485 m d'altitude, à plus de 400 km du Pont canal du Guétin (165 m d'altitude) où sont réalisés les prélèvements pour les eaux de l'Allier.

L'interprétation de la signature isotopique des eaux de l'Arroux relève du même raisonnement. Les altitudes du bassin de l'Arroux varient au moins entre 420 m (source) et 220 m (confluence avec la Loire). Le cours de cet affluent est d'envion 130 km et draîne un large bassin

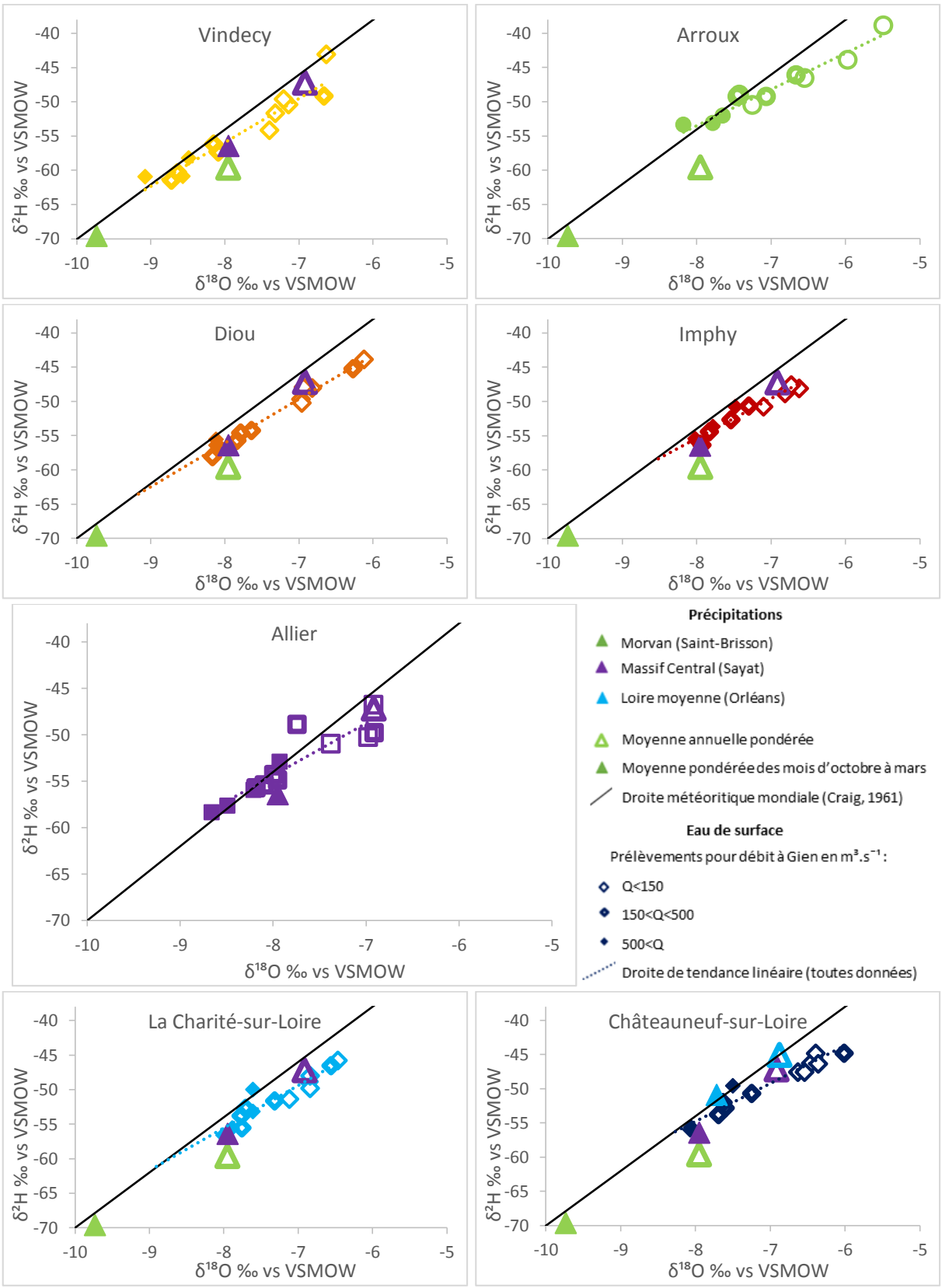


Fig. 123. *Comparaisons des teneurs isotopiques des précipitations avec celles de la Loire et de ses affluents aux différents sites de prélèvements.*

versant de 3174 km². Le site sur lequel ont été prélevées les précipitations pour le Massif du Morvan, à Saint-Brisson, est distant de 50 km de la source de l'Arroux et se situe à une altitude de 617 m. Il est donc logique que les rapports isotopiques des précipitations pour le Morvan soient appauvris en comparaison des eaux de l'Arroux. Il s'agit également du site de prélèvement des précipitations le plus élevé en altitude (550 m à Sayat pour le Massif Central et 109 m à Orléans pour la Loire moyenne). Les signatures isotopiques des précipitations pour le Massif du Morvan, obtenues dans le cadre de cette étude, ne sont donc que peu représentatives des précipitations formant les débits de l'Arroux.

La comparaison des signatures isotopiques de la Loire entre Vindecy et Imphy, montre un enrichissement progressif des eaux de la Loire, induit par les apports du Morvan. Seul l'Arroux a fait l'objet d'un suivi chimique et isotopique. Il existe néanmoins de multiples cours d'eau drainant le secteur de la Loire bourbonnaise, qui rejoignent la Loire entre Vindecy et Decize, l'Arroux étant le principal d'entre eux. A Decize, entre Diou et Imphy, l'Aron (bassin versant de 1600 km²) se jette dans la Loire et explique cette influence du Morvan qui s'amplifie dans les eaux de la Loire entre Diou et Imphy.

Enfin, les eaux en Loire moyenne semblent bien plus influencées par les mélanges des eaux entre l'Allier et la Loire amont que par les précipitations locales. Est illustrée ici la faible augmentation de la superficie du bassin versant entre le Bec d'Allier et Orléans comparativement au linéaire du fleuve. La superficie du bassin versant s'étend de 32 610 km² à Givry (juste en aval du Bec d'Allier) à 36 970 km² à Orléans, soit une augmentation de 13% pour un linéaire de la Loire de 160 km.

En conclusion, il convient de souligner que les signatures isotopiques des précipitations du Massif Central et du Morvan sont de piètres indicateurs des précipitations alimentant la haute Loire et l'Allier et d'autre part l'Arroux, eu égard à la surface des bassins versants et aux différences d'altitude de ces derniers. Mais, étant donnée la situation des sites de prélèvements, l'inverse aurait été étonnant. Néanmoins, les signatures isotopiques des eaux de surface illustrent des mélanges cohérents entre les différents tributaires, permettant une étude plus détaillée des parts de mélange entre les différents bassins amont pour des situations hydrologiques contrastées.

4.4. Apports des méthodes de la géochimie dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des confluences Loire – Allier et Loire – Arroux

Les données chimiques et isotopiques des eaux prélevées dans la Loire et ses affluents, pendant les années 2010, 2011 et 2012, permettent l'étude, sur cette période, des mélanges des eaux au niveau de confluences. Les protocoles de prélèvements ont été mis en place afin de permettre principalement l'étude de deux confluences, celle de l'Allier et de la Loire et celle de la Loire et de l'Arroux.

4.4.1. La confluence Loire - Allier

Le suivi géochimique mis en place durant cette thèse des eaux de la Loire et de l'Allier à leur confluence est justifié par le qualité aléatoire des données de débits. Ainsi, il est important, pour étudier la part des apports de l'Allier et de la Loire amont dans les flux d'eau à l'aval de la confluence, de croiser plusieurs paramètres. En effet, les stations de jaugeage les plus proches de la confluence sur l'Allier à Cuffy, et sur la Loire à l'aval de la confluence, à Givry, sont perturbées par cette confluence (F. Giroux, communication personnelle). Les données de la station de Gien seront donc utilisées comme débits de la Loire en aval de la confluence Loire - Allier.

Estimations des apports de la Loire amont et de l'Allier au Bec d'Allier à partir des données de débits

Lorsque que l'on additionne les débits de l'Allier à Cuffy et les débits de la Loire amont à Nevers, il est fréquent d'obtenir un résultat supérieur au débit de la Loire à Gien. Afin d'estimer les apports relatifs de la Loire amont et de l'Allier au Bec d'Allier à partir des données de débits, les pourcentages sont donc calculés par rapport à la somme des débits des deux tributaires amont (tab. 40).

	Parts des apports de la Loire amont à Nevers	Parts des apports de l'Allier à Cuffy
	dans la somme des apports en amont du Bec d'Allier (Allier et Loire amont)	
Toutes données	57%	43%
$Q < 150\ m^3.s^{-1}$	51%	49%
$150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$	54%	46%
$500\ m^3.s^{-1} < Q$	62%	38%

Tab. 40. *Apports relatifs de la Loire amont et de l'Allier dans les débits de la Loire en aval de la confluence Loire – Allier pour la période du 10/01/2010 au 31/01/2012 pour différentes classes de débits de la Loire à Gien (calculés à partir des données de débits).*

Ainsi, pour la période d'étude du 10/01/2010 au 31/01/2012, en moyenne, la Loire amont a fourni 57% des flux d'eau au Bec d'Allier et l'Allier 43% (tab. 40). Néanmoins, pour les débits de la Loire inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, les apports de la Loire amont et de l'Allier sont équivalents. Puis, plus les débits augmentent, plus les apports relatifs de la Loire amont par rapport à l'Allier augmentent pour atteindre 62% pour les débits de la Loire supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien.

Echec de la quantification des apports de la Loire amont et de l'Allier, à partir des données géochimiques, dans un modèle simple de mélange à deux composantes

En utilisant les mesures pour un même rapport isotopique ou les teneurs en un élément majeur, non interactif et conservé lors des mélanges (comme le chlorure) d'une même campagne de prélèvements, à l'amont de la confluence sur l'Allier au Guétin, sur la Loire à Imphy, et à l'aval de la confluence à la Charité-sur-Loire, on peut estimer les apports respectifs de la Loire amont et de l'Allier dans la formation des débits à l'aval de la confluence (tab. 41 à 44).

En plus des isotopes stables de la molécule d'eau, on utilisera les concentrations en chlorures et de la silice dissoute, qui, comme on l'a vu précédemment, présente des variations significatives entre la Loire et l'Allier qui pourraient permettre de définir des parts de mélange.

Il convient ici de noter l'intérêt des classes de débits définies plus haut. En effet, en comparant les différentes classes de débit choisies, on observe l'évolution des moyennes du $\delta^{18}O$, à La Charité-sur-Loire, de -7‰ pour les débits inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, à -8‰ pour les débits supérieurs 500 $m^3.s^{-1}$. Un écart de 1‰ est significativement supérieur à l'erreur de la mesure $\delta^{18}O$ qui est de ±0,15‰.

Dans les tableaux 41 à 44, les lignes grisées correspondent aux prélèvements où la mesure à l'aval de la confluence n'est pas comprise entre les deux valeurs de l'amont. Pour ces mesures-là, d'autres processus se surimposent. Les parts de mélange ne sont évidemment pas possibles à calculer dans ces cas-là. Par ailleurs, les lignes bleutées indiquent que les marges d'erreur des résultats des différents sites de prélèvements se chevauchent.

Ainsi sur 13 campagnes de prélèvements, les apports relatifs de l'Allier et de la Loire amont ne sont calculables que pour 5 campagnes grâce aux $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ et Cl^{-}, et 9 grâce à la silice. Il ne s'agit bien sûr pas des mêmes campagnes en fonction des éléments ou des rapports isotopiques considérés. Il faut noter que pour les campagnes où les apports sont quantifiables, on trouve à certains moments des valeurs aberrantes, comme l'exemple d'apports de l'Allier de plus de 80%, obtenus à partir des données de la concentration en silice dissoute. Ce résultat est à nuancer car la silice est un élément chimique intéractif.

		Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	% $\delta^{18}O$ Allier	% $\delta^{18}O$ Imphy
$Q < 150\ m^3.s^{-1}$	23/07/2010	-7,1	-6,92	-6,86		
	16/08/2010	-6,81	-6,98	-6,84	18%	82%
	27/07/2011	-6,62	-7,32	-6,84	31%	69%
	05/11/2011	-6,73	-7,39	-7,12	59%	41%
$150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$	28/01/2010	-7,3	-7,99	-7,32		
	27/04/2010	-7,83	-8,18	-7,77		
	01/06/2010	-7,54	-8,09	-7,71	31%	69%
	29/06/2010	-7,93	-7,95	-7,76		
	08/11/2011	-7,22	-7,74	-7,16		
$Q > 500\ m^3.s^{-1}$	27/02/2010	-8,02	-8,66	-7,89		
	31/03/2010	-7,78	-8,49	-7,61		
	15/12/2010	-8,01	-8,21	-8,01		
	04/01/2012	-7,48	-7,93	-7,61	29%	71%

Tab. 41. *Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir du rapport isotopique $\delta^{18}O$ (‰ vs VSMOW).*

		Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	% δ^2H Allier	% δ^2H Imphy
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	23/07/2010	-50,75	-46,74	-48,83	48%	52%
	16/08/2010	-48,85	-50,23	-49,77	67%	33%
	27/07/2011	-48,11	-50,37	-48,00		
	05/11/2011	-47,59	-51,39	-51,34		
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	28/01/2010	-50,65	-54,33	-51,64	27%	73%
	27/04/2010	-54,43	-55,77	-53,8		
	01/06/2010	-52,69	-55,46	-52,71		
	29/06/2010	-56,35	-54,93	-55,53	58%	42%
	08/11/2011	-50,76	-48,92	-49,44	72%	28%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	27/02/2010	-55,44	-58,37	-55,55		
	31/03/2010	-53,67	-57,67	-53,17		
	15/12/2010	-55,72	-55,94	-56,56		
	04/01/2012	-50,73	-52,90	-50,00		

Tab. 42. *Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir du rapport isotopique δ^2H (‰ vs VSMOW).*

		Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	% $[Cl^-]$ Allier	% $[Cl^-]$ Imphy
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	23/07/2010	17,1	17,8	18,2		
	16/08/2010	15,8	19,7	17,7	49%	51%
	27/07/2011	22,2	20,4	20,6	85%	15%
	05/11/2011	17,1	22,7	20,0	51%	49%
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	28/01/2010	17,2	18,6	19,2		
	27/04/2010	16,3	15,1	16,5		
	01/06/2010	14,4	13,4	14,3		
	29/06/2010	16,3	14,4	15,8	26%	74%
	08/11/2011	20,3	8,9	15,5	42%	58%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	27/02/2010	12,1	12,4	12,8		
	31/03/2010	10,9	11,2	9,9		
	15/12/2010	14,9	15,0	14,9		
	04/01/2012	11,9	11,3	12,0		

Tab. 43. *Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir de la concentration des ions Cl^- ($mg.l^{-1}$).*

		Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	% [SiO_2] Allier	% [SiO_2] Imphy
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	23/07/2010	13,9	18,5	15,5	35%	65%
	16/08/2010	14,5	20,0	15,8	24%	76%
	27/07/2011	20,8	26,6	21,9	19%	81%
	05/11/2011	5,0	10,6	4,8		
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	28/01/2010	10,5	15,2	11,6	23%	77%
	27/04/2010	3,5	6,3	6,2		
	01/06/2010	8,5	12,7	10,5	48%	52%
	29/06/2010	18,1	22,0	17,9		
	08/11/2011	6,8	8,7	7,0	11%	89%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	27/02/2010	3,8	11,8	8,1	54%	46%
	31/03/2010	7,8	10,8	8,4	20%	80%
	15/12/2010	11,0	13,9	11,7	24%	76%
	04/01/2012	14,5	16,9	14,6		

Tab. 44. *Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir de la concentration de silice dissoute (mg.l^{-1}).*

		Débits		$\delta^{18}O$		$\delta^{2}H$		[SiO2]		[Cl-]	
		% Allier	% Nevers	% Allier	% Imphy	% Allier	% Imphy	% Allier	% Imphy	% Allier	% Imphy
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	23/07/2010	77%	23%			48%	52%	35%	65%		
	16/08/2010	52%	48%	18%	82%	67%	33%	24%	76%	49%	51%
	27/07/2011	52%	48%	31%	69%						
	05/11/2011	**51%**	**49%**	**59%**	**41%**					**51%**	**49%**
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	28/01/2010	40%	60%			**27%**	**73%**	**23%**	**77%**		
	27/04/2010	50%	50%								
	01/06/2010	53%	47%	31%	69%			48%	52%		
	29/06/2010	53%	47%			58%	42%			26%	74%
	08/11/2011	64%	36%			72%	28%	11%	89%	42%	58%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	27/02/2010	33%	67%					54%	46%		
	31/03/2010	41%	59%					20%	80%		
	15/12/2010	46%	54%					24%	76%		
	04/01/2012	36%	64%	29%	71%						

Tab. 45. Synthèse des parts de mélange entre la Loire amont (Imphy pour la géochimie et Nevers pour les débits) et l'Allier (Le Guétin) à la confluence Loire – Allier, calculées à partir des données de débits, des isotopes stables de la molécule d'eau, de la silice dissoute et des chlorures. Pour les données de débits, le pourcentage des apports est calculé par rapport à la somme des débits des tributaires (Loire amont à Nevers et Allier à Cuffy). La couleur de fond des cellules permet de mettre en évidence le tributaire majoritaire (violet pour l'Allier et orangé pour la Loire amont). Les résultats en vert indiquent la cohérence entre plusieurs paramètres pour un même prélèvement.

La synthèse des résultats des parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier, obtenues grâce aux différents éléments pris en compte, permet de mettre en évidence le peu de cohérence des résultats (tab. 45).

Globalement, pour les débits les plus importants, aucune conclusion n'est possible car les parts de mélange ne peuvent être calculées pour tous les éléments. Ceci indique que la formation des forts débits ne fait pas toujours appel aux mêmes pôles de mélange avec des compositions chimiques homogènes et ce, dans les mêmes proportions.

Pour les débits inférieurs à 500 $m^3.s^{-1}$, on obtient un peu plus de résultats cohérents et homogènes d'une date à l'autre. Mais, en comparant les pourcentages obtenus à partir des débits, des rapports isotopiques ou des éléments majeurs pour une même date, il est à nouveau impossible de conclure. Pour une seule campagne (novembre 2011 : date en vert dans le tableau 45), on obtient, à partir de trois paramètres différents, des parts de mélange cohérentes. Pour déterminer s'il s'agit d'un cas particulier ou d'un cas « normal », il faudrait faire ce calcul sur un plus grand nombre de situations, et donc disposer de données supplémentaires.

Ces incohérences révèlent toutefois qu'un modèle simple de mélange à seulement deux composantes (Loire amont et Allier) ne permet pas d'expliquer les mesures obtenues à l'aval de la confluence Loire - Allier.

Figure 124, sont représentées graphiquement les signatures isotopiques de la Loire amont à Imphy, de l'Allier au Guétin et de la Loire moyenne à La-Charité-sur-Loire, par classe de débits et par campagne, avec les marges d'erreurs liées à l'analyse. Il est remarquable qu'il existe des intervalles, dans cette marge d'erreur, qui rendraient les données exploitables dans un système simple à deux pôles de mélange. La valeur aval étant comprise entre les deux valeurs amont, le calcul des parts de mélange est possible. Néanmoins, pour des débits supérieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, les résultats, à l'image de ceux présentés précédemment (tableaux 41 à 45), ne révèleraient, la plus part du temps, que des parts de mélange disproportionnées entre les deux apports amont. Il est donc nécessaire de raisonner dans le cadre d'un système à plus de deux apports différents : la Loire amont, l'Allier et au moins une autre source d'eau participant au débit en aval de la confluence Loire - Allier.

Un modèle de mélange à cinq composantes

A partir de la figure 124, , il est possible d'appuyer cette hypothèse d'un système à plus de deux pôles de mélange au niveau de la confluence Loire - Allier. Il convient ici de noter que les résultats du suivi isotopique de plusieurs campagnes, présentent des valeurs, pour les trois sites de prélèvements, peu différenciées (dans les marges d'erreur), notamment lorsque les débits de la Loire à Gien sont inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien. Une certaine prudence est donc de rigueur dans l'analyse de ces résultats.

Pour les débits supérieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, on peut observer une « déviation » relativement constante des signatures isotopiques de la Loire à l'aval de la confluence par rapport à celles de l'Allier et de la Loire amont. Les eaux de la Loire à La-Charité-sur-Loire sont effectivement trop enrichies en comparaison des apports amont. Cet enrichissement révèle donc au moins un autre pôle de mélange à prendre en compte pour expliquer les signatures isotopiques à l'aval de la confluence Loire – Allier.

Cet enrichissement est imputable à l'influence de petits affluents de la Loire entre Nevers et la Charité-sur-Loire, cumulée à celle de nombreuses sources, essentiellement en rive droite, entre le Bec d'Allier et La Charité-sur-Loire (proximité de Pourgues-les-eaux). Ces petits affluents ne seront donc pas négligeables dans la composition géochimique des eaux de la Loire.

En effet, La Nièvre se jette dans la Loire à Nevers, c'est-à-dire à l'aval du site de prélèvement pour la Loire amont. Il faut rappeler ici que le site de prélèvement à Nevers avait été abandonné à cause du mauvais mélange des eaux de la Nièvre avec celles de la Loire au niveau du pont choisi, trop proche de leur confluence. Le bassin versant de la Nièvre couvre 630 km^2 et elle parcourt un peu moins de 50 km. Sa source est située à 276 m d'altitude et sa confluence avec la Loire à 171 m. Cet ordre de grandeur des altitudes pourrait expliquer une signature isotopique qui se rapprocherait de celle des précipitations à Orléans, en comparaison des altitudes élevées de l'amont des bassin de la Loire et de l'Allier. Le module de la Nièvre à Urzy, proche de la confluence avec la Loire, est de 5,3 $m^3.s^{-1}$, c'est-à-dire 3% du module de la Loire à Nevers. Pour les prélèvements réalisés le 4 janvier 2012, le débit moyen de la Nièvre à Arzembouy (station située au tiers de son bassin versant), atteignait 28,6 $m^3.s^{-1}$. Le débit de la Loire à Nevers ce même jour était de 730 $m^3.s^{-1}$ dont la Nièvre représentait donc près de 4% du débit.

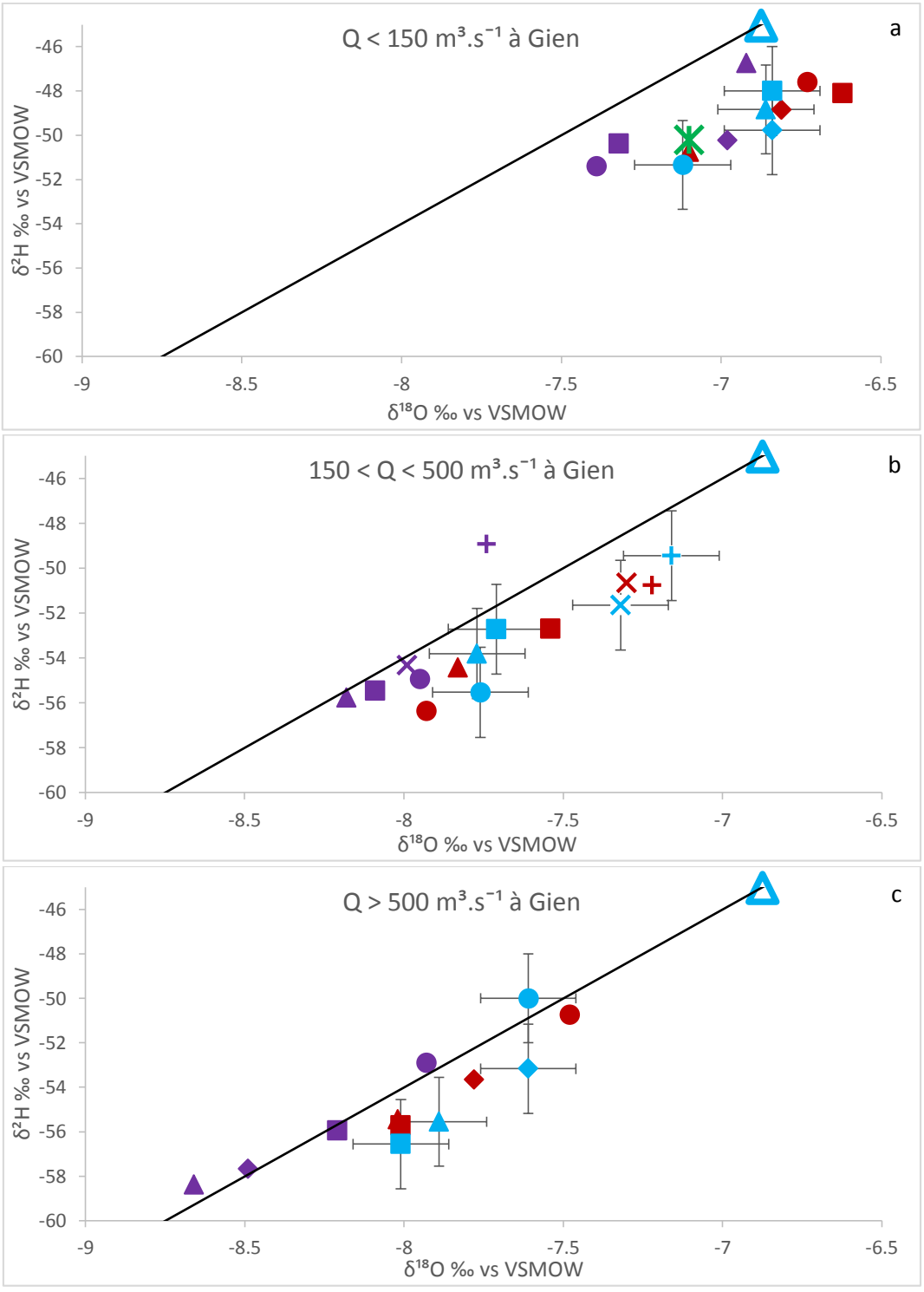


Fig. 124. *Signatures isotopiques des eaux de la Loire et de l'Allier à leur confluence pour différentes classes de débits (a : débits de la Loire à Gien inférieurs à 150 m³.s⁻¹ ; b : débits entre 150 et 500 m³.s⁻¹ ; c : débits supérieurs à 500 m³.s⁻¹). La droite noire représente la droite mondiale des eaux météoriques. Le triangle bleu est la moyenne annuelle pondérée des signatures isotopiques des précipitations à Orléans. La couleur des figurés indique le site de prélèvements : violet pour l'Allier au Guétin, rouge pour la Loire à Imphy et bleu pour la Loire à La Charité-sur-Loire. Un figuré différent a été attribué à chaque campagne.*

La présence de sources dans la région de Nevers, dont les apports n'ont pas été identifiés, doivent également renforcer cette influence des précipitations locales dans la Loire à l'aval de la confluence avec l'Allier.

Ainsi, on peut considérer pour les débits supérieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, qu'il existe au moins quatre pôles de mélange, dont les signatures isotopiques diffèrent, qui expliquent les débits de la Loire à l'aval de la confluence : la Loire amont, l'Allier, de petits affluents dont la Nièvre et des sources ; ces affluents locaux et les sources étant liés aux précipitations locales.

Pour les débits inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien, c'est-à-dire en situation de basses eaux, à partir de la figure 124, on ne peut pas identifier clairement un autre pôle de mélange. Les apports des petits affluents locaux peuvent jouer un rôle, mais il n'est pas identifiable.

Or, dans une étude antérieure du secteur du Bec d'Allier (Négrel et al., 2001), il a été démontré que la nappe alluviale alimente la Loire en période d'étiage. La signature isotopique de cette nappe avait été estimée lors d'une campagne de prélèvement en juin 1999 (l'étoile verte en représente la moyenne sur le graphique de la figure 124a). En étiage, les débits en aval de la confluence relève donc d'un mélange de cinq apports différents : la Loire amont, l'Allier, les petits affluents locaux, les sources et la nappe alluviale, avec peut-être également l'impact de l'évaporation car les faibles débits se rencontrent surtout l'été.

Incohérences de la caractérisation isotopique des pôles de mélange supplémentaires (petits affluents locaux, sources et nappe alluviale)

Malgré l'absence de prélèvement d'eau sur les petits affluents de la Loire entre Imphy et La-Charité-sur-Loire, les sources ou la nappe alluviale, il est néanmoins possible d'estimer les apports qu'ils représentent à partir des données de débits existantes et des analyses isotopiques réalisées dans le cadre de cette thèse.

Tout d'abord, il convient d'estimer les apports, autres que ceux de la Loire amont et de l'Allier, par une étude des débits autour de la confluence Loire-Allier. Ainsi sera calculé un débit que l'on nommera $Q_{inexpliqué}$, représentant le débit non expliqué par la Loire amont et l'Allier à

l'aval de la confluence. Puis à partir des données isotopiques, pour chaque date de prélèvements, la signature isotopique théorique de ce « débit inexpliqué » peut être calculée grâce à la relation suivante (de même pour δ^2H) :

$$\delta^{18}O_{inexpliqué} = (\delta^{18}O_{Loire\ aval} \times Q_{Loire\ aval} - \delta^{18}O_{Allier} \times Q_{Allier} - \delta^{18}O_{Loire\ amont} \times Q_{Loire\ amont}) / Q_{inexpliqué}$$

La condition pour estimer ces apports est la fiabilité des données de débits fournies par la Dreal Centre. Or, dans le secteur de la confluence Loire - Allier, ce n'est pas leur fiabilité qui caractérise les stations de jaugeage, comme abordé précédemment. Il convient donc de choisir empiriquement les stations de jaugeage à utiliser en fonction de la vraissemblance des cumuls de débits au niveau de la confluence (tab. 46).

D'après le tableau 46, pour déterminer un débit réaliste non expliqué entre les sites de prélèvements choisis, il convient d'utiliser pour l'aval de la confluence la station de jaugeage de Gien, plus éloignée de la confluence que celle de Givry, mais dont les mesures sont les plus fiables en Loire moyenne.

		Différence entre les débits de la Loire à Givry et la somme des débits de la Loire à Nevers et des débits de l'Allier à Cuffy	Différence entre les débits de la Loire à Gien et la somme des débits de la Loire à Nevers et des débits de l'Allier à Cuffy
Toutes données	Moyenne	-1,2	18,1
	Ecart-type	21,1	72,5
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	Moyenne	-5,8	3,3
	Ecart-type	8,6	23,9
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	Moyenne	2,3	20,9
	Ecart-type	24,7	71,7
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	Moyenne	2,0	49,2
	Ecart-type	30,2	127,8

Tab. 46. *Moyennes des estimations des « débits inexpliqués » à la confluence Loire-Allier du 10/01/2010 au 31/01/2012 (débits journaliers en $m^3.s^{-1}$). Les valeurs négatives indiquent que la somme des débits en amont de la confluence (Loire à Nevers et Allier à Cuffy) est supérieure aux débits mesurés à Givry (en aval de la confluence).*

Ainsi, pour la période du 10/01/2010 au 31/01/2012, on calcule des apports moyens, autres que ceux de la Loire amont et de l'Allier, de 18 $m^3.s^{-1}$, soit 6,4% du débit de la Loire à Gien. De plus, l'évolution de ces « débits inexpliqués », en fonction des gammes de débits, est

cohérente : des apports de 3 $m^3.s^{-1}$ en moyenne pour les débits à Gien inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ et jusqu'à 50 $m^3.s^{-1}$ pour les débits supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$. Cependant, ces moyennes masquent des écarts-types importants. Cette relation n'est donc pas validée pour tous les débits journaliers de la période du 10/01/2010 au 31/01/2012 (fig. 125).

Le calcul d'un débit provenant d'apports non jaugés (petits affluents locaux, sources, nappe alluviale) ne permet donc pas d'obtenir un débit réaliste pour l'ensemble des campagnes de prélèvements (tab. 47). Pour un jour donné, le fait que la somme des débits de la Loire à Nevers et de ceux de l'Allier à Cuffy soit supérieur au débit de la Loire à Gien peut-être expliqué par la qualité médiocre des données de débits mais également par la distance entre Gien et le site de la confluence (95 km), qui entraîne un certain décallage temporel.

D'après le tableau 47, il est donc possible d'estimer la signature isotopique de ces débits inconnus pour 8 campagnes de prélèvements sur 13. Cependant, le résultat de cette estimation est à nouveau incohérent pour certaines campagnes (tab. 48). Les résultats des quatre campagnes pour lesquelles les rapports isotopiques obtenus pour les apports non jaugés, sont vraisemblables, ont été représentés dans la figure 126.

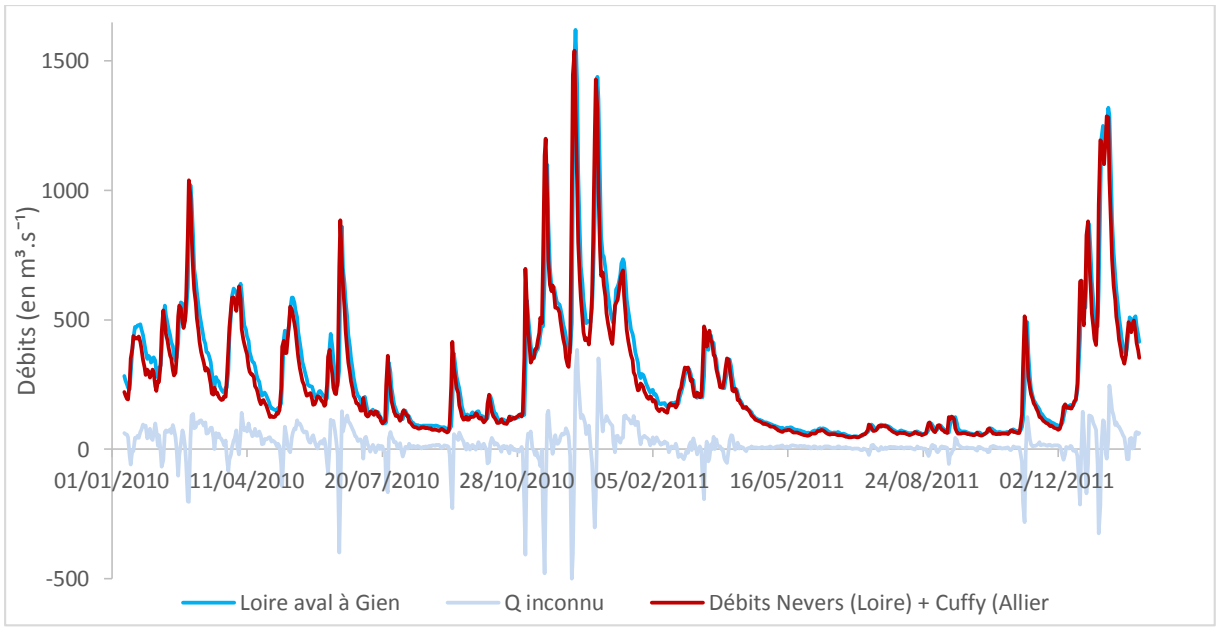


Fig. 125. *Comparaison entre la somme des débits de la Loire à Nevers et de l'Allier à Cuffy (somme des apports amont) et le débit de la Loire à l'aval de sa confluence avec l'Allier, à Gien.*

		Q Loire amont Nevers	Q Allier Cuffy	Σ Q apports amont	Q Loire aval Gien	% Q Loire amont	% Q Allier	% Q inconnu	Q inconnu
Q < 150 m³.s⁻¹	23/07/2010	96,3	152	248,3	103				
	16/08/2010	37,6	42,2	79,8	91,3	41%	46%	13%	11,5
	27/07/2011	40,6	46,1	86,7	92,7	44%	50%	6%	6,0
	05/11/2011	85,9	47,6	133,5	84,5				
150 < Q < 500 m³.s⁻¹	28/01/2010	175	127	302	362	48%	35%	17%	60,0
	27/04/2010	67,8	70,3	138,1	184	37%	38%	25%	45,9
	01/06/2010	85,3	98,9	184,2	201	42%	49%	8%	16,8
	29/06/2010	93,8	113	206,8	276	34%	41%	25%	69,2
	08/11/2011	178	316	494	477				
Q > 500 m³.s⁻¹	27/02/2010	701	339	1040	837				
	31/03/2010	358	227	585	593				
	15/12/2010	272	236	508	641	42%	37%	21%	133
	04/01/2012	730	409	1139	1250	58%	33%	9%	111

Tab. 47. *Estimations des « débits inexpliqués » pour chaque campagne de prélèvements dans la zone de la confluence Loire – Allier (débits en m³.s⁻¹). Les valeurs en rouge indiquent leur incohérence, celles en vert leur cohérence.*

		δ¹⁸O (‰ vs VSMOW)				δ²H (‰ vs VSMOW)			
		Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	Apports inconnus	Loire amont Imphy	Allier Le Guétin	Loire aval La Charité	Apports inconnus
Q < 150 m³.s⁻¹	16/08/2010	-6,81	-6,98	-6,84	-6,42	-48,85	-50,23	-49,77	-51,09
	27/07/2011	-6,62	-7,32	-6,84	-4,64	-48,11	-50,37	-48	-29,05
150 < Q < 500 m³.s⁻¹	28/01/2010	-7,3	-7,99	-7,32	-5,96	-50,65	-54,33	-51,64	-48,83
	27/04/2010	-7,83	-8,18	-7,77	-7,05	-54,43	-55,77	-53,8	-49,85
	01/06/2010	-7,54	-8,09	-7,71	-6,34	-52,69	-55,46	-52,71	-36,62
	29/06/2010	-7,93	-7,95	-7,76	-7,22	-56,35	-54,93	-55,53	-55,40
Q > 500 m³.s⁻¹	15/12/2010	-8,01	-8,21	-8,01	-7,66	-55,72	-55,94	-56,56	-59,38
	04/01/2012	-7,48	-7,93	-7,61	-7,29	-50,73	-52,9	-50	-34,51

Tab. 48. *Estimations des rapports isotopiques pour les apports autres que ceux de la Loire amont et de l'Allier dans le secteur de la confluence Loire – Allier. Les valeurs en vert indiquent leur cohérence. Les lignes bleutées indiquent que les marges d'erreur des résultats des différents sites de prélèvements se chevauchent.*

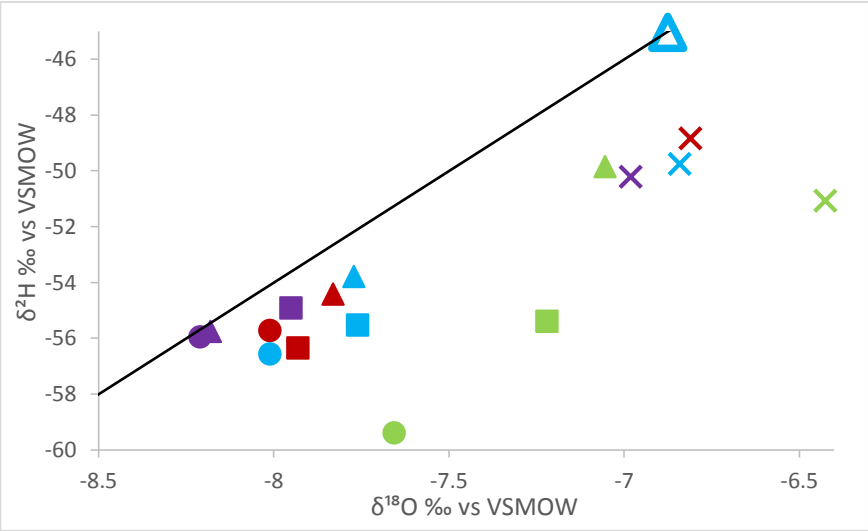


Fig. 126. *Influence des apports locaux dans les eaux de la Loire à La Charité-sur-Loire, à l'aval de la confluence Loire – Allier. La droite noire représente la droite mondiale des eaux météoriques. Le triangle bleu est la moyenne annuelle pondérée des signatures isotopiques des précipitations à Orléans. La couleur des figurés indique le site de prélèvement : violet pour l'Allier au Guétin, rouge pour la Loire à Imphy et bleu pour la Loire à La Charité-sur-Loire. Les figurés verts sont les résultats des calculs effectués ci-dessus (tab. 48) pour estimer la signature isotopique d'apports locaux provenant de petits affluents, de sources ou de la nappe alluviale. Un figuré différent a été attribué à chaque campagne (croix : 16/08/2010 ; triangles : 27/04/2010 ; carrés : 29/06/2010 ; ronds : 15/12/2010).*

La figure 126 révèle surtout l'approximation des données isotopiques obtenues à partir de l'estimation de ces apports locaux. Les figurés verts qui les représentent montrent en effet des eaux très évaporées. Faute d'apporter une indication de la réalité de la signature isotopique de ces apports locaux, au niveau de la confluence Loire – Allier, ceci permet de confirmer l'existence de ces apports.

Les résultats présentés ici au niveau de la confluence Loire – Allier ne permettent donc pas d'apporter de nouveaux éléments à la connaissance des apports relatifs entre la Loire et l'Allier dans la formation des débits en Loire moyenne. La volonté de mener une étude de cette confluence reposant sur la chimie des eaux et les isotopes stables de la molécule d'eau était motivée notamment par les problèmes de fiabilité des données de débit dans ce secteur. La conclusion ici est la mise en lumière de la complexité du fonctionnement hydrologique de cette zone.

L'étude hydrologique de cette confluence est donc compromise, non pas seulement par la qualité des données de débits mais également par les apports éparses de petits affluents locaux, de sources ou de la nappe alluviale, qui ne peuvent être négligés dans l'interprétation des données disponibles.

Pour aller plus loin, dans l'interprétation de ces données ainsi que dans l'illustration de la variabilité des apports de la Loire amont et de l'Allier, il serait nécessaire de réaliser quelques campagnes de prélèvements, pour des situations hydrologiques contrastées, qui comporteraient, en plus des sites déjà sélectionnés au Guétin, à Imphy et à La Charité-sur-Loire, des prélèvements des eaux de la nappe alluviale au niveau du Bec d'Allier, des eaux de la Nièvre et de l'Aubois (les deux affluents les plus importants du secteur, même si leur débit reste modeste comparé à celui de la Loire), ainsi que des eaux des sources proche de Pougues-les eaux.

4.4.2. La confluence Loire - Arroux

La confluence entre la Loire et l'Arroux est plus simple que celle avec l'Allier d'un point de vue hydrologique. Les données de débits sont à nouveau à manier avec prudence. La station de jaugeage de Rigny-sur-Arroux est connue pour être perturbée par la confluence avec la Loire (F. Giroux, communication personnelle). Pour les débits les plus importants, les eaux de la Loire ont tendance à bloquer les eaux de l'Arroux à Digoin. Les débits de l'Arroux pour ces périodes, ne sont donc qu'estimés.

Les calculs des parts de mélange entre la haute Loire et l'Arroux au niveau de la confluence à partir des données de débits, des rapports isotopiques et de la concentration des chlorures fonctionnent mieux qu'à la confluence de l'Allier pour tous les paramètres (tab. 49), excepté pour la période d'étiage. En effet, pour les rapports isotopiques, les gammes de valeur sont plus différenciées entre les trois sites de prélèvements, excepté pour les campagnes où le débit de la Loire à Gien est inférieur à 150 $m^3.s^{-1}$ (tab. 49).

Tab. 49. *Parts de mélange entre la Loire haute et l'Arroux à la confluence Loire – Arroux. Les parts de mélange sont calculées à partir de différents indicateurs : a. débits, b. $\delta^{18}O$, c. δ^2H, d. concentration des*

ions Cl^-, e. synthèse. Les stations de jaugeage utilisées sont, pour la haute Loire, Digoin, pour l'Arroux, Rigny-sur-Arroux et pour la Loire en aval de la confluence, Gilly-sur-Loire. Les prélèvements d'eau ont été réalisés à Vindecy pour la haute Loire, à Rigny-sur-Arroux pour l'Arroux et à Diou pour la Loire en aval de la confluence. Pour les débits, les pourcentages sont calculés à partir des débits de la station amont divisés par les débits de la station aval. Il est donc normal que la somme ne soit pas égale à 100% car ne sont pas pris en compte tous les petits affluents de la zone de la confluence. Les données en vert indiquent la cohérence entre les différents paramètres. Les lignes grisées correspondent aux prélèvements où la mesure à l'aval de la confluence n'est pas comprise entre les deux valeurs de l'amont. Les lignes bleutées indiquent que les marges d'erreur des résultats des différents sites de prélèvements se chevauchent.

a. Débits (en $m^3.s^{-1}$)		haute Loire Digoin	Arroux Rigny-sur-Arroux	Loire aval Gilly	% débits haute Loire	% débits Arroux
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	22/07/2010	59.3	12.6	59.9		
	15/08/2010	18.3	3	26.2	70%	11%
	27/07/2011	18.3	2.2	26.9	68%	8%
	05/11/2011	105	37	123		
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	27/01/2010	86.4	26.8	142	61%	19%
	26/04/2010	23.3	9.8	45.9	51%	21%
	31/05/2010	37.7	11.6	62.3	61%	19%
	28/06/2010	59.6	8.8	78.4	76%	11%
	06/11/2011	187	38.9	236	79%	16%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	28/02/2010	163	148	422	39%	35%
	30/03/2010	91.3	56.6	191	48%	30%
	16/12/2010	87.4	43.5	149	59%	29%

b. $\delta^{18}O$ (‰ vs VSMOW)		haute Loire Vindecy	Arroux Rigny-sur-Arroux	Loire aval Diou	% $\delta^{18}O$ haute Loire	% $\delta^{18}O$ Arroux
Q < 150 $m^3.s^{-1}$	22/07/2010	-6.63	-5.49	-6.82		
	15/08/2010	-7.4	-5.97	-6.97	30%	70%
	27/07/2011	-7.32	-6.55	-6.94	49%	51%
	05/11/2011	-7.21	-7.25	-6.96		
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$	27/01/2010	-8.15	-7.45	-7.79	51%	49%
	26/04/2010	-8.09	-7.42	-7.64	67%	33%
	31/05/2010	-8.72	-6.66	-7.84	43%	57%
	28/06/2010	-8.64	-7.06	-8.17	30%	70%
	06/11/2011	-6.94	-7.69	-7.21	36%	64%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$	28/02/2010	-9.08	-8.18	-8.12		
	30/03/2010	-8.57	-7.65	-8.12	49%	51%
	16/12/2010	-8.49	-7.78	-8.08	58%	42%

c. δ^2H (‰ vs VSMOW)		haute Loire Vindecy	Arroux Rigny-sur-Arroux	Loire aval Diou	% δ^2H haute Loire	% δ^2H Arroux
$Q < 150\ m^3.s^{-1}$	22/07/2010	-43.06	-38.83	-48.03		
	15/08/2010	-54.11	-43.83	-49.7	43%	57%
	27/07/2011	-51.65	-46.49	-47.94	72%	28%
	05/11/2011	-49.62	-50.47	-50.23	72%	28%
$150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$	27/01/2010	-56.14	-49.27	-54.59	23%	77%
	26/04/2010	-57.32	-48.98	-54.22	37%	63%
	31/05/2010	-61.44	-46.1	-55.72	37%	63%
	28/06/2010	-60.31	-49.3	-58.07	20%	80%
	06/11/2011	-51.17	-52.92	-52.1	53%	47%
$Q > 500\ m^3.s^{-1}$	28/02/2010	-60.93	-53.35	-56.39	60%	40%
	30/03/2010	-60.83	-52.01	-55.53	60%	40%
	16/12/2010	-58.2	-53.11	-56.48	34%	66%

d. $[Cl^-]$ $(mg.l^{-1})$		haute Loire Vindecy	Arroux Rigny-sur-Arroux	Loire aval Diou	% $[Cl^-]$ haute Loire	% $[Cl^-]$ Arroux
$Q < 150\ m^3.s^{-1}$	22/07/2010	11.5	18	17.3	89%	11%
	15/08/2010	19.55	18.21	19.87		
	27/07/2011	26.67	20.5	24.88	29%	71%
	05/11/2011	26.13	12.32	25.67	3%	97%
$150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$	27/01/2010	33.97	12.08	26.33	35%	65%
	26/04/2010	20.36	9.99	18.07	22%	78%
	31/05/2010	18.63	12.1	17.77	13%	87%
	28/06/2010	18	12.3	17.1	16%	84%
	06/11/2011	25.79	11.43	23.55	16%	84%
$Q > 500\ m^3.s^{-1}$	28/02/2010	38.12	7.08	18.82	62%	38%
	30/03/2010	21.85	9.19	13.65	65%	35%
	16/12/2010	23.29	11.43	17.57	48%	52%

e. Synthèse		Débits		$\delta^{18}O$		$\delta^{2}H$		[Cl-]	
		% haute Loire	% Arroux	% haute Loire	% Arroux	% haute Loire	% Arroux	% haute Loire	% Arroux
$Q < 150\ m^3.s^{-1}$	22/07/2010							11%	89%
	15/08/2010	70%	11%	70%	30%	57%	43%		
	27/07/2011	68%	8%	51%	49%	28%	72%	71%	29%
	05/11/2011					28%	72%	97%	3%
$150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$	27/01/2010	61%	19%	49%	51%	77%	23%	65%	35%
	26/04/2010	51%	21%	33%	67%	63%	37%	78%	22%
	31/05/2010	61%	19%	57%	43%	63%	37%	87%	13%
	28/06/2010	76%	11%	70%	30%	80%	20%	84%	16%
	06/11/2011	79%	16%	64%	36%	47%	53%	84%	16%
$Q > 500\ m^3.s^{-1}$	28/02/2010	39%	35%			40%	60%	38%	62%
	30/03/2010	48%	30%	51%	49%	40%	60%	35%	65%
	16/12/2010	59%	29%	42%	58%	66%	34%	52%	48%
Moyenne	150 > Q	69%	10%	60%	40%	38%	62%	59%	41%
	150 < Q < 500	65%	17%	55%	45%	66%	34%	80%	20%
	500 < Q	48%	31%	47%	53%	49%	51%	42%	58%
	Toutes données	61%	20%	54%	46%	54%	46%	64%	36%

Les décallages dans les parts de mélange obtenues pour l'Arroux à partir des différents types de données, sont liés au mode de calcul de ces pourcentages. En effet, pour les rapports isotopiques et les concentrations des chlorures, le calcul est réalisé à partir de l'hypothèse qu'il n'existe que deux pôles de mélange : la haute Loire et l'Arroux. Les apports de l'Arroux sont donc surestimés. Pour les débits, les pourcentages sont calculés à partir d'un rapport simple entre le débit amont de la Loire ou de l'Arroux et le débit de la Loire à l'aval de la confluence.

A partir des données de débits, 20% des débits à l'aval de la confluence semblent ne pas être expliqués par les apports de la haute Loire et de l'Arroux. Entre les stations de jaugeage sur la Loire à Digoin et à Gilly-sur-Loire, distantes de 20 km, on trouve quelques petits affluents non jaugés (tab. 50). A cette liste, il faut ajouter la Vouzance (tab. 52), affluent jaugé en rive gauche, longue d'une quarantaine de kilomètres. Cependant, malgré ces apports multiples autres que l'Arroux, que leur somme représente 20% des débits de la Loire à Gilly-sur-Loire paraît surestimée.

Affluents	Rive	Confluence avec la Loire	Longueur du cours d'eau (en km)
Le Blandenan	droite	St Agnan	18
Le Crécou	droite	St Agnan	12
Le Charnay	droite	Perrigny sur Loire	5
Le Loddes	gauche	Pierrefitte sur Loire	32
Le Creuse	droite	Perrigny sur Loire	9
Le Sauvigny	droite	Perrigny sur Loire	13
Le Doulin	droite	Gilly-sur-Loire	13
Le Theil	gauche	Pierrefitte sur Loire	7

Tab. 50. *Petits affluents de la Loire non jaugés entre les stations de jaugeage de Digoin et de Gilly-sur-Loire.*

Malgré les différences dans les modes de calcul, pour les proportions que représentent les apports de la haute Loire, on observe une cohérence entre les résultats issus des données de débits et ceux issus des autres paramètres. Ainsi, on observe une évolution de l'importance des apports de la haute Loire en fonction des gammes de débits. Plus les débits de la Loire augmentent, plus les apports de la haute Loire représentent une part réduite des débits à l'aval de la confluence. Grâce à cette cohérence des résultats obtenus à partir des différents paramètres pris en compte, on peut conclure, qu'à la confluence Loire – Arroux, la haute Loire fournit en moyenne 60% des débits. Cette proportion varie de, environ 65%, en période d'étiage jusqu'à un peu moins de 50%, pour les périodes où les débits de la Loire dépasse 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien.

L'intérêt des prélèvements réalisés des eaux de l'Arroux dépasse la simple étude de la confluence. On peut considérer que les rapports isotopiques obtenus pour les eaux l'Arroux sont représentatifs de l'ensemble des apports provenant du Morvan.

4.5. Importance des apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire amont

La Loire bourbonnaise s'étend de Roanne (juste en aval de Villerest) à Decize, soit sur 150 km de long. Les débits de la Loire y subissent une augmentation importante, par l'apport d'eaux d'affluents drainant le Morvan. Le bassin versant drainé par la Loire à Villerest représente seulement 37% du bassin drainé à Nevers (superficie du bassin versant de la Loire : 6 584 km² à Villerest pour 17 570 km² à Nevers). La Loire bourbonnaise joue donc un rôle important dans les flux de la Loire à son entrée dans le Bassin Parisien (tab. 51).

La proportion de ces apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire à Imphy, augmente d'ailleurs avec le débit de la Loire, pour fournir, en moyenne, 70% du débit de la Loire à Imphy pour des débits supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien (tab. 51). Il faut rappeler ici que les débits de la Loire à Villerest en période d'étiage sont augmentés artificiellement par les lâchers d'eau du barrage de Villerest afin de soutenir les débits en Loire moyenne.

	Moyenne		Ecart-type
	% du débit de la Loire à Villerest dans le débit de la Loire à Imphy	% des apports en Loire bourbonnaise dans le débit de la Loire à Imphy	
Q < 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien	53%	47%	59%
150 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien	38%	62%	33%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien	30%	70%	13%

Tab. 51. *Evolutions de la part des apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire à Imphy pour différentes classes de débits (données de débit du 10/01/2010 au 31/01/2012). La somme des apports des affluents de la Loire en Loire bourbonnaise est obtenue en soustrayant le débit de la Loire à Villerest (limite amont de la Loire bourbonnaise) à celui à Imphy (limite aval de la Loire bourbonnaise).*

Les apports des affluents provenant du Morvan, l'Arroux et l'Aron, participent à cette augmentation des débits en Loire bourbonnaise mais ils ne sont pas les seuls tributaires. En effet, de nombreux cours d'eau, essentiellement en rive droite, mais de moindre importance, rejoignent la Loire entre Roanne et Decize (tab. 52). En travaillant sur la différence des débits de la Loire entre Villerest et Imphy, on étudie donc, non seulement l'influence du Morvan, mais également l'influence des autres affluents et des nappes alluviales de ce tronçon. Néanmoins, les

affluents en rive gauche, excepté la Besbre (module de 8.9 $m^3.s^{-1}$), sont peu nombreux et peu abondants (tab. 52). Ces affluents jaugés de la Loire en rive gauche représentent 12% de la somme des superficies des bassins versants jaugés affluents de la Loire en Loire bourbonnaise, et 12% de la somme de leurs modules. Les affluents de la Loire drainant le Morvan, l'Arroux et l'Aron, ainsi que leurs propres affluents, représentent à eux seuls 66% de la superficie des bassins versants jaugés affluents de la Loire en Loire bourbonnaise et 65% de la somme des modules recencés dans le tableau 52.

Confluence (d'amont en aval)	Affluents de la Loire	Rive	Longueur (en km)	Superficie du bassin versant (en km^2)	Altitude source (en m)	Altitude confluence (en m)	Module (en $m^3.s^{-1}$)	Localisation station de jaugeage	Superficie du bassin versant jaugé (en km^2)
Roanne	Le Rhins	droite	60				5,3	Saint-Cyr-de-Favières	427
	Le Rhodon	droite	13				0,22	Perreux	32
	Le Sornin	droite	47		595	256	6,9	Charlieu	457
	La Teysonne	gauche	30	162	600	262	0,33	Changy	23
	L'Arconce	droite	100				5,8	Montceaux-l'Etoile	599
Digoin	L'Arroux	droite	132		420	220	34,4	Digoin	3166
	La Vouzance	gauche	41		490	224	0,79	Saint-Léger-sur-Vouzance	131
Diou	La Besbre	gauche	106	762	1185	212	8,9	Saint-Pourçain-sur-Besbre	710
Decize	L'Aron	droite	103		327	188	17,7	Verneuil	1465

Tab. 52. *Les affluents jaugés de la Loire en Loire bourbonnaise, entre Villerest et Decize.*

Dans ces conditions, l'utilisation de la signature isotopique des eaux de l'Arroux comme indicateur de l'ensemble des apports en Loire bourbonnaise est envisageable, bien qu'il conviendra de vérifier la cohérence de ce choix.

4.5.1. Apports des analyses géochimiques réalisées durant les années 2010 et 2011

Tout d'abord, il convient de vérifier que les signatures isotopiques de l'Arroux peuvent être utilisées comme indicateur de la signature isotopique l'ensemble des apports à la Loire en Loire bourbonnaise. En utilisant les données de débits de la Loire à Villerest combinées aux rapports isotopiques obtenus à Vindecy, ainsi que les débits de la Loire à Imphy combinés aux rapports isotopiques à Imphy, on peut estimer la signature isotopique moyenne des apports en Loire bourbonnaise pour chaque campagne de prélèvements réalisée, à partir de la relation suivante (de même pour δ^2H) :

$$\delta^{18}O_{\text{Loire bourbonnaise}} = (\delta^{18}O_{\text{Imphy}} \times Q_{\text{Imphy}} - \delta^{18}O_{\text{Vindecy}} \times Q_{\text{Villerest}}) / Q_{\text{Imphy-Villerest}}$$

Les rapports isotopiques ainsi obtenus sont représentés (figurés vert foncé) dans la figure 127. Le résultat de la comparaison entre ces rapports isotopiques calculés et ceux, mesurés, des eaux de l'Arroux montre que pour les débits de la Loire à Gien supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$, les signatures isotopiques calculées de la Loire bourbonnaise sont systématiquement situées dans la marge d'erreur de l'analyse des signatures isotopiques de l'Arroux. De même pour la campagne où le débit de la Loire à Gien est compris entre 200 et 500 $m^3.s^{-1}$ (campagne de fin juin 2010, fig. 127 : figurés ronds sur le graphique des débits de la Loire à Gien compris entre 150 et 500 $m^3.s^{-1}$), contrairement à celles pour des débits inférieurs à 200 $m^3.s^{-1}$. Les signatures isotopiques de l'Arroux seront donc utilisées comme indicateur de l'ensemble de apports à la Loire en Loire bourbonnaise seulement pour les campagnes de prélèvements où le débit de la Loire à Gien dépasse 200 $m^3.s^{-1}$.

Ce résultat s'explique par deux types de situation hydrologique différents. D'après les données de débits dont on dispose, ce n'est pas la proportion des apports d'eau par les principaux affluents de la Loire bourbonnaise, autres que l'Arroux et l'Aron, qui explique pourquoi les signatures isotopiques des apports en Loire bourbonnaise s'éloignent de celles de l'Arroux pour les plus faibles débits.

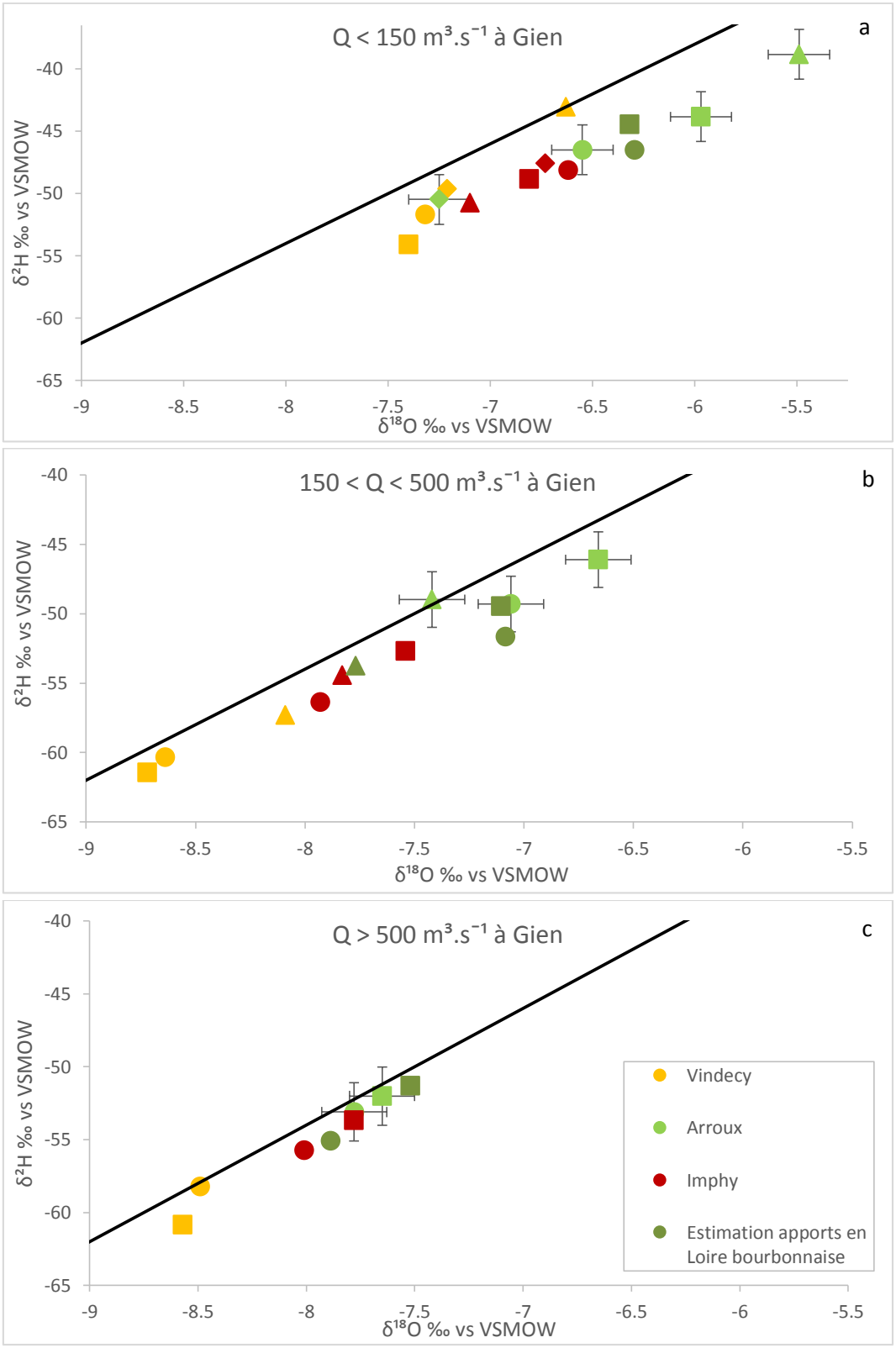


Fig. 127. *Importance des apports du Morvan dans les débits de la Loire à Imphy pour différentes gammes de débits de la Loire à Gien (a : débits de la Loire à Gien inférieurs à 150 m³.s⁻¹ ; b : débits entre 150 et 500 m³.s⁻¹ ; c : débits supérieurs à 500 m³.s⁻¹).*

En effet, la somme des apports moyens mensuels du Rhins, du Sornin, de l'Arconce et de la Besbre représente entre 11 et 17% du débit moyen mensuel de la Loire à Nevers selon les mois (tab. 53), pour la période de l'étude (01/01/2010 au 31/12/2012). Cette proportion est remarquablement stable.

Par contre, la proportion que représente la somme des débits moyens mensuels de l'Arroux et de l'Aron dans ceux de la Loire à Nevers, elle, varie. En période de hautes-eaux, les affluents du Morvan fournissent entre 35 et 48% des débits de la Loire à Nevers, et en période de basses-eaux, seulement entre 17 et 18% selon les mois considérés (tab. 53). Cette baisse relative des apports du Morvan pour les plus faibles débits, cumulée aux probables apports des nappes alluviales, explique que pour les débits de la Loire inférieurs à 200 $m^3.s^{-1}$ à Gien, la signature isotopique des eaux de l'Arroux soit moins représentative de celle de l'ensemble des apports cumulés en Loire bourbonnaise. Il convient néanmoins de noter ici que les eaux de l'Arroux sont représentatives de l'ensemble de ces apports pour les débits les plus importants car les altitudes de son bassin versant sont elles-même représentatives des altitudes des autres bassins versants affluents en Loire bourbonnaise.

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Somme de l'Arroux et de l'Aron	39%	35%	30%	26%	20%	19%	17%	18%	17%	20%	26%	48%
Somme du Rhins, du Sornin, de l'Arconce et de la Besbre	17%	17%	16%	15%	12%	11%	14%	14%	11%	14%	14%	16%

Tab. 53. *Moyennes mensuelles de la proportion que représentent d'une part les affluents drainant le Morvan (Arroux à Digoin et Aron) et d'autre part les autres affluents significatifs de la Loire bourbonnaise (Rhins, Sornin, Arconce et Besbre) dans les débits de la Loire à Nevers, du 01/01/2010 au 31/01/2012 (voir tab.52).*

D'après les données de débits, les apports du Morvan sont donc relativement moins importants en période d'étiage que pendant les hautes-eaux. La figure 127 illustre également cette évolution saisonière. **Les signatures isotopiques des eaux de la Loire à Imphy sont de plus en plus proches de celles de l'Arroux quand les débits de la Loire augmentent.** Ceci est particulièrement visible pour les situations hydrologiques où les débits de la Loire à Gien dépassent 500 $m^3.s^{-1}$.

		Débits		$\delta^{18}O$		$\delta^{2}H$		[Cl-]	
		% Apports haute Loire (Villerest)	% Apports affluents de la Loire bourbonnaise	% haute Loire (Vindecy)	% Loire bourbonnaise (Arroux)	% haute Loire (Vindecy)	% Loire bourbonnaise (Arroux)	% haute Loire (Vindecy)	% Loire bourbonnaise (Arroux)
		dans les débits de la Loire à Imphy		dans les eaux de la Loire à Imphy					
200 < Q < 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien	06/11/2011	70%	30%	63%	37%			62%	38%
	28/06/2010	54%	46%	55%	45%	64%	36%	70%	30%
	27/01/2010	24%	76%			20%	80%	23%	77%
Q > 500 $m^3.s^{-1}$ à Gien	28/02/2010	22%	78%			28%	72%	16%	84%
	30/03/2010	25%	75%	14%	86%	19%	81%	13%	87%
	16/12/2010	20%	80%	32%	68%	51%	49%	30%	70%

Tab. 54. *Parts de mélange entre la haute Loire à Villerest et les apports des affluents de la Loire bourbonnaise dans les eaux de la Loire à Imphy. Les campagnes sont classés par débit croissant. Les données en vert indiquent une cohérence entre tous les paramètres considérés ; les données en orange indiquent une cohérence seulement entre certains paramètres.*

Après avoir sélectionné uniquement les campagnes de prélèvements pendant lesquelles le débit de la Loire à Gien dépassait les 200 $m^3.s^{-1}$, et avoir calculé les parts de mélange entre les eaux de la Loire à Villerest et les apports des affluents en Loire bourbonnaise (à partir des données de l'Arroux) dans les eaux de la Loire à Imphy (tab. 54), les différents paramètres utilisés révèlent une cohérence importante dans les résultats pour une même campagne de prélèvements.

De plus, ces résultats soulignent une inversion des proportions entre les apports provenant de la haute Loire et ceux de la Loire bourbonnaise. Pour les deux campagnes dont les débits de la Loire à Gien sont les plus proches de 200 $m^3.s^{-1}$, la haute Loire fournit en moyenne 60% des eaux à Imphy et la Loire bourbonnaise 40%. Pour les trois campagnes de prélèvements où les débits de la Loire à Gien dépassaient les 500 $m^3.s^{-1}$, la Loire bourbonnaise a fourni en moyenne 75% des eaux de la Loire à Imphy, contre 25% pour la haute Loire. Ces proportions moyennes obtenues à partir des isotopes stables de l'eau et des chlorures sont cohérentes avec celles obtenues à partir des débits des jours concernés par les prélèvements.

Pour synthétiser les apports des méthodes de la géochimie à la connaissance de la variabilité des apports du Morvan dans les débits de la Loire à son entrée dans le Bassin Parisien, on peut rappeler que les apports du Morvan sont réduits en période d'étiage, c'est-à-dire en période estivale (étude de la confluence Loire-Arroux).

De plus, pour les débits de la Loire supérieurs à 200 $m^3.s^{-1}$ à Gien, les apports en Loire bourbonnaise représentent entre 40 et 75% des eaux de la Loire à Imphy, c'est-à dire qu'ils peuvent être responsables de plus du doublement du débit de la Loire entre Villerest et Imphy. Les affluents drainant le Morvan sont les principaux responsables de ces apports et de leur augmentation relative pendant les périodes où les débits de la Loire sont les plus élevés.

La nuance à apporter à cette conclusion est le fait qu'aucune crue n'a pu faire l'objet d'un tel suivi géochimique durant la thèse. Pour les crues hivernales, l'importance des apports du Morvan pourrait sûrement être démontrée, mais pour des crues de type cévenol, les eaux qui les composent proviennent évidemment essentiellement de la haute Loire.

4.5.2. Validation des résultats grâce à 40 ans de données de débits

Les particularités de l'année hydrologique (2009-2010) pendant laquelle a été réalisée la majorité des campagnes de prélèvements nécessitent de les valider à l'aide des chroniques de débits. Les chroniques de débits dont dispose la Dreal pour les affluents de la Loire bourbonnaise débutent au plus tard en 1970. L'étude des débits en Loire bourbonnaise porte donc sur les années 1970 à 2011.

Le **coefficient d'abondance mensuelle** est défini comme le rapport de la moyenne mensuelle des QJM (débits moyens journaliers) par la moyenne annuelle des QJM (de l'année concernée). Il renseigne donc sur la répartition des débits dans l'année. Il permet de mettre en exergue les variations saisonnières distinctes pour les différents apports à la Loire en Loire bourbonnaise.

La comparaison entre les coefficients d'abondance mensuelle de l'Arroux et de la Loire à Villerest (fig. 128) permet d'identifier les différences dans la saisonnalité de leur régime. Pour les trois mois des hautes-eaux, de décembre à février, les coefficients d'abondance mensuelle de l'Arroux, mais également de l'Aron et de l'Arconce (coefficient proche de 2) sont plus importants que ceux de la Loire à Villerest (coefficient inférieur à 1.5). Du mois d'avril à octobre, c'est pour la

Loire à Villerest que les coefficients d'abondance mensuelle sont plus importants que ceux des affluents drainant le Morvan. A cette période, la Loire à Villerest est donc relativement plus abondante que les affluents de la Loire bourbonnaise, par rapport à leur abondance annuelle respective, notamment au mois de mai et septembre. Cette abondance au mois de septembre révèle les influences climatiques cévenoles provenant de l'amont du bassin de la Loire.

L'évolution des coefficients d'abondance mensuelle de la Loire bourbonnaise indique l'influence progressive du Morvan. Les valeurs pour la Loire à Digoin, où la Loire n'a collecté que les eaux de l'Arconce, sont encore très proches de celles de la Loire à Villerest. Mais ensuite, dès la station de Gilly-sur-Loire, on observe que l'influence du Morvan est maximale étant donné le peu de variations des valeurs entre Gilly-sur-Loire et Nevers. L'abondance relative des affluents drainant le Morvan en période de hautes-eaux et leur pauvreté relative en période d'étiage sont donc confirmées par les données de débits.

D'après la figure 129, l'inversion des proportions entre les apports de la haute Loire et de la Loire bourbonnaise dans les débits à Nevers est confirmée en fin d'étiage. Les apports de la haute Loire atteignent en moyenne 60% au mois de septembre et 50% en août et octobre. Pendant les hautes-eaux, les apports de la haute Loire ne représentent en moyenne plus que 30% des débits à Nevers. Pour le printemps et la fin de l'automne, les apports se stabilisent autour de 40%.

De plus, les apports des affluents jaugés en Loire bourbonnaise, excepté ceux drainants le Morvan, sont très stables au long de l'année hydrologique (environ 15% des débits de la Loire à Nevers). La part des débits non expliqués, qui correspondent aux affluents non jaugés de la Loire bourbonnaise, ont un comportement intermédiaire entre les aflluents drainant le Morvan et les autres affluents du secteur. La stabilité des apports des affluents autres que l'Arroux et l'Aron confirme donc que la variabilité des apports en Loire bourbonnaise dépend de ces affluents drainant le Morvan. Le gonflement des débits en hautes-eaux est donc attribuable au Morvan. Les débits de la Loire sont donc au moins multipliés par deux en Loire bourbonnaise (excepté au mois de septembre), et même par près de 2,5 en période de hautes-eaux.

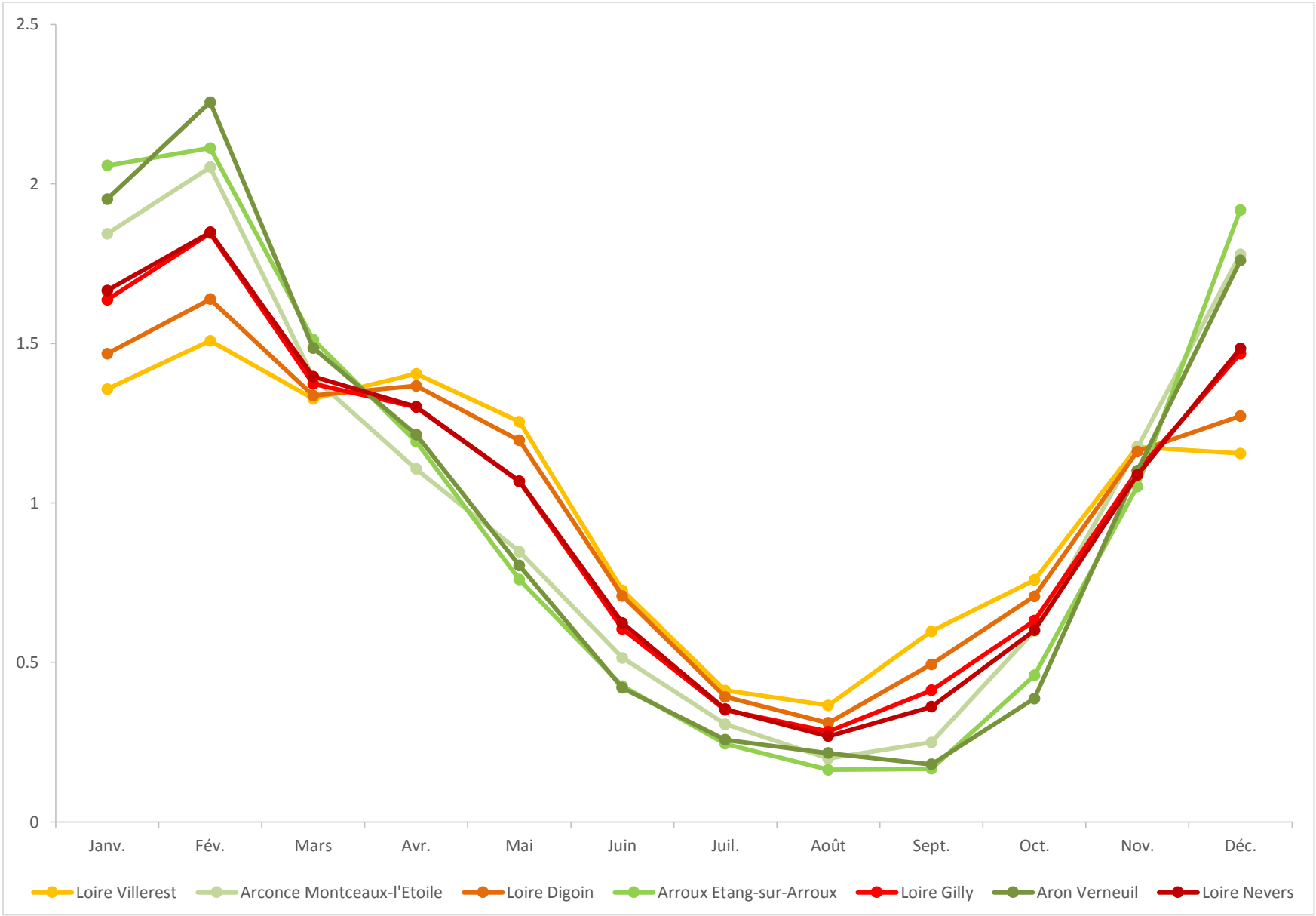


Fig. 128. *Moyennes des coefficients d'abondance mensuelle en Loire bourbonnaise (1970-2011).*

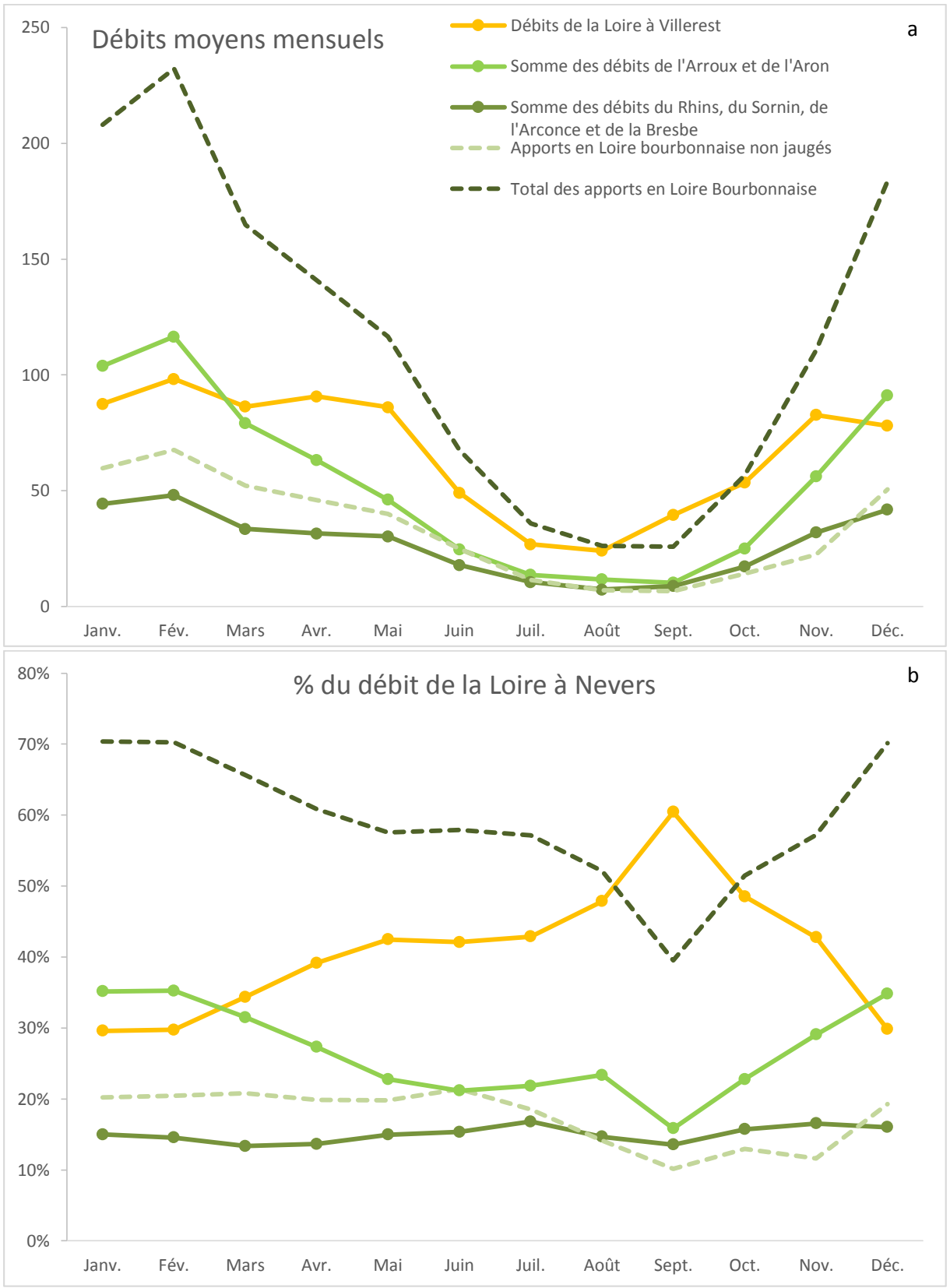


Fig. 129. *Synthèse des débits moyens mensuels en Loire bourbonnaise (a) et de la proportion des différents apports par rapport au débit de la Loire à Nevers (b) (1970-2011).*

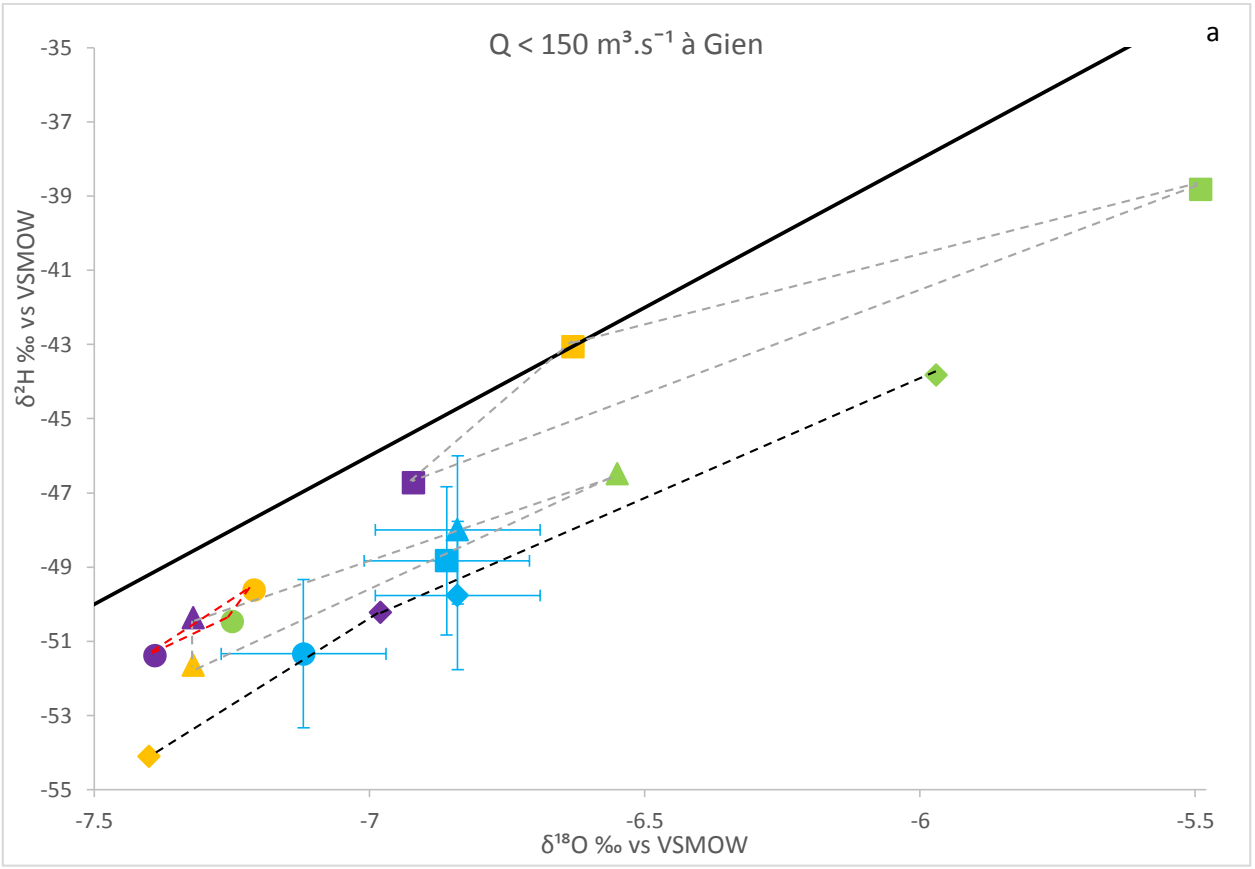
4.6. Importance des apports de la haute Loire, de l'Alllier et du Morvan dans les débits de la Loire moyenne

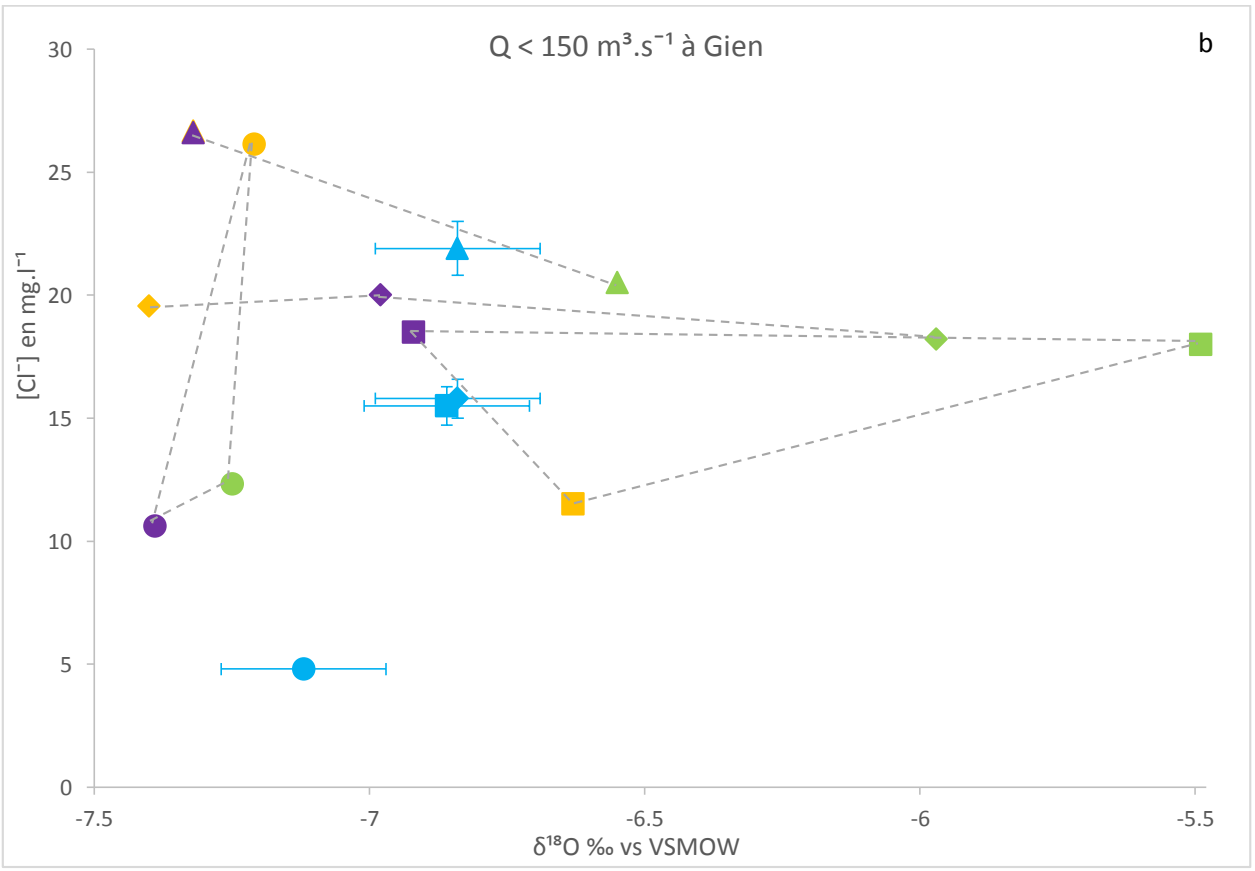
Pour conclure ce chapitre, la synthèse des résultats présentés ci-dessus est la détermination des parts de mélange, à l'entrée en Loire moyenne, des apports provenant des trois bassins amont majeurs : la haute Loire, le Morvan et l'Allier. Les graphiques (fig. 130) réunissant les résultats du suivi géochimique (^{18}O, ^{2}H, Cl^-), par gamme de débits (débits de la Loire à Gien, inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$, compris entre 150 et 500 $m^3.s^{-1}$ et supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$), représentant, pour chaque campagne de prélèvements, les 3 pôles de mélange (Vindecy pour la haute Loire, Rigny-sur-Arroux pour le Morvan, Le Guétin pour l'Allier) ainsi que le résultat de ces mélanges en Loire moyenne (La-Charité-sur-Loire) illustrent la compléxité du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne.

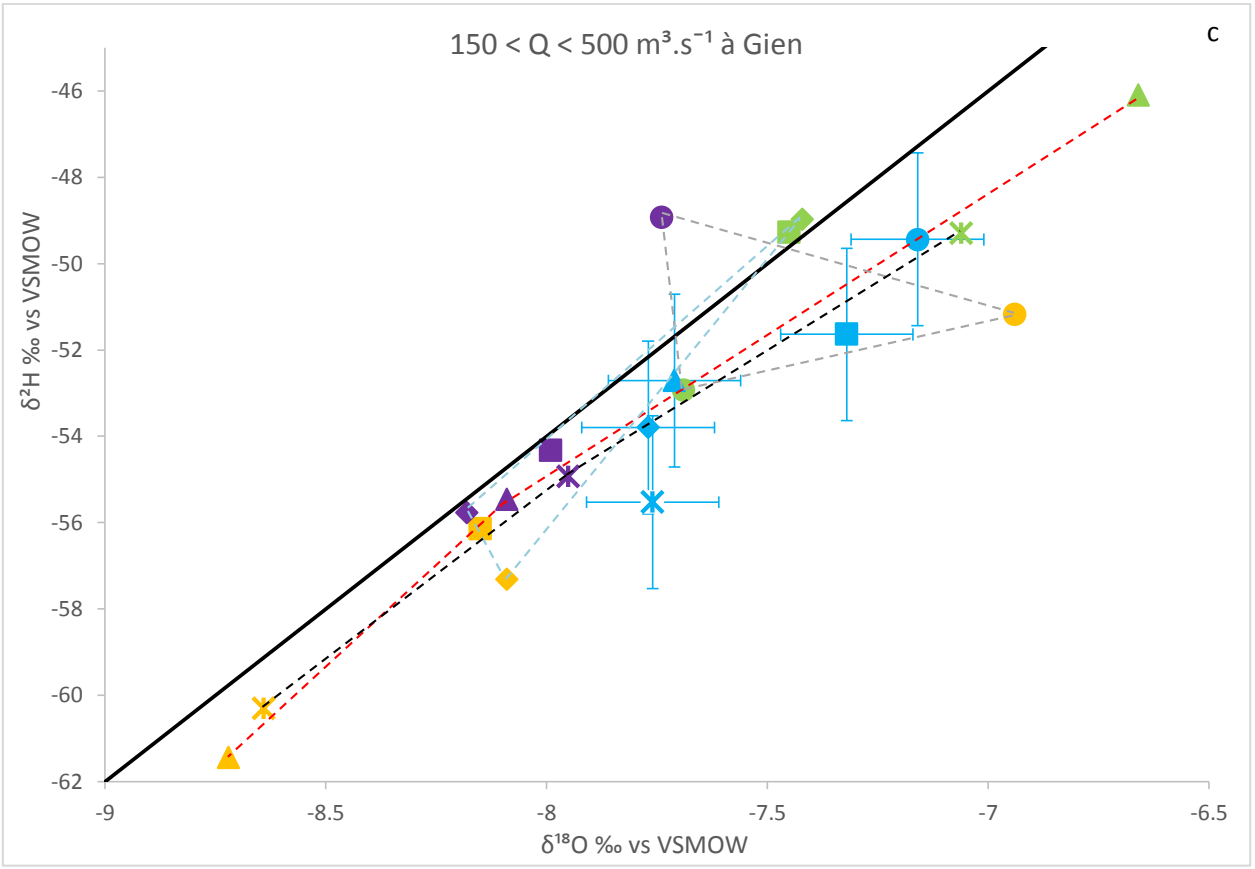
Pour les débits de la Loire à Gien inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$, il est toujours impossible de conclure. Il manque un pôle de mélange, qui est très probablement l'apport des nappes alluviales (moyenne des données estivales de la nappe alluviale dans le secteur du Bec d'Allier $\delta^{18}O$ = - 7,1‰ ; $\delta^{2}H$ = - 50,2‰ ; Négrel et al., 2001). Néanmoins, à partir de situations très similaires en termes de débits (entre 91 et 111 $m^3.s^{-1}$ à Gien), il est intéressant de constater qu'ils peuvent relever de mélanges différents entre les apports. Pour la campagne de juillet 2011 (triangles sur la fig. 130), les données de La-Charité-sur-Loire s'approchent de celles du Morvan. Pour les campagnes de juillet 2010 (carrés sur la fig. 130) et août 2010 (losanges sur la fig. 130), ce sont plutôt les pôles de la haute Loire et l'Allier qui sont les principaux acteurs des parts de mélange.

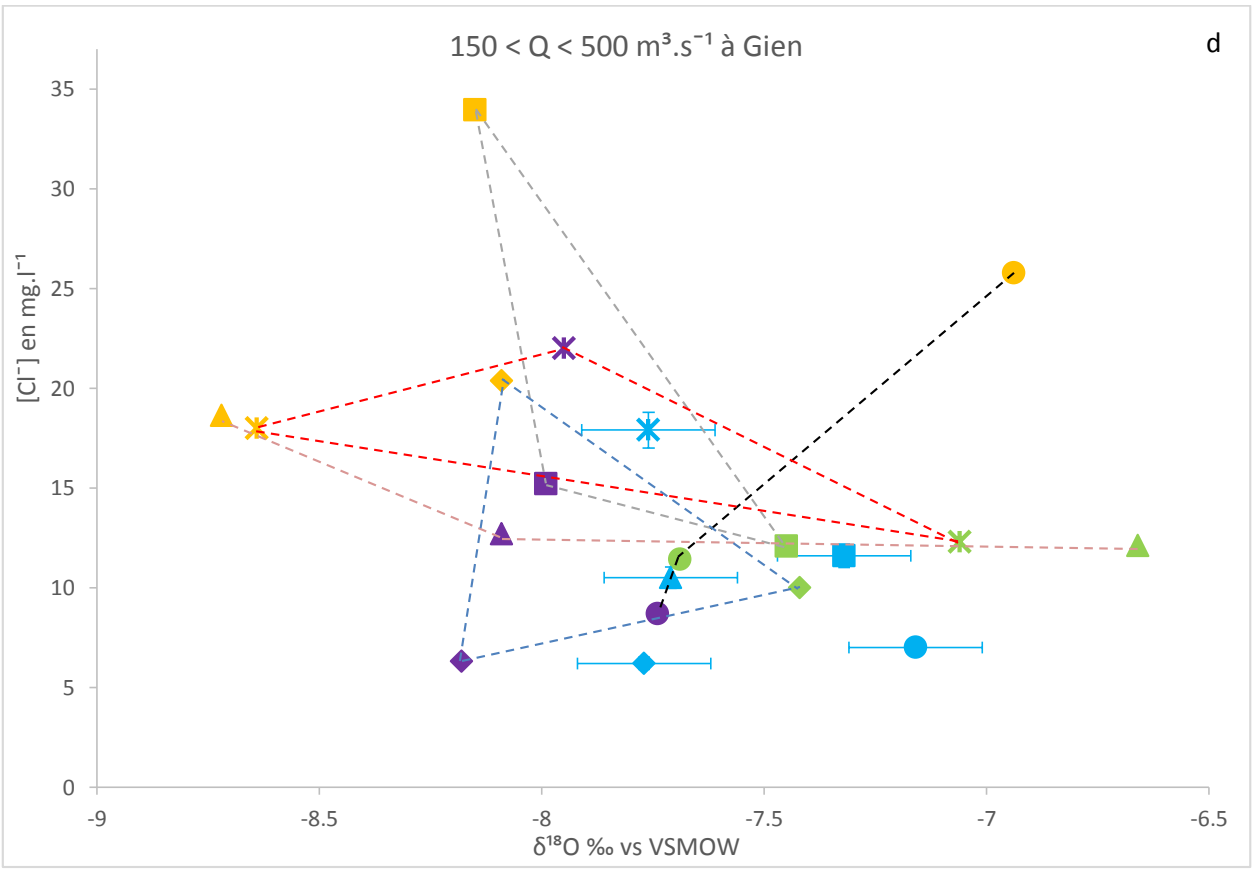
Fig. 130. ***Mélanges des apports de la haute Loire*** *(orange),* ***du Morvan*** *(vert)* ***et de l'Allier*** *(violet)* ***à l'entrée de la Loire moyenne (bleu) à partir des rapports isotopiques*** *(a, c, e)* ***et des concentrations des chlorures*** *(b, d, f)****, pour différentes gammes de débits de la Loire à Gien*** *(a et b : débits de la Loire à Gien inférieurs à 150 $m^3.s^{-1}$; c et d : entre 150 et 500 $m^3.s^{-1}$; e et f : supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$).*

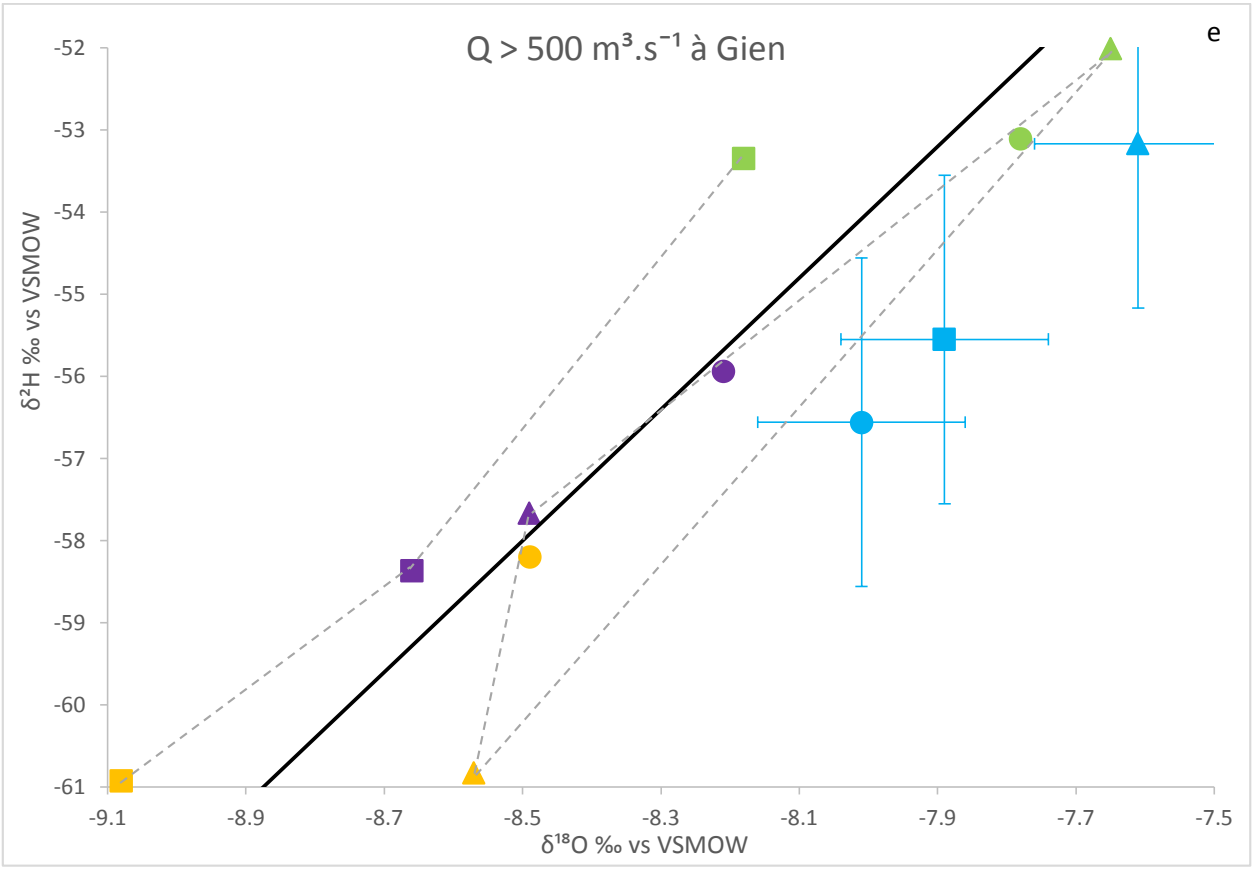
Les données des trois pôles de mélange d'une même campagne sont reliées entre elles. Les échelles des graphiques ne sont pas harmonisées afin de faciliter la lecture. Les marges d'erreur liées aux analyses ne sont représentées que pour les données de La-Charité-sur-Loire afin de ne pas surcharger les graphiques.

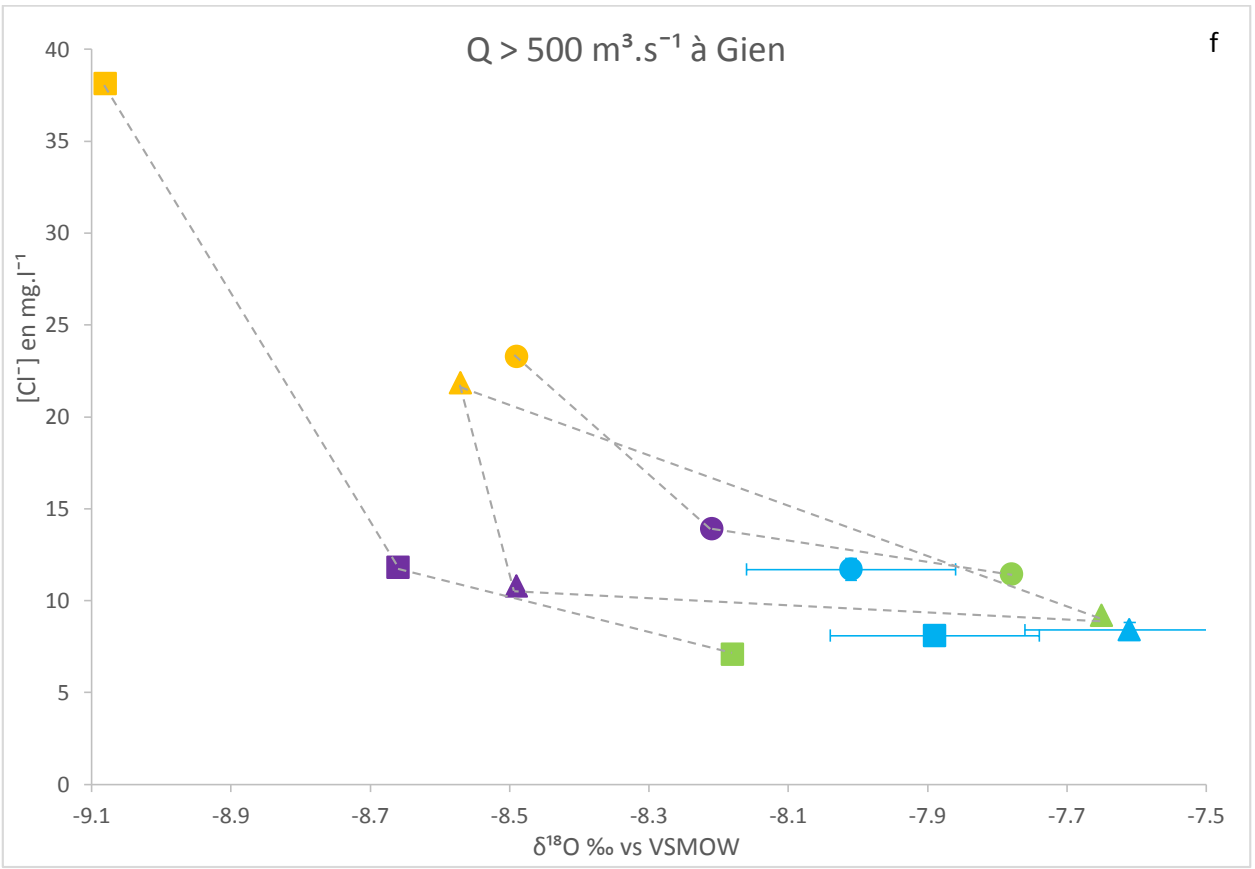

Q < 150 m³.s⁻¹ à Gien
a
δ²H ‰ vs VSMOW
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW
-35
-37
-39
-41
-43
-45
-47
-49
-51
-53
-55
-7.5
-7
-6.5
-6
-5.5


Q < 150 m³.s⁻¹ à Gien
b
[Cl⁻] en mg.l⁻¹
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW
30
25
20
15
10
5
0
-7.5
-7
-6.5
-6
-5.5


150 < Q < 500 m³.s⁻¹ à Gien
c
δ²H ‰ vs VSMOW
-46
-48
-50
-52
-54
-56
-58
-60
-62
-9
-8.5
-8
-7.5
-7
-6.5
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW


150 < Q < 500 m³.s⁻¹ à Gien
d
[Cl⁻] en mg.l⁻¹
35
30
25
20
15
10
5
0
-9
-8.5
-8
-7.5
-7
-6.5
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW


e
Q > 500 m³.s⁻¹ à Gien
δ²H ‰ vs VSMOW
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW
-52
-53
-54
-55
-56
-57
-58
-59
-60
-61
-9.1
-8.9
-8.7
-8.5
-8.3
-8.1
-7.9
-7.7
-7.5


f
Q > 500 m³.s⁻¹ à Gien
[Cl⁻] en mg.l⁻¹
δ¹⁸O ‰ vs VSMOW
40
35
30
25
20
15
10
5
0
-9.1
-8.9
-8.7
-8.5
-8.3
-8.1
-7.9
-7.7
-7.5

Pour les débits de Loire à Gien compris entre 150 et 500 $m^3.s^{-1}$, à nouveau, les données isotopiques ne peuvent pas s'expliquer par un simple mélange à trois pôles. Il manque à nouveau un pôle mélange pour expliquer les données à La-Charité-sur-Loire : un pôle ayant les caractéristiques isotopiques des précipitations à Orléans (moyenne pondérée pour les mois d'octobre à mars des précipitations à Orléans : $\delta^{18}O$ = - 6,9‰ ; $\delta^{2}H$ = -45‰ ; Chéry et al., 2004).

En effet, l'influence des apports de la haute Loire semble être réduite par rapport aux apports des autres cours d'eau échantillonés, car les données à La-Charité-sur-Loire se situent la plus part du temps entre celles de l'Allier et du Morvan. Cependant, sur le second graphique, $[Cl^-]$ = f ($\delta^{18}O$) où les pôles de mélange sont plus différenciés, il est visible que les données à l'entrée de la Loire moyenne se rapprochent en fait d'un pôle pauvre en chlorure et enrichi du point de vue isotopique, c'est-à-dire les caractéristiques des précipitations à Orléans.

Pour les débits de la Loire à Gien supérieurs à 500 $m^3.s^{-1}$, les conclusions sont identiques à la gamme de débits précédente, mais de façon encore plus nette.

D'après ces graphiques, l'importance des apports de la haute Loire, dans la formation des débits à l'entrée de la Loire moyenne, semble réduite, excepté pendant l'étiage. Les apports de l'Allier semblent prendre une part importante dans les mélanges, quelle que soit la saison hydrologique. L'influence des apports du Morvan est elle plus marquée pour les débits de la Loire supérieurs à 150 $m^3.s^{-1}$ à Gien. Enfin, les apports locaux à l'entrée de la Loire moyenne, qu'ils s'agissent des nappes alluviales ou bien des précipitations locales, semblent jouer un rôle non négligeable dans l'explication de ces débits.

Les méthodes de la géochimie élémentaire, et surtout isotopique, ont donc permis d'étudier l'évolution des caractéristiques des eaux de la Loire, d'amont en aval, en fonction des apports successifs des affluents et des processus physiques et biologiques qui les modifient.

Bien que les concentrations des éléments majeurs soient trop perturbées par des sources anthropiques, ou trop peu conservées, pour intervenir dans la définition des parts de mélange dans les eaux de la Loire, elles ont permis la mise en évidence des caractéristiques spécifiques des eaux des bassins amont.

De plus, on a vu que les résultats des études des signatures isotopiques sont bien plus limités par la complexité des fonctionnements hydrologiques de certaines zones que par la fiabilité des mesures obtenues (difficulté de définir les pôles de mélange qui se trouvent dans les marges d'erreur de l'analyse). Ainsi, à partir des signatures isotopiques, ont pu être définies des parts de mélange entre les principaux bassins amont contribuant aux débits de la Loire bourbonnaise, qui sont validées par les données de débits.

Le rôle déterminant du Morvan, en période de hautes-eaux, en Loire bourbonnaise a ainsi pu être démontré et quantifié.

Il faut préciser ici, que, lors de la dernière étude globale majeure de l'hydrologie de la Loire moyenne (Dacharry, 1974), la mise en service de la station de jaugeage de Rigny-sur-Arroux sur l'Arroux ne datait que de 7 ans. Dans ce précédent travail, le rôle du Morvan, et plus particulièrement celui de l'Arroux n'a donc pas pu être démontré, faute de chroniques de débits suffisantes (à l'époque, aucun des affluents de la Loire drainant le Morvan n'avait pu faire l'objet d'une étude en tant que bassin témoin). Néanmoins, le rôle primordial des affluents de la Loire bourbonnaise en période de hautes-eaux avait été démontré par l'intermédiaire de l'évolution des coefficients d'abondance mensuelle de la Loire entre les stations de Digoin, de Givry-sur-Loire et de Nevers. Ces observations permettaient à M. Dacharry de conclure : « la comparaison entre les apports de la Loire en amont de Digoin, d'une part et de Digoin à Nevers, d'autre part, a bien montré que les eaux d'hiver les plus abondantes sont fournies par le second secteur du bassin et non par le premier, ce qui est essentiel et ne semble pourtant pas avoir retenu jusqu'à maintenant l'attention » (Dacharry, 1974, I, p. 290).

Les résultats concernant la quantification des apports provenant du Morvan, présentés dans ce quatrième chapitre, sont donc tout à fait novateurs dans l'étude de la formation des débits de la Loire moyenne.

A l'entrée en Loire moyenne, ce sont principalement les eaux de l'Allier, du Morvan et des apports locaux (nappes et précipitations) qui permettent d'expliquer l'évolution des débits. Il convient de rappeler que malheureusement aucune crue de type cévenole n'a fait l'objet d'un suivi pendant la durée de la thèse. **Les apports de la haute Loire sont donc significatifs en Loire moyenne en période d'étiage mais également ponctuellement lors d'épisodes cévenols non décrits ici.**

Synthèse des résultats du 4ème chapitre

- Les concentrations des éléments majeurs de la Loire mettent en exergue les variations saisonnières et leur relation au débit, en adéquation avec les processus physiques et biologiques qui contrôlent les différents éléments.

- Le suivi géochimique des eaux de la Loire entre Roanne et Orléans a permis de définir les principales caractéristiques qui différencient les eaux des bassins amont (haute Loire, Allier et Morvan), afin de mettre en évidence leurs mélanges au fil du cours de la Loire.

- La complexité des apports d'eau au niveau de la confluence Loire- Allier n'a pas permis le calcul des apports de l'Allier, à partir des données géochimiques.

- Les apports des affluents en Loire bourbonnaise entraînent, au moins, le doublement des débits de la Loire entre Villerest et Nevers (excepté au mois de septembre).

- Les variations saisonnières des apports des affluents en Loire bourbonnaise sont importantes et permettent de démontrer que les affluents drainant le Massif du Morvan sont les principaux contributeurs à cette augmentation du débit de la Loire en Loire bourbonnaise en période de hautes eaux.

- Le Morvan a une influence très significative sur les débits de la Loire à Nevers en période de hautes eaux (35%) alors que son rôle est réduit en période d'étiage (20%).

- La synthèse des apports des bassins de la haute Loire, du Morvan et de l'Allier à l'entrée de la Loire moyenne est complexifiée par les apports locaux non étudiés ici.

- L'influence de la haute Loire en comparaison de celle de l'Allier et du Morvan semble réduite dans la formation des débits à l'aval du Bec d'Allier, ecxepté en période d'étiage.

Pour conclure cette deuxième partie, l'étude statistique des longues chroniques de débits à Blois ainsi que le suivi géochimique des eaux de la Loire depuis la Loire bourbonnaise ont permis de mettre en lumière l'importance des bassins amont dans la compréhension de la formation des débits de la Loire moyenne. Le rôle de ces bassins amont est primordial en tant que tributaires. Leur suivi et l'approfondissement de leurs possibles évolutions hydrologiques représentent les principales perspectives de recherche.

En effet, l'anticipation de possibles évolutions en Loire moyenne en termes d'abondance de la ressource en eau ou de sa qualité est un enjeu essentiel pour les gestionnaires du bassin ligérien. On l'a vu, les débits de la Loire moyenne ne présentent pas d'évolutions majeures, ou inquiétantes. Des tendances dans l'occurrence des basses-eaux, des hautes-eaux et des débits à plein bord ont été relevées qui sont importantes à connaître. Le facteur qui impacte le plus aujourd'hui l'hydrologie de la Loire moyenne est la politique de soutien des débits d'étiage menée grâce aux deux barrages de Villerest et de Naussac.

Cependant, les évolutions hydrologiques possibles causées par le changement climatique actuel auront leurs premiers effets sur les bassins amont, notamment sur les régimes de type cévenol. La possibilité que ces évolutions hydrologiques soient de faible ampleur est réaliste tant qu'il n'est pas question des extrêmes hydrologiques. Or, dans les prévisions des impacts du changement climatique sur l'hydrologie continentale à nos latitudes l'accent est notamment porté sur l'évolution de ces extrêmes. Ce seraient donc les bassins amont qui transmettraient à la Loire moyenne ces évolutions.

Ainsi, l'étude approfondie de l'hydrologie des bassins amont, leur suivi, l'étude des processus physiques qui ont pu par le passé impacter les débits de ces bassins affluents de la Loire moyenne, même à l'échelle de petits bassins, toutes ces problématiques doivent être prises en compte par les gestionnaires. La complexité du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne est importante. Pour la dépasser, les réponses sont à rechercher à l'amont de ce vaste bassin.

Le dernier acteur de l'explication des débits en Loire moyenne est la nappe alluviale. Son rôle a été d'ores et déjà abordé sous forme d'hypothèse pour expliquer les apports d'eau non jaugés en période estivale. Les nappes alluviales jouent un rôle majeur dans la diffusion des débits de la Loire dans sa plaine alluviale, par la recharge de ces nappes par la Loire en période de hautes eaux. Mais elles fournissent également à la Loire d'importants apports en période d'étiage. Le fonctionnement de ce système Loire – nappes alluviales en Loire moyenne est l'objet de la troisième et dernière partie de cette thèse.

Troisième partie

Interactions des eaux de la Loire moyenne au sein de sa plaine alluviale

Sommaire de la troisième partie :

Introduction de la troisième partie ……..289

Chapitre 5 – Fonctionnement hydrologique d'une plaine alluviale de la Loire moyenne – Analyse des connectivités hydrologiques entre la Loire et la nappe alluviale sur le site du méandre de Guilly ……..290

5.1. Le site-atelier du méandre de Guilly ……290

5.1.1. Une morphologie fluviale héritée, liée à l'évolution des usages autour du fleuve .293
5.1.2. Dépôts alluvionnaires au sein du méandre et encaissant de la nappe alluviale ……295
5.1.3. Expansion des crues de la Loire et remise en eau du méandre ……297

5.2. Méthodologie d'analyse des échanges d'eau entre les différents réservoirs hydrologiques sur le site du méandre de Guilly ……302

5.2.1. Le choix des sites et protocole du suivi piézométrique et géochimique ……302
5.2.2. Validation des sites choisis et des données géochimiques ……308
5.2.3. Méthodes de traitements des données ……314

5.3. Caractérisation de la chimie des différentes masses d'eau en présence ……318

5.3.1. Les précipitations ……322
5.3.2. La nappe de Beauce ……323
5.3.3. Une zone humide : le Trou Robert ……323
5.3.4. La nappe alluviale ……324
5.3.5. Influences des activités agricoles sur la chimie des eaux de la nappe alluviale ……326

5.4. Piézométrie de la nappe alluviale : variations, échanges avec la Loire, circulation au sein de la nappe et autres apports ……329

5.4.1. Variations temporelles et spatiales de la piézométrie de la nappe alluviale ……329
5.4.2. Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations des lignes d'eau de la Loire ……335
5.4.3. Mise en évidence des échanges entre la Loire et la nappe alluviale ……340
5.4.4. Occurrences des échanges entre la Loire et la nappe alluviale ……347
5.4.5. Vidange progressive de la nappe alluviale en période d'étiage : exemple de l'étiage 2011 ……357
5.4.6. Impacts des crues moyennes et exemple de la crue printanière de mai 2013 ……361

5.4.7. Circulation des eaux de la nappe alluviale, parallèlement ou transversalement à la levée ……366

5.5. L'apport des mesures isotopiques : caractérisation des mélanges des eaux au sein de la nappe alluviale ……381

5.5.1. Chroniques des données isotopiques dans le secteur du méandre de Guilly ……381
5.5.2. Les hautes eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly ……393
5.5.3. Les basses eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly ……400
5.5.4. Influence des formes fluviales héritées : les zones humides au sein des anciens bras de la Loire ……404

5.6. Généralisation au fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne ……409

Conclusion et synthèse des résultats du cinquième chapitre ……416

Conclusion de la troisième partie ……419

Le principal enjeu de l'étude de l'hydrologie en Loire moyenne, après avoir analysé les apports des bassins amont, est la compréhension des échanges entre le fleuve et sa plaine alluviale. On a vu dans le chapitre 4 que ces échanges pouvaient impacter la composition géochimique des eaux de la Loire. L'écoulement des nappes d'eaux souterraines (nappe alluviale, nappe régionale des calcaires de Beauce) et les crues de la Loire sont les deux vecteurs par lesquels se déroulent ces transferts à travers la plaine alluviale. Cependant, les levées en bord de Loire interdisent ces transferts par inondation de la plaine alluviale. Seules les nappes alluviales sont encore actrices de cette diffusion des eaux de la Loire dans sa plaine. Elles sont ici l'objet de ce cinquième chapitre.

En effet, l'étude du fonctionnement d'une nappe alluviale, dans ces modes de recharge et dans ces contributions aux débits de la Loire est essentielle pour la compréhension de la variabilité des débits et des caractéristiques géochimiques des eaux dans ce secteur de la Loire moyenne.

Les échanges entre la Loire et la nappe alluviale sont donc étudiés. Les mécanismes de l'inversion de ces échanges ont pu être décrits avec précision y compris leurs conséquences sur la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale.

A nouveau, la variabilité des débits de la Loire vient perturber la recharge en hautes eaux de la nappe alluviale par la Loire et le soutien des débits d'étiage par la nappe. Néanmoins, les mélanges des eaux au sein de la nappe alluviale ont pu être confirmés par le suivi géochimique des eaux de la Loire et de la nappe alluviale.

La recharge de la nappe alluviale est donc largement dépendante des variations du débit de la Loire. Les précipitations locales y ont en effet un rôle secondaire, excepté en zones humides qui, après avoir joué un rôle de collecteur de ces précipitations, permettent, localement, leur infiltration progressive jusqu'à la nappe alluviale.

Ces résultats associés à ceux de la partie précédente permettent enfin de conclure sur la formation des débits de la Loire moyenne avec la démonstration du rôle majeur des nappes alluviales dans le soutien des débits d'étiage en Loire moyenne.

Chapitre 5 : Fonctionnement hydrologique d'une plaine alluviale de la Loire moyenne – Analyse des connectivités hydrologiques entre la Loire et la nappe alluviale sur le site-atelier du méandre de Guilly

L'objectif de ce chapitre est de caractériser à une échelle fine les transferts d'eau dans les plaines alluviales à l'aide de l'étude d'un site-atelier, le méandre de Guilly (fig. 131). Après l'étude de la formation des débits en amont de la Loire moyenne, il s'agit maintenant de comprendre comment un site en Loire moyenne répond à ces pressions de l'amont et comment se font les interactions entre la Loire et les nappes, alluviales et régionales, à une grande échelle.

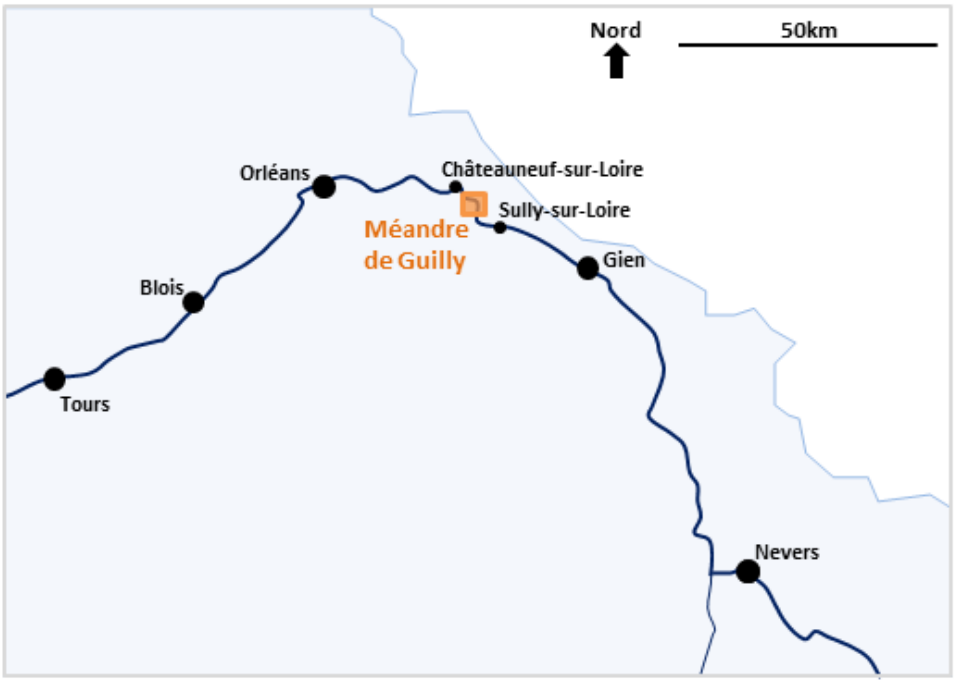


Fig. 131. *Situation du méandre de Guilly en Loire moyenne.*

Le site d'étude retenu est le méandre de la Loire, sur la commune de Guilly (Loiret, région Centre), entre Sully-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire (fig. 131). Outre la possibilité d'instrumenter le site pour répondre aux besoins de l'étude, le choix du site est également motivé par une demande sociale du Conservatoire des Espaces Naturels (CEN) de la région Centre,

gestionnaire du site, car ce méandre représente un intérêt patrimonial important (fig. 132). Ce méandre est l'un des rares sites d'expansion de crue du Val d'Orléans. En effet, presque partout ailleurs, la Loire y est corsetée par les levées. Ainsi les quelques zones permettant l'étalement des crues représentent un enjeu important dans la gestion du risque inondation. Ainsi, ce site permet d'allier l'étude des échanges nappes – rivière, réalisable sur de nombreux sites en Loire moyenne, à celle de l'impact de l'expansion de crues de la Loire dans une partie de sa plaine alluviale.

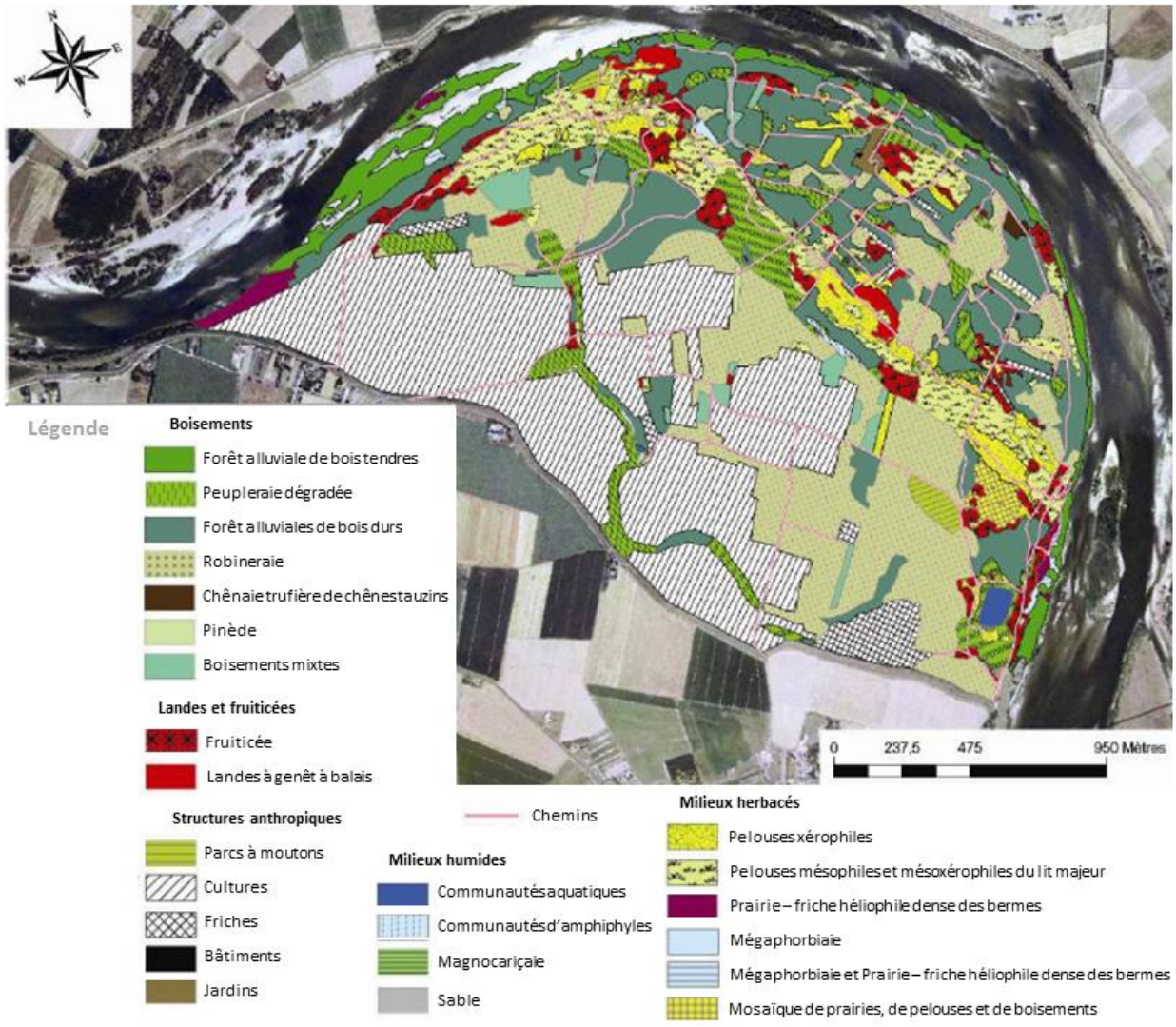


Fig. 132. Diversité des habitats au sein du méandre de Guilly en 2006. Source : Païen, 2006.

La connaissance précise de la morphologie fluviale héritée de ce méandre (essentiellement travaux du Laboratoire de Géographie Physique, CNRS, Meudon, Université

Paris 1) autorise l'étude de son impact sur le fonctionnement hydrologique du méandre. Plus spécifiquement, ce lobe de convexité est parcouru par deux grands bras morts (le « Grand Riot » au Nord et le « Petit Riot » au Sud ; fig. 133) ; ces deux anciennes structures d'écoulement ont été abandonnées au cours du 19ème siècle, sans doute du fait d'une intervention anthropique (Gautier et al., 1999).

Dans le cadre de la thèse, le suivi piézométrique de la nappe alluviale mis en place et le suivi géochimique réalisé sur une année hydrologique à l'échelle du méandre, permettent de décrire les différentes masses d'eau en présence (nappe alluviale, nappe régionale, zone humide, Loire) ainsi que leur fonctionnement propre, notamment les modes de recharge de la nappe alluviale : importance respective des apports des précipitations locales et des écoulements de surface. Ainsi sont mis en évidence leurs échanges saisonniers entre les différents réservoirs hydrologiques.

Le suivi piézométrique perdurant, la variabilité interannuelle du fonctionnement hydrologique du site-atelier en période d'étiage a pu être étudiée, et notamment l'impact de la crue printanière de mai 2013 sur la nappe alluviale. La description de cet hydrosystème Loire – nappe alluviale conduit à la synthèse du fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne en combinant ces résultats à ceux de la partie précédente.

5.1. Le site-atelier du méandre de Guilly

Le méandre de Guilly[1] s'étend sur 4,27 km². Les altitudes entre l'amont et l'aval du méandre varient peu, entre 110 m et 105 m. Les points les plus hauts sont situés au niveau de l'Ile aux Canes et des Varennes (fig. 133).

[1] Cf. présentation du site du méandre de Guilly à la fin du chapitre 1 (1.3.3.).

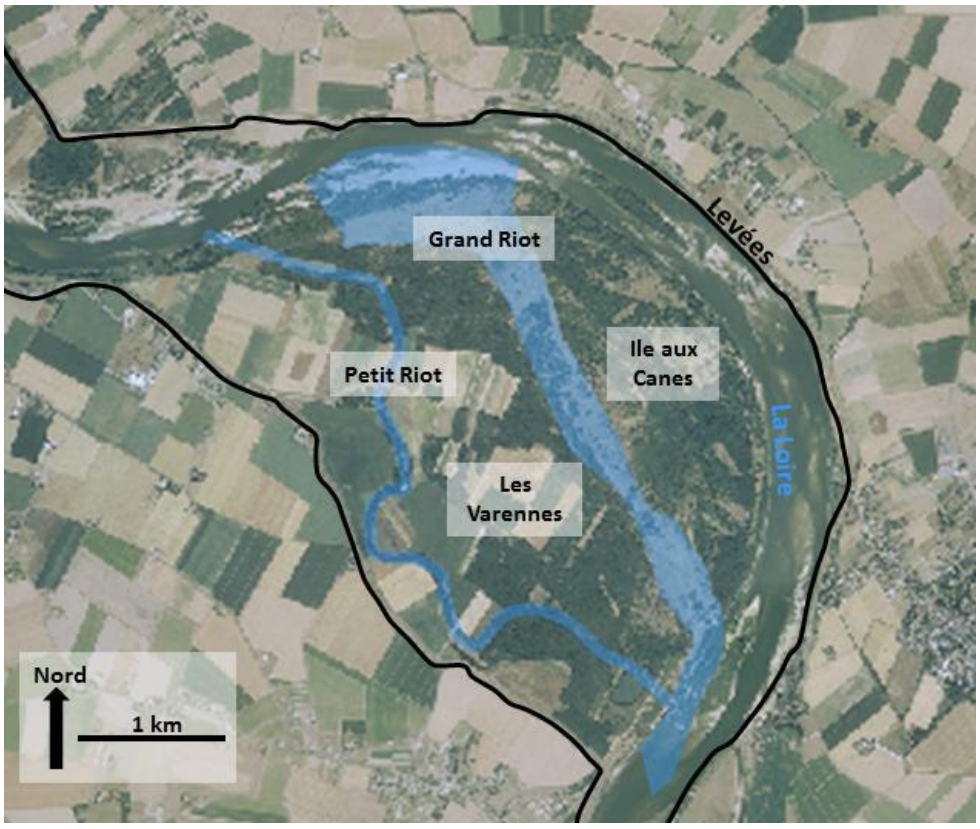


Fig. 133. *Toponymie des principales entités du méandre de Guilly.*

La toponymie des différentes entités du méandre est marquée par le fleuve et ses anciens chenaux (fig. 133). Le site est composé de différentes unités morphologiques. Le site est traversé d'anciens bras de la Loire, connectés au fleuve seulement en période de crue. Les niveaux topographiquement les plus bas de ces bras morts sont alimentés par la nappe alluviale, à l'exemple du Trou Robert (situé au centre du Grand Riot) en eau pratiquement toute l'année (fig. 134). L'île aux Canes et les Varennes sont deux anciennes îles de la Loire.



Le Petit Riot en eau



Le Trou Robert au sein du Grand Riot



Le Grand Riot

Fig. 134. Photographies des paléochenaux au sein du méandre de Guilly. *Crédit : S. Ramond*

5.1.1. Une morphologie fluviale héritée, liée à l'évolution des usages autour du fleuve

De nombreux travaux de recherche ont été menés sur la géomorphologie du Val d'Orléans dont certains sont centrés sur le méandre de Guilly. Ils ont notamment apporté une bonne connaissance de l'évolution du lit majeur de la Loire. Plusieurs paléochenaux ont été mis en évidence au sein du Val d'Orléans (fig. 135). Il est notable qu'au sein du site-atelier, les paléochenaux identifiés sont récents.

Les interventions humaines sur le lit de la Loire au sein du méandre ne se sont pas circonscrites à la construction des levées. Au 19ème siècle, on observe une importante réduction artificielle de la bande active (fig. 136). L'enjeu pour les populations locales était de gagner sur la Loire de nouvelles terres agricoles. Ainsi, la perte de vitesse des activités agro-pastorales aux profits des plantations et des cultures a entraîné une modification de la dynamique fluviale au sein du méandre. Ces évolutions y ont permis une diversification des habitats, qui en fait sa richesse écologique actuelle.

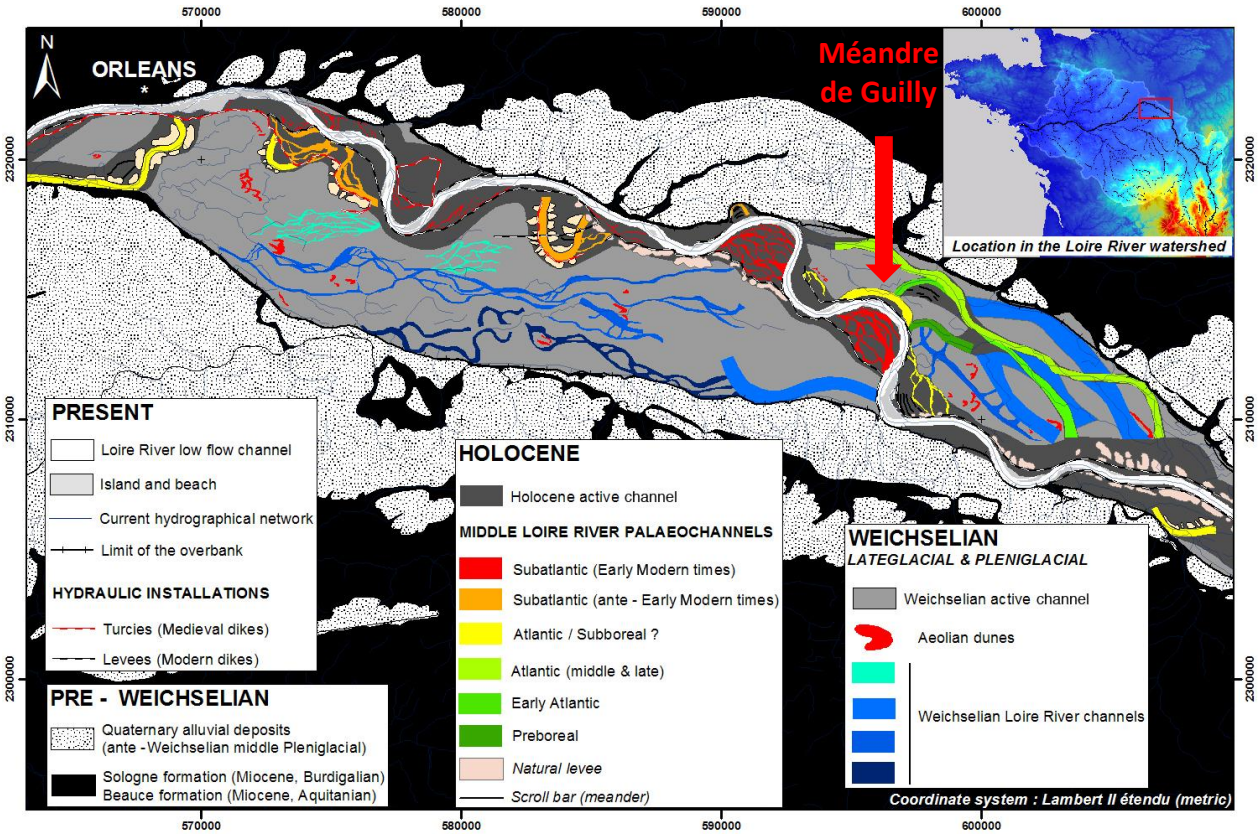


Fig. 135. *Paléochenaux du Val d'Orléans. Source : Castanet, 2008, modifié.*

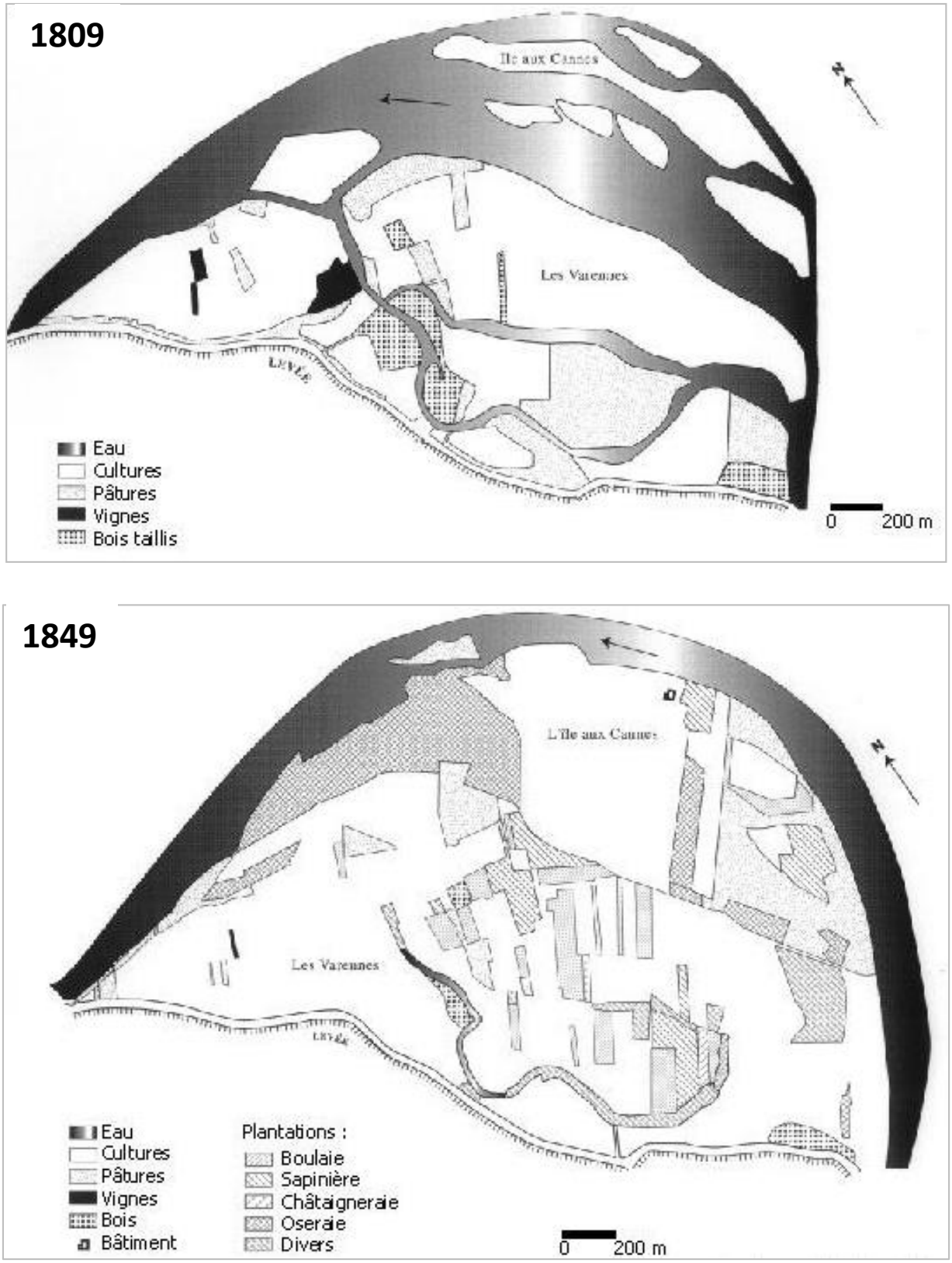


Fig. 136. *Évolutions de l'occupation du sol au 19ème siècle au sein du méandre de Guilly. Source : Larousse, 1998.*

5.1.2. Dépôts alluvionnaires au sein du méandre et encaissant de la nappe alluviale

Les données collectées par C. Castanet (2008), rassemblant les données géologiques de forages réalisés par différents organismes (CETE Blois, Société française du pétrole 1963, BEFA Forages 1991 et autres sources : Archives Morillon et CETE, BSS BRGM), ont permis la réalisation de profils à travers le méandre (annexe C).

La synthèse de ces informations permet d'étudier l'épaisseur et la composition des dépôts alluvionnaires au sein du méandre. Ces alluvions sont l'encaissant de la nappe alluviale. Des variations de la granulométrie de ces dépôts peuvent influer sur la porosité, la capacité hydraulique et la capacité de stockage du milieu.

Les dépôts alluvionnaires au sein du méandre sont principalement composés par des sables, des graviers et des galets. Leurs proportions respectives varient d'un forage à l'autre. Ils reposent sur une couche imperméable composée d'argiles (Marne de l'Orléanais, Miocène Inférieur, Burdigalien) qui les séparent des calcaires, encaissant de la nappe de Beauce, à environ 40 m de profondeur.

Dans la majorité des cas, les dépôts alluvionnaires ont une épaisseur moyenne de 6 à 8 m (fig. 137). Les forages où cette épaisseur excède 8 m sont situés dans la partie amont des riots ou au-delà des levées où les sédiments ne peuvent avoir été remobilisés depuis le 16ème siècle. Ceux où l'épaisseur des alluvions est inférieure à 5 m sont concentrés à l'aval des deux riots.

De plus, les alluvions sont essentiellement composées par une couche de sables en surface, puis de mélanges de sables, graviers et galets. Les exceptions à cette norme se situent à l'amont du méandre, proche de la Loire ou dans le Grand Riot. Pour les forages du Grand Riot, la couche superficielle de sables est réduite ou absente. La granulométrie y est majoritairement plus grossière (graviers et galets).

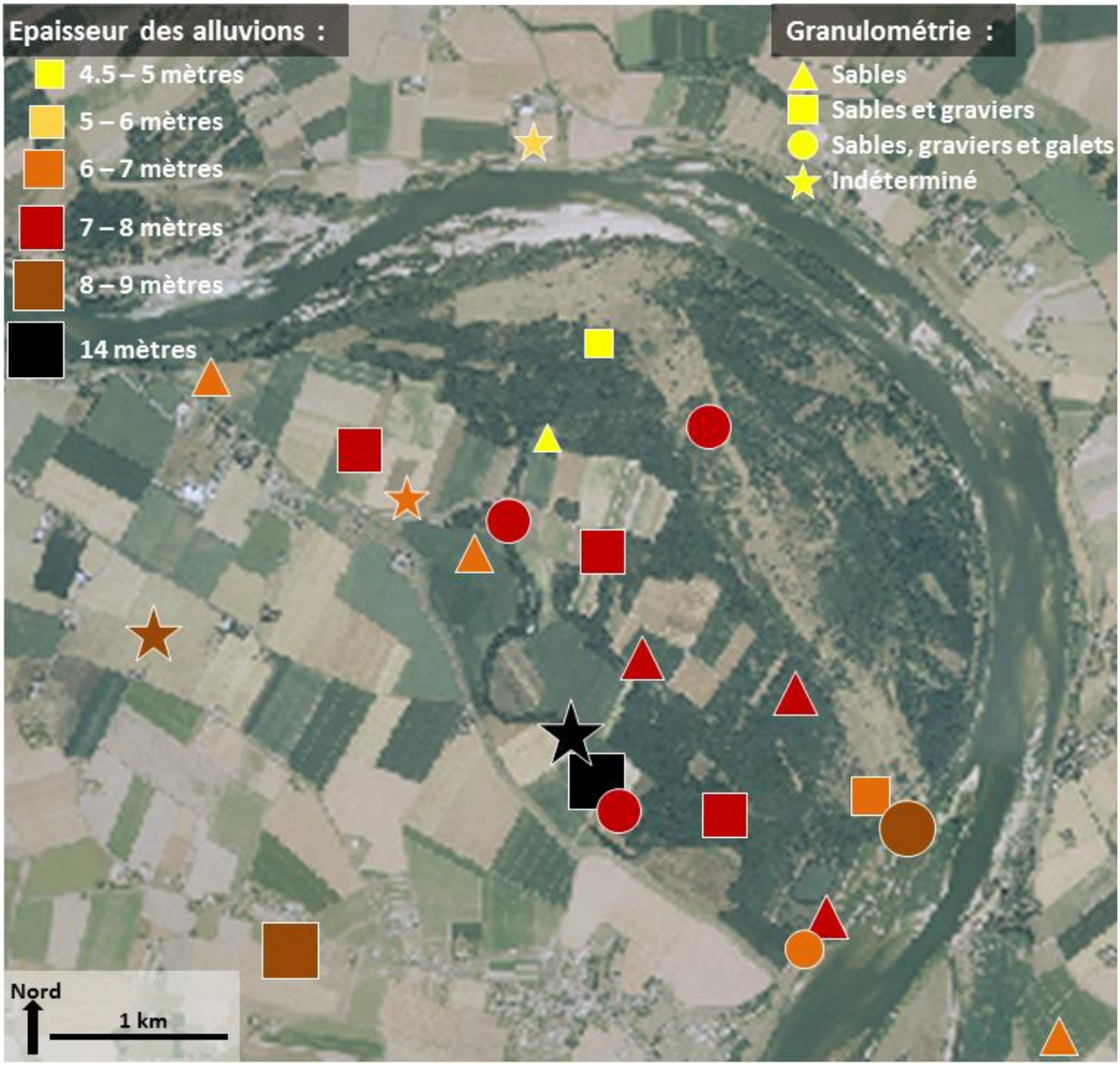


Fig. 137. Carte de synthèse de l'épaisseur et de la composition granulométrique des dépôts alluvionnaires au sein du méandre de Guilly.

L'organisation des dépôts alluvionnaires est donc corrélée aux héritages morphologiques liés à la dynamique fluviale. La partie amont du méandre et le Grand Riot sont marqués par des dépôts plus épais et plus grossiers, apportés par les eaux de la Loire en période de crues, qui ont une capacité de transport plus importantes qu'à l'aval du méandre où les alluvions sont plus fines et leurs dépôts un peu moins épais.

5.1.3. Expansion des crues de la Loire et remise en eau du méandre

Les anciens bras de la Loire jouent également un rôle incontournable en période de crue. Lors de la montée des eaux de la Loire, les premières zones du méandre à être en eau, se situent dans la partie aval du méandre, au niveau des connexions aval des anciens bras de la Loire (Depret, 2006 ; fig. 138). On peut noter ici, que les points bas au centre du Petit Riot, qui sont indiqués en eau pour des débits de l'ordre de 1000 $m^3.s^{-1}$, peuvent l'être, mais par remontée des eaux de la nappe alluviale et non pas par les eaux de la Loire.

Pour les crues quinquennales (fig. 139 et 140), la montée des eaux dans les anciens bras de la Loire permet la connexion amont-aval au sein du Grand Riot.

Pour les crues même de faible intensité, les bras mort de la Loire sont donc les vecteurs de la dynamique fluviale et de la diffusion des eaux de la Loire au sein du méandre. Les conséquences en sont multiples. En ce qui concerne la recharge de la nappe alluviale, cela implique que les anciens bras de la Loire représentent potentiellement des zones importantes d'infiltration des eaux de la Loire vers la nappe. Il s'agit donc de phénomènes ponctuels mais qui peuvent être relativement fréquents (inondation partielle de la partie aval des bras morts pour des crues annuelles).

En effet, le nombre de jours par an où le débit de la Loire à Blois dépasse les 1 000 $m^3.s^{-1}$ est, en moyenne, de 19 jours (moyenne calculée sur la chronique de 1863 - 2011 ; voir 3.8, fig. 92 et 93). La variabilité interannuelle des débits de la Loire implique que ce débit-seuil n'est pas atteint chaque année, mais également, que certaines années, la durée de submersion de l'aval des anciens bras de la Loire est beaucoup plus importante (maximum connu de jours dans une année où le débit de la Loire a dépassé les 1 000 $m^3.s^{-1}$ est de 94 jours ; $3^{ème}$ quartile de la chronique du nombre de jours par an où le débit de la Loire dépasse le seuil des 1 000 $m^3.s^{-1}$ est égale à 29 jours).

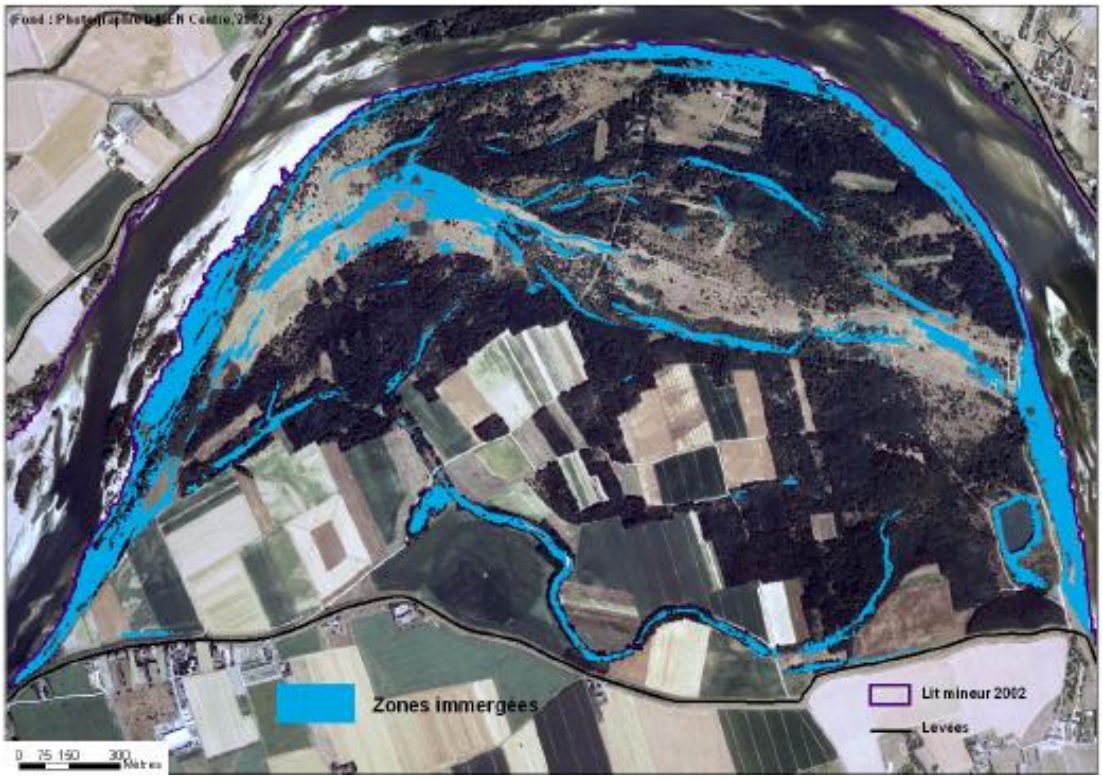


Fig. 138. *Hauteurs d'eau simulées au sein du méandre de Guilly pour un débit de la Loire entre 900 et 1000 $m^3.s^{-1}$ (crue de période de retour de 1 an). Source : Depret, 2006.*

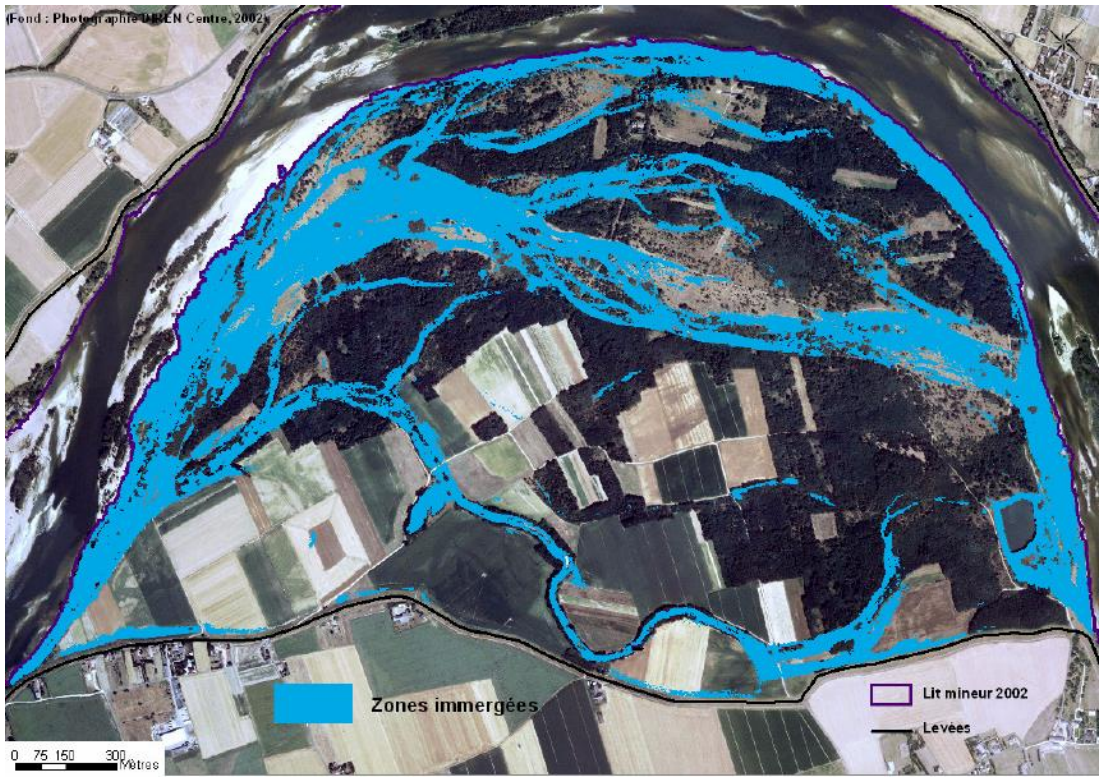


Fig. 139. *Hauteurs d'eau simulées au sein du méandre de Guilly pour un débit de la Loire entre 1700 et 2100 $m^3.s^{-1}$ (crue de période de retour de 5 ans). Source : Depret, 2006.*



Les eaux de la Loire remontent le Grand Riot à partir de sa connexion aval (SR, 05/05/2013).



Débordement de la Loire à l'amont du méandre de Guilly (SR, 05/05/2013).

Fig. 140. *Illustrations de l'inondation du méandre de Guilly lors de la crue de mai 2013, pendant laquelle le débit moyen journalier de la Loire à Gien a atteint 2 000 $m^3.s^{-1}$ (le 07/05/2013). Crédit : S. Ramond.*

Pour les crues plus importantes (fig. 141 : exemple de la crue de décembre 2003, une crue vicennale), le méandre est largement sous les eaux. Le rôle des anciens bras de la Loire est toujours essentiel, dans le sens où les hauteurs d'eau en leur sein sont les plus importantes mais également du fait qu'ils concentrent les flux d'eau les plus rapides.

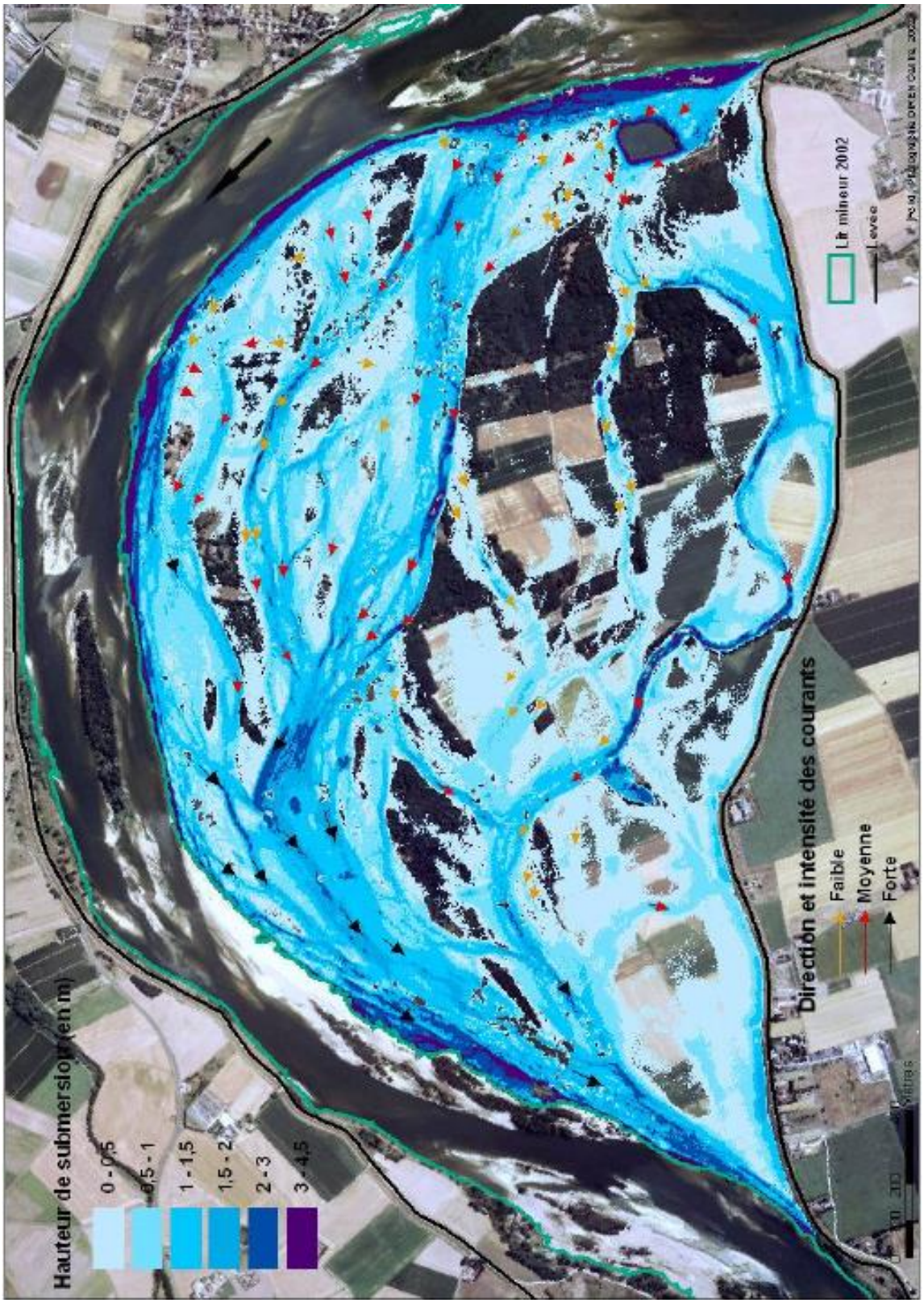


Fig. 141. *Simulation de la répartition des hauteurs d'eau et des courants au sein du méandre de Guilly lors de la crue de décembre 2003 pendant laquelle le débit de la Loire a atteint 3320 m³.s⁻¹ (crue vicennale). Source : Depret, 2006*

Le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du méandre de Guilly est donc fortement influencé par les anciens bras de la Loire. Cependant, les deux facteurs qui contraignent le plus ce dynamisme sont les variations du débit de la Loire, ainsi que la réduction de son lit majeur par les levées (fig. 142). Le protocole de suivi mis en place pour l'étude détaillée des échanges entre les différentes masses d'eau et les différentes unités fluviales en présence a donc pris en compte l'ensemble de ces caractéristiques du site du méandre de Guilly.

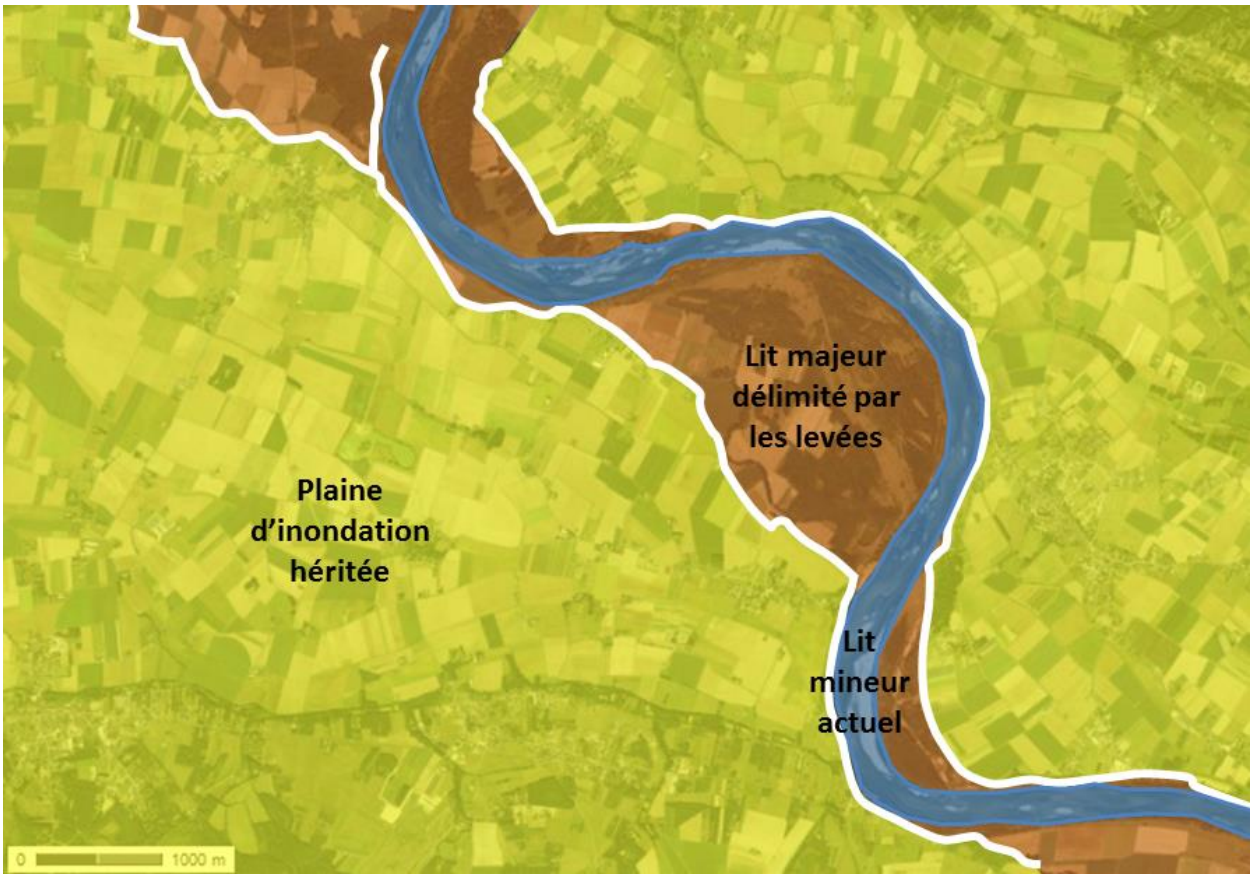


Fig. 142. *Synthèse des différentes unités fluviales de la plaine alluviale de la Loire dans le secteur de Guilly.*

5.2. Méthodologie d'analyse des échanges d'eau entre les différents réservoirs hydrologiques dans le secteur du méandre de Guilly

L'équipement et le suivi du site-atelier ont été menés en collaboration avec le Conservatoire des Espaces Naturels (CEN) de la région Centre : en effet le CEN gère le site de l'Ile aux Canes, au sein du méandre de Guilly, par l'intermédiaire d'un bail emphytéotique.

5.2.1. Choix des sites et protocole du suivi piézométrique et géochimique

Le suivi de la nappe alluviale comporte deux volets (fig. 143) : un suivi piézométrique et un suivi géochimique des eaux souterraines.

Le suivi piézométrique a été réalisé grâce à l'installation de sondes de pression de type Diver (fig. 143) dans la nappe alluviale, dans des puits agricoles. Ces sondes mesurent la pression de la colonne d'eau au-dessus d'elles. Grâce à la compensation de ces données par la pression de l'air (sonde barométrique), on obtient la surface piézométrique de la nappe, et son altitude après calage des données au DGPS. Ces sondes permettent également de suivre les hauteurs d'eau pour les eaux de surface. L'intervalle de temps entre chaque mesure est de 30 minutes. Ces données piézométriques permettent donc d'identifier les échanges entre les différentes masses d'eau en comparant les cotes des masses d'eau.

Le suivi des paramètres physico-chimiques, de la concentration des éléments majeurs et de la composition isotopique (^{18}O et ^{2}H) des eaux de la nappe alluviale, de la Loire et de la nappe de Beauce permettent de déterminer l'origine des eaux de la nappe alluviale et leurs variations saisonnières. Ce suivi a été réalisé à un pas de temps mensuel pendant une année hydrologique (2009 -2010), puis a été centré sur les étiages et les périodes de crues (fig. 144).

Le matériel de mesure, les protocoles de prélèvements et d'analyse des paramètres physico-chimiques, des éléments majeurs et des isotopes, sont identiques à ceux utilisés pour les prélèvements des eaux de surface présentés dans le chapitre 4 (cf. 4.1.).

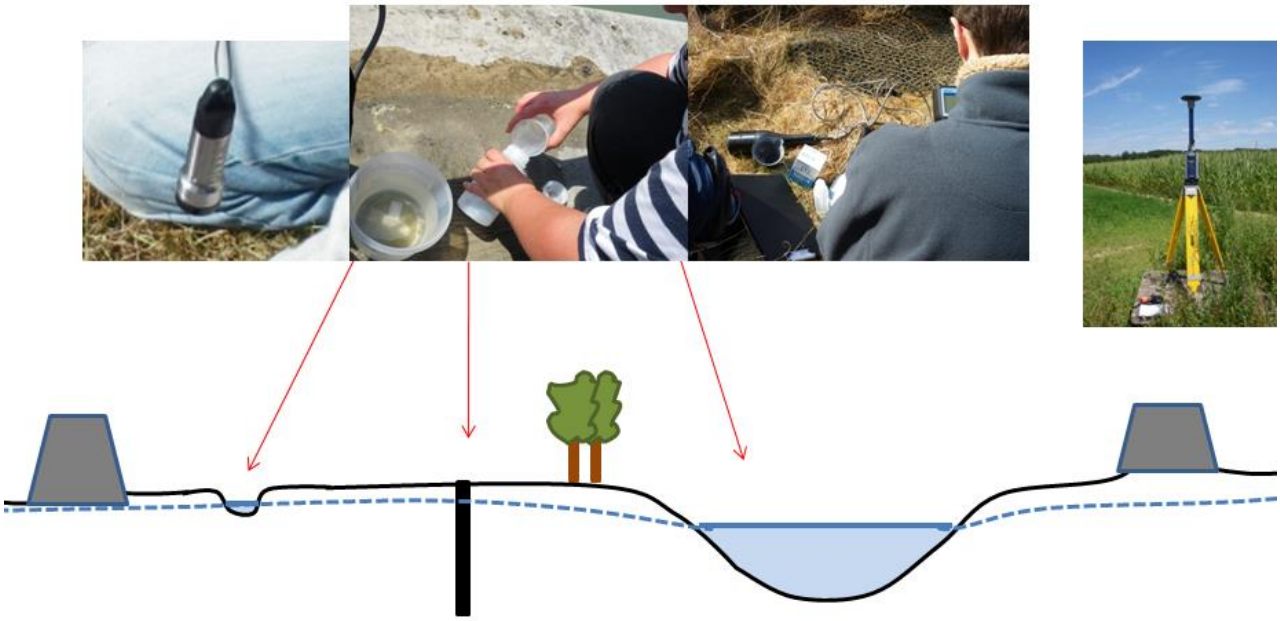


Fig. 143. *Synthèse du suivi réalisé des différentes masses d'eaux dans le secteur du méandre de Guilly. Crédit : S. Ramond.*

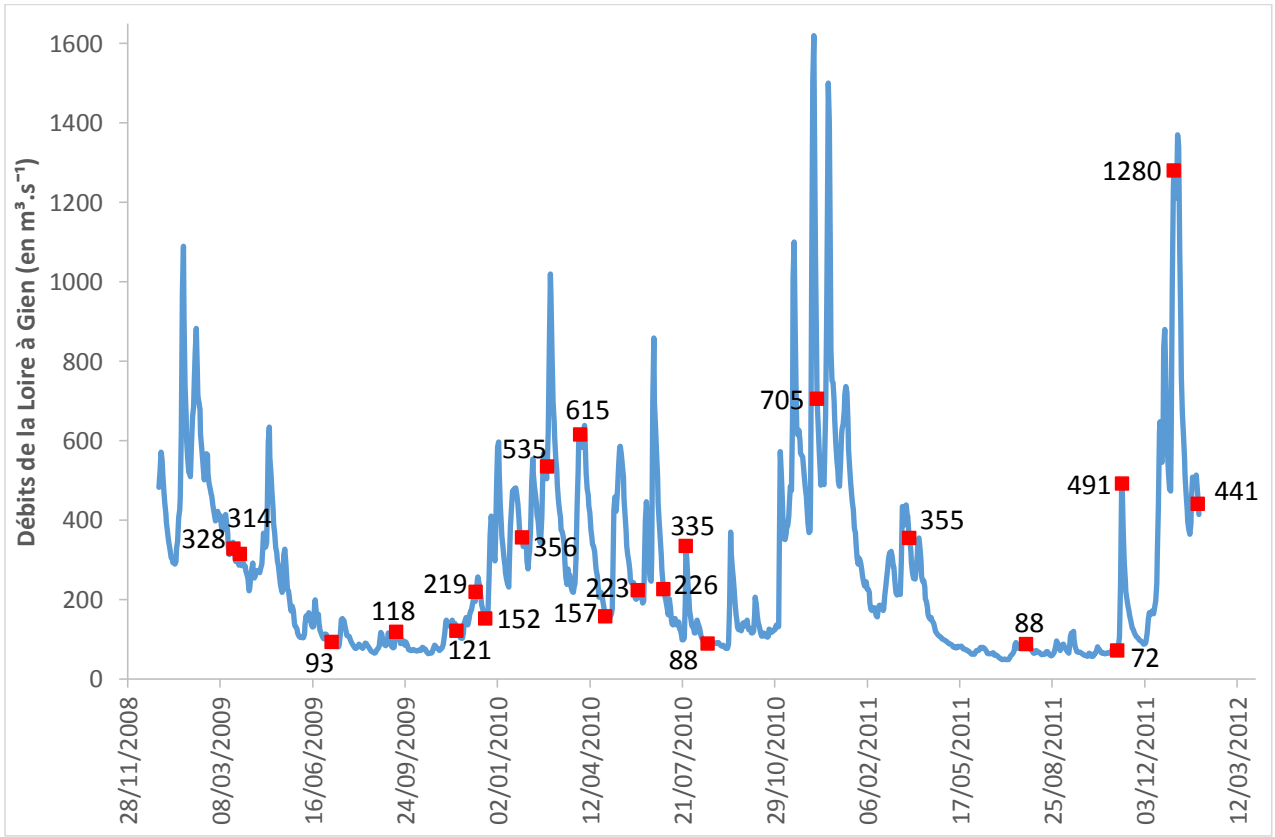


Fig. 144. *Dates des campagnes, complètes ou partielles, de prélèvements et de mesures des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly, et de celles de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire.*

Critères de sélection des puits agricoles et présentation des sites

Des puits agricoles, fermés et non pompés dans la mesure du possible (fig. 145), dans la nappe alluviale, ont donc été sélectionnés pour faire l'objet d'un suivi grâce à l'aide du CEN Centre et des Présidents des Associations d'irrigants des communes de Guilly et de Saint-Benoît-sur-Loire, respectivement M. Robert et M. Boin (tab. 55 et fig. 148).

Ainsi, huit puits, dont les eaux sont puisées dans la nappe alluviale, ont été retenus dans la plaine alluviale, au-delà des levées (5 en rive droite et 3 en rive gauche ; fig. 148). Dans la plaine alluviale, un forage dans la nappe de Beauce (Carrières, fig. 148) a également fait l'objet d'un suivi géochimique.



Pu 1



Pu 17



Pu Ménivelle



Pu Aubépin

Fig. 145. *Photographies de quelques puits ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique. Crédit : S. Ramond.*

Au sein du méandre de Guilly, le problème a été la rareté des ouvrages dans certains secteurs. Les puits faisant l'objet d'un suivi devaient être répartis dans le méandre et leur distance à la Loire variée (fig. 147). De plus, il était important de suivre certains secteurs comme le Grand

Riot et le Petit Riot. Six puits ont donc été retenus au sein du méandre de Guilly, entre la Loire et la levée. Une zone humide située dans le Grand Riot, le Trou Robert (fig. 148), et la Loire à l'Ile aux Canes (fig. 146 et 148), ont également fait l'objet d'un suivi de leurs lignes d'eau. Une sonde barométrique a été installée sur l'Ile aux Canes, en situation d'abris, sous un appentis (fig. 148).



Fig. 146. *Sonde TD Diver installée dans la Loire à l'Ile aux Canes, lestée par deux poids de pêche à brochet et reliée à l'un des arbres de la berge. Crédit : S. Ramond.*

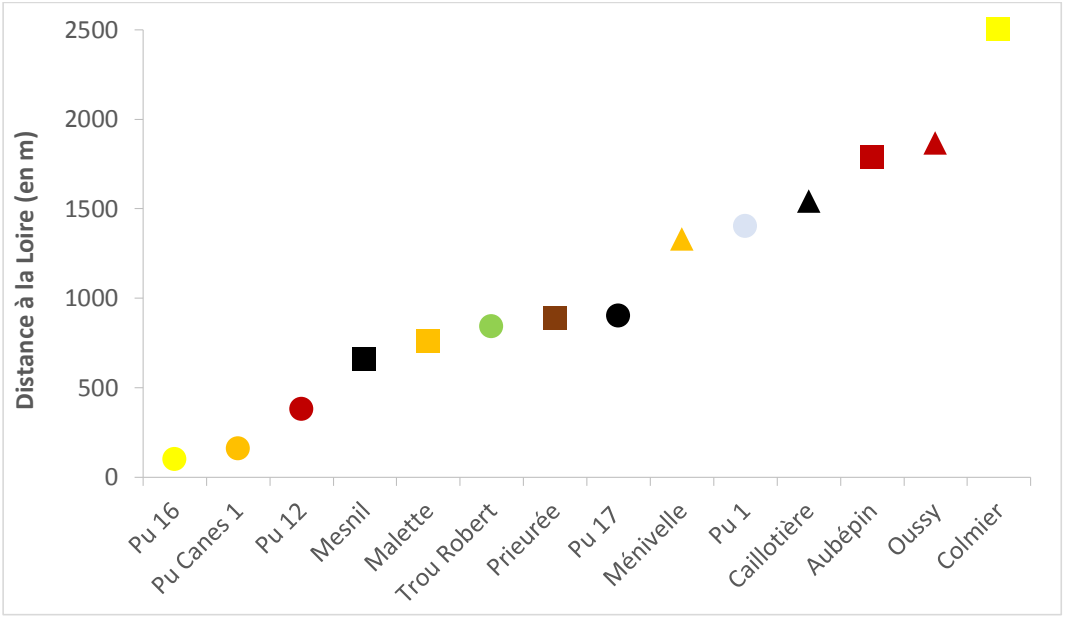


Fig. 147. *Distances entre la Loire et les puits sélectionnés de la nappe alluviale.*

Le suivi géochimique des eaux de la Loire a été réalisé à partir des prélèvements à Châteauneuf-sur-Loire, à quelques kilomètres en aval du site (fig. 131 et cf. chapitre 4).

La nappe alluviale a donc fait l'objet d'un suivi géochimique et piézométrique sur 14 sites différents (fig. 148), dont la distance à la Loire varie entre 100 et 2500 m (fig. 147).

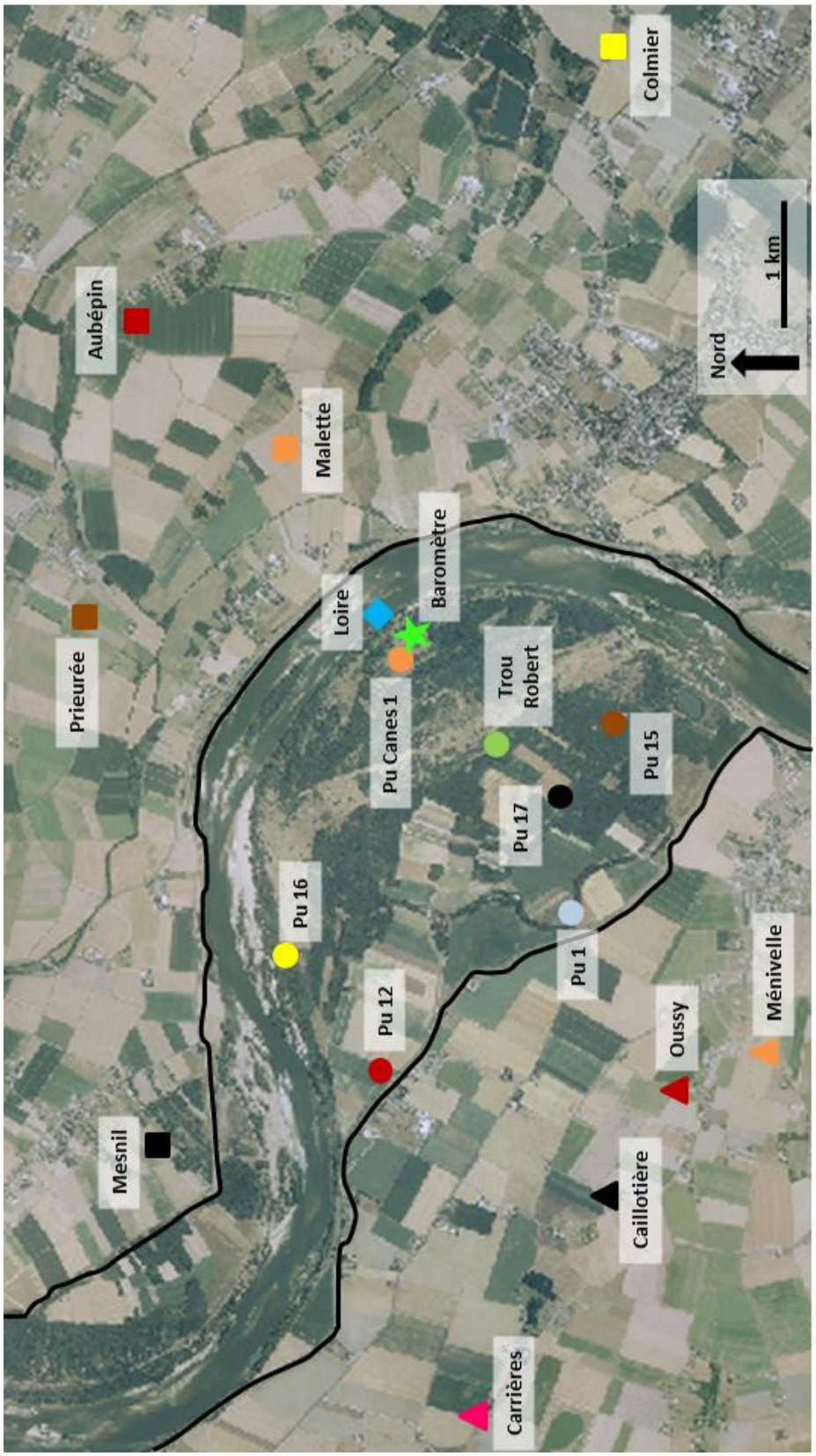


Fig. 148. *Localisation des sites de suivi piézométrique et/ou géochimique dans le secteur du méandre de Guilly. Source du fond de carte : DREAL.*

			Coordonnées DGPS (Lambert II) Est	Nord	Hauteur ortho (en m)	Exploitant ou gestionnaire	Diamètre du puits (en cm)	Hauteur de la margelle (en cm)	Profondeur du puits (en m)	Fermeture des puits
Puits du méandre de Guilly, situés entre la Loire et la levée	classés selon leur distance à la Loire	Pu 16	595026.998	2314153.79	108.1	DPF, CEN	100	23	3.99	semi-fermé
		Pu Canes 1	596568.805	2313588.64	109.96	M. Valta	100	15	4.4	couvert mais pas hermétique
		Pu 12	594412.413	2313626.89	108.75	M. Cholet	100	10	5.17	semi-fermé
		Pu 15	596200.225	2312456.98	111.71	M. Crèche	15	13	11.5	couvert mais pas hermétique
		Pu 17	595787.383	2312748.14	111.17	M. Allaire	100	26	5.89	hermétiquement clos
	Paléo-chenal	Pu 1	595207.167	2312652.77	109.35	M. Robert	40	36	7.74	hermétiquement clos
	Zone Humide	Trou Robert	596013.689	2313169.21	106.46	DPF, CEN	_	_	_	_
Puits situés dans le val, en rive gauche	d'amont en aval	Ménivelle	594738.504	2311447	109.92	M. Aubier	100	20	5.35	semi-fermé
		Oussy	594335.234	2312219.56	110.15	M. Chambole	100	20	7.46	hermétiquement clos
		Caillotière	593737.826	2312390.63	109.98	M. Brague	100	55	8.8	hermétiquement clos
	Nappe de Beauce	Carrières	592501.934	2313212.22	107.98	M. Robert	50	10	+de 15	semi-fermé
Puits situés dans le val, en rive droite, d'amont en aval		Colmier	599614.974	2312450.31	113.18	M. Boin	100	55	6.04	hermétiquement clos
		Malette	597615.216	2314240.28	110.61	M. Asselineau	100	55	5.06	hermétiquement clos
		Aubépin	598369.447	2314945.67	110.82	M. Boin	100	55	5.12	hermétiquement clos
		Prieurée	596697.257	2315205.07	110.18	M. Boullier	100	50	5.11	hermétiquement clos depuis l'été 2010
		Mesnil	593934.307	2314825.06	109.17	M. Quettier	100	10	6.92	hermétiquement clos

Tab. 55. *Principales caractéristiques des puits dont les eaux ont fait l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique.*

5.2.2. Validation des sites choisis et des données géochimiques

Essais de pompage des puits agricoles

Afin de vérifier que l'eau contenue dans les puits est bien représentative de celle de la nappe, c'est-à-dire que l'eau des puits n'est pas une eau stagnante, des tests de pompage (fig. 149) ont été réalisés pour six puits retenus.

A cette occasion, les mesures des paramètres physico-chimiques et des prélèvements des eaux ont été faits avant et après pompage. Le rabattement de la nappe a été suivi à l'aide d'une sonde piézométrique. L'équivalent de trois fois le volume d'eau contenue dans le puits a été pompé pour s'assurer du renouvellement complet de l'eau qui y était contenue. Un canal Venturi a été utilisé pour mesurer le volume d'eau pompé. Le pH, la température et la conductivité électrique des eaux pompées ont été suivis en continu (observations pendant pompage détaillées en annexe D).

Les résultats obtenus à partir des comparaisons entre les eaux prélevées avant (P1) et après le pompage (P2) d'un puits sont assez variables (tab. 56). Pour la conductivité, ses variations ne dépassent pas 5% pour seulement trois puits sur six (pu 17, Oussy et Caillotière). Pour les éléments majeurs, au niveau de Pu 1 (entre 4 et 55%) et Pu 17 (entre 4 et 42%), les différences de concentrations sont importantes pour tous les éléments. Au niveau de Pu 12, ce sont les bicarbonates (14%), les nitrates (10%) et les sulfates (13,5%) qui présentent les variations de concentration les plus fortes. Au Pu Canes 1 et à Caillotière, ce sont le calcium (respectivement 18 et 13%) et les bicarbonates (respectivement 14 et 23%) qui varient le plus. A Oussy, aucune variation ne dépasse 8% de la valeur initiale.

Selon ces éléments, les concentrations des éléments majeurs sont peu indicatrices de la chimie des eaux de la nappe alluviale. Ces données ne seront donc pas analysées en détail mais permettront seulement de caractériser de façon générale les différentes masses d'eau en présence.



Dispositif de pompage des puits : groupe électrogène, pompe et système de fixation, sonde piézométrique



Canal Venturi et son dispositif d'installation



Suivi des paramètres physico-chimiques et prélèvements des eaux à la sortie du canal Venturi

Fig. 149. *Illustrations des méthodes et matériels utilisés pour les tests de pompage des eaux de puits agricoles dans la nappe alluviale. Crédit : S. Ramond.*

	pH	CE ($mS.cm^{-1}$)	Cl^- ($mg.l^{-1}$)	NO_3^- ($mg.l^{-1}$)	SO_4^{2-} ($mg.l^{-1}$)	HCO_3^- ($mg.l^{-1}$)	Ca^{2+} ($mg.l^{-1}$)	K^+ ($mg.l^{-1}$)	Na^+ ($mg.l^{-1}$)	Mg^{2+} ($mg.l^{-1}$)	SiO_2 ($mg.l^{-1}$)	$\delta^{18}O$ (‰ vs SMOW)	δ^2H (‰ vs SMOW)
Pu 1	10/12/2009												
P1	7,6	0,275	24,4	0	29,0	Nm	36,3	2,4	11,5	13,2	Nm	-7,53	-53,5
P2	6,5	0,351	31	58,5	40,7	Nm	45,1	1,9	11,0	14,8	Nm	-7,53	-55,4
Différence	-1,1	0,076	6,5	58,5	11,7		8,8	-0,59	-0,51	1,62		0	-1,94
%	-14,6%	27,6%	26,9%		40,3%		24,2%	-23,9%	-4,4%	12,3%		0,0%	3,6%
	24/03/2011												
P1	6,9	0,297	22,04	47,93	38,14	97,6	44,87	1,79	10,23	13,36	17	-7,51	-52,57
P2	6,7	0,35	33,88	74,23	49,14	73,2	47,24	1,97	12,02	16,08	20,4	-7,44	-51,86
Différence	-0,2	0,053	11,84	26,3	11	-24,4	2,37	0,18	1,79	2,72	3,4	0,07	0,71
%	-2,9%	17,8%	53,7%	54,9%	28,8%	-25,0%	5,3%	10,1%	17,5%	20,4%	20,0%	-0,9%	-1,4%
Pu 17	12/10/2009												
P1	6,4	0,216	8,8	63,8	9,2	Nm	25,5	6,4	9,0	6,8	Nm	-6,8	-48,4
P2	6,5	0,206	10,4	42,1	12,1	Nm	23,9	3,7	8,6	7,3	Nm	-7,2	-51,7
Différence	0,1	-0,01	1,6	-21,7	2,8		-1,6	-2,7	-0,4	0,5		-0,4	-3,3
%	0,8%	-4,6%	18,3%	-34,0%	30,0%		-6,2%	-42,3%	-3,9%	7,9%		6,3%	6,9%
Pu 12	24/03/2011												
P1	6,6	0,416	37,2	72,8	55,4	83,0	58,3	5,4	11,4	14,6	22,9	-6,85	-46,9
P2	6,5	0,460	35,5	65,6	48,0	78,1	46,7	3,3	11,5	15,5	22,9	-6,78	-47,3
Différence	-0,1	0,044	-1,7	-7,2	-7,4	-11,6	-2,1	0,1	0,8	0,9	0	0,07	-0,5
%	-2,1%	10,6%	-4,7%	-9,8%	-13,4%	-14,0%	-3,6%	1,8%	7,5%	5,9%	0,0%	-1,0%	1,0%
Pu Canes 1	24/03/2011												
P1	7,2	0,148	9,0	13,0	9,5	68,3	15,7	0,9	6,9	4,4	19,4	-7,4	-50,1
P2	6,8	0,125	8,8	13,1	9,3	58,5	12,9	1,0	6,7	4,5	19,0	-7,47	-51,6
Différence	-0,4	-0,023	-0,2	0,1	-0,2	-9,7	-2,8	0,1	-0,2	0,1	-0,4	-0,07	-1,5
%	-5%	-16%	-2%	0%	-3%	-14%	-18%	11%	-2%	3%	-2%	1%	3%
Oussy	23/03/2011												
P1	6,7	0,516	42,8	138,6	71,8	73,2	47,0	8,0	15,9	24,3	33,4	-6,34	-43,7
P2	6,6	0,541	42,3	143,0	72,8	68,3	47,7	8,7	16,3	24,0	33,0	-6,48	-44,3
Différence	-0,1	0,025	-0,5	4,6	1,0	-4,9	0,7	0,7	0,4	-0,3	-0,4	-0,14	-0,6
%	-1%	5%	-1%	3%	1%	-7%	1%	8%	3%	-1%	-1%	2%	1%
Caillotière	23/03/2011												
P1	6,9	0,481	29,8	63,8	64,1	146,4	51,1	7,9	17,8	20,9	26,1	-6,51	-44,8
P2	7,0	0,489	30,0	64,6	64,5	112,2	44,5	7,8	17,5	20,8	30,1	-6,43	-45,2
Différence	0,1	0,008	0,2	0,8	0,4	-34,2	-6,6	-0,1	-0,3	-0,1	4,0	0,08	-0,4
%	2%	2%	1%	1%	1%	-23%	-13%	-2%	-2%	-1%	15%	-1%	1%

Tab. 56. *Impacts sur la géochimie des eaux prélevées du renouvellement, par pompage, de la colonne d'eau de six puits de la nappe alluviale (P1 : prélèvement avant le pompage, P2 : prélèvement après le pompage).*

Néanmoins, pour les compositions isotopiques, excepté pour Pu 17 (tab. 56), les différences observées ne dépassent pas les marges d'erreur des analyses (0,15‰ pour ^{18}O et 2‰ pour ^{2}H). **Les résultats obtenus à partir des isotopes pourront donc être utilisés comme indicateur de l'origine des eaux de la nappe alluviale et des mélanges en son sein.**

Bilans ioniques des prélèvements d'eau analysés

	Erreur entre 0 et 5%	Erreur entre 5 et 10%	Erreur entre 10 et 15%
Au sein du méandre : 54 échantillons	33 échantillons soit 61,5%	18 échantillons soit 33%	3 échantillons soit 5,5%
Dans la plaine alluviale, au-delà des levées : 63 échantillons	22 échantillons soit 35%	27 échantillons soit 43%	14 échantillons soit 22%

Tab. 57. *Synthèse des bilans ioniques de 117 échantillons analysés, prélevés dans le secteur du méandre de Guilly.*

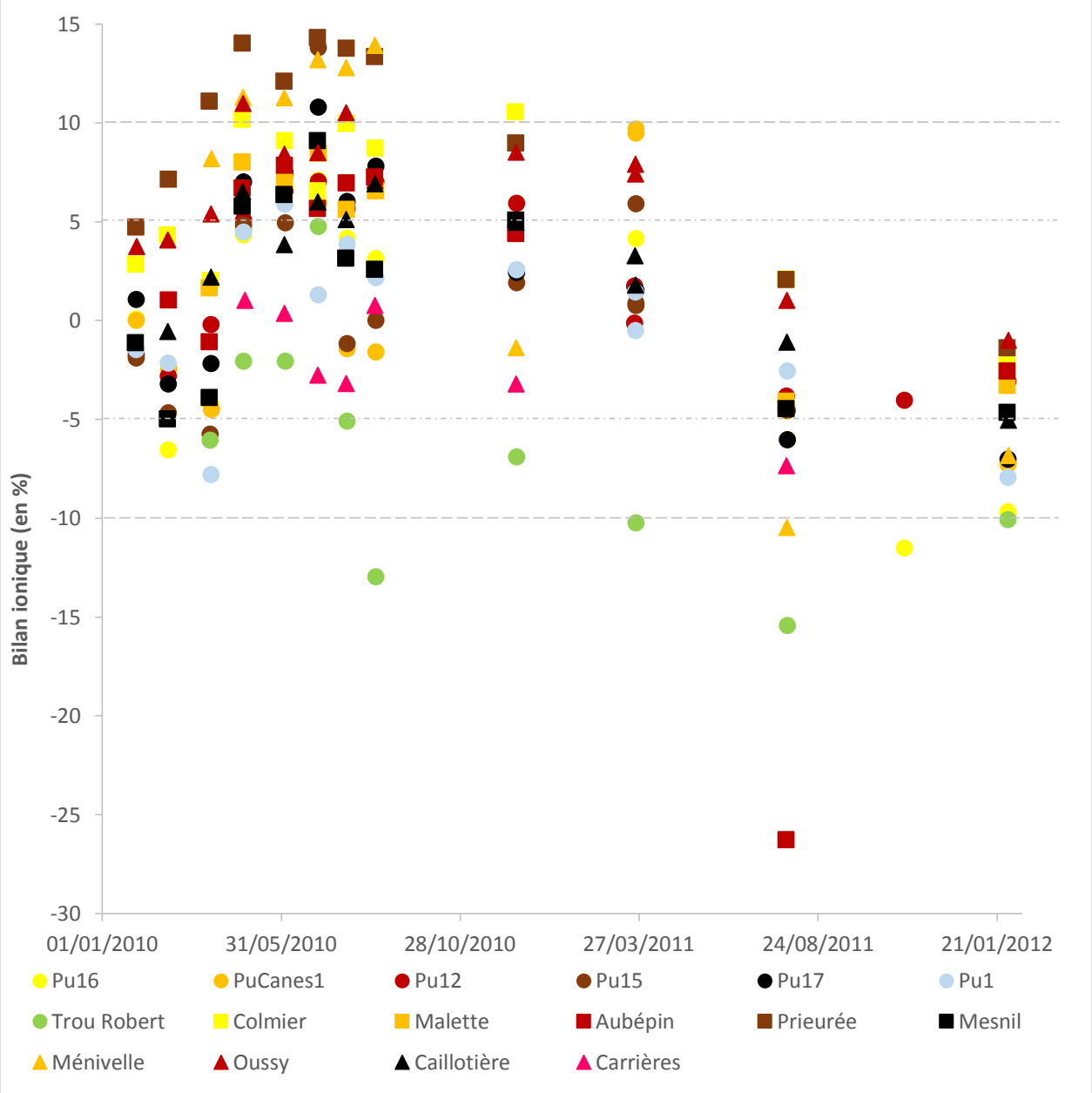


Fig. 150. *Bilan ionique des échantillons prélevés dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce et le Trou Robert, dans le secteur du méandre de Guilly.*

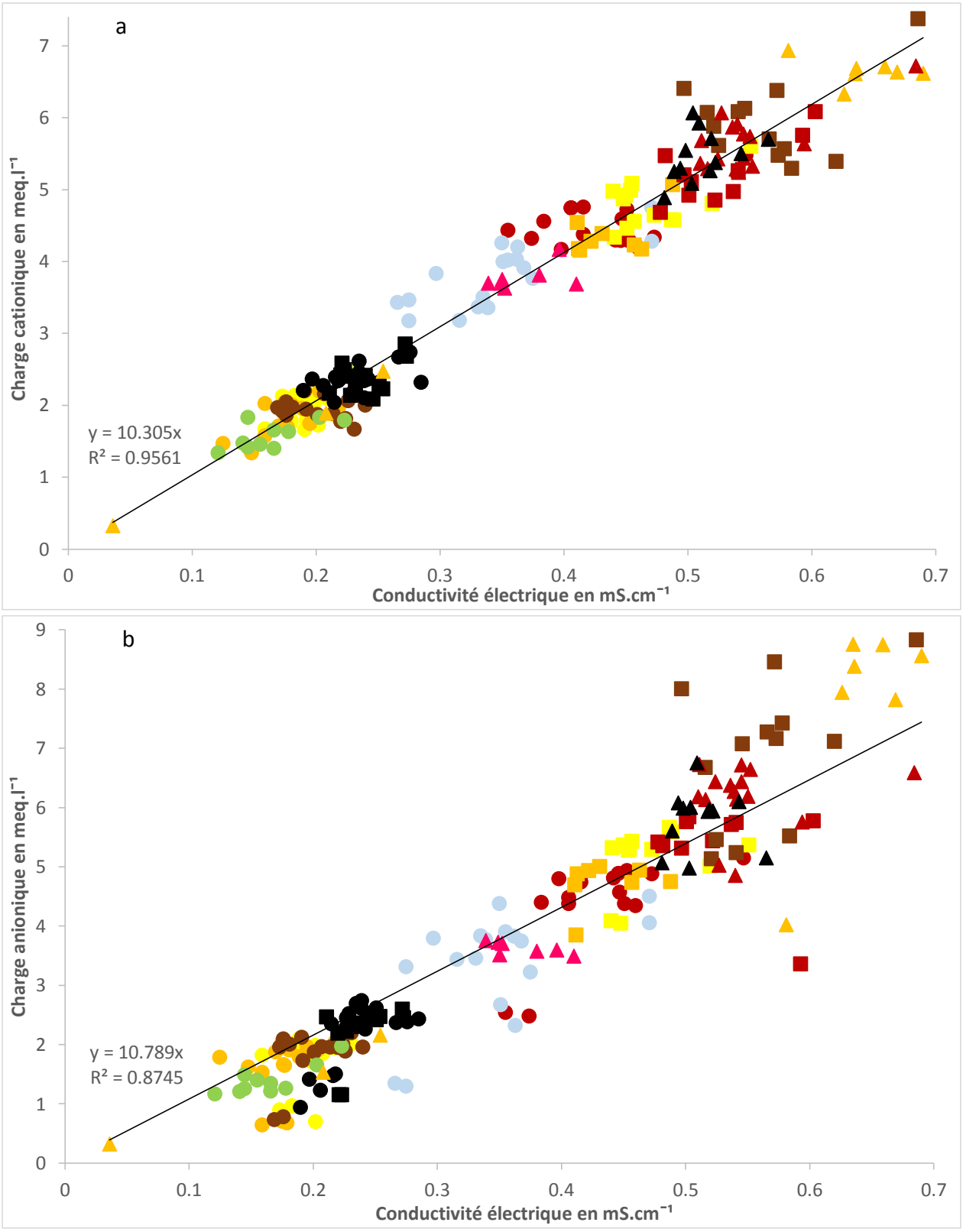


Fig. 151. *Charge cationique (a) et anionique (b) en fonction de la conductivité électrique des eaux prélevées dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce et le Trou Robert, dans le secteur du méandre de Guilly (légende identique à la figure 150).*

Les bilans ioniques pour chaque prélèvement ont été calculés, lorsque les analyses étaient complètes (fig. 150 et 151 et synthèse tab. 57).

Les balances ioniques les plus mauvaises se concentrent essentiellement au niveau des puits à La Prieurée, à Ménivelle et au Trou Robert (fig. 150).

A la Prieurée et Ménivelle, en période de hautes-eaux, les balances ioniques présentent un déficit de charges positives (fig. 151). Pour le Trou Robert, en période d'étiage, les balances ioniques présentent un déficit de charges négatives, ce qui reste inexpliqué (fig. 151).

Synthèse des données géochimiques et piézométriques disponibles et validées

Les données géochimiques des puits de Ménivelle, de la Prieurée et de Pu 15 ont finalement été abandonnées. A Ménivelle et à la Prieurée, les puits n'étant pas fermés, l'eau de pluie se déverse directement dedans, ce qui fausse les données géochimiques par des phénomènes de dilution. Les eaux de ces puits ne sont pas représentatives de la nappe.

Le Pu 15, lui, présente des variations piézométriques singulières. Lors du forage du puits, le terrain a été largement remanié à cause d'un problème de matériel. La déstructuration des alluvions peut expliquer ce comportement non significatif. Le puits Pu 15 est sans doute colmaté. Les résultats des suivis piézométriques et géochimiques ont donc également été abandonnés.

Les résultats du suivi géochimique d'une sélection de 14 sites sont donc présentés dans ce chapitre : 1 site pour la nappe de Beauce (Carrières), 11 pour la nappe alluviale dont 5 sites au sein du méandre (Pu 16, Pu 12, Pu Canes 1, Pu 17 et Pu 1), et dans la plaine alluviale au-delà des levées, 2 sites en rive gauche (Oussy et Caillotière) et 4 sites en rive droite (Colmier, Aubépin, Malette et Mesnil), 1 site dans une zone humide (Trou Robert, au sein du méandre) et 1 dans la Loire (Châteauneuf-sur-Loire).

En ce qui concerne le suivi piézométrique de la nappe alluviale, ce sont les données de 13 sites qui sont utilisées, sans compter les lignes d'eau du Trou Robert. L'extension temporelle de ces données est synthétisée dans le tableau 58.

Secteurs		Puits	Mise en place du suivi	Interruptions dans les données (problèmes de matériel)	Fin du suivi	Dernier relevé des sondes Diver	Nombre de jours de données disponibles
En rive gauche	au sein du méandre	Pu Canes 1	23/03/2009	10/01/2012 au 10/06/2012		30/01/2015	1987
		Pu 16	30/03/2009	31/01/2012 au 16/09/2013		29/01/2015	1537
		Pu 12	30/03/2009			29/01/2015	2132
		Pu 1	23/03/2009	24/12/2011 au 06/05/2013		30/01/2015	1641
		Pu 17	17/07/2009	31/01/2012 au 04/05/2013		30/01/2015	1564
		Trou Robert	21/03/2010	10/08/2011 au 09/01/2012 ; 31/01/2012 au 16/09/2013		30/01/2015	1028
	au-delà de la levée	Oussy	20/11/2009	25/02/2010 au 02/04/2010		29/01/2015	1861
		Caillotière	22/03/2010		30/01/2012		680
		Ménivelle	02/04/2010		08/08/2011		494
En rive droite (au-delà de la levée)		Colmier	19/11/2009		13/06/2013		1302
		Aubépin	22/03/2010	13/06/2013 au 16/09/2013		30/01/2015	1679
		Prieurée	22/03/2010	31/01/2012 au 16/09/2013		30/01/2015	1180
		Malette	22/03/2010	31/01/2012 au 16/09/2013		30/01/2015	1180
		Mesnil	20/11/2009	13/06/2013 au 16/09/2013		30/01/2015	1801

Tab. 58. *Données piézométriques disponibles dans le secteur du méandre de Guilly. Les interruptions dans les données ont été causées par des problèmes sur les sondes Diver (sonde qui se détache et tombe au fond du puits, défaillance de sondes dont il a été impossible de récupérer les données stockées dans leur mémoire).*

5.2.3. Méthodes de traitements des données

Les données géochimiques permettent de différencier les masses d'eau en présence et leurs mélanges au sein de la nappe alluviale, grâce à la réalisation de diagramme de Piper et de graphiques $\delta^2H = f(\delta^{18}O)$. Les données isotopiques sont également utilisées pour mettre en évidence d'une part, les modes de recharge de la nappe alluviale et d'autre part, les apports des nappes alluviales dans les débits de la Loire moyenne en période d'étiage.

Les données piézométriques de la nappe alluviale sont d'abord converties en altitudes (cote NGF) grâce à une campagne de nivellement des sites suivis (tab. 55). Ensuite, combinées aux lignes d'eau de la Loire dans le secteur de Guilly, elles permettent de définir les échanges entre la Loire et la nappe alluviale.

Il est donc nécessaire de disposer de plusieurs chroniques fiables des lignes d'eau de la Loire dans le secteur du méandre de Guilly.

Or, il n'existe aucune échelle limnimétrique à proximité immédiate. Les données de hauteurs d'eau les plus proches dont dispose la Dreal (fig. 152) se situent à Gien (34,9 km en amont de Guilly), Châteauneuf-sur-Loire (8,9 km en aval de Guilly) et Saint-Denis-de-l'Hôtel (17,4 km en aval de Guilly).



Fig. 152. *Stations de mesure de hauteurs d'eau de la Loire, de la Dreal. Source fond de carte : Géoportail.*

Il n'était pas non plus possible d'utiliser simplement les données de la sonde Diver située le long d'une berge de la Loire à l'Ile aux Canes. En effet, il était impossible de l'installer dans le lit de façon à ce qu'elle soit toujours sous l'eau. Les données collectées sont donc incomplètes (pour les débits de la Loire les plus faibles, la sonde est hors d'eau).

Les lignes d'eau de la Loire ont donc été estimées sur une distance de 6,1 km. 61 points de calcul des lignes d'eau de la Loire, au pas de temps journalier, ont donc été définis tout au long du méandre de Guily (fig. 153), chacun espacé de 100 m. Ils sont définis en fonction de leur distance aux échelles limnimétriques de Saint-Denis-de-l'Hôtel et de Gien. Pour chacun de ces points, sont calculées les lignes d'eau de la Loire en fonction des lignes d'eau à Gien, de celles de Saint-Denis-de-l'Hôtel, de la distance entre le point considéré et Saint-Denis-de-l'Hôtel et de deux coefficients (optimisés grâce aux relevés de terrain (DGPS) des lignes d'eau de la Loire dans le secteur du méandre de Guilly pour des débits variés) selon la relation suivante :

$$Z_P = [(Z_{Gien} - Z_{St\ Denis}) / D_{Gien\text{-}St\ Denis}] \times D_{St\ Denis\text{-}P} \times a + Z_{St\ Denis} \times b$$

avec Z l'altitude des lignes d'eau (en m NGF) et D les distances (en m)

avec a et b deux coefficients optimisés grâce aux relevés de terrain (DGPS) des lignes d'eau de la Loire dans le secteur du méandre de Guilly pour des débits variés.

Les données collectées par la sonde Diver installée dans la Loire à l'Ile aux Canes ont permis de valider ces données de lignes d'eau calculées.

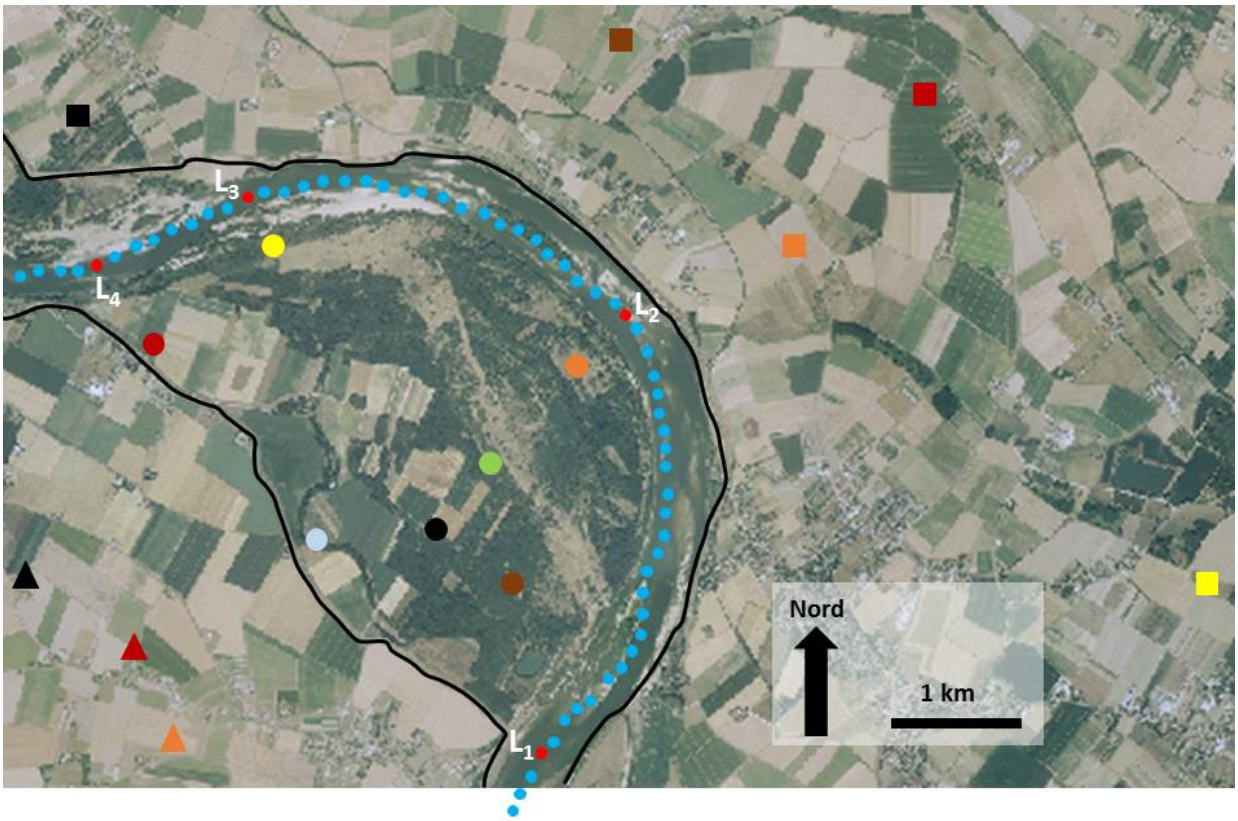


Fig. 153. *Localisation des sites de calcul des lignes d'eau de la Loire (points bleus) dans le secteur du méandre de Guilly.*

Ainsi, des **différences de charge** entre ces lignes d'eau de la Loire et la surface piézométrique de la nappe alluviale ont été calculées pour différents sites suivis. Les quatre sites de calcul de lignes d'eau de la Loire qui ont été utilisés pour les différences de charge sont L_1 pour la partie amont du méandre, L_2 pour l'Ile aux Canes, L_3 et L_4 pour la partie aval du méandre (fig. 153). Ces différences de charge sont calculées à partir des moyennes journalières des lignes d'eau de la Loire et de la surface piézométrique de la nappe alluviale. En effet, étant donné l'éloignement des échelles limnimétriques utilisées pour le calcul des lignes d'eau de la Loire dans le secteur de Guilly, l'utilisation de ces données à un pas de temps plus court serait douteuse.

De plus, des **corrélations linéaires** ont été recherchées entre les chroniques piézométriques de la nappe alluviale d'une part, et d'autre part, les lignes d'eau de la Loire et les précipitations journalières (données de la station de Saint-Benoît-sur-Loire, fournies par Météo France), grâce au logiciel Past (fonction crosscorrelation).

Enfin, pour mettre en évidence les circulations des eaux souterraines, des **cartes piézométriques** ont été réalisées, à l'aide du logiciel Surfer, avec une interpolation par krigeage des données piézométriques de la nappe alluviale mesurées et des 61 lignes d'eau de la Loire calculées pour le secteur du méandre de Guilly. Pour chaque carte piézométrique présentée dans ce chapitre, le variogramme correspondant est disponible en annexe (annexe G). Il permet en effet d'appréhender la vraisemblance de la carte piézométrique produite à partir des données mesurées, liée à la marge d'erreur inhérente à toute méthode d'interpolation.

5.3. Caractérisation de la chimie des différentes masses d'eau en présence

Il s'agit ici de synthétiser les principales caractéristiques de la chimie des eaux des unités hydrologiques : la Loire[2], les précipitations locales, la nappe de Beauce, la nappe alluviale et une zone humide, le Trou Robert. Etant données les incertitudes sur les données de la chimie des eaux pour les prélèvements réalisés dans des puits agricoles, l'analyse ici de ces données ne s'attachera qu'au commentaire général des caractéristiques qui différencient ces masses d'eau l'une de l'autre.

On peut noter ici que les graphiques de l'évolution de la conductivité électrique, du pH et des concentrations des éléments majeurs, en fonction du temps, ont été placés en annexe (annexe E).

Différenciation des masses d'eau en présence

Le diagramme de Piper réunissant les résultats de tous les prélèvements effectués (fig. 154) permet de démontrer que **les différentes sources possibles de la recharge de la nappe alluviale (recharge par les précipitations, la Loire et la nappe de Beauce) se distinguent**, essentiellement grâce aux anions.

Les eaux de la nappe alluviale, en rive droite, au-delà des levées (puits à Oussy et Caillotière) représenteront également un pôle de mélange pour les eaux de la nappe alluviale au sein du méandre. Les eaux de la nappe alluviale au sein du méandre se situent donc au milieu de ces différents pôles de mélange (fig. 154). En effet, leurs données sont échelonnées entre celles de la Loire et et celles de la nappe au-delà de la levée (Oussy et Caillotière), en fonction d'un gradient dépendant de la distance entre les puits et la Loire. Le détail de ces mélanges et de leurs variations sera étudié à partir des données isotopiques collectées (cf. 5.5), dont la fiabilité a été soulignée précédemment.

[2] La chimie des eaux de la Loire a été décrite au chapitre précédent (4.2). Une synthèse des apports amont et de l'influence des nappes en Loire moyenne sera faîte à la fin du présent chapitre (5.6).

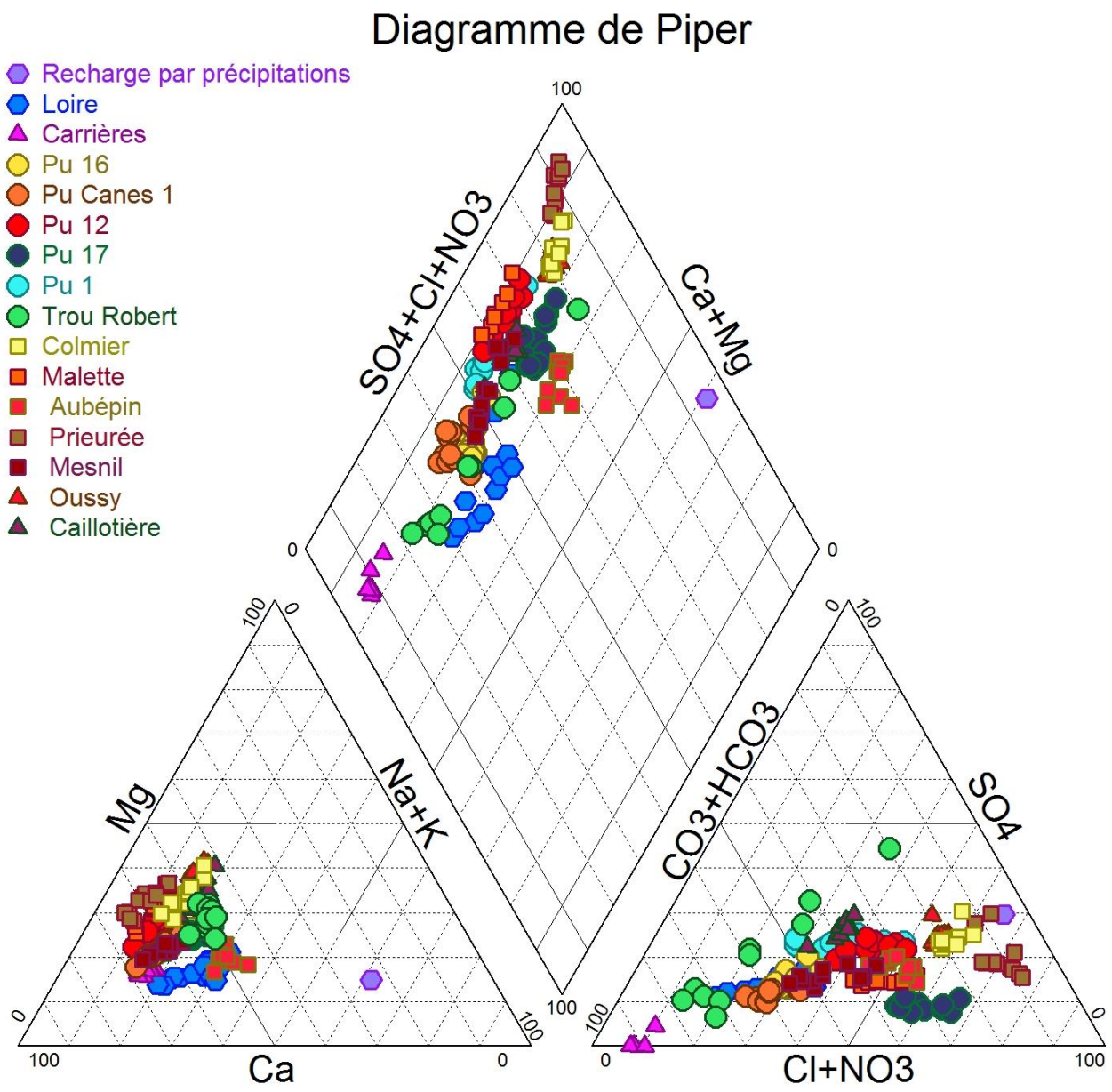


Fig. 154. *Diagramme de Piper réunissant l'ensemble des données collectées lors des prélèvements dans le secteur du méandre de Guilly (nappe alluviale, Loire, Trou Robert, nappe de Beauce) et données des précipitations (cf 5.3.1).*

	HCO_3^-	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	Mg^{2+}	K^+	SiO_2	NO_3^-	F^-	NO_2^-	CE en $mS.cm^{-1}$	pH
	en $meq.l^{-1}$												
Loire (19)	1,25	1,36	0,47	0,30	0,54	0,39	0,10	0,20	0,13	0,00	0,00	0,230	8,1
Pu 16 (16)	1,03	1,10	0,30	0,28	0,34	0,48	0,04	0,37	0,28	0,00	0,00	0,189	6,6
Pu Canes 1 (16)	1,08	1,10	0,26	0,21	0,29	0,41	0,02	0,36	0,25	0,00	0,00	0,171	6,8
Pu 12 (16)	1,58	2,75	0,97	1,03	0,48	1,18	0,10	0,42	1,03	0,00	0,00	0,420	6,6
Pu 17 (17)	0,77	1,25	0,27	0,22	0,39	0,58	0,13	0,39	1,10	0,00	0,00	0,233	6,5
Pu 1 (17)	1,55	2,13	0,75	0,81	0,47	1,14	0,05	0,31	0,68	0,00	0,00	0,330	7,0
Trou Robert (10)	0,85	0,77	0,25	0,26	0,31	0,46	0,04	0,11	0,04	0,00	0,00	0,166	7,7
Oussy (15)	1,25	2,72	1,28	1,57	0,67	2,05	0,21	0,58	2,23	0,00	0,00	0,543	6,5
Caillotière (12)	2,24	2,63	0,88	1,51	0,77	1,87	0,19	0,56	1,17	0,00	0,00	0,512	6,6
Colmier (13)	0,96	2,45	1,38	1,29	0,56	1,60	0,19	0,50	1,68	0,00	0,00	0,470	6,5
Aubépin (10)	1,74	2,62	0,78	1,00	0,80	1,04	0,76	0,46	2,05	0,00	0,00	0,526	6,8
Malette (8)	1,70	2,55	1,14	0,69	0,41	1,36	0,06	0,52	1,18	0,00	0,01	0,436	7,0
Mesnil (13)	1,10	1,45	0,50	0,37	0,37	0,51	0,05	0,40	0,40	0,00	0,00	0,238	6,9
Carrières (7)	3,27	2,52	0,31	0,02	0,54	0,63	0,10	0,21	0,00	0,02	0,00	0,368	7,4

Tab. 59. *Teneurs moyennes des éléments majeurs dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce et de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire (moyenne de tous les prélèvements réalisés : pour chaque site leur nombre est indiqué entre parenthèse).*

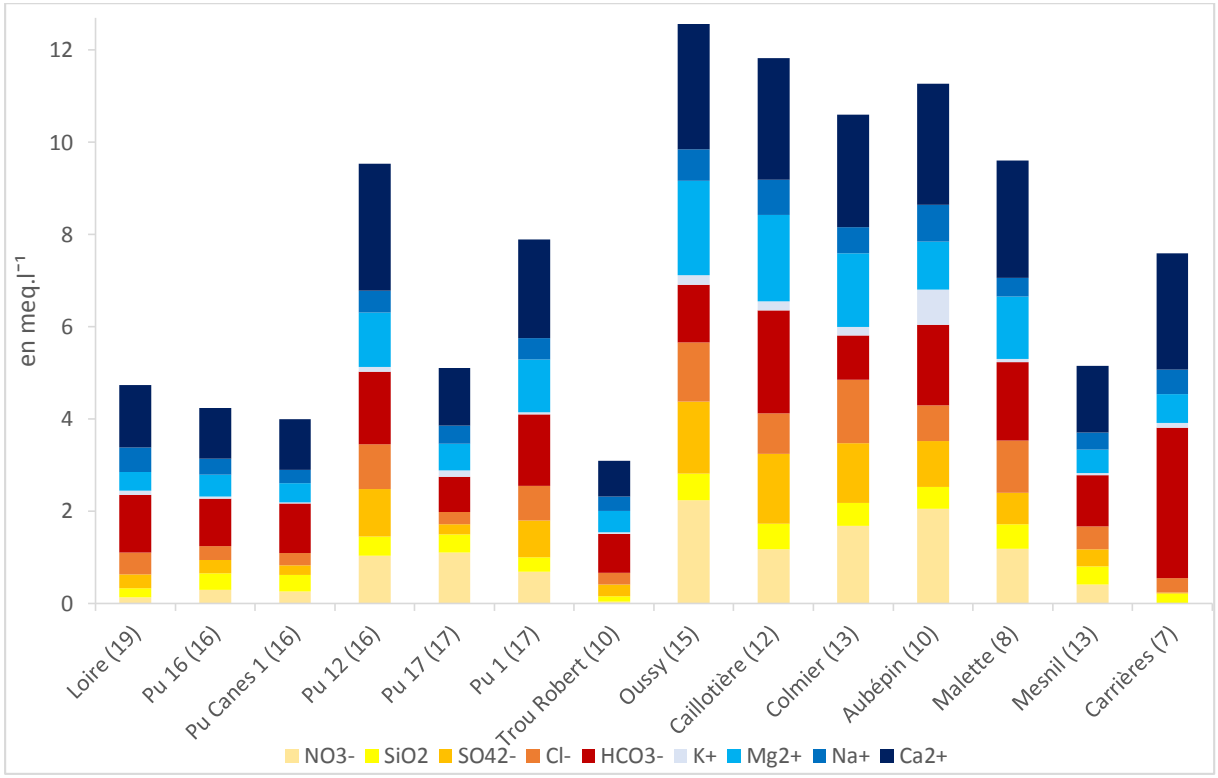


Fig. 155. *Teneurs des éléments majeurs dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce, du Trou Robert et de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire (moyenne de tous les prélèvements réalisés : pour chaque site leur nombre est indiqué entre parenthèse sur l'axe des X).*

Loire (12)	Pu 16 (15)	Pu Canes 1 (15)	Pu 12 (15)	Pu 17 (13)	Pu 1 (15)	Trou Robert (8)	Oussy (13)	Caillotière (9)	Colmier (11)	Aubépin (8)	Malette (6)	Mesnil (11)	Carrières (6)	
1,00	-0,03	-0,22	0,01	-0,10	-0,54	0,82	-0,36	0,21	0,22	-0,02	0,63	0,17	0,25	Loire
	1,00	0,81	0,46	0,42	0,64	-0,03	-0,15	0,54	0,62	0,50	0,44	0,44	0,31	Pu 16
		1,00	0,59	0,72	0,88	-0,13	0,31	0,59	0,66	0,63	0,32	0,56	0,29	Pu Canes 1
			1,00	0,78	0,56	-0,33	0,28	0,28	0,70	0,67	0,32	0,46	0,39	Pu 12
				1,00	0,72	-0,33	0,42	0,46	0,85	0,60	0,59	0,68	0,00	Pu 17
					1,00	-0,57	0,50	0,37	0,40	0,45	-0,38	0,33	-0,10	Pu 1
						1,00	-0,21	0,32	0,16	0,12	0,96	0,23	0,78	Trou Robert
							1,00	0,45	0,07	0,31	-0,16	0,33	0,15	Oussy
								1,00	0,76	0,72	0,52	0,74	0,56	Caillotière
									1,00	0,81	0,88	0,86	0,44	Colmier
										1,00	0,76	0,75	0,49	Aubépin
											1,00	0,81	0,86	Malette
												1,00	0,47	Mesnil
													1,00	Carrières

Tab. 60. *Coefficients de corrélation linéaire entre les données de conductivité électrique (mesurée entre mars 2009 et mars 2011) de chaque site de prélévements dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce à Carrières et la Loire à Châteauneuf-sur-Loire. Entre parenthèse est indiqué le nombre de mesure pour chaque site.*

Alcalinité : prédominance des ions HCO_3^-

En fonction du pH des eaux, l'espèce minérale carbonée dominante dans les eaux prélevées dans le secteur de Guilly est le bicarbonate (tab. 61).

Cette dominance est marquée pour les eaux de surface (Trou Robert), la nappe de Beauce (Carrières) et les puits proches de la Loire (Pu Canes 1, Mesnil et Malette). Mais, pour les autres sites de prélèvements au sein de la nappe alluviale, le bicarbonate ne représente qu'entre 51 et 63% du carbone inorganique total dissous (excepté Pu 1 avec 74% de bicarbonates).

	H_2CO_3	HCO_3^-	CO_3^{2-}
Pu Canes 1 (13)	30,0	70,0	0,0
Pu 16 (13)	38,6	61,4	0,0
Pu 12 (14)	40,0	60,0	0,0
Pu 17 (12)	46,0	54,0	0,0
Pu 1 (13)	25,4	74,6	0,0
Trou Robert, zone humide (10)	16,6	82,3	1,1
Oussy (13)	48,2	51,7	0,0
Caillotière (12)	38,8	61,2	0,0
Mesnil (11)	29,6	70,2	0,1
Malette (8)	29,0	70,8	0,3
Aubépin (10)	36,2	63,7	0,1
Colmier (11)	48,1	51,9	0,0
Carrières, nappe de Beauce (7)	10,5	89,4	0,1

Tab. 61. *Abondances moyennes (en %) des espèces minérales carbonées pour chaque site de prélèvements du secteur de Guilly. Entre parenthèses est indiqué, pour chaque site de prélèvements, le nombre d'échantillons pris en compte dans le calcul de ces moyennes.*

5.3.1. Les précipitations

Les données disponibles de chimie des précipitations les plus proches sont celles de la station d'Orléans (prélèvements réalisés pendant l'année 2004 ; Millot et al., 2010). Les précipitations sont faiblement minéralisées. On peut, en première approximation, estimer les caractéristiques chimiques des eaux de recharge à partir des précipitations après infiltration en multipliant par 5 les concentrations en éléments majeurs des précipitations. Le facteur 5 est indicateur de la concentration des eaux par évapotranspiration dans la zone non saturée lors de leur infiltration vers la nappe. On nommera ces eaux infiltrées « recharge » (tab.62). Cette estimation est peu précise.

	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^-	NO_3^-
Précipitations	1,22	0,59	0,19	0,51	1,52	1,50	1,05
Recharge (x5)	6,11	2,93	0,97	2,53	7,60	7,51	5,26

Tab. 62. *Moyenne pondérée des concentrations des différents éléments majeurs, pour les mois d'octobre à mars, des précipitations à Orléans, et des eaux de « recharge » (concentrations de précipitations multipliées par 5). Source données : Millot et al., 2010.*

La moyenne pondérée par élément, des mois d'octobre à mars, n'est utilisée que pour définir un pôle de mélange représentant les précipitations dans un diagramme de Piper synthétique (fig. 154). On note ici que ce sont les cations qui différencient ces eaux de « recharge » des eaux prélevées dans le secteur du méandre de Guilly (fig. 154).

5.3.2. La nappe de Beauce

Sept prélèvements ont été réalisés dans la nappe de Beauce. Ces eaux ont une conductivité électrique moyenne de 0,368 $mS.cm^{-1}$ (tab.59).

Les ions bicarbonates et calcium sont les espèces chimiques dominantes (leurs concentrations moyennes respectives sont de 3,27 et 2,52 $meq.l^{-1}$, tab. 58) en raison de la nature carbonatée de l'aquifère. Il s'agit des plus fortes concentrations en bicarbonates mesurées dans le secteur du méandre de Guilly (fig. 155).

L'absence de nitrate et de sulfate dans les eaux prélevées de la nappe de Beauce est notable. A l'exception du potassium et de la silice dissoute, les concentrations des éléments majeurs sont assez constantes entre les différents prélèvements.

5.3.3. Une zone humide : le Trou Robert

La chimie des eaux du Trou Robert est assez bien corrélée avec celle des eaux de la Loire (tab. 60). Ce sont les eaux, en moyenne, les plus faiblement minéralisées du secteur d'étude (conductivité électrique moyenne : 0,166 $mS.cm^{-1}$). Les variations du pH y sont remarquables par leur ampleur (entre 6,3 et 9,2 unité pH), ce qui est lié au contact avec l'atmosphère et à l'activité biologique du plan d'eau.

La faible minéralisation ionique de ces eaux s'accompagne de concentrations relativement faibles en éléments majeurs, notamment pour les nitrates (tab. 59, fig. 155). Les concentrations en bicarbonate, en sulfates, en sodium, en potassium et en silice dissoute connaissent d'importantes variations, contrairement aux autres éléments majeurs.

5.3.4. La nappe alluviale

Le pH moyen pour l'ensemble des sites de prélèvements dans la nappe alluviale est compris entre 6,5 et 7,0 unité pH (tab. 59).

La conductivité électrique

Globalement, **les eaux de la nappe alluviale sont moins minéralisées au sein du méandre** qu'en rive droite ou en rive gauche au-delà des levées (fig. 155). Les mesures de conductivité électrique pour chaque site de prélèvement au sein du méandre sont assez constantes dans le temps et dans l'espace, à part à Pu 12 et Pu 1. Notons que les eaux de la nappe alluviale pour les deux puits les plus proches de la Loire (Pu 16 et Pu Canes 1) sont souvent même moins minéralisées que les eaux de la Loire. Ce sont également les deux seuls puits qui ne sont pas entourés de champs cultivés.

Toujours au sein du méandre, entre la Loire et les levées, les valeurs de conductivité électrique sont corrélées d'une part entre les puits Pu 16 et Pu Canes 1 (coefficient de corrélation linéaire r = 0,81 ; tab. 60) et d'autre part, entre Pu Canes 1 et Pu 17 (coefficient de corrélation linéaire r = 0,72 ; tab. 60). Leur conductivité électrique moyenne se situe entre 0,171 et 0,233 $mS.cm^{-1}$. Effectivement, les caractéristiques chimiques des eaux du puits Pu 17 sont souvent proches de celles des puits Pu 16 et Pu Canes 1, contrairement aux Pu 12 et Pu 1. La minéralisation des eaux de la nappe alluviale pour ces deux derniers puits est intermédiaire entre ces trois premiers puits du méandre et les puits situés au-delà des levées (conductivité électrique moyenne de 0,330 $mS.cm^{-1}$ au Pu 1 et 0,420 $mS.cm^{-1}$ au Pu 12 ; tab. 59).

En rive gauche, au-delà des levées (puits à Oussy et la Caillotière), les eaux de la nappe alluviale sont les plus minéralisées (conductivité moyenne 0,543 $mS.cm^{-1}$ à Oussy et 0,512 à la Caillotière ; tab. 59).

En rive droite, la conductivité électrique moyenne des eaux de la nappe alluviale des trois puits les plus éloignés de la Loire (Colmier, Aubépin et Malette) se situe entre 0,430 et 0,530

$mS.cm^{-1}$. Les données de conductivité électrique pour les quatre puits en rive droite sont d'ailleurs toutes corrélées entre les différents sites de prélèvements (coefficient de corrélation linéaire r entre 0,75 et 0,88 ; tab. 60).

La conductivité moyenne des eaux de la nappe alluviale au Mesnil est de 0,238 $mS.cm^{-1}$. Ce dernier puits est proche de la Loire. Les caractéristiques de la chimie des eaux de la nappe alluviale s'y apparentent à celles au sein du méandre de Guilly.

Concentrations des éléments majeurs

Les concentrations en ions **HCO_3^-, Ca^{2+}, Na^+ et SiO_2** des eaux de la nappe alluviale varient conjointement, même si les gammes de valeur sont différentes (fig. 154). La concentration en silice dissoute au Pu 1 est la plus faible mesurée au sein de la nappe alluviale, alors que pour les autres éléments majeurs, les concentrations se situent généralement à la médiane des autres puits.

Pour les éléments suivants, **Cl^-, SO_4^{2-}, Mg^{2+}**, deux ensembles de puits sont définis par leurs variations communes : d'une part, les puits à Oussy, Caillotière, Colmier, Aubépin et Malette (variations significatives au cours du temps) et d'autre part, les puits proches de la Loire au Mesnil, Pu 16, Pu Canes 1 et Pu 17 (quasiment pas de variations des concentrations au cours du temps). Les variations des concentrations de ces éléments au niveau des puits Pu 12 et Pu 1 ne s'apparentent à aucun des deux groupes. L'effet des pompages sur la chimie des eaux de ces puits étant important, il convient de n'en tirer aucune conclusion.

Pour **les nitrates et le potassium**, les concentrations dans les eaux de la nappe alluviale proche de la Loire y sont assez stables (Pu 16, Pu Canes 1 et Mesnil). Au niveau de tous les autres puits, les variations des concentrations de ces deux éléments sont significatives mais aucun comportement commun ne se distingue. On peut noter ici que les concentrations en potassium (fig. 156) au puits d'Aubépin (rive droite) sont au moins quatre fois plus élévées qu'au niveau des puits suivis qui l'entourent (concentration moyenne de 0,76 $meq.l^{-1}$ à Aubépin contre 0,19 $meq.l^{-1}$ au Colmier, tab. 59).

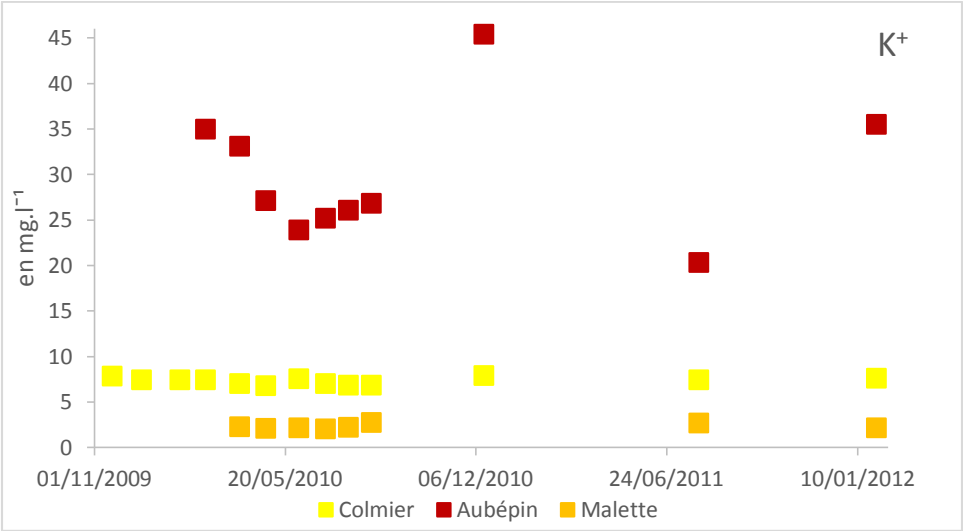


Fig. 156. *Concentrations en potassium dans les eaux de la nappe alluviale au niveau du puits d'Aubépin (rive droite).*

5.3.5. Influence des activités agricoles sur la chimie des eaux de la nappe alluviale

Les activités agricoles sont omniprésentes dans la plaine alluviale, et notamment les cultures intensives (fig. 157), excepté aux alentours des puits Pu 16 et Pu Canes 1, les plus proches de la Loire. Ces activités induisent des apports anthropiques pour les sols et les cultures.



Fig. 157. *Activités agricoles au sein du méandre de Guilly. Crédit : S. Ramond.*

Grâce aux informations communiquées par M. Boin (Président de l'association des irrigants de la commune de Saint-Benoît-sur-Loire) sur les types d'engrais, leurs formules chimiques et la quantité utilisée au printemps 2010 dans les champs à proximité des puits au

Colmier et à Aubépin, l'impact de l'utilisation de ces engrais sur les eaux de la nappe peut être étudié (tab. 63 et fig. 158).

Lieu	Culture	Date	Type d'engrais	Quantité
Colmier	Orge d'hiver	16/02	NPK	440 kg
	Orge d'hiver	19/03	NAS	?
Aubépin	Maïs	14/04	NPK	350kg
	Maïs	28/05	NAS	?

Tab. 63. *Caractérisation des engrais utilisés au printemps 2010 dans les champs les plus proches des puits de Colmier et d'Aubépin. Source : D. Boin, communication personnelle.*

D'après la figure 158, au Colmier, suite à la première utilisation d'engrais, les concentrations en nitrate et potassium sont constants le mois suivant (février 2010) puis diminuent légèrement. Seule la concentration en sulfates augmente légèrement puis se stabilise. A Aubépin, les concentrations en nitrate dans les eaux de la nappe alluviale augmentent tout de suite après l'utilisation des engrais puis diminuent progressivement. Pour le potassium et les sulfates, leur concentration y diminue avant et après l'utilisation d'engrais, puis augmentent légèrement dans les mois qui suivent.

Dans les eaux de la nappe alluviale, la concentration des éléments chimiques entrant dans la composition des engrais, n'augmente donc pas de façon importante et systématique, suite à leur utilisation aux alentours d'un puits. Cependant, étant donné les concentrations importantes d'éléments chimiques spécifiques à la composition des engrais, bien qu'il n'y ait pas de pollution ponctuelle et localisée, **il existe une pollution diffuse à l'échelle de la plaine alluviale, liée à l'agriculture intensive**.

Sur le site d'Aubépin, les fortes concentrations en potassium ne semblent donc pas être expliquées par des apports anthropiques. Néanmoins, les concentrations en sodium à Aubépin sont également les plus importantes mesurées dans la nappe alluviale (moyenne des concentrations en sodium pour dix échantillons : 0,80 meq.l^{-1} ; tab. 59). Ceci pourrait donc indiquer une influence localisée des argiles sur la chimie des eaux de la nappe alluviale.

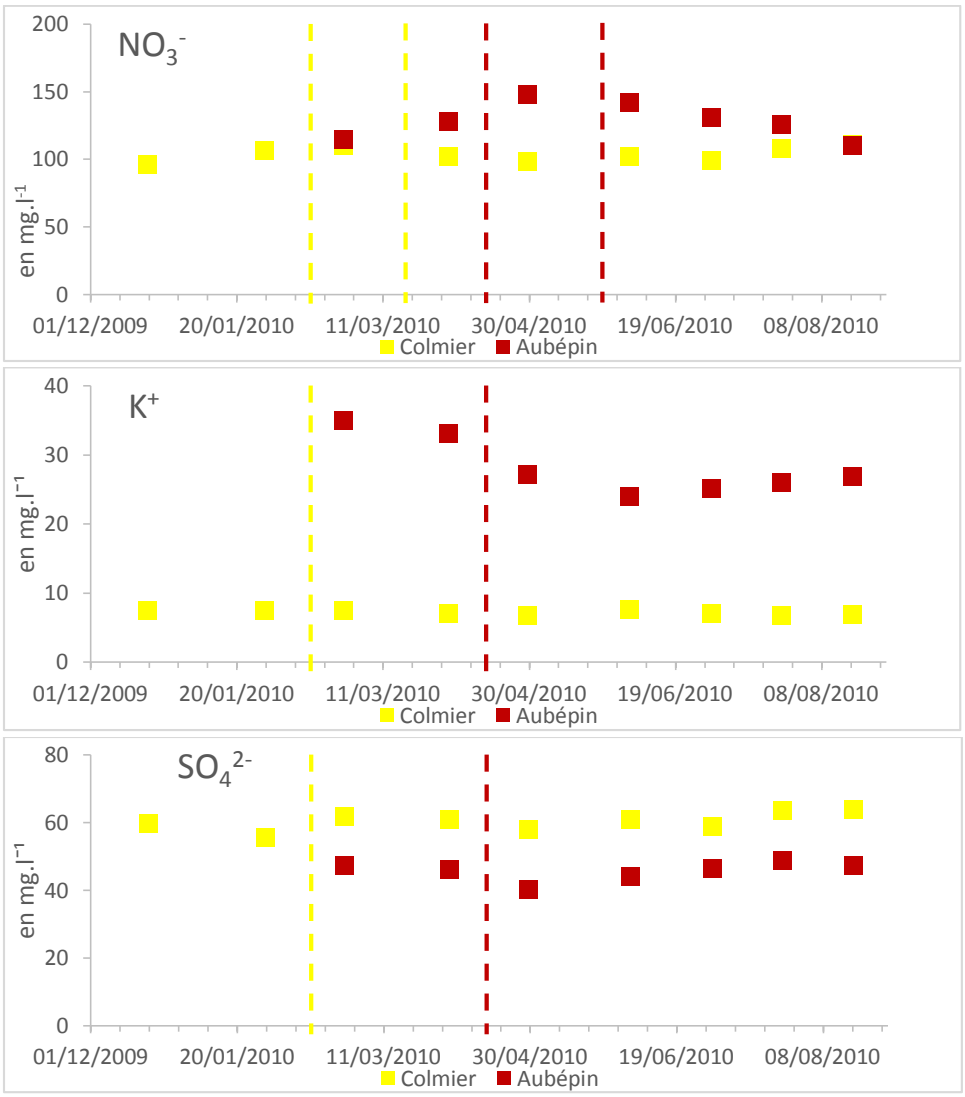


Fig. 158. *Evolution des concentrations de nitrates, potassium et sulfates dans les eaux de la nappe alluviale au Colmier et à Aubépin, en fonction de l'utilisation d'engrais à proximité. Les lignes verticales en pointillés indiquent les dates d'utilisation d'engrais dans les champs à proximité des puits du Colmier (lignes jaunes) et d'Aubépin (lignes rouges).*

Les résultats de la chimie des eaux des différentes masses d'eau sont à manier avec précaution pour tous les prélèvements réalisés dans des puits agricoles, étant donné le doute concernant le bon renouvellement des eaux au sein de ces puits. Il a été néanmoins possible de caractériser globalement les différentes masses d'eau en présence : la Loire, la nappe de Beauce, la zone humide du Trou Robert ainsi que différents secteurs de la nappe alluviale. Ainsi, les eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly semblent être le résultat de différents mélanges entre les eaux de la Loire, les précipitations et les eaux de la nappe alluviale au-delà des levées.

5.4. Piézométrie de la nappe alluviale : variations, échanges avec la Loire, circulation au sein de la nappe et autres apports

L'étude des données piézométriques porte sur la période de mars 2009 à janvier 2012. Seules les chroniques continues de la surface piézométrique de la nappe alluviale (Pu 12 et Oussy) ont fait l'objet d'une analyse détaillée jusqu'en janvier 2015 (cf 5.4.6).

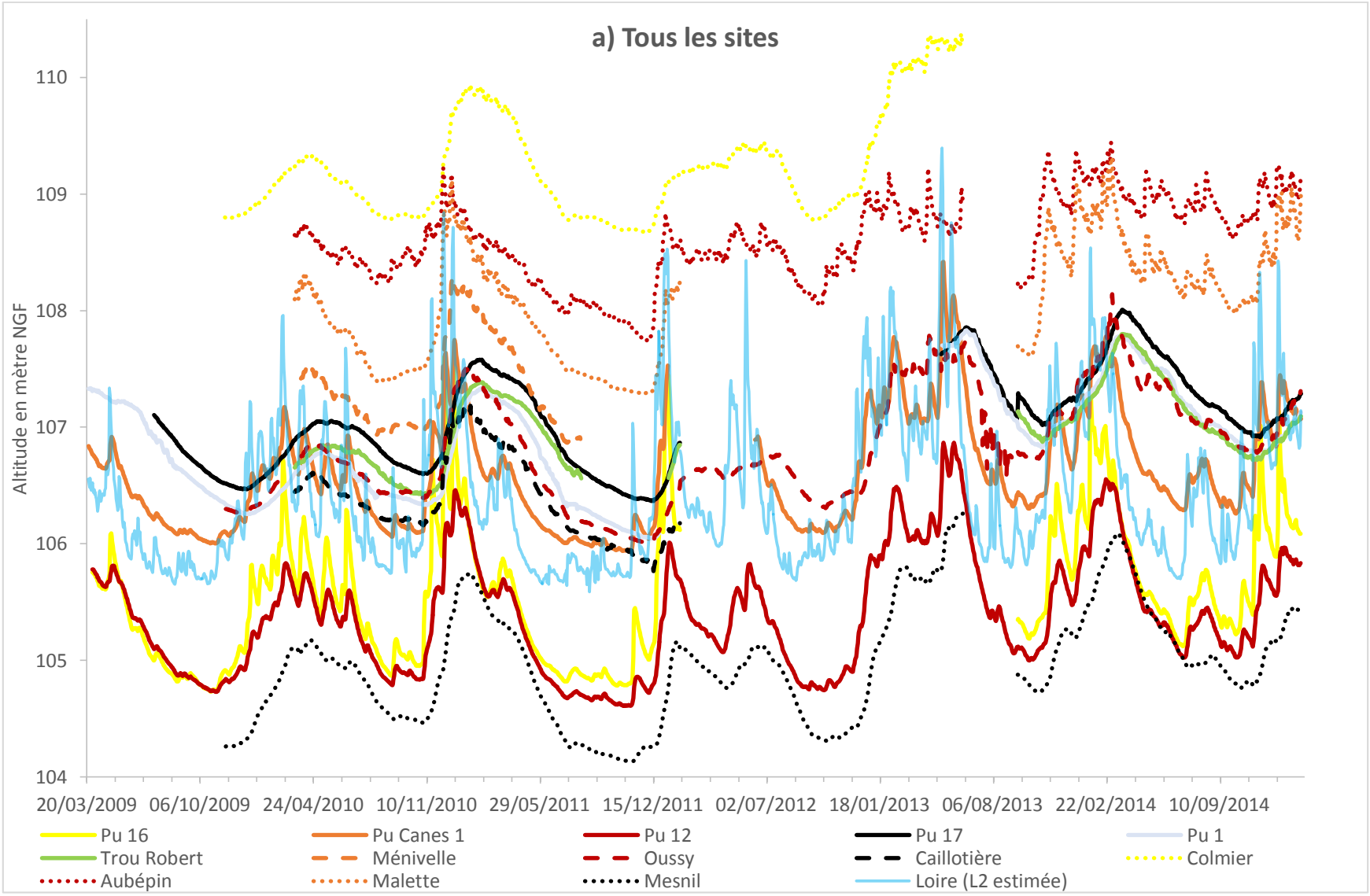
5.4.1. Variations temporelles et spatiales de la piézométrie de la nappe alluviale

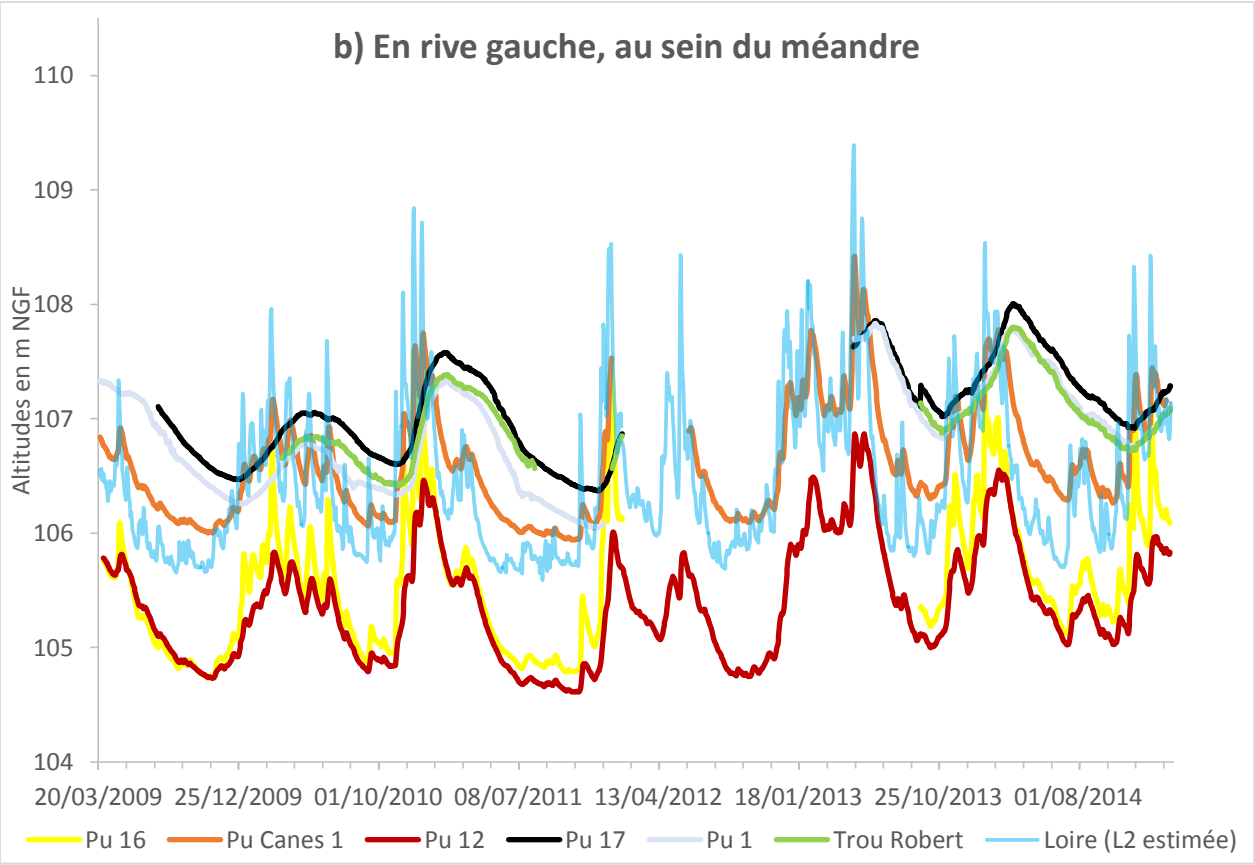
Le toit de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly varie entre 104 et 110,5 m NGF (fig. 159).

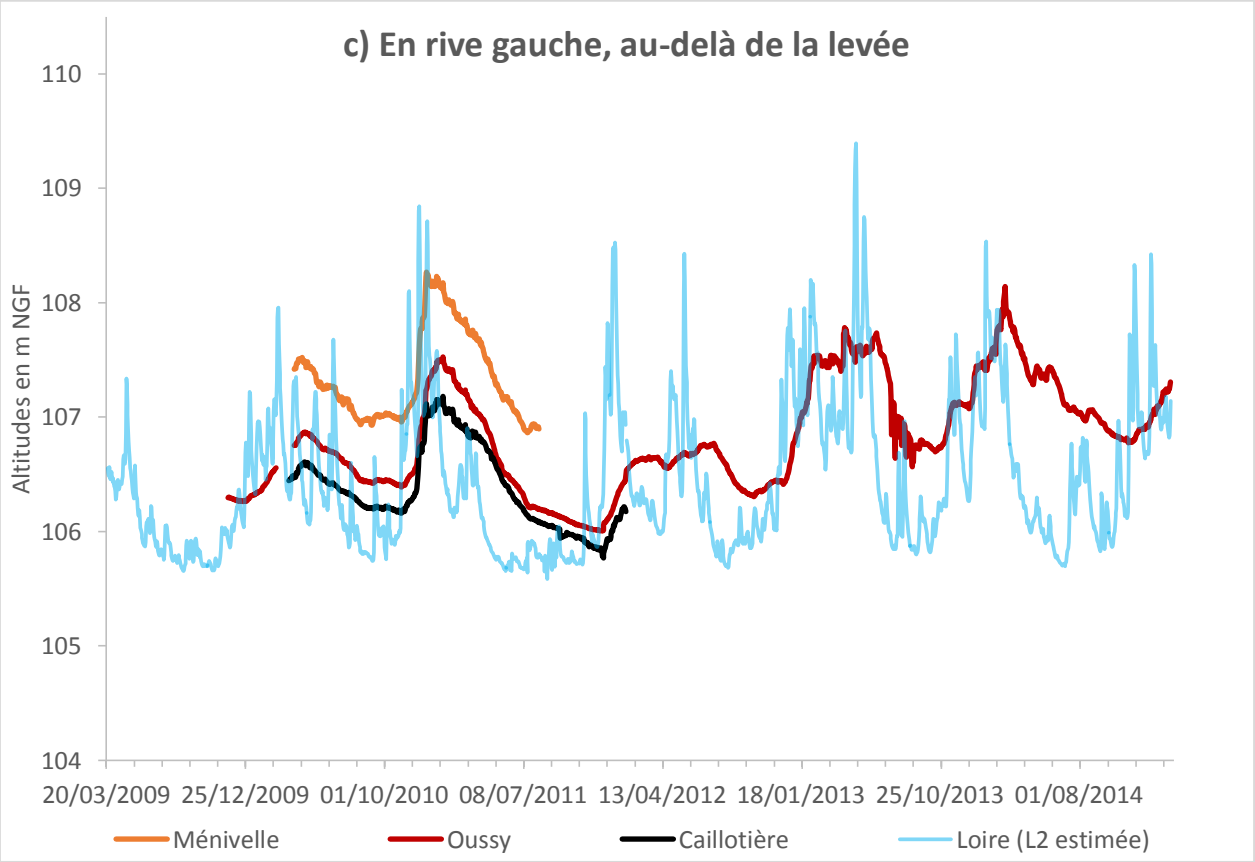
A partir des chroniques de la surface piézométrique de la nappe alluviale et des lignes d'eau de la zone humide du Trou Robert, **des regroupements de sites sont possibles** :

- Tout d'abord, la nappe alluviale aux puits Pu Canes 1, Pu 16 et Pu 12, présentent les variations piézométriques les plus importantes (différence entre le maximum et le minimum piézométrique supérieure à 1,80 m entre mars 2009 et janvier 2012, avec même une différence de 2,87 m au Pu 16). Ce sont les trois puits les plus proches de la Loire en termes de distance (fig. 147, 5.2.1).

- Ensuite, la majorité des sites présente des variations plus faibles (différence entre le maximum et le minimum piézométrique entre 0,90 et 1,60 m entre mars 2009 et janvier 2012): Pu 17, Pu 1 et le Trou Robert au sein du méandre (respectivement, 1,21 m ; 1,29 m et 0,97 m), les trois puits de la rive gauche au-delà de la levée (Ménivelle, Oussy et Caillotière), et enfin en rive droite, les puits situés au Colmier et au Mesnil.


a) Tous les sites
Altitude en mètre NGF
110
109
108
107
106
105
104
20/03/2009
06/10/2009
24/04/2010
10/11/2010
29/05/2011
15/12/2011
02/07/2012
18/01/2013
06/08/2013
22/02/2014
10/09/2014
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Ménivelle
Oussy
Caillotière
Colmier
Aubépin
Malette
Mesnil
Loire (L2 estimée)


b) En rive gauche, au sein du méandre
Altitudes en m NGF
110
109
108
107
106
105
104
20/03/2009
25/12/2009
01/10/2010
08/07/2011
13/04/2012
18/01/2013
25/10/2013
01/08/2014
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Loire (L2 estimée)


c) En rive gauche, au-delà de la levée
Altitudes en m NGF
110
109
108
107
106
105
104
20/03/2009
25/12/2009
01/10/2010
08/07/2011
13/04/2012
18/01/2013
25/10/2013
01/08/2014
Ménivelle
Oussy
Caillotière
Loire (L2 estimée)

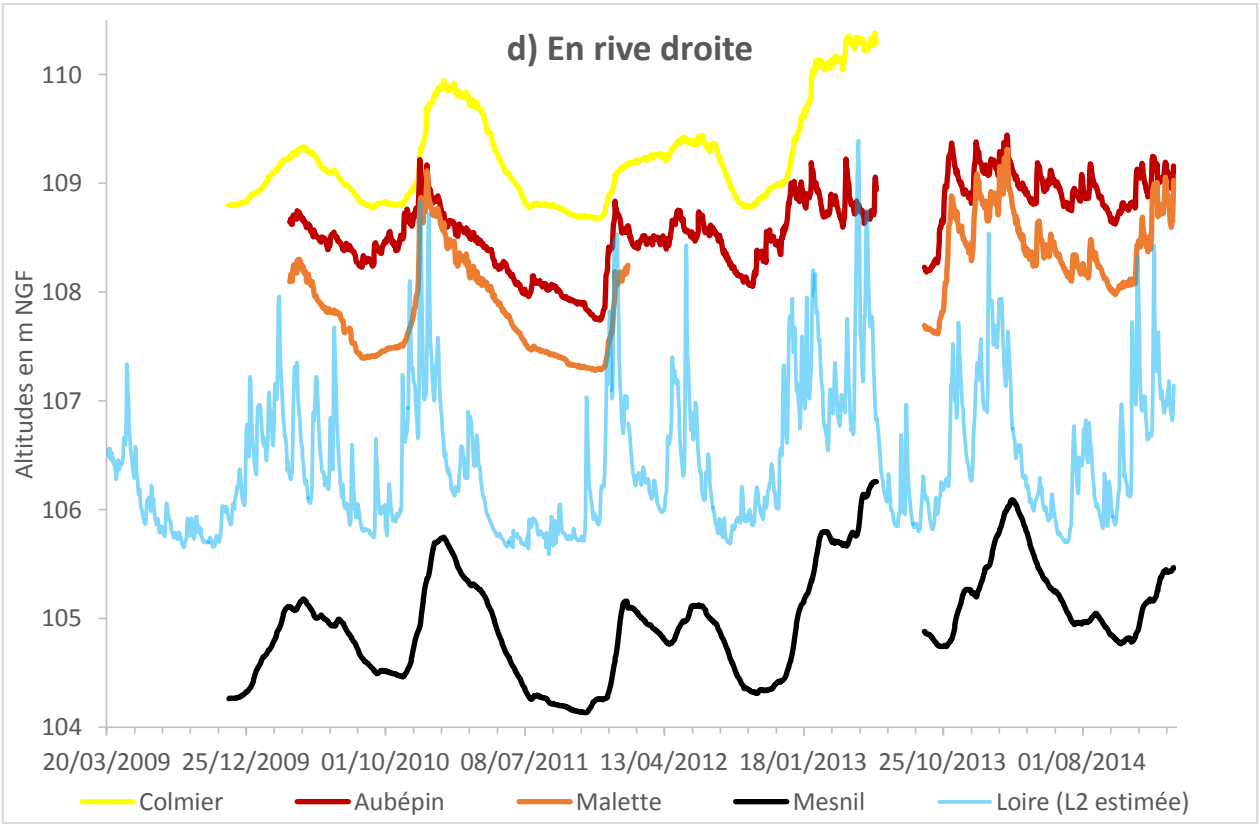


Fig. 159. *Chroniques de la surface piézométrique de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly (moyennes journalières de toutes les données disponibles entre mars 2009 et janvier 2015, en mètres NGF), associées aux lignes d'eau de la Loire à l'Ile aux Canes (L_2).*

Le graphique a) rassemble tous les sites suivis. Les graphiques suivants sont limités à un secteur, pour une meilleure lecture : en rive gauche, b) les sites au sein du méandre (entre la Loire et la levée), puis c) ceux au-delà de la levée, et enfin d) les sites en rive droite.

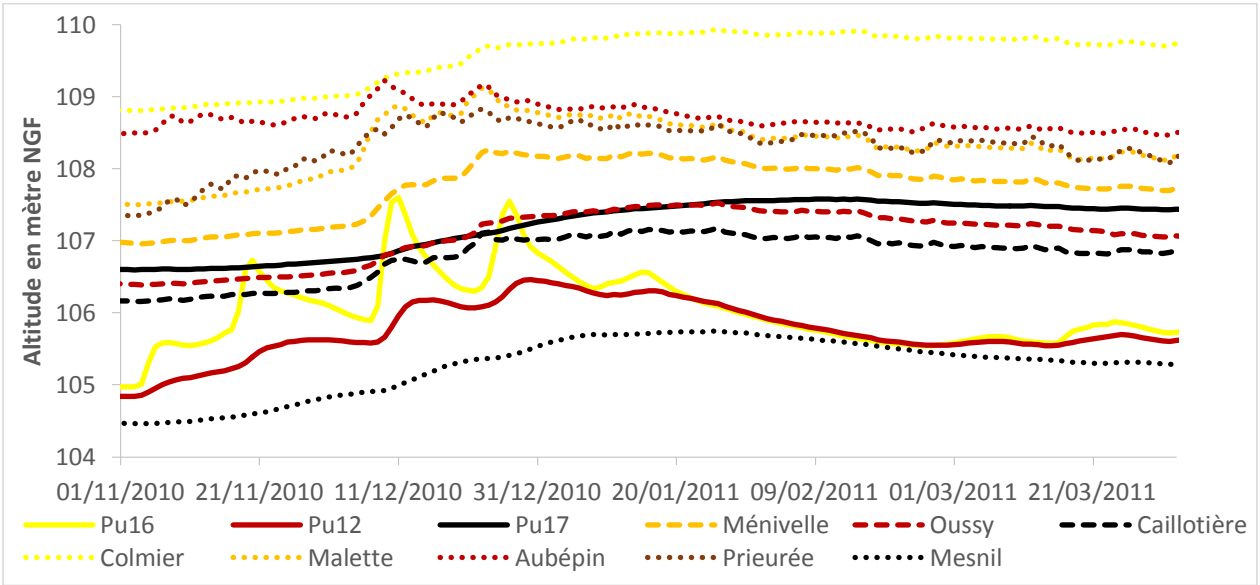


Fig. 160. *Surface piézométrique de la nappe alluviale entre le 01/11/2010 et le 01/04/2011.*

- Au niveau des autres puits de la rive droite, à Aubépin, La Malette et la Prieurée, la nappe alluviale a des variations également relativement amorties.

Néanmoins, de faibles variations de la surface piézométrique (de 5 à 30 cm), observables à un pas de temps décadaire, sont également présentes (fig. 160). Ces petites variations sont observables pour tous les puits de la plaine alluviale au-delà des levées, en rive droite et en rive gauche, mais elles sont plus marquées pour ces trois puits. Il est notable, qu'au contraire, elles sont absentes des chroniques de la nappe alluviale au sein du méandre (fig. 160).

L'altitude moyenne de la nappe alluviale au sein de la plaine alluviale est assez hétérogène (fig. 159). Globalement, l'altitude du toit de la nappe est plus élevée en rive droite qu'en rive gauche. De plus, les altitudes moyennes sont essentiellement expliquées par un gradient amont-aval (fig. 161).

Cependant, il faut y combiner la distance à la Loire pour comprendre l'ensemble de ces variations. Par exemple, en rive droite (carrés, fig. 161), pour expliquer l'altitude de la nappe alluviale à Aubépin, il faut prendre en compte son éloignement de la Loire.

En rive gauche, au sein du méandre (ronds, fig. 161), seul le puits Canes 1 présente une anomalie par rapport au gradient amont – aval. L'altitude moyenne de la nappe y est plus faible étant donnée sa proximité avec la Loire. Toujours en rive gauche, mais dans la plaine alluviale au-delà de la levée (triangles, fig. 161), le gradient amont - aval se vérifie exactement.

On note aussi que les puits les plus proches de la Loire présentent une plus forte variabilité piézométrique (en particulier Pu 16, Pu Canes 1, Pu 12 et Malette ; fig. 161), tandis que la nappe alluviale varie plus faiblement lorsque l'on s'éloigne du fleuve (Pu 17, Caillotière, Aubépin ; fig. 161).

Les altitudes de la nappe alluviale présentent donc une relative indépendance entre la rive droite et la rive gauche, bien que réunies par la Loire.

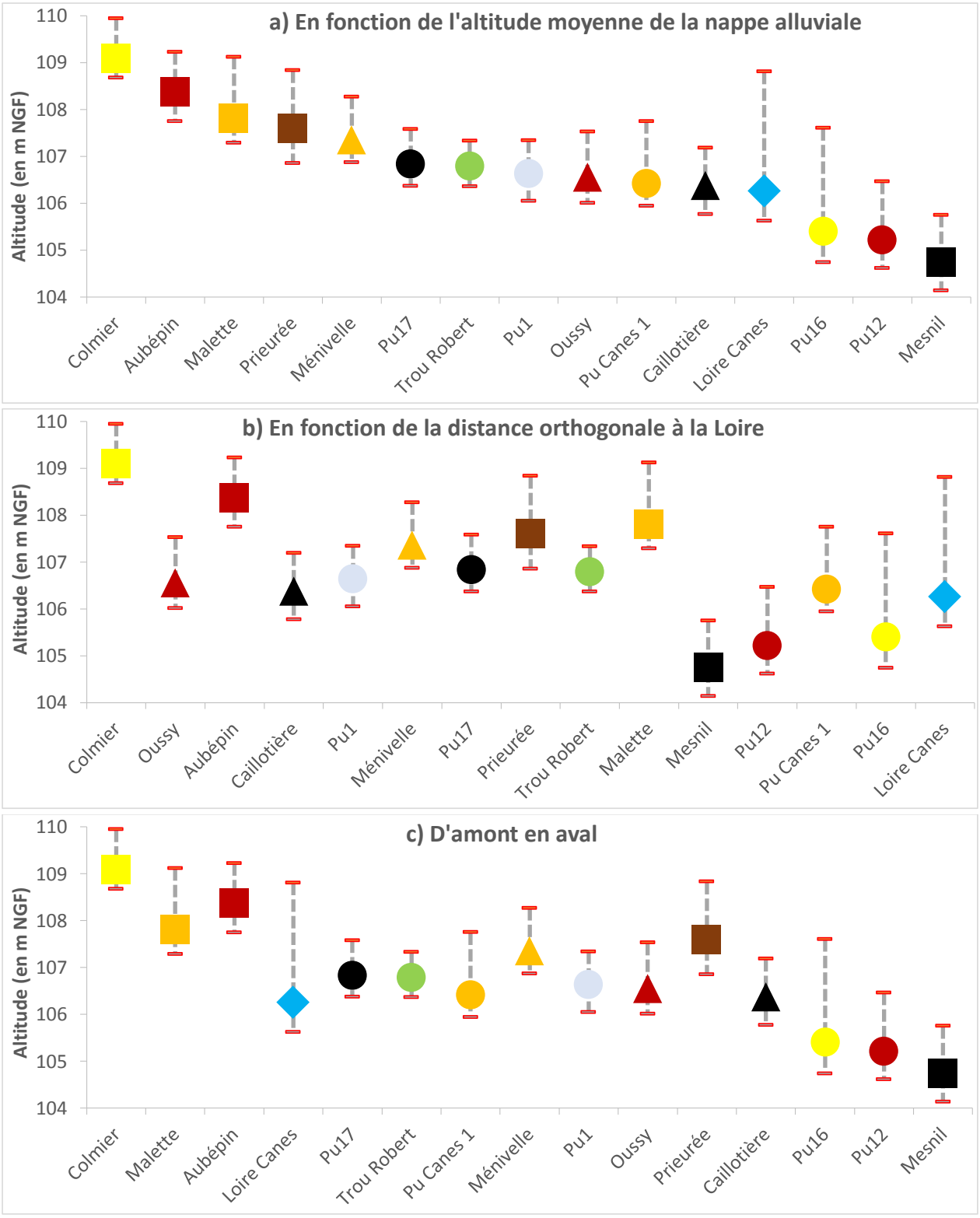


Fig. 161. *Altitudes moyennes de la nappe alluviale, classées selon 3 critères différents : a) l'altitude moyenne de la nappe, b) la distance orthogonale à la Loire et c) d'amont en aval. Les figurés représentent l'altitude moyenne des lignes d'eau pour toutes les données disponibles entre mars 2009 et le 31/01/2012 ; les barres haut/bas indiquent les altitudes minimales et maximales mesurées sur la même période.*

5.4.2. Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations des lignes d'eau de la Loire

La figure 159 illustre l'importante corrélation entre les variations des lignes d'eau de la Loire et celles de la surface piézométrique de la nappe alluviale, quel que soit le site considéré. Cependant, il est également évident que le temps de réponse de la nappe alluviale ainsi que l'ampleur de ses variations varient d'un site à l'autre.

Grâce à la fonction *Crosscorrelation* du logiciel Past, on calcule les coefficients de corrélation linéaire r (avec 0<r<1), entre, d'une part, la chronique des lignes d'eau de Loire à l'Ile aux Canes (L_2), et d'autre part, les chroniques de la surface piézométrique de la nappe alluviale pour les différents sites suivis. De plus, cette fonction permet de calculer les coefficients de corrélation r(K), avec K en jour. Ainsi, pour K=0, est calculé r entre les deux chroniques initiales. Pour K=1, r est calculé en décalant la seconde chronique, d'une unité, c'est-à-dire, ici, d'un jour, etc, comme présenté dans le tableau 64.

	Chroniques des lignes d'eau de la Loire à l'Ile aux Canes	Chroniques de la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu X
r(K) avec K = 0	Z_L1, Z_L2, Z_L3, Z_L4, Z_L5, …	Z_X1, Z_X2, Z_X3, Z_X4, Z_X5, …
r(K) avec K = 1	Z_L1, Z_L2, Z_L3, Z_L4, Z_L5, …	Z_X2, Z_X3, Z_X4, Z_X5, Z_X6, …
r(K) avec K = 2	Z_L1, Z_L2, Z_L3, Z_L4, Z_L5, …	Z_X3, Z_X4, Z_X5, Z_X6, Z_X7, …
r(K) avec K = 3	Z_L1, Z_L2, Z_L3, Z_L4, Z_L5, …	Z_X4, Z_X5, Z_X6, Z_X7, Z_X8, …
r(K) avec K = 4	Z_L1, Z_L2, Z_L3, Z_L4, Z_L5, …	Z_X5, Z_X6, Z_X7, Z_X8, Z_X9, …
etc		

Tab. 64. *Illustration de la fonction Crosscorrelation du logiciel Past qui permet de calculer un coefficient de corrélation linéaire r(K), avec ici K en jours, révèlant ainsi les temps de réponse des systèmes.*

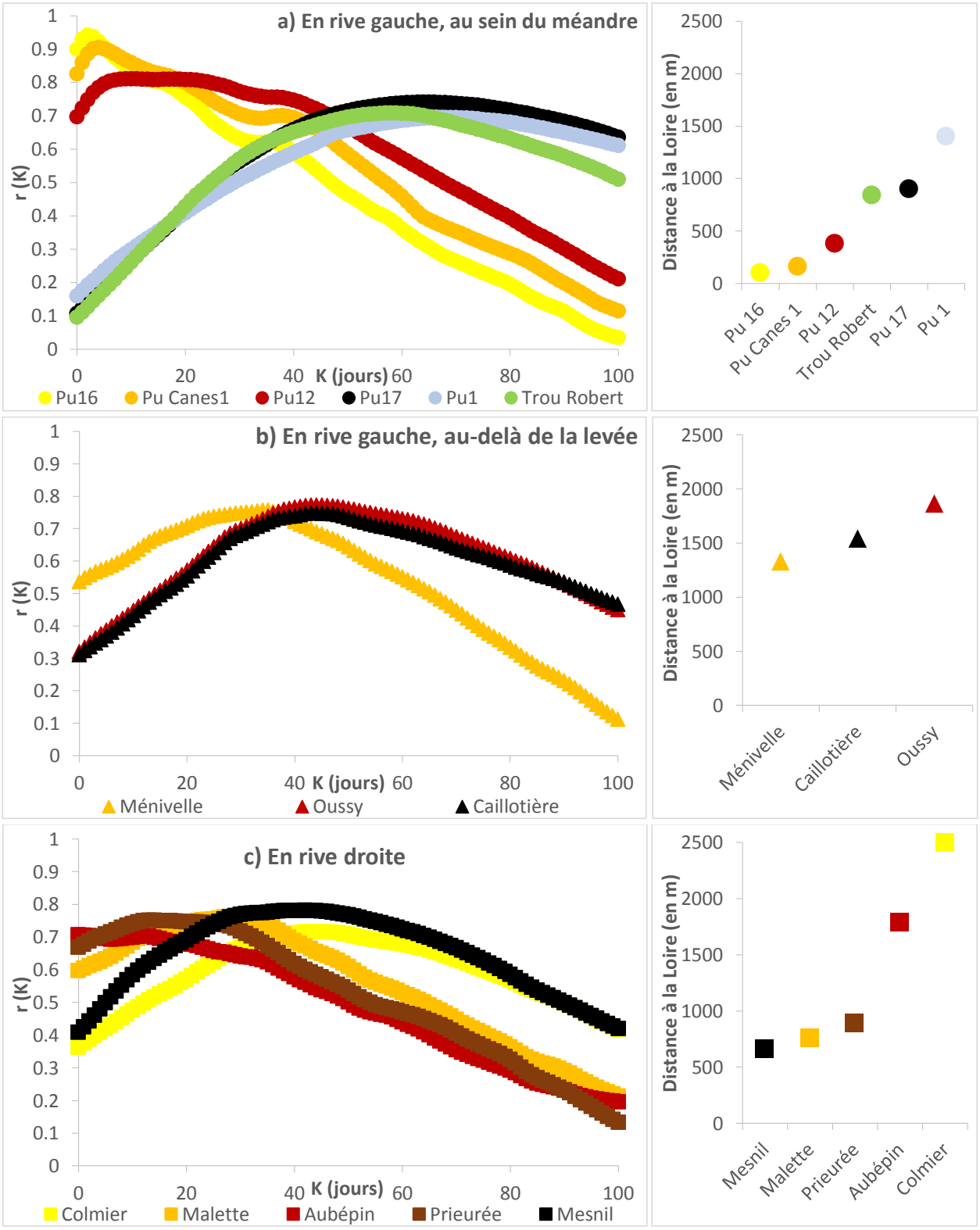


Fig. 162. *Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations de la ligne d'eau de la Loire. Coefficents de corrélation r(K), entre les altitudes des lignes d'eau de la Loire à l'Ile aux Canes (L_2) et celles de la surface piézométrique de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly, pour toutes les données disponibles entre mars 2009 et le 31/01/2012.*

	r(K) max	K (jours) pour r(K) max
Pu 16	0,94	2
Pu Canes 1	0,9	4
Pu 12	0,81	10
Aubépin	0,7	12
Prieurée	0,75	13
Malette	0,76	28
Ménivelle	0,76	34
Mesnil	0,78	42
Oussy	0,77	43
Caillotière	0,75	43
Colmier	0,72	43
Trou Robert	0,71	58
Pu 17	0,74	65
Pu 1	0,69	68

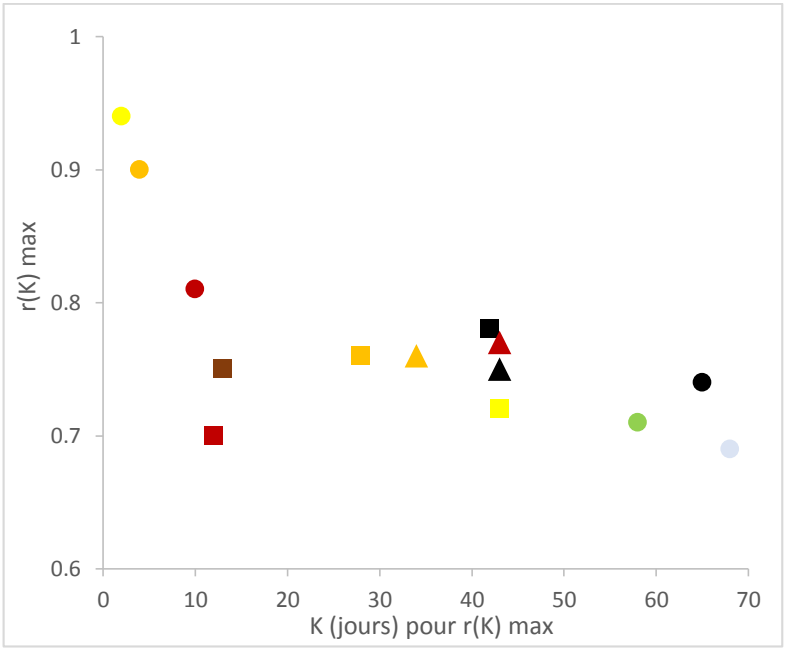


Fig. 163. *Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations des lignes d'eau de la Loire : valeur maximale des coefficients de corrélation r(K) entre l'altitude de la nappe alluviale et celle de la ligne d'eau de la Loire à l'Ile aux Canes et nombre de jours auquel il intervient, pour chaque puits suivi (légende identique à la figure 162).*

La figure 163 démontre les fortes corrélations existant entre les lignes d'eau de la Loire et la surface piézométrique de la nappe alluviale. **Globalement, par secteur, plus le puits est proche de la Loire, plus le coefficient de corrélation niveau de la Loire – niveau piézométrique est élevé et plus la réponse de la nappe alluviale aux variations de la Loire est rapide.**

Les puits au sein du méandre en sont un bon exemple. Les trois puits les plus proches de la Loire (Pu 16, Pu Canes 1 et Pu 12) ont un temps de réponse aux variations des lignes d'eau de la Loire très rapide (respectivement, 2, 4 et 10 jours), avec des coefficients de corrélation importants (respectivement, 0,94 ; 0,9 et 0,81; fig. 163). Au contraire, les puits plus éloignés de la Loire, Pu 17 et Pu 1, ont un temps de réponse de 65 et 68 jours, avec des coefficients de corrélation un peu plus faibles (respectivement 0,74 et 0,69).

Pour les puits situés en rive gauche, au-delà de la levée, les temps de réponse sont plus homogènes (34 jours pour Ménivelle et 43 jours pour Oussy et la Caillotière, avec des coefficients de corrélation entre 0,75 et 0,77).

En rive droite, on note de nouveau un fonctionnement assez différent de la rive opposée. Les valeurs maximales des coefficients de corrélation sont très proches (entre 0,70 et 0,76). Les temps de réponse ne respectent pas de logique en lien avec la distance à la Loire. A Aubépin, les variations de la nappe alluviale sont le mieux corrélées à celles de la Loire après seulement 12 jours, alors qu'au Mesnil, il faut attendre 42 jours (alors que ce puits est bien plus proche de la Loire qu'Aubépin, fig. 162).

La distance des puits à la Loire explique donc les temps de réponse de la nappe alluviale aux variations des lignes de la Loire au sein du méandre. On ne retrouve pas cette logique en rive droite, ni d'ailleurs, pour les puits de la rive gauche situés au-delà de la levée (fig. 162 et 163).

Néanmoins, les temps de réponse de la nappe alluviale au centre du méandre paraissent anormalement longs si on estime que les variations piézométriques sont essentiellement liées aux transferts et/ou au transport d'eaux de la Loire dans la nappe alluviale. En effet, par rapport à l'ensemble des puits suivis, ce sont les puits Pu 17, Pu 1 et le Trou Robert qui réagissent le plus lentement aux variations de la Loire (entre 58 et 68 jours à comparer à 43 jours au Colmier, le puits le plus éloigné de la Loire, cf. fig. 147) alors que ces puits ne sont pas les plus éloignés du fleuve. On trouvera une explication à ce délai par l'étude des cartes piézométriques (cf. 5.4.3).

Influence des précipitations sur la piézométrie de la nappe alluviale

Toutefois, comme les variations piézométriques peuvent également résulter d'une recharge de la nappe par l'infiltration de précipitations, les coefficients de corrélation r(K) ont également été calculés entre les chroniques de précipitations journalières à Saint-Benoît-sur-Loire et la variation de l'altitude de la nappe alluviale ou de la Loire entre deux jours consécutifs. Ainsi, on recherche la réponse, immédiate ou décallée dans le temps, de la nappe alluviale aux précipitations.

Les résultats montrent qu'aucune corrélation existe entre les précipitations et les niveaux piézométriques de la nappe alluviale ($-0,2 < r(K) < 0,35$ ce qui n'est pas significatif ; fig. 164).

Les précipitations participent évidement à la recharge de la nappe alluviale. Cependant, à partir des données piézométriques, leur effet n'est pas détectable. Il s'agit sûrement d'un

phénomène trop diffus et mettant en œuvre des volumes trop peu important pour être visible dans les chroniques piézométriques, comparativement à l'importance des échanges latéraux entre la Loire et la nappe alluviale. Le principal résultat ici est donc de confirmer par défaut l'importance de la Loire dans les variations de la nappe alluviale.

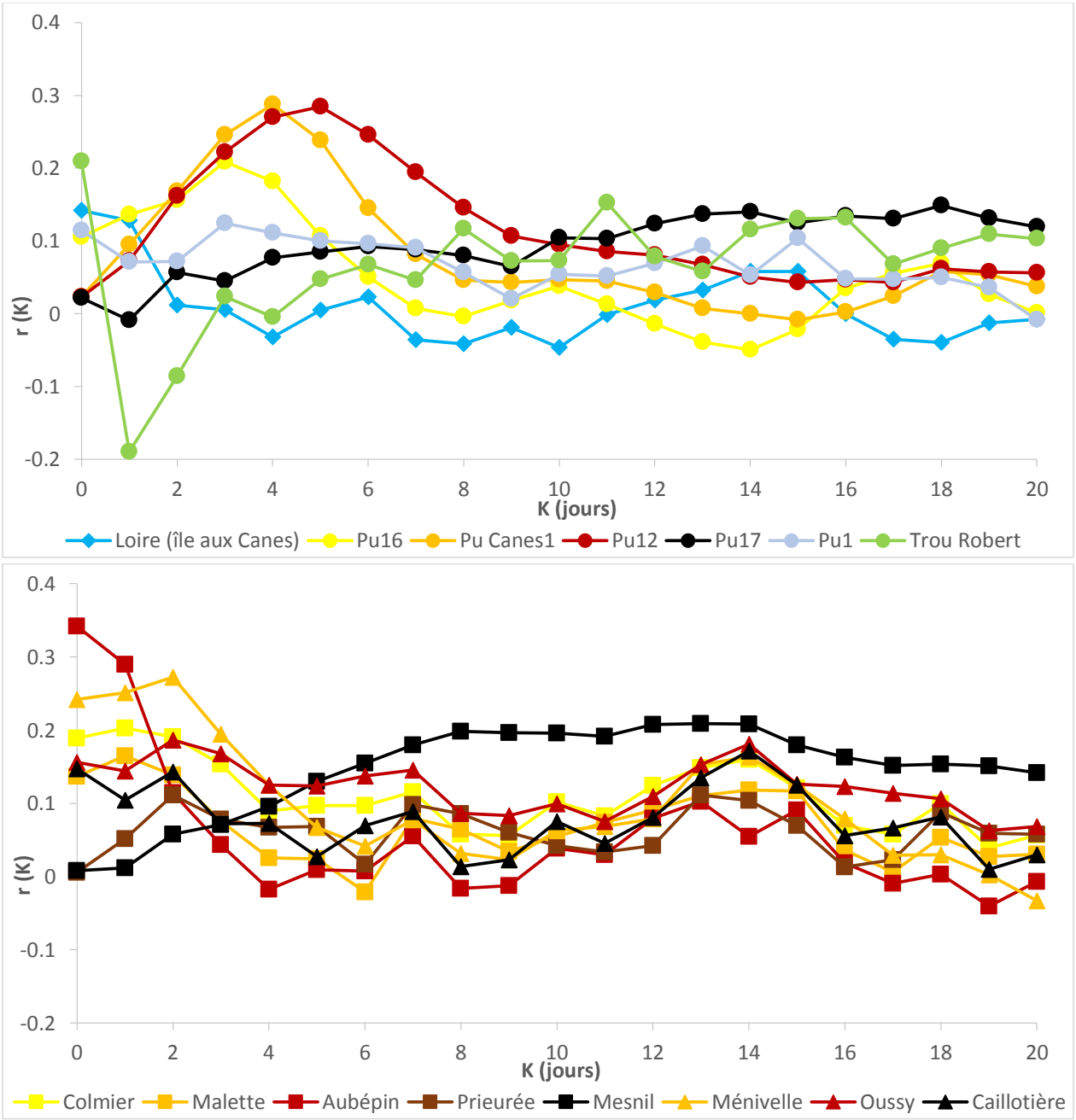


Fig. 164. *Coefficents de corrélation r(K), entre les précipitations journalières à Saint-Benoît-sur-Loire et la dérivée de la chronique des altitudes du toit de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly, pour toutes les données journalières disponibles entre mars 2009 et le 31/01/2012.*

5.4.3. Mise en évidence des échanges entre la Loire et la nappe alluviale

Les cartes piézométriques réalisées permettent de mettre en évidence des échanges entre la Loire et la nappe alluviale, dans les deux sens. Théoriquement, deux scénarios devraient se différencier (fig. 165). En hautes-eaux, les lignes d'eau de la Loire atteignant une altitude plus élevées que le toit de la nappe alluviale, la Loire devrait contribuer à la recharge de la nappe alluviale. Au contraire, en période de basses-eaux, les lignes d'eau de la Loire s'abaissent et la nappe alluviale, se retrouvant plus haute que la Loire, soutiendrait les débits de la Loire.

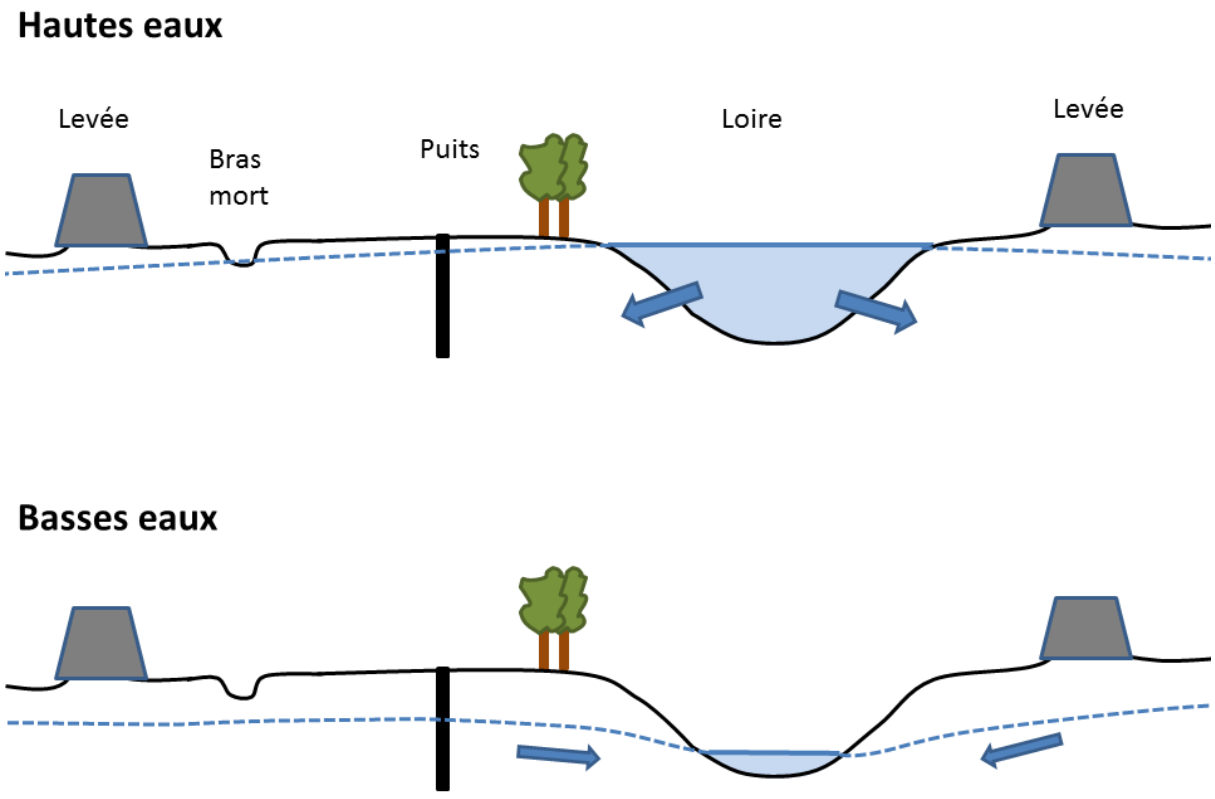


Fig. 165. *Schéma théorique des échanges saisonniers entre la Loire et sa nappe alluviale.*

Cependant, la variabilité saisonnière et interannuelle des débits de la Loire va à nouveau venir perturber ce schéma théorique. D'après les figures 166 à 169, on retrouve ces deux scénarios dans chaque saison hydrologique. En effet, la variabilité des débits de la Loire au sein d'une même saison est telle, que les échanges entre la Loire et sa nappe alluviale intègrent cette variabilité et présentent donc eux-mêmes une complexité importante par rapport à la simplicité du schéma envisagé comme hypothèse au début de nos travaux.

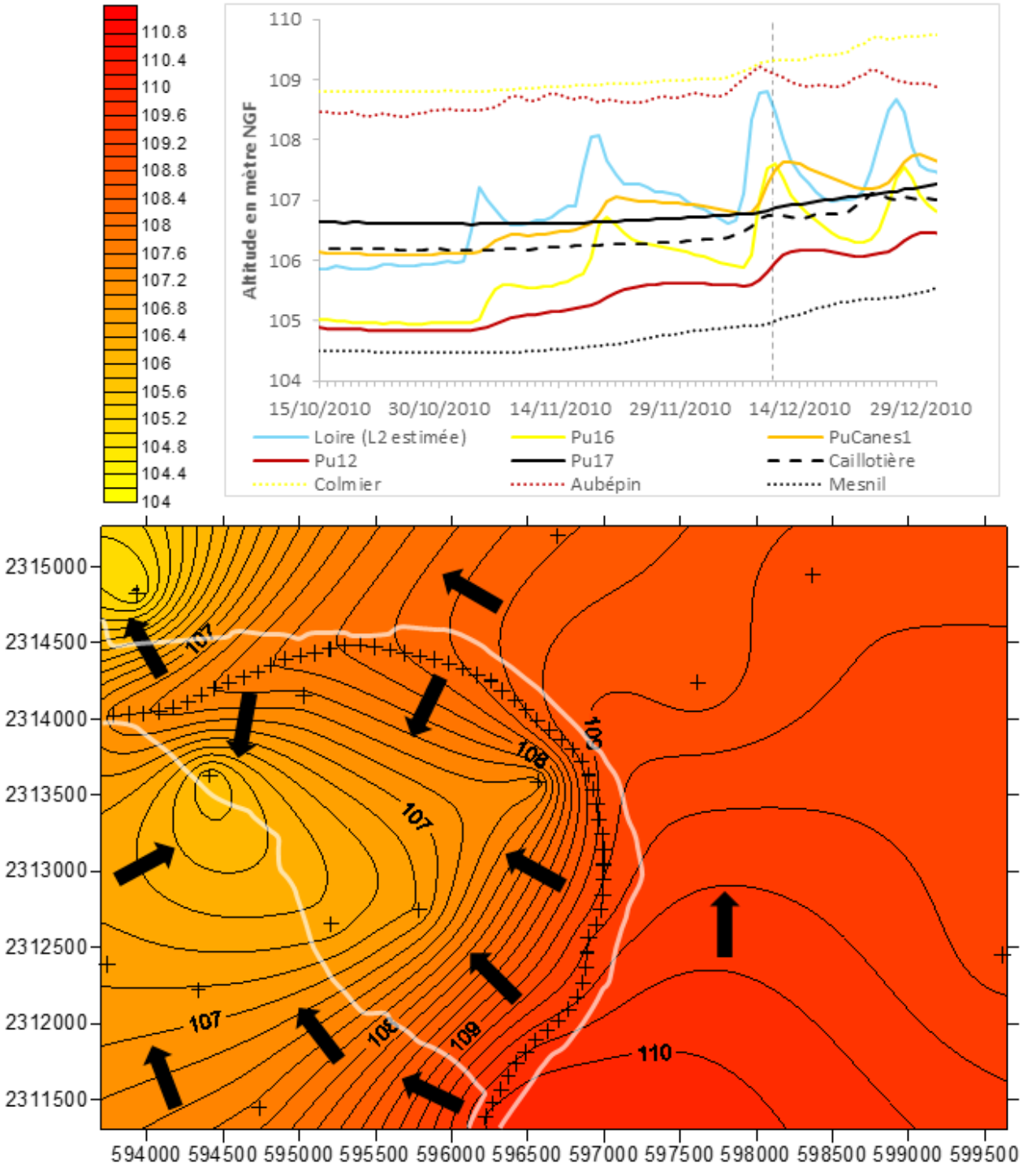


Fig. 166. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du **10 décembre 2010**, pour un débit de la Loire à Gien de **1620 m³.s⁻¹**, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique.*

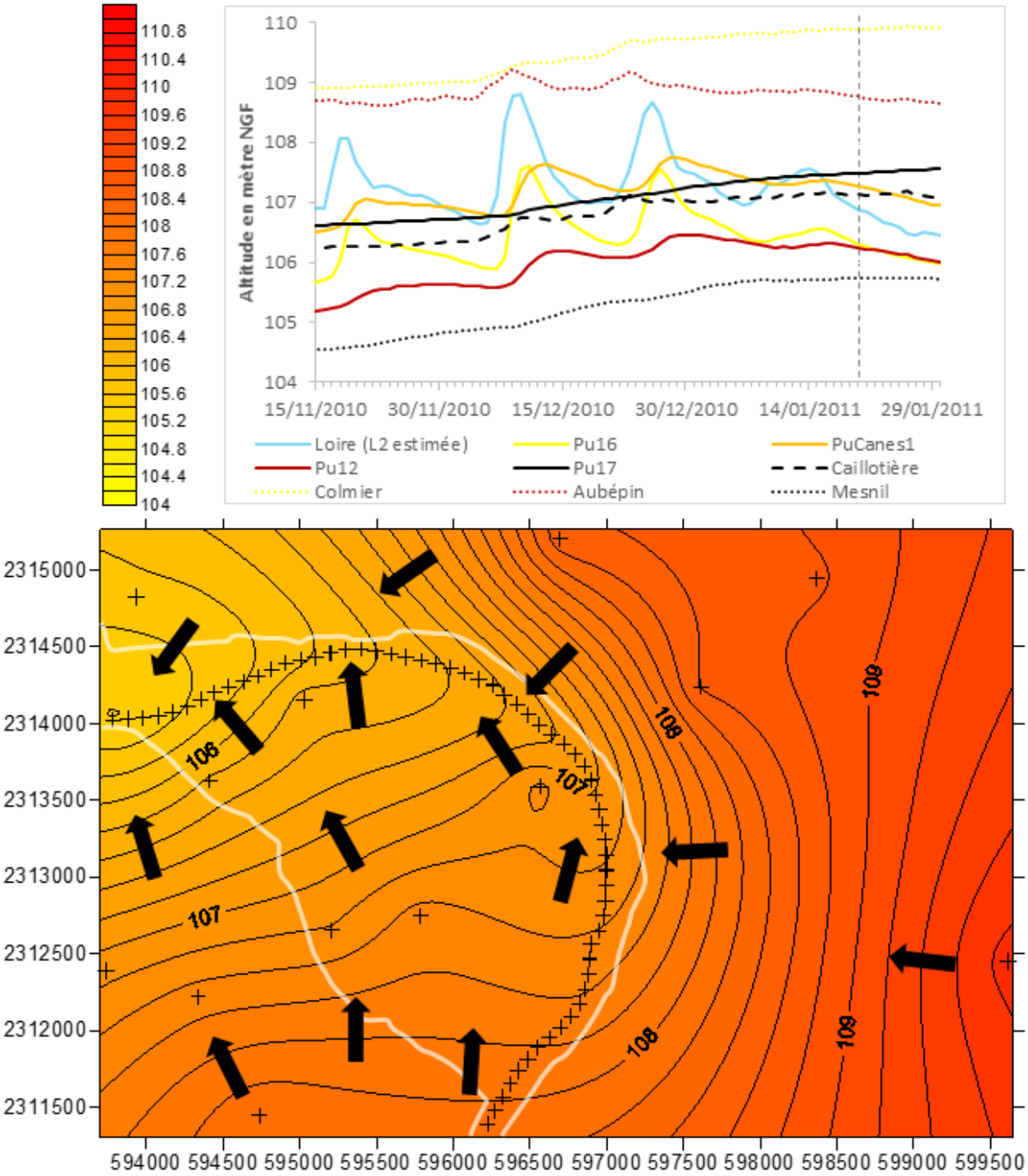


Fig. 167. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du **20 janvier 2011**, pour un débit de la Loire à Gien de **482 m³.s⁻¹**, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique.*

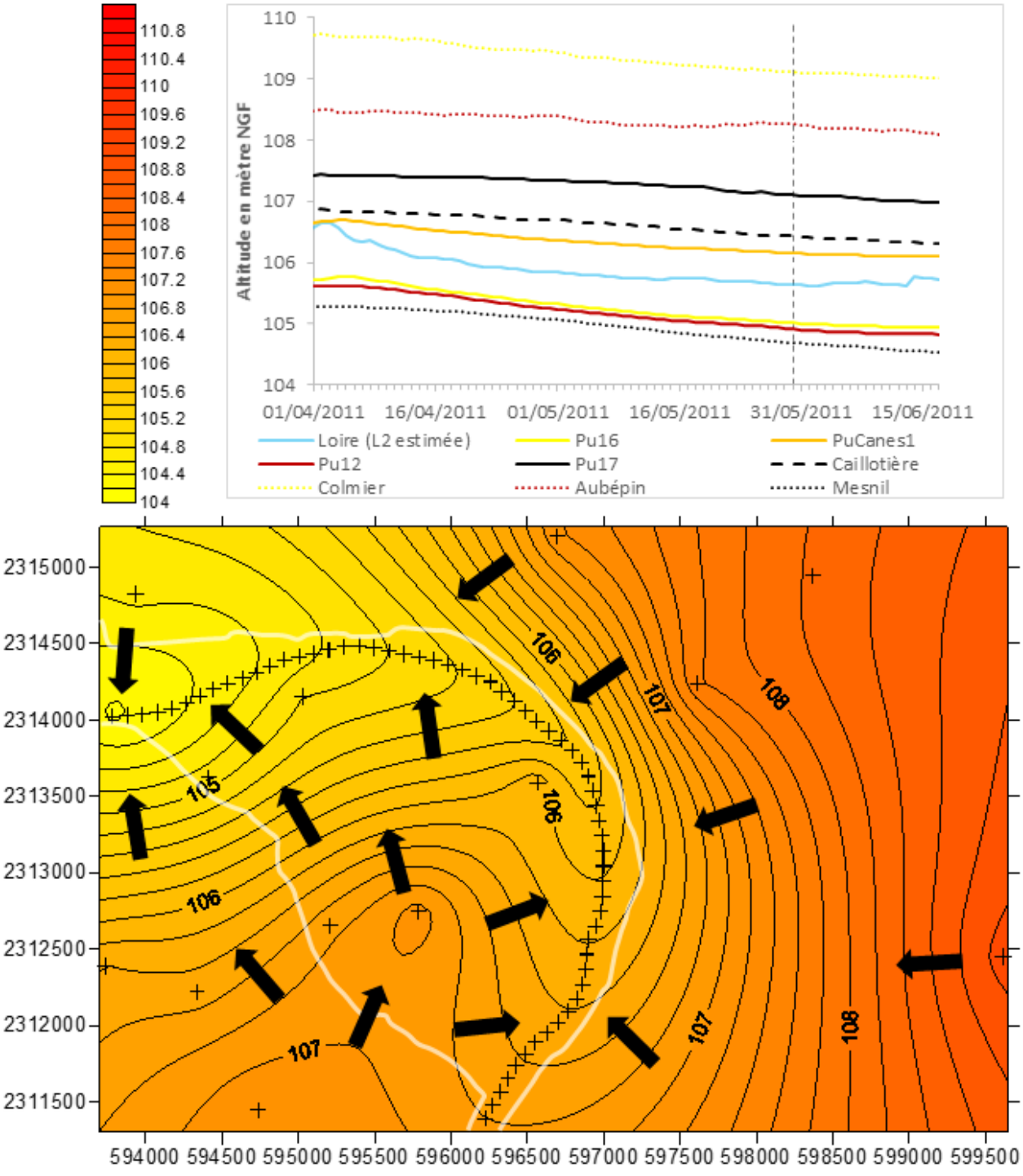


Fig. 168. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du **1er juin 2011**, pour un débit de la Loire à Gien de **64 m³.s⁻¹**, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique.*

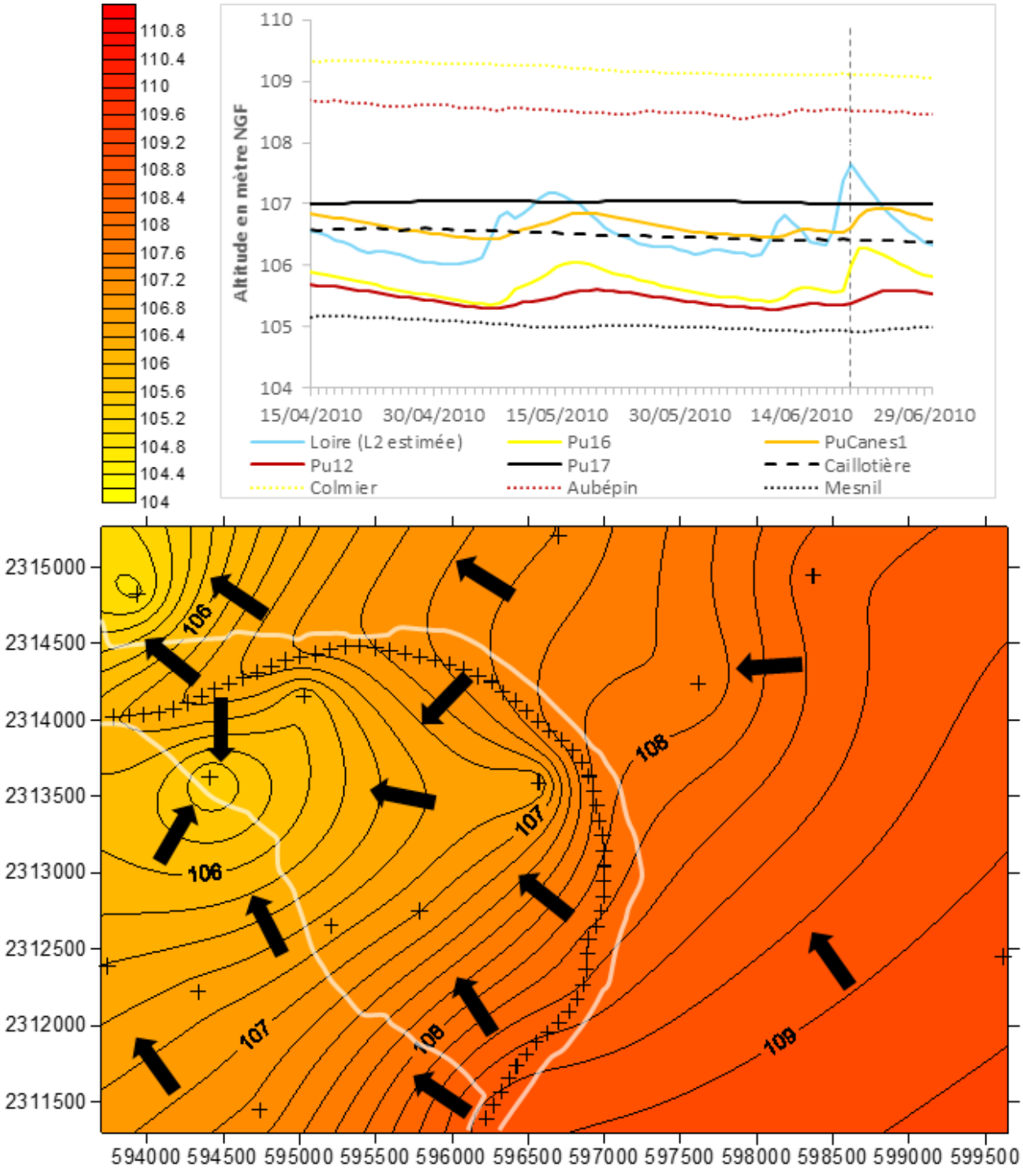


Fig. 169. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du **20 juin 2010**, pour un débit de la Loire à Gien de **859 m³.s⁻¹**, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique.*

Ces cartes piézométriques mettent bien en évidence les échanges entre la Loire et la nappe alluviale ainsi que les transferts d'eau au sein de la nappe alluviale (fig. 166 à 169). Les échanges d'eau entre la Loire et la nappe alluviale surviennent, dans les deux sens, dans tous les secteurs du méandre : l'amont, le centre et l'aval du méandre.

Ces quatre cartes piézométriques illustrent également **la variabilité et la complexité des échanges entre la Loire et la nappe alluviale**. On observe que la recharge de la nappe alluviale par la Loire survient lors de pics de débits de la Loire (fig. 166 et 169), et que le soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale s'effectue en période de baisse du débit de la Loire (fig. 167 et 168), quelle que soit la saison hydrologique en cours.

Ainsi, les variations des débits de la Loire semblent un élément déterminant de la description de ces échanges entre le fleuve et sa nappe d'accompagnement. Ceci est bien illustré par l'occurrence de débits proches du pleins-bords en juin 2010 (fig. 169) qui engendrent la recharge de la nappe par la Loire ou bien par le soutien des débits de la Loire par la nappe en janvier 2011, lors d'une baisse des débits (fig. 167) . La variabilité des échanges entre la Loire et la nappe alluviale sera analysée à l'alinéa suivant (cf. 5.4.4.)

Globalement, la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale à travers le méandre se fait d'amont en aval. Cependant, les figures 166 et 169 font apparaître des circulations localisées à l'amont et à l'aval du méandre, transversalement à la levée. La variabilité des circulations des eaux au sein de la nappe alluviale sera étudiée en détails à l'alinéa 5.4.7.

On peut noter ici la probable explication des temps de réponse importants aux variations de la Loire des puits situés au centre du méandre, en proportion de leur distance à la Loire. En effet, ce n'est pas leur distance minimale à la Loire qu'il convient de prendre en compte, mais la distance qui les sépare de la Loire vers l'amont du méandre (c'est-à-dire 1,4 km pour le Trou Robert et non pas 0,8 km ; fig. 170). En effet, les distances initiales séparant les puits de la Loire ne prenaient pas en compte les directions des écoulements de la nappe alluviale (figures 147, 161 et 162). Or les eaux de la Loire qui viennent recharger la nappe dans ce secteur du centre du

méandre proviennent de l'amont du méandre et non de la Loire à l'Ile aux Canes, ce qui pourrait être une explication des temps de réponse importants de la nappe au centre du méandre, aux variations de la Loire.

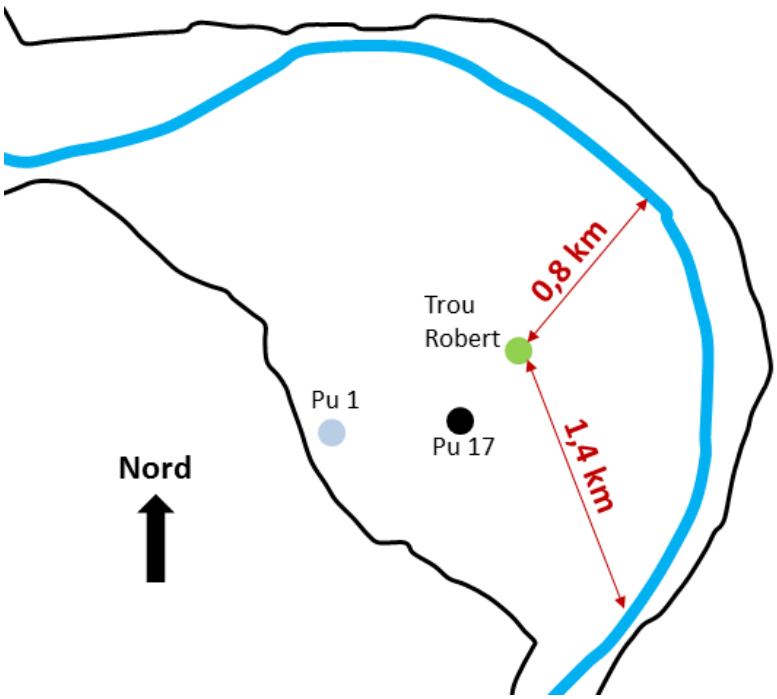


Fig. 170. *Schéma de la distance séparant les puits du centre du méandre, de la Loire.*

L'étude de la variabilité des échanges entre la Loire et la nappe alluviale, ou de celle de la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale, n'est pas possible à partir des cartes piézométriques, qui n'illustrent l'hydrogéologie du secteur qu'à un moment donné. L'étude des différences de charges hydrauliques, au contraire, permet de mettre en évidence l'alternance de ces échanges, et leur occurrence, pour toute la période d'étude.

5.4.4. Occurrences des échanges entre la Loire et la nappe alluviale

Les **différences de charge** sont simplement une différence entre deux lignes d'eau, entre la ligne d'eau de la Loire et la surface piézométrique de la nappe alluviale au niveau d'un puits, ou bien entre deux puits. Ici, sur des chroniques, et pour différents secteurs du méandre, ils permettront donc de mettre en évidence la variabilité temporelle et spatiale des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale.

Les différences de charge ont été calculées entre la Loire et quatre puits différents au sein du méandre, répartis d'amont en aval : Pu 17, Pu Canes 1, Pu 16 et Pu 12. Ce sont tous des puits proches de la Loire, excepté Pu 17 (au centre du méandre).

En effet, pour illustrer les échanges entre la Loire et la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre, l'absence de puits suivi (parce qu'il n'y a pas de puits agricoles dans cette zone) est notable. Cependant, d'après les cartes piézométriques présentées précédemment (fig. 166 à 169) et la cohérence de la piézométrie représentée, Pu 17 permet d'étudier ces échanges dans la zone amont.

Enfin, pour Pu Canes 1, Pu 16 et Pu 12, les lignes d'eau de la Loire prises en compte pour le calcul des différences de charge sont celles au droit du puits, respectivement aux points L_2, L_3 et L_4 (cf. fig. 153). Ce choix est validé par les cartes piézométriques précédentes qui montrent des directions de circulations des eaux de la nappe alluviale orthogonales à la Loire dans les premières centaines de mètres qui jouxtent le fleuve. Pour Pu 17, toujours au vue des figures 166 à 169, les lignes d'eau de la Loire prises en compte pour le calcul des différences de charge sont celles du point L_1 (fig. 153).

Pour l'ensemble de ce travail, une différence de charge positive illustre la recharge de la nappe par la Loire, c'est-à-dire des échanges d'eau dans le sens de la Loire vers la nappe alluviale, car l'altitude de la ligne d'eau de la Loire est plus importante que celle du toit de la nappe alluviale. Au contraire, une différence de charge négative illustre le soutien des débits de la Loire par la nappe.

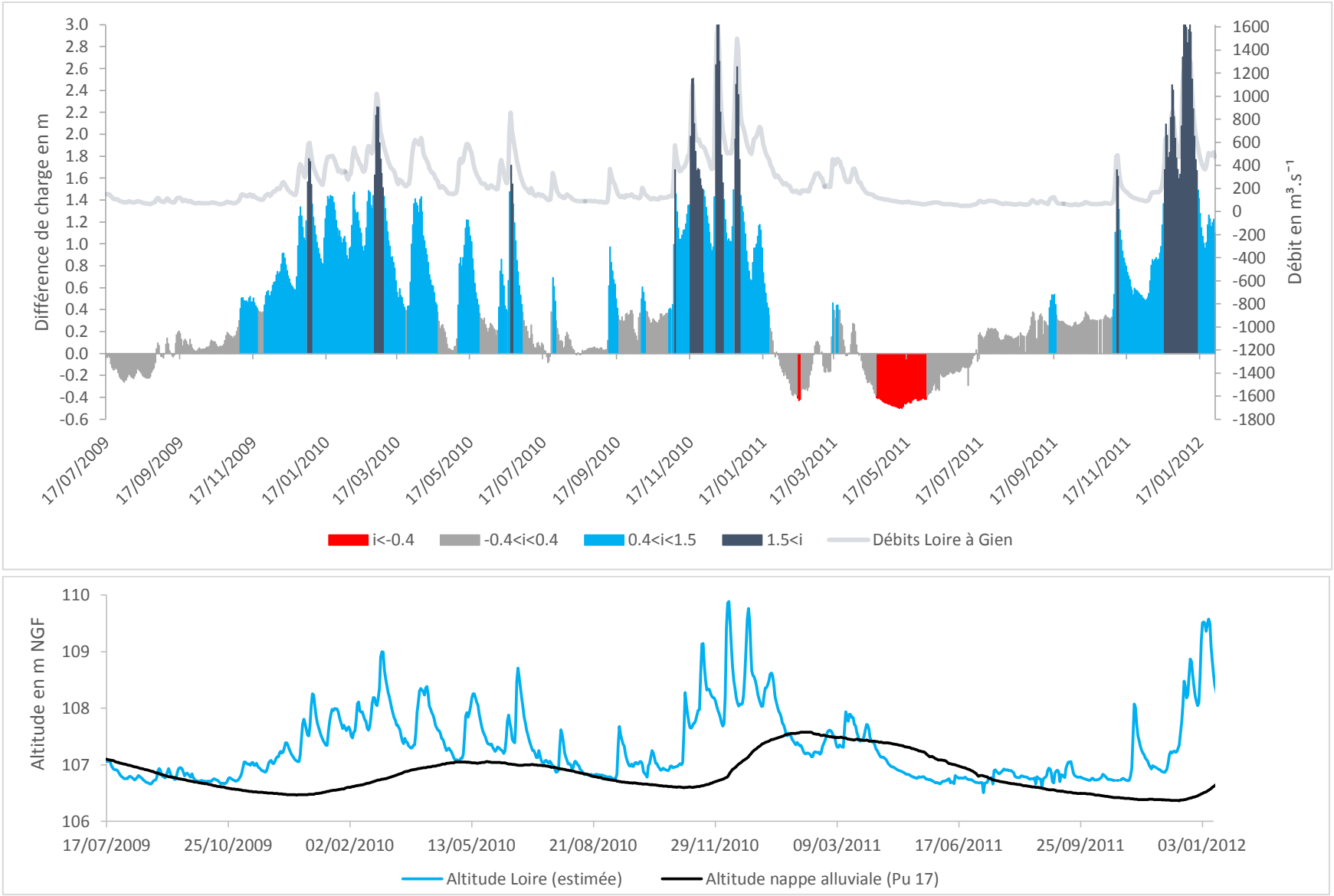


Fig. 171. *Différences de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_1) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 17 (avec i = Z (L_1) – Z (Pu 17)).*

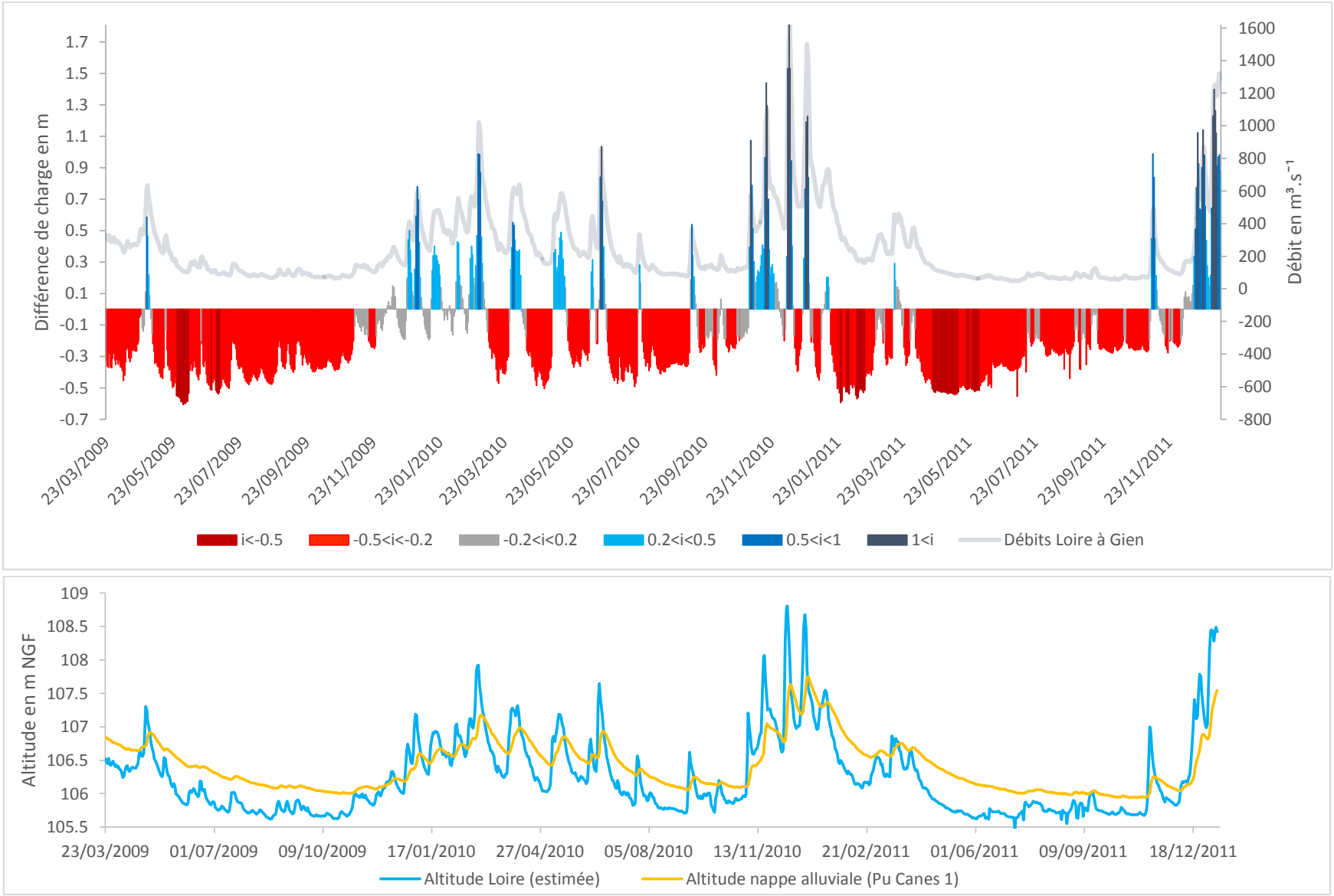


Fig. 172. *Différences de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_2) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu Canes 1 (avec i = Z (L_2) – Z (Pu Canes 1)).*

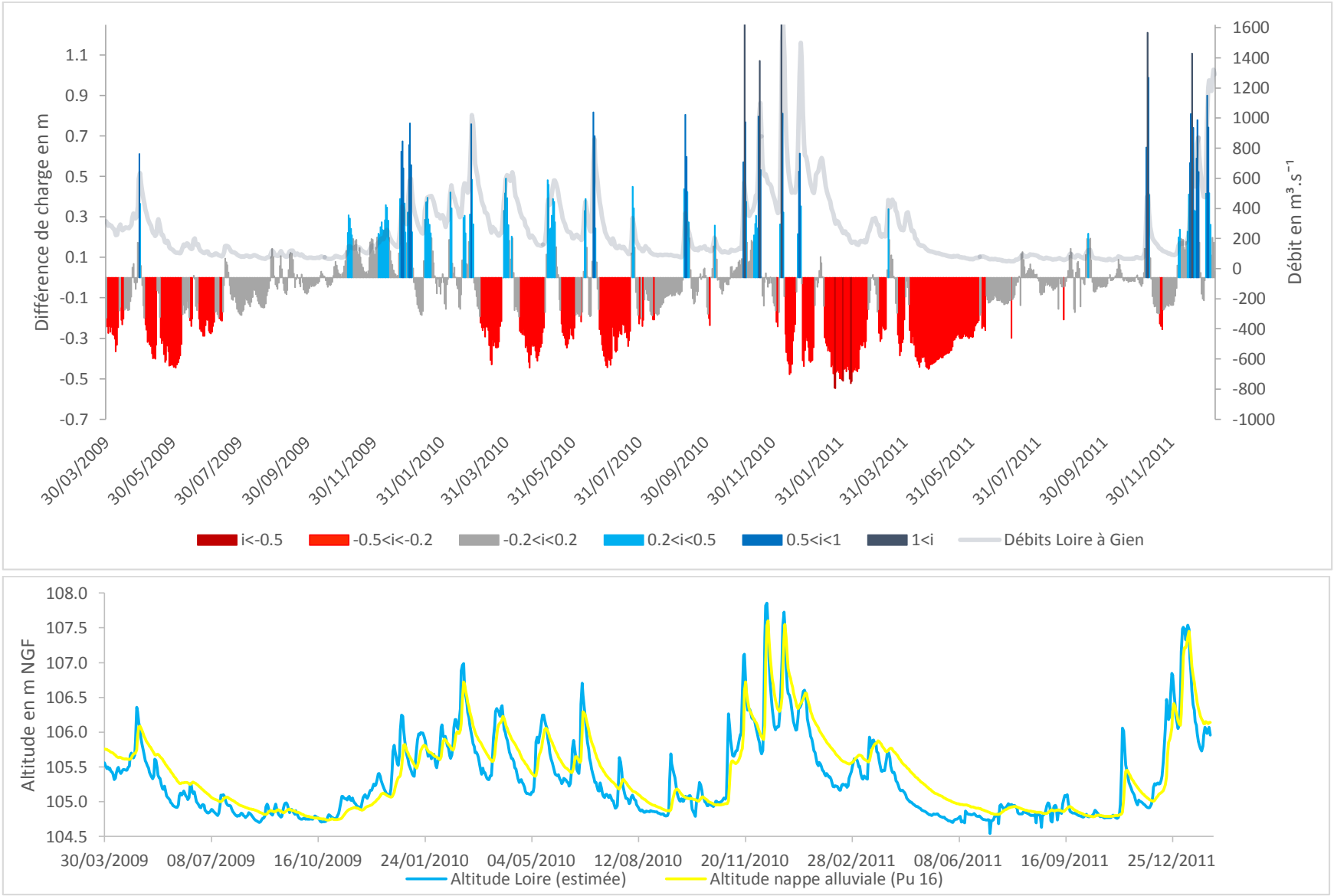


Fig. 173. *Différences de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_3) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 16 (avec i = Z (L_3) – Z (Pu 16)).*

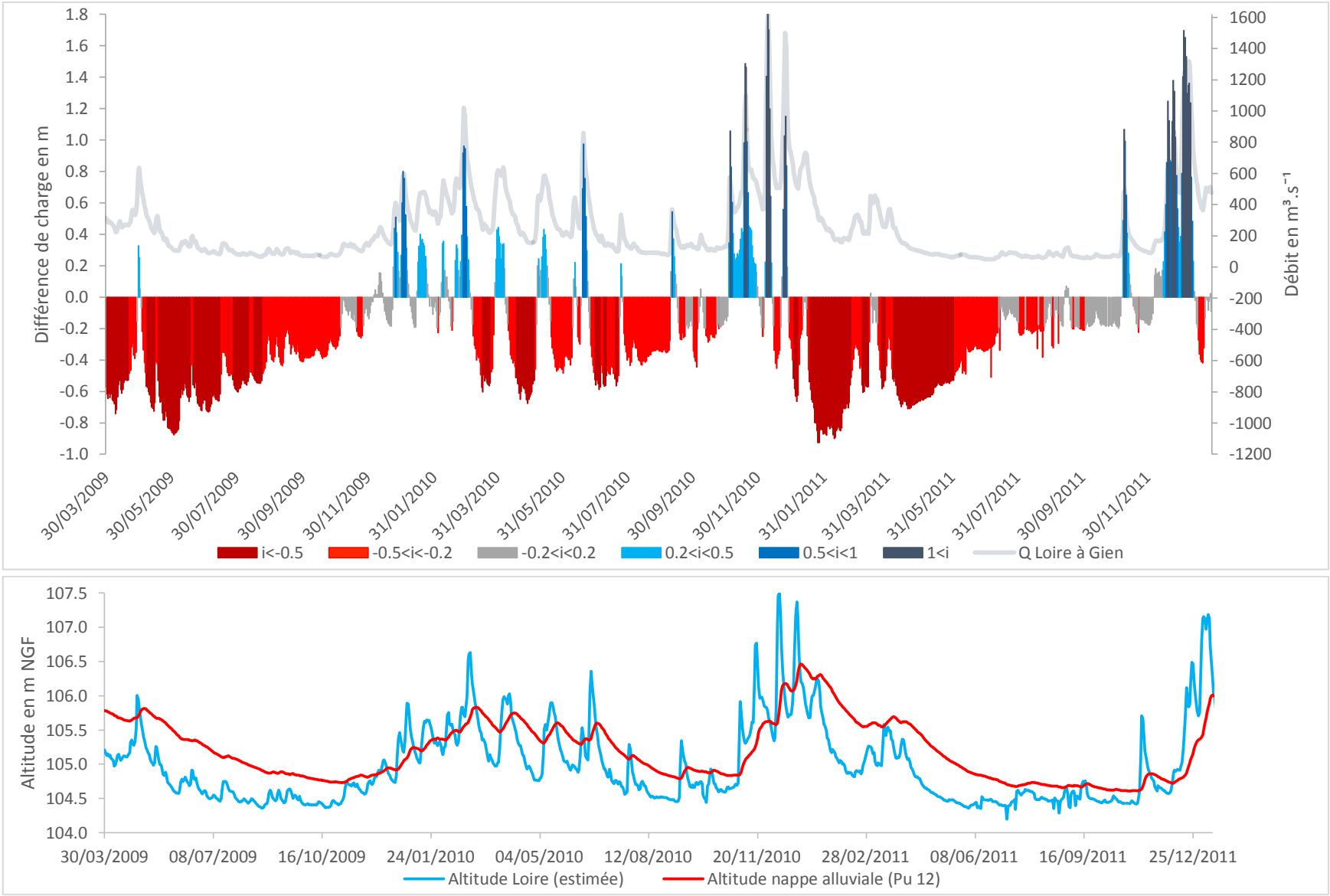


Fig. 174. *Différences de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_4) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 12 (avec i = Z (L_4) – Z (Pu 12)).*

Le secteur amont du méandre

La figure 171 présente les résultats des différences de charge (i), pour l'amont du méandre, entre la Loire (L_1) et la nappe alluviale au Pu 17.

Les valeurs entre -0,4 et 0,4 m sont considérées comme illustrant des situations d'équilibre entre la Loire et sa nappe alluviale. Etant donné que 1,15 km sépare le Pu 17 du point amont de la Loire utilisé ici, ce seuil n'est pas si important. La figure 168 illustre la validité de la borne basse de cette situation d'équilibre. En effet, la différence de charge entre la Loire amont (L_1) et Pu 17 le 01/06/2011 est de -0,42 m. La courbure des isopièzes atteste de l'échange d'eau de la nappe alluviale vers la Loire, alors que pour des différences de charge plus importantes (entre -0,4 et 0 m) cette courbure des isopièzes est absente. De même, pour la figure 167 et la borne haute des situations d'équilibre (différence de charge entre la Loire en L_1 et la nappe alluviale au Pu 17 le 20/02/2011 : 0,46 m).

Il est frappant de voir que **dans ce secteur amont, c'est essentiellement la Loire qui recharge la nappe alluviale** (données en bleu sur la figure 171) et dans une moindre mesure la nappe qui soutient les débits de la Loire (données en rouge, fig. 171). Ainsi, pour 925 jours de données piézométriques, entre juillet 2009 et janvier 2012, seulement 5% de la période ont connu une situation où la nappe alluviale a soutenu les débits de la Loire. 53% de ce temps présentent une situation d'équilibre entre les deux masses d'eau. Par contre, 42% de la période ont connu une recharge de la nappe par la Loire.

Le facteur de contrôle du sens de ces échanges est très clairement les variations de la ligne d'eau de la Loire. En effet, pour la période, la surface piézométrique de la nappe alluviale au niveau du Pu 17 se concentre sur une gamme de valeurs d'un mètre. Pour la Loire, ses lignes d'eau varient sur une gamme de valeurs de plus de trois mètres. De plus, la recharge de la nappe alluviale est inféodée aux augmentations brusques du débit de la Loire. Elles ne correspondent pas forcément à des augmentations importantes du débit, mais la différence d'altitude de la ligne d'eau suffit à faire augmenter la différence de charge entre la Loire et la nappe alluviale, comme le montrent les nombreux pics de débits entre 400 et 500 $m^3.s^{-1}$ de la période de hautes-eaux 2010 - 2011.

Il faut noter que les différences de charge les plus importantes (avec i > 1,5 m, en bleu foncé sur la fig. 171) se produisent le plus souvent entre les mois de novembre et mars. Mais au cours des basses-eaux de l'année 2010, plusieurs augmentations des débits de la Loire ont entraîné une recharge de la nappe alluviale. Ainsi, l'augmentation du débit de la Loire de 103 $m^3.s^{-1}$ le 23/07/2010 à 335 $m^3.s^{-1}$ le 25/07/2010, a entraîné 3 jours de recharge de la nappe alluviale par la Loire en pleine période de basses-eaux[3]. **Ainsi, pour ce secteur amont du méandre de Guilly, la recharge de la nappe alluviale peut survenir tout au long de l'année hydrologique en fonction des pics de débits de la Loire, bien qu'elle soit plus significative en période de hautes-eaux.**

Secteur de l'Ile aux Canes

Dans le secteur de l'Ile aux Canes (fig. 172), c'est-à-dire au centre de la zone d'étude, **ce sont les périodes de soutien des débits par la nappe qui sont les plus fréquentes** (64% du temps pour 1023 jours de données, de mars 2009 à janvier 2012). Ces périodes sont relativement longues et continues, alors que **les périodes de recharge de la nappe par la Loire sont ponctuelles et n'excèdent pas quelques jours** (13% de la période). Les variations des différences de charge sont à nouveau inféodées aux moindres variations du débit de la Loire.

Les périodes d'équilibre entre les deux masses d'eau représentent 24% de la période. Les valeurs seuil de cet état d'équilibre ont été fixées à -0,2 et 0,2 m pour Pu Canes 1, Pu 16 et Pu 12, tous les trois situés à moins de 400 m de la Loire.

Enfin, les périodes de soutien des débits de la Loire par la nappe alluviales y proviennent à tout moment de l'année hydrologique, excepté lors des pics de débits de la Loire. En effet, le temps de réponse de la nappe alluviale aux variations de la Loire est à l'Ile aux Canes de quatre jours seulement. La surface piézométrique de la nappe alluviale s'ajuste donc très vite à la ligne d'eau de la Loire et dès que le débit diminue un peu la nappe soutient les débits. L'exemple des hautes eaux 2010 – 2011 illustre bien ce phénomène. La nappe restitue de l'eau à la Loire même entre les pics de débit importants du mois de décembre 2010, puis s'engage une longue période

[3] Les mécanismes du soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale seront décrits en détail plus loin ; cf. 5.4.5.

de soutien des débits dès le 17 janvier 2011, avec d'ailleurs des différences de charge supérieures à -0,5 m, jusque début juin, ce qui reflète les volumes d'eau importants mobilisés.

Secteur aval du méandre

Pour les différences de charge calculées entre **la Loire et la nappe alluviale au Pu 16** (fig. 173), les réponses de la nappe aux variations de la Loire sont tellement rapides (2 jours ; fig. 163), que ce sont les périodes d'équilibre entre les deux masses d'eau qui dominent (58% du temps, entre mars 2009 et janvier 2012). Ce phénomène est sûrement plus lié à la très faible distance qui sépare le puits de la Loire (100 m) qu'à des caractéristiques particulières du secteur aval du méandre. Il ne reste donc plus que 31% du temps pour le soutien des débits de la Loire par la nappe et 11% de la période où la Loire recharge la nappe.

A nouveau, le sens des échanges entre la Loire et la nappe alluviale ne cessent de s'inverser à l'exemple de la période entre mars et octobre 2010, même si la recharge de la nappe par la Loire est encore un phénomène plus ponctuel que le soutien des débits par la nappe. Il est également notable, que les périodes de fin d'étiage sont, dans le secteur du Pu 16, des périodes d'équilibre entre les masses d'eau de la Loire et la nappe alluviale (de fin juillet à début novembre pour les années 2009 et 2011).

Il est possible de synthétiser l'inversion de ces échanges entre la Loire et la nappe alluviale au niveau des puits Pu Canes 1 et Pu 16, qui fonctionnent de façon assez similaires.

Le début des hautes eaux est marqué par un épisode de recharge de la nappe alluviale par la Loire, avec parfois des différences de charge importantes selon l'importance des débits de la Loire. Cette période exclusive de recharge de la nappe par la Loire a duré deux mois pendant les hautes eaux 2009 – 2010 et un mois pour celles de 2010 – 2011.

Puis, même si les débits restent importants, le sens des échanges entre les deux masses d'eau ne cessent de s'inverser, jusqu'aux hautes eaux suivantes s'il n'y a pas de baisse estivale durable des débits, comme pendant l'été 2010. Sinon, les échanges se stabilisent dans le sens de la nappe vers la Loire pendant les basses eaux, au moins au début. Ce soutien des débits de basses eaux et d'étiage de la Loire par la nappe faiblit plus l'étiage est long. Lorsque les basses eaux sont

précoces ou s'elles se prolongent pendant la période automnale, une situation d'équilibre entre les masses d'eau dans la deuxième partie de l'étiage s'installe jusqu'au début des hautes eaux suivantes, même si cet équilibre est perturbé à la moindre petite augmentation de débit.

Ce schéma est donc marqué par la variabilité saisonnière et interannuelle des débits de la Loire.

Enfin, le secteur le plus en aval du méandre (fig. 174), **est lui marqué par une prépondérance des périodes où la nappe soutient les débits de la Loire** (60% du temps, entre mars 2009 et janvier 2012). Seuls 12% de la période ont connu une recharge de la nappe alluviale par la Loire dans ce secteur.

En outre, lorsque l'étiage se prolonge, on remarque une diminution particulièrement prononcée de la valeur absolue des différences de charge (lorsque la nappe soutient les débits de la Loire, la différence de charge est ici négative). Cette baisse en valeur absolue est observable en continu pendant les étiages 2009 et 2011. Elle illustre donc le fait que les volumes d'eau fournis par la nappe alluviale à la Loire décroissent lorsque les étiages de la Loire « s'éternisent ». En 2010, la période d'étiage est marquée par des pics de débits qui viennent interrompre le soutien des débits par la nappe. Néanmoins, au fur et à mesure de l'avancée dans la saison, les valeurs absolues des différences de charge ont également tendance à baisser.

Différences de charge et recharge de la nappe alluviale

On peut noter ici que les différences de charge les plus importantes proviennent au moment des pics de crues, même en cas de crue moyenne, mais également au moment des premiers pics de débit qui marquent la fin des étiages. En effet, si les débits de la Loire ont connu une réelle baisse pendant la période d'étiage, le niveau de la nappe alluviale est relativement bas. Des débits moyens peuvent donc engendrer des différences de charge importantes entre la Loire et la nappe alluviale, comme le pic de débit survenu en fin d'étiage, en novembre 2011, qui n'était que d'un débit de 477 $m^3.s^{-1}$ à Gien.

L'importance des différences de charge dans l'efficacité de la recharge de la nappe alluviale en période de hautes eaux est à nouveau illustrée par la comparaison entre les hautes

eaux 2009-2010 et celles de 2010-2011. En effet, les niveaux de la nappe alluviale en fin d'étiage 2009 et 2010 sont comparables. Cependant, les niveaux de la nappe alluviale à la fin de ces deux périodes de hautes eaux sont différents. Les hautes eaux 2009-2010 s'étalent sur six mois, mais les évènements hydrologiques sont peu nombreux et peu prononcés (débit maximum : 1020 $m^3.s^{-1}$ à Gien). Au contraire, les hautes eaux 2010-2011 ne durent que deux mois et demi, mais trois pics de débit dépassent les 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien. Ainsi, la nappe alluviale a atteint à la fin des hautes eaux 2010-2011 des niveaux plus importants qu'après celles 2009-2010. D'après les figures 171 à 174, on peut voir que la différence de charge entre les maxima piézométriques atteints par la nappe alluviale entre ces deux périodes de hautes eaux sont de : 63 cm au Pu 12, 83 cm au Pu 16, 57 cm au Pu Canes 1 et 52 cm au Pu 17.

Donc, **plus les différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale sont importantes, plus la recharge de la nappe alluviale est efficace**.

Pour conclure, il est nécessaire de relativiser les variations de temps de recharge de la nappe ou de soutien de débits entre les différents secteurs étudiés (tab. 65), étant donné que les puits ne se situent pas à la même distance de la Loire. On verra l'importance de ce facteur un peu plus loin pour la vidange estivale de la nappe alluviale.

	Données disponibles	Soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale	Equilibre	Recharge de la nappe alluviale par la Loire
Pu 17	925 jours	45 jours	492 jours	388 jours
		5%	53%	42%
Pu Canes 1	1023 jours	653 jours	242 jours	128 jours
		64%	24%	13%
Pu 16	1036 jours	323 jours	600 jours	113 jours
		31%	58%	11%
Pu 12	1034 jours	617 jours	288 jours	129 jours
		60%	28%	12%

Tab. 65. *Synthèse de l'amplitude temporelle de chacun des sens des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale au sein du méandre de Guilly, pour toutes les données disponibles entre mars 2009 et le 31/01/2012*.

Cependant, les deux secteurs les plus en amont et en aval du méandre se différencient nettement (tab. 65 : Pu 17 et Pu 12). L'amont du méandre est essentiellement une zone de recharge de la nappe alluviale et contribue très peu fréquemment au soutien des débits de la Loire. Au contraire, l'aval du méandre joue un rôle prédominant dans le soutien des débits de la Loire, alors qu'il ne s'y produit que peu fréquemment des échanges d'eau de la Loire vers la nappe alluviale.

Cette observation du rôle différent dans le fonctionnement hydrologique des secteurs aval et amont du méandre est certainement généralisable. Le principal facteur entraînant cette opposition est le gradient topographique d'altitude entre l'amont et l'aval du méandre. Comme il s'agit d'une caractéristique de la morphologie des méandres, ce fonctionnement des échanges entre un cours d'eau et sa nappe alluviale au sein d'un méandre devrait être observable dans bien des exemples.

Pour renforcer cette analyse, nous allons développer deux situations hydrologiques qui permettront d'analyser en détail le fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne dans ses échanges avec la nappe d'accompagnement. Il s'agit d'une part, de l'étiage très long de 2011 et d'autre part, des crues printanières de 2013.

5.4.5. Vidange progressive de la nappe alluviale en période d'étiage[4] : exemple de l'étiage 2011

Le choix a été fait de se concentrer sur l'étude des basses eaux de l'année 2011, plutôt que sur celles des années 2009 ou 2010. Les basses eaux des années 2009 et 2010 ont été moins longues que celles de 2011. De plus, en fin de hautes eaux, la nappe alluviale avait atteint les niveaux les plus hauts en 2011. La recharge importante de la nappe alluviale, combinée à un étiage sévère par sa longueur, accentue les mécanismes et permet de mieux illustrer les tendances en cours pendant ces périodes d'étiage.

[4] Les termes basses eaux et étiages sont ici confondus pour plus de simplicité étant donné que les débits de la Loire sont soutenus par les grands barrages pour qu'ils demeurent supérieurs au seuil de 60 $m^3.s^{-1}$ à Gien.

L'hydrologie de la Loire de l'année 2011 est donc marquée par des basses eaux qui ont duré six mois et demi, de mi-avril à début novembre (fig. 177). Pour prendre la mesure de la sévérité de cet étiage, comparons-le avec celui de 2009. D'après la figure 174, le niveau minimal de la nappe alluviale au Pu 12 lors de l'étiage 2009, a été atteint le 31 octobre (104,73 m NGF). En 2011, la même valeur basse est atteinte bien plus tôt, le 3 juillet, malgré une recharge de la nappe plus importante que les années précédentes grâce aux pics de débit de novembre et décembre 2010.

De plus, début novembre 2011, l'altitude du toit de la nappe au niveau de Pu 12 est de 104,61 m NGF : c'est-à-dire qu'en quatre mois supplémentaires d'étiage, la nappe alluviale n'a baissé que de 14 cm de plus dans ce secteur.

Des éléments supplémentaires informent sur le fonctionnement hydrologique. En effet, lorsque l'on compare les cartes piézométriques de début juillet et de début novembre 2011 (fig. 175 et 176), elles se ressemblent beaucoup en termes de circulation des eaux au sein de la nappe alluviale. La nappe continue à soutenir les débits de la Loire, même si les échanges entre la nappe alluviale en rive gauche et la Loire semblent être très limités à l'amont du méandre. De plus, on voit que le niveau de la nappe dans la partie aval du méandre entre juillet et novembre n'a que peu évolué, tandis qu'en amont, ce niveau a baissé.

En effet, début juillet 2011, la nappe alluviale a donc atteint un seuil bas dans le secteur aval du méandre (Pu 12 ; fig. 177). Ce seuil bas est également observé pour les deux puits proches de la Loire (Pu Canes 1 et Pu 16) dès début juillet 2011.

Les droites de régression linéaire représentées pour différentes périodes de rabattement de la nappe alluviale (fig. 177) montrent une diminution de la pente de ces droites au fur et à mesure de l'étiage, jusqu'à une pente quasiment nulle (au Pu 16, P2 = -0,0008 m.jour^{-1}).

De plus, on remarque que le rythme du rabattement de la nappe alluviale est plus rapide pour le secteur aval du méandre (Pu 16 et Pu 12) ainsi que pour le puits Pu Canes 1, très proche de la Loire (fig. 178). Au centre du méandre, en s'éloignant de la Loire (Pu 17 et Oussy), la vidange de la nappe est plus progressive, en lien avec la porosité et la perméabilité du milieu.

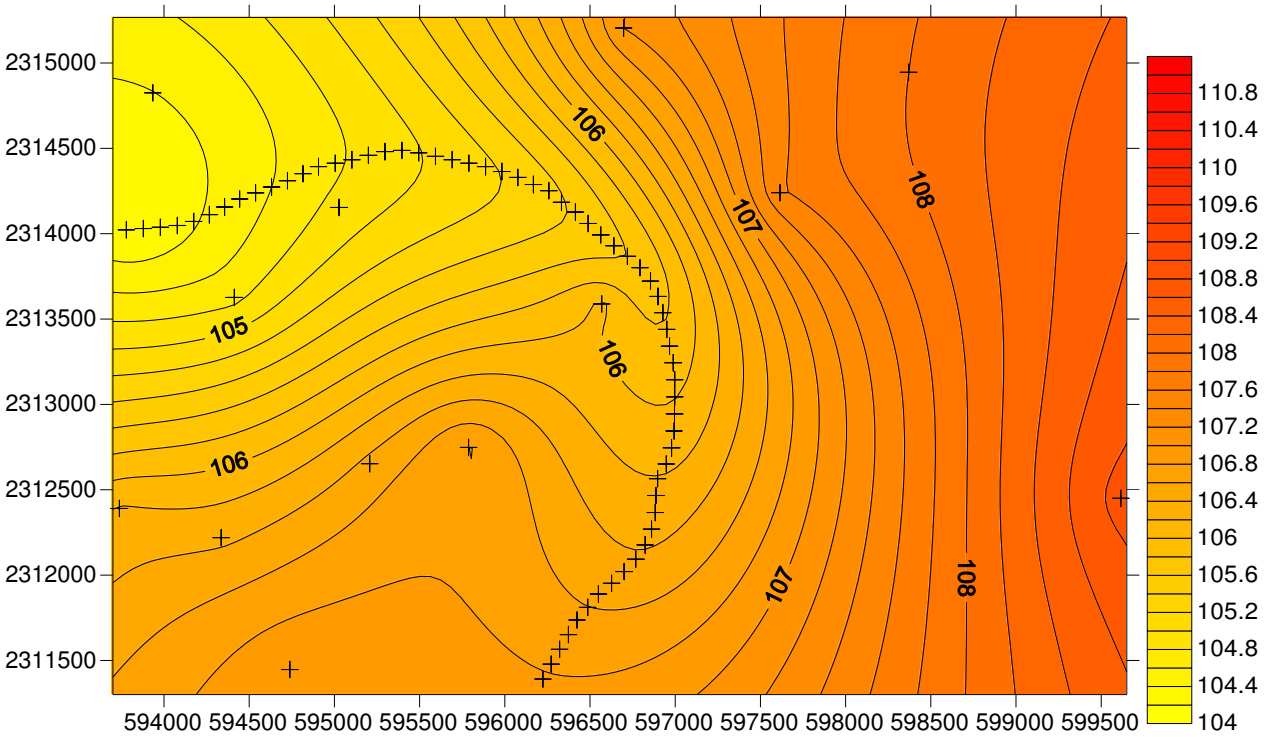


Fig. 175. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly en date du 02 juillet 2011.*

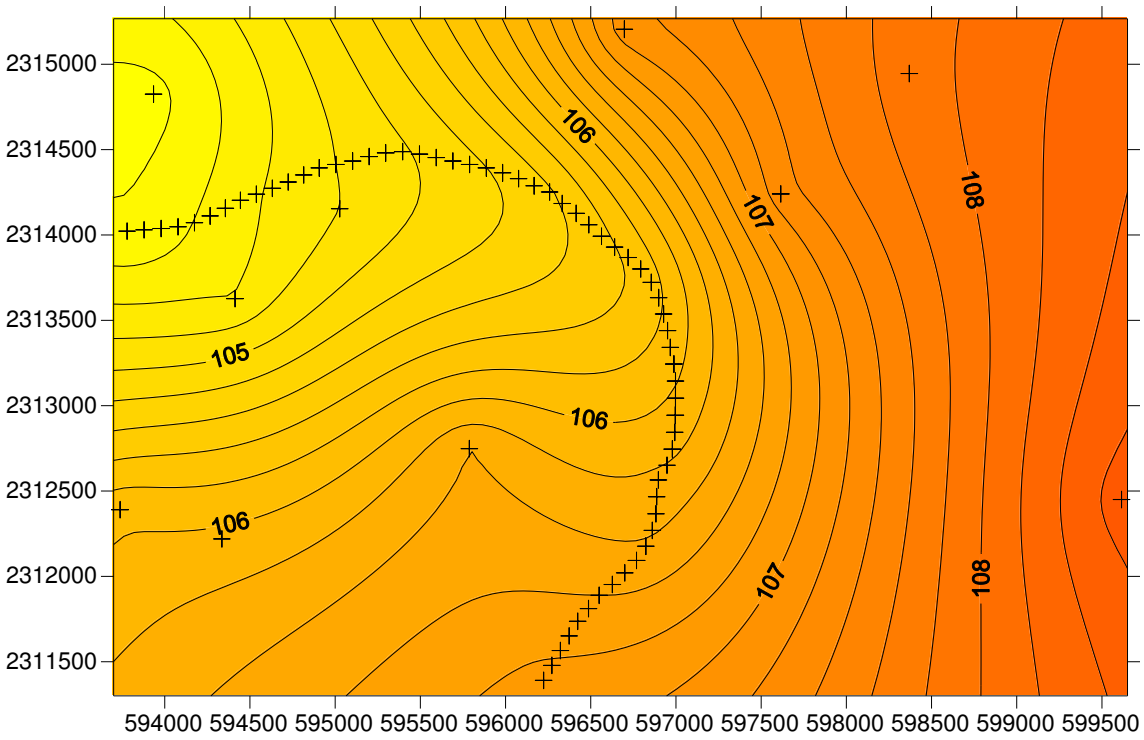


Fig. 176. *Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly en date du 04 novembre 2011 (légende identique que la fig. 174).*

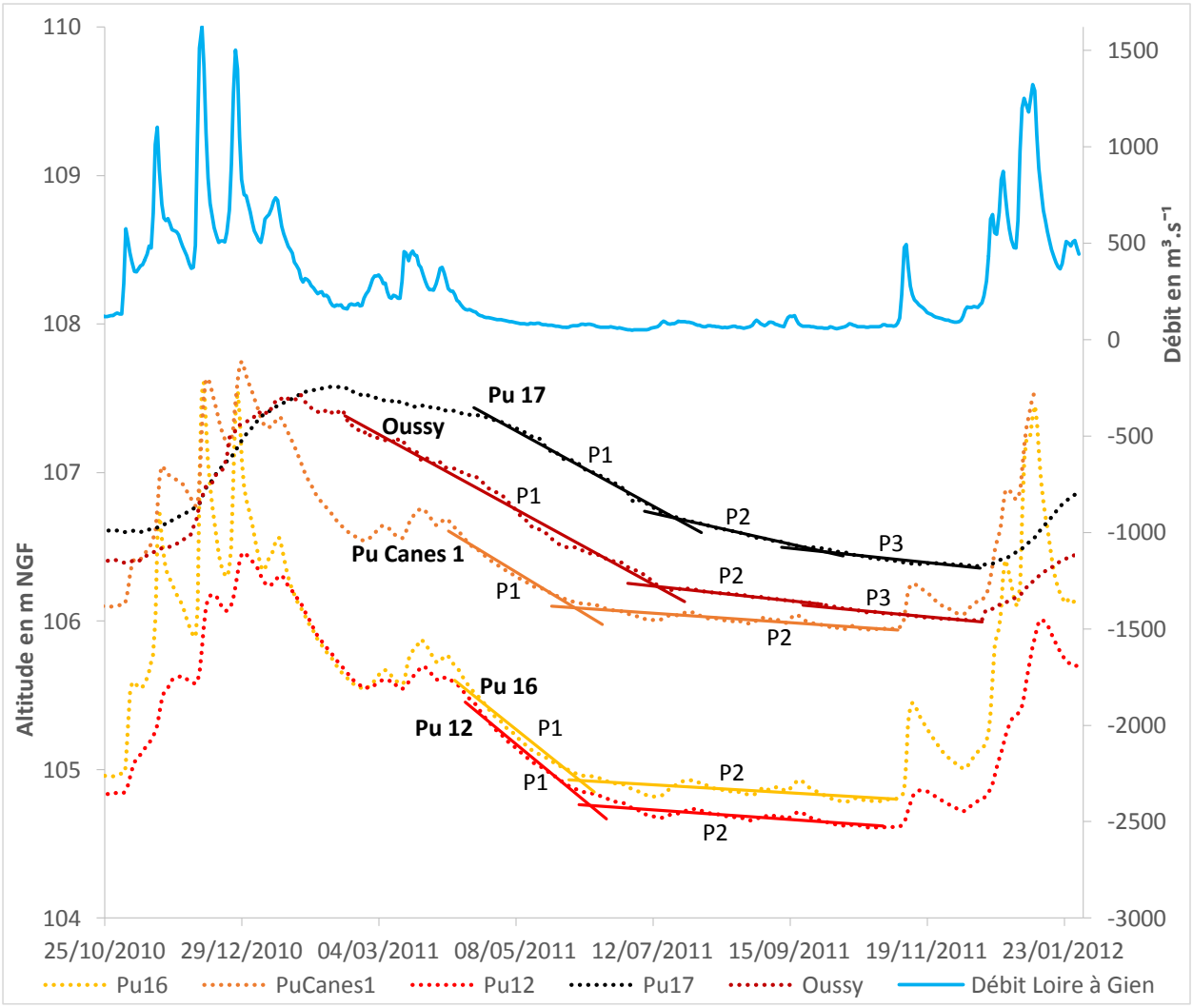


Fig. 177. *Mobilisation progressive de la ressource en eau de la nappe alluviale pour le soutien des débits de la Loire lors de l'étiage 2011.*

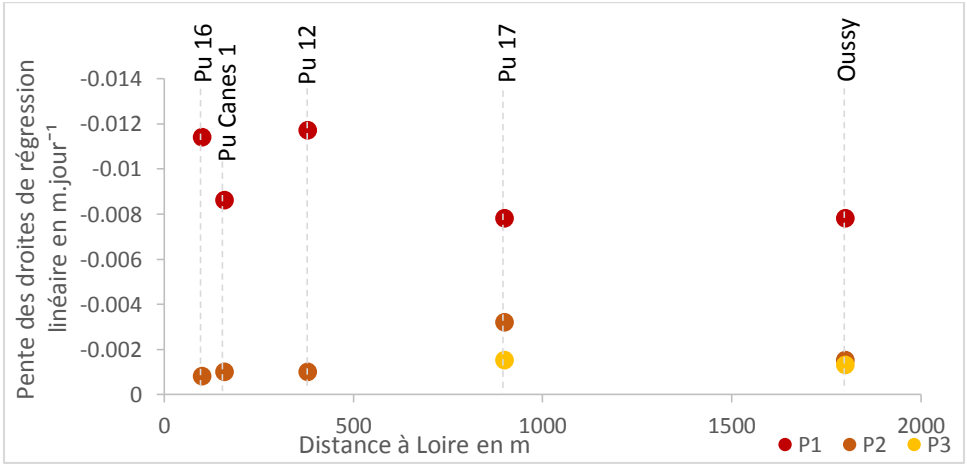


Fig. 178. *Ryhtme de la baisse de la cote piézométrique de la nappe alluviale pendant l'étiage 2011 : en fonction de la distance à la Loire et du temps (légende P1, P2, P3 : fig. 177).*

Les figures 175 à 178 démontrent donc que le stock d'eau que représente la nappe alluviale est mobilisé petit à petit. Les réserves les plus proches de la Loire sont les premières à être mobilisées au cours de l'étiage et à s'épuiser (d'où l'altitude très stable de la nappe alluviale dans les puits proches de la Loire).

Le soutien des débits d'étiage de la Loire est donc assuré par les réserves d'eau de la nappe alluviale, qui sont mobilisées d'autant plus loin de la Loire que l'étiage perdure, comme lors de l'étiage 2011. Ainsi, au cours de l'étiage, la nappe restitue à la Loire les réserves accumulées dans les périodes de débits importants. Il faut néanmoins noter que malgré le fait que le soutien des débits de la Loire perdure pendant tout l'étiage 2011, la baisse progressive des différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale (engendrée par la baisse du niveau de la nappe alluviale) implique que les volumes d'eau fournis à la Loire s'affaiblissent également au cours du temps.

5.4.6. Impacts des crues moyennes et exemple de la crue printanière de mai 2013

Entre janvier et mai 2013, la Loire a traversé une période de hautes eaux avec quelques épisodes de crue. L'épisode le plus prononcé a eu lieu au début mai 2013 (tab. 66). Pour illustrer les interactions entre la Loire en crue et la nappe, nous avons retenu le comportement de deux puits (Pu 12 et Oussy : les deux seules chroniques continues jusqu'à cette période). Par facilité, la majorité des exemples utilisés ci-dessous seront pris au Pu 12, étant donné que le temps de réponse de la nappe alluviale aux variations de la Loire y est rapide (10 jours), comparé à celui au site d'Oussy (43 jours).

Tout d'abord, l'augmentation de la cote piézométrique de la nappe alluviale provoquée par le pic de crue de mai 2013 peut être comparée à d'autres pics de débits importants de la Loire (fig. 179 et tab. 66). D'après le tableau 66, la crue de mai 2013 a eu le plus fort impact mesuré sur la variation de la nappe alluviale au Pu 12. En effet, elle a fait augmenter de 71 cm la cote piézométrique de la nappe, malgré la faible différence de charge entre la Loire et la nappe alluviale au Pu 12 au début de la crue.

Débits de la Loire à Gien (en $m^3.s^{-1}$)			Altitude de la nappe alluviale au Pu 12 (en mètre NGF)			Différence de charge entre la Loire (L_4) et la nappe alluviale au Pu 12 (en mètre)		
Date du pic de débit	Débits maximaux journaliers	Nombre de jours où Q > 1000 $m^3.s^{-1}$	Altitude initiale (à la date à laquelle le débit dépasse les 1000 $m^3.s^{-1}$)	Altitude maximale dans les 10 jours suivants	Amplitude de la variation	Le jour où le débit de la Loire dépasse 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien	Le jour du pic de débit	Maximum pendant la crue
28/02/2010	1020	1	105,65	105,83	0,18	0,96	0,96	0,96
04/02/2013	1100	2	106,12	106,49	0,37	0,70	0,70	0,70
26/05/2012	1230	3	105,49	105,83	0,34	1,28	1,53	1,53
23/01/2014	1340	3	105,92	106,37	0,45	0,63	1,17	1,17
10/12/2010	1620	5	105,6	106,18	0,58	1,41	1,70	1,80
08/01/2012	1320	8	105,43	106,01	0,58	1,70	1,36	1,70
07/05/2013	2000	8	106,16	106,87	0,71	0,54	1,36	1,43

Tab. 66. *Impacts des pics de débit de la Loire supérieurs à 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien sur les variations de la nappe alluviale au Pu 12 de mars 2009 à janvier 2015.*

Cependant, pour la crue de mai 2013, la variation de la nappe alluviale au Pu 12 révèle surtout l'impact de l'inondation de l'aval du méandre pendant plusieurs jours sur la recharge de la nappe alluviale. En effet, lors de cet évènement, la partie aval du méandre a été entièrement inondée, alors que les autres pics de crues cités dans le tableau 66, n'avaient engendré qu'une remise en eau partielle des anciens bras de la Loire dans le secteur aval du méandre (fig. 138 à 140, cf. 5.1.3). En mai 2013, cette inondation a duré 3 ou 4 jours selon les zones.

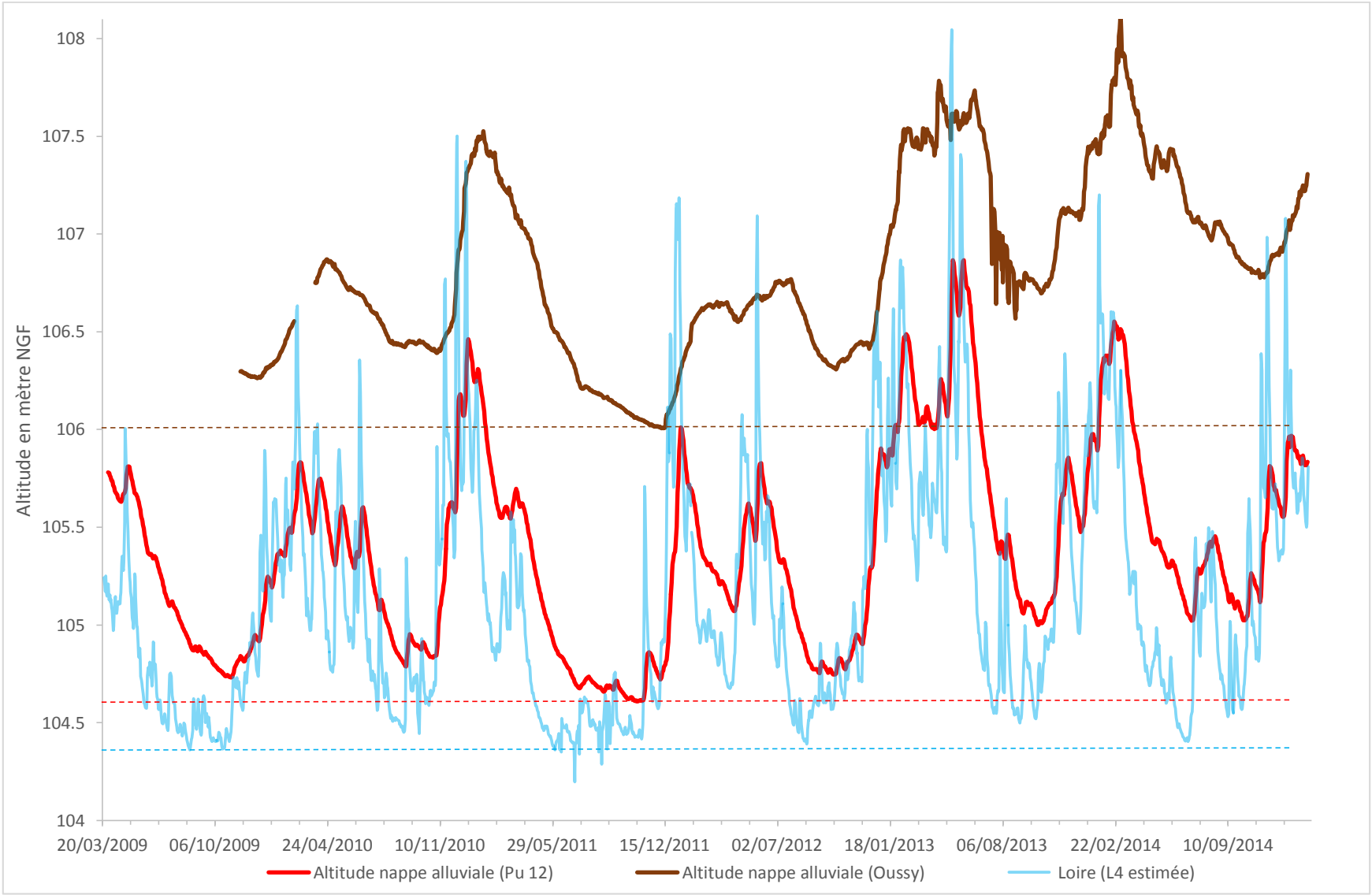


Fig. 179. *Impact d'une crue printanière sur la recharge de la nappe alluviale puis sa vidange pendant l'étiage.*

Curieusement, lorsque que l'on compare l'impact sur la nappe alluviale des crues de janvier 2012 et de mai 2015, ils ne sont pas aussi différents (respectivement, au Pu 12, +58 cm et +71 cm) que l'écart des maxima de débit atteint pendant la crue pourrait laisser supposer (respectivement 1320 et 2000 $m^3.s^{-1}$ à Gien). On peut expliquer la forte recharge de la nappe alluviale par la crue de janvier 2012 par l'importance de la différence de charge au début de la crue. En effet, pour ces deux évènements, les différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale au Pu 12 au moment du pic de crue sont strictement égales (le 08/01/2012 : 1,36 m et le 07/05/2013 : 1,36 m), alors que le jour où le débit de la Loire dépasse 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien, elle est beaucoup plus importante pour la crue de janvier 2012 (le 02/05/2013 : 0,54 m et le 03/01/2012 : 1,70 m).

L'inondation du méandre a donc un impact majeur sur la recharge de la nappe alluviale puisque la surface d'infiltration des eaux de la Loire en crue y est démultipliée. Cependant, cette recharge est la plus efficace lorsque la différence de charge entre la nappe et le fleuve est marquée. Ainsi, le tableau 66 permet de relativiser l'effet d'une inondation comparé à des débits de la Loire plus faibles, mais supérieurs à 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien, qui surviennent lorsque la nappe alluviale est relativement basse (différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale importantes, fig. 179).

L'étude de l'impact de la crue de mai 2013 à moyen terme est également primordiale.

Avant la crue du début mai 2013, le niveau de la nappe alluviale est équivalent à celui du maximum des hautes eaux 2010-2011 (107,7 m NGF à Oussy et 106,5 m au Pu 12, fig. 179). La crue de mai 2013 entraîne une augmentation de l'altitude du toit de la nappe alluviale de 70 cm à Pu 12 (en 10 jours) et de l'ordre de 25 cm à Oussy (en 15 jours). Les volumes d'eau que cette hausse de la surface piézométrique de la nappe représente à l'échelle de la nappe alluviale, sont donc très significatifs. La recharge de la nappe par cet épisode est donc importante.

Cependant, son bénéfice le plus important se remarque au moment de l'étiage : retarder dans la saison le rabattement de la nappe alluviale. Fin mai 2013, les niveaux de la nappe alluviale étaient donc encore très hauts. Pendant un peu plus de deux mois, de fin juillet à début octobre, les basses eaux de la Loire se stabilisent autour de débits de l'ordre de 100 $m^3.s^{-1}$, soit des lignes

d'eau supérieures de 15 cm au minimum atteint en 2009 et 2011. Ces débits assez soutenus pour une période de basses eaux ont été renforcés par leur remontée jusqu'à 500 $m^3.s^{-1}$ pendant la première quinzaine d'août.

Pendant l'étiage 2013, la nappe alluviale a donc été loin d'atteindre les niveaux bas de 2011. Au Pu 12, le minimum atteint début octobre 2013 se situe 40 cm au-dessus du minimum de novembre 2011. A Oussy, la différence est de 70 cm entre les deux minima. On l'a vu pour l'étiage de 2011, les deux caractéristiques qui entraînent une baisse aussi importante de la nappe alluviale sont la faiblesse des débits et la longueur de l'étiage. Les basses eaux de 2013, dans ces termes, n'atteignent pas du tout l'ampleur de l'étiage de 2011. Néanmoins, ces niveaux de la nappe alluviale, demeurés relativement hauts pour une période sèche, ne sont pas seulement attribuables à la médiocrité de l'étiage 2013, mais également aux importants volumes d'eau accumulés par la nappe pendant la crue du mois de mai 2013.

Enfin, en fin des hautes eaux 2013 – 2014, on remarque que la surface piézométrique maximale de la nappe alluviale est élevée par rapport aux autres années. Au Pu 12, la nappe atteint un niveau équivalent au maximum des hautes eaux 2010 – 2011. Par contre, à Oussy, il s'agit bien du maximum d'altitude mesuré pour l'ensemble de la période de suivi. Le puits d'Oussy est donc révélateur de l'état des réserves de la nappe alluviale, plus que Pu 12 où la nappe varie rapidement en fonction de la Loire.

A Oussy, les réserves de la nappe alluviale, accumulées pendant la période de hautes eaux 2012 – 2013 jusque pendant la crue de mai 2013 et peu mobilisées pendant les basses eaux 2013, présentent donc un maximum piézométrique fin février 2014 particulièrement important. Ainsi, les hautes eaux 2013 – 2014 ne sont pas les principales responsables de ce maximum piézométrique. Ces hautes eaux ont certes duré quatre mois, mais les débits de la Loire y sont restés modestes (débit maximum le 23/01/2014 de 1 340 $m^3.s^{-1}$ à Gien). Ce sont donc les effets cumulés des hautes eaux 2012 – 2013 et de la crue de mai 2013 qui expliquent ce maximum piézométrique de février 2014 à Oussy. Cet effet durable de la crue de mai 2013 sur la nappe alluviale est d'autant plus long que l'étiage de 2013 n'a pas mobilisé l'ensemble des réserves de la nappe alluviale.

Les débits à pleins bords (1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien) et les crues entraînant l'inondation du méandre ont donc un impact majeur sur la recharge de la nappe alluviale, impact dont l'effet peut se prolonger dans le temps en fonction de l'abondance hydrologique des périodes suivant la crue.

5.4.7. Circulation des eaux de la nappe alluviale, parallèlement ou transversalement à la levée

La levée représente un élément très structurant du paysage ligérien, mais elle a aussi un impact important sur les écoulements, en limitant efficacement l'extension latérale des inondations lors des crues de fréquence élevée et moyenne. Seules les grandes crues « échappent » au contrôle de la levée. Cet impact efficace se vérifie-t-il également au niveau des écoulements souterrains ? Quelle influence pourrait avoir cette infrastructure continue sur la circulation des eaux de la nappe alluviale ?

Les cartes piézométriques des figures 166 à 169 (cf. 5.4.3) ont permis d'identifier des circulations d'eau parallèles ou transversales à la levée, dans les secteurs amont et aval du méandre. Il s'agit ici de comprendre les facteurs qui modifient la circulation des eaux de la nappe de part et d'autre de la levée, et d'étudier l'occurrence de ces deux directions de la circulation des eaux de la nappe alluviale.

Secteur aval du méandre

Tout d'abord, pour l'étude des directions de la circulation des eaux de la nappe alluviale dans le secteur aval du méandre, les niveaux de nappe utilisés sont ceux des puits à Oussy, la Caillotière et Pu 12 et pour la Loire, l'altitude des lignes d'eau à l'aval du méandre, au point L_4.

Un seuil d'équilibre des masses d'eau a également été défini ici entre l'altitude des lignes d'eau de la Loire et celle de la nappe alluviale. Ainsi, les différences de charges entre -0,2 et 0,2 m sont considérés comme reflétant une « situation hydrogéologique stable ».

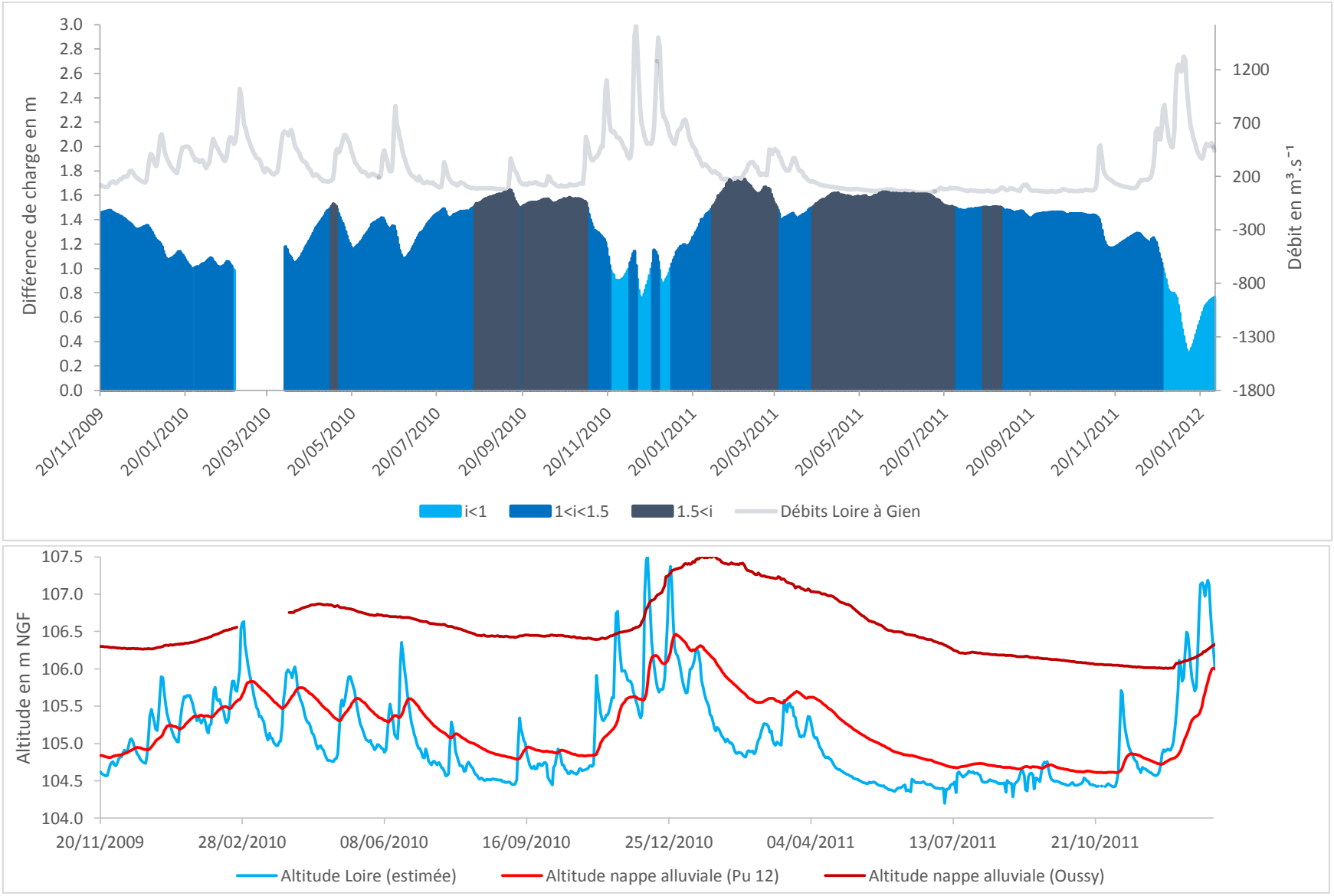


Fig. 180. *Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Oussy et au Pu 12 (avec i = Z (Oussy) – Z (Pu 12). Sont également représentées les lignes d'eau de la Loire au point L_4.*

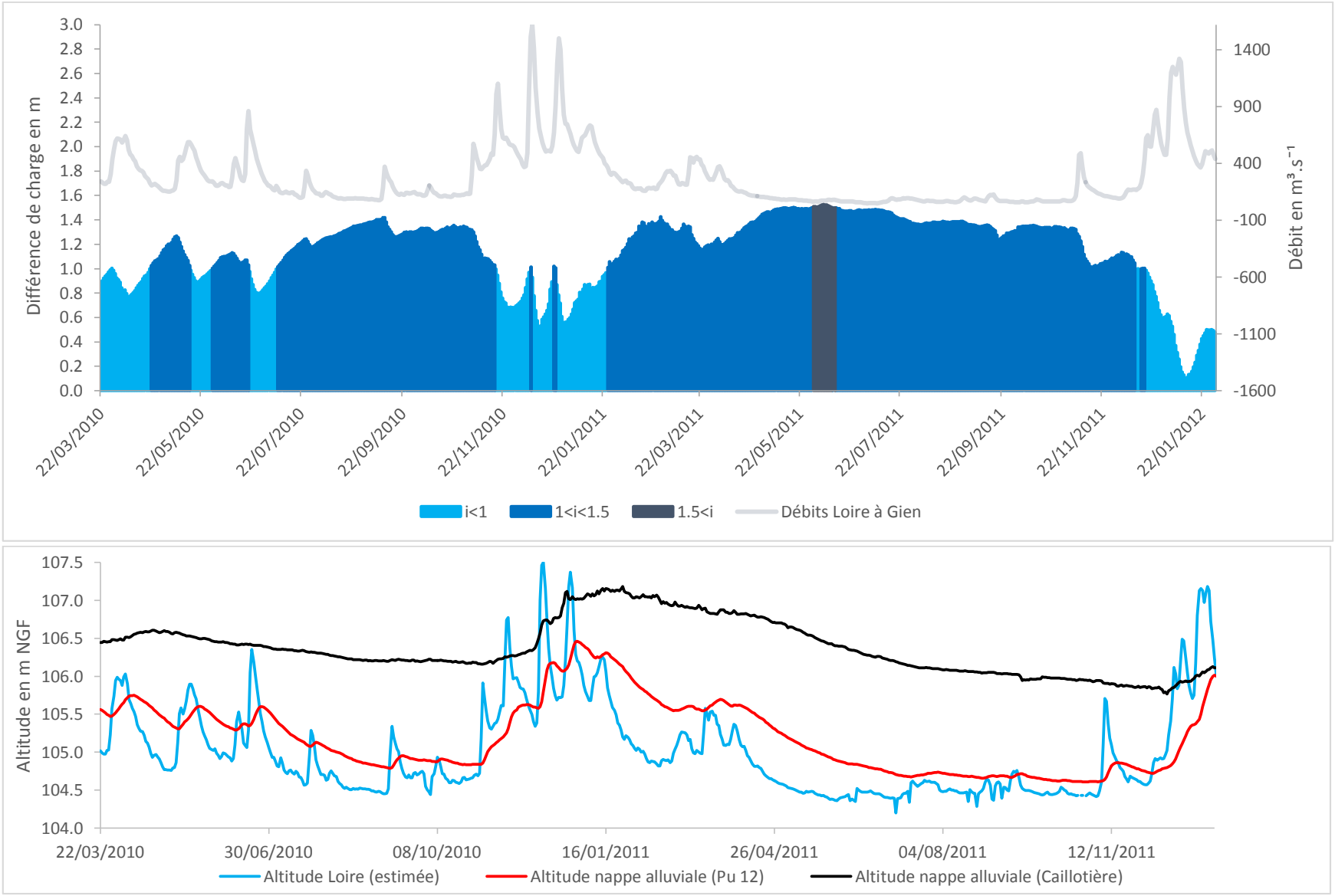


Fig. 181. *Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Caillotière et au Pu 12 (avec i = Z (Caillotière) – Z (Pu 12). Sont également représentées les lignes d'eau de la Loire au point L_4.*

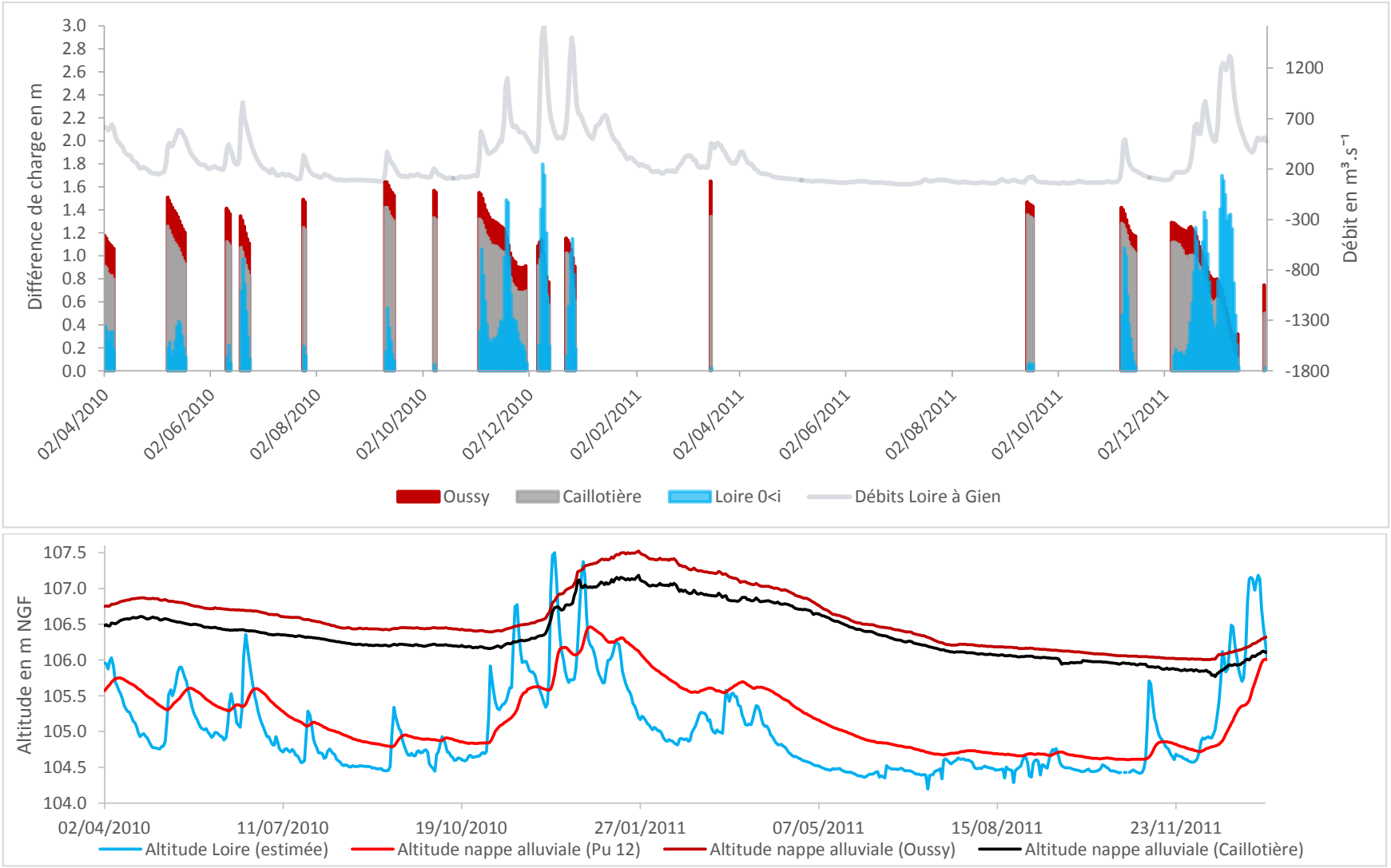


Fig. 182. *Synthèse de l'occurrence des circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée, dans le secteur aval du méandre grâce aux différences de charge (i) entre d'une part, la Loire (L_4) ou la nappe alluviale à Oussy ou à Caillotière et d'autre part la nappe alluviale au Pu 12. Ces circulations transverses surviennent lorsque i>0,2 m pour les trois différences de charge. Les différences de charge sont représentées ici pour les seules périodes où i (Loire – Pu 12) > 0).*

Les différences de charge au sein de la nappe alluviale, entre Oussy et Pu 12 (fig. 180) d'une part, et d'autre part La Caillotière et Pu 12 (fig. 181) sont positives pour toute la période d'étude. Dans le secteur aval du méandre, une circulation des eaux de la nappe, transverse à la levée, est donc possible tout le temps. Cependant, d'après les cartes piézométriques des figures 166 à 169, la situation est plus complexe. Ce ne sont donc pas les différences de charges hydrauliques de part et d'autre de la levée, au sein de la nappe alluviale, qui contrôle la direction de la circulation de ces eaux souterraines.

D'après les figures 166 à 169, pour que la direction de l'écoulement des eaux de la nappe alluviale se modifie de parallèle à transversal par rapport à la levée, il faut que la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 12 représente les points bas de ce secteur. La majorité du temps, ces points bas de la surface piézométrique sont les lignes d'eau de la Loire. Mais lorsque la Loire recharge la nappe alluviale dans le secteur aval, Pu 12 se situe au centre d'une légère dépression piézométrique. Ainsi, dans cette zone, la circulation des eaux de la nappe alluviale est transverse à la levée quand la Loire recharge la nappe, c'est-à-dire lorsque la différence de charge entre la Loire (en L_4) et la nappe alluviale à Pu 12 est positive.

L'occurrence de ces situations hydrogéologiques est synthétisée par la figure 182. La plupart du temps, les eaux de la nappe alluviale circulent de l'amont vers l'aval du méandre, soit parallèlement à la levée (fig. 167 et 168, cf. 5.4.3.). A l'inverse, les eaux de la nappe alluviale circulent transversalement à la levée seulement 12% du temps pour la période étudiée (mars 2009 à janvier 2012 ; tab. 68). Il s'agit donc de circulation relativement réduite dans le temps, mais que l'on ne peut pas négliger. En effet, les différences de charges hydrauliques internes à la nappe alluviale entre les deux côtés de la levée peuvent dépasser 1,5 m.

Toutefois, il convient de nuancer ce dernier constat. En effet, la différence de charges hydrauliques au sein de la nappe alluviale, entre les deux côtés de la levée, dans des situations particulières, peut approcher de zéro. Par exemple, lors des premiers jours de l'année 2012, les conditions sont réunies pour un écoulement transverse de la nappe alluviale. Toutefois, la différence de cotes piézométriques entre Oussy ou la Caillotière et Pu 12 est très faible, ce qui implique un transfert peu abondant vers le méandre. En effet, lors de l'étiage long et sévère de

l'année 2011, les niveaux de la nappe alluviale à Oussy et la Caillotière ont beaucoup baissé. Puis, lorsque les débits de la Loire ont brusquement augmenté fin décembre 2011, la nappe a répondu rapidement au niveau du Pu 12 ce qui l'a amené pratiquement à l'altitude de la nappe à Oussy et la Caillotière.

Ces circulations internes à la nappe alluviale, transversalement à la levée, dans le secteur aval du méandre, se produisent donc lorsque la Loire recharge la nappe alluviale, c'est-à-dire sur des périodes continues dans la première partie de la période des hautes eaux, ou, ponctuellement au moindre pic de débit en période de basses eaux (fig. 182). En effet, comme on l'a vu, pour que la Loire recharge la nappe alluviale dans le secteur aval, il faut que la surface piézométrique de la nappe alluviale ait été abaissée par un soutien des débits de la Loire ou bien que la Loire connaisse des augmentations brusques de débit impliquant que ses lignes d'eau dépassent le toit de la nappe alluviale. **Les variations du débit de la Loire, en plus de contrôler les échanges entre la Loire et la nappe alluviale, déterminent donc également la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale dans le secteur aval du méandre.**

Secteur amont du méandre

Pour le secteur à l'amont du méandre, la situation est plus complexe. Les niveaux piézométriques de la nappe alluviale utilisés ici sont ceux des puits à Ménivelle, à Oussy et au Pu 17, ainsi que les lignes d'eau de Loire à l'amont du méandre (L_1).

De même que pour le secteur aval, la différence de charges hydrauliques au sein de la nappe alluviale entre Ménivelle et Pu 17 est positive pour l'ensemble des données d'avril 2010 à août 2011 (fig. 183), même si elle est en moyenne moins importante que dans le secteur aval. Ainsi, hydrauliquement, la circulation des eaux de la nappe alluviale de Ménivelle, au-delà de la levée, vers le méandre est possible. Cependant, d'après les figures 166 à 169, récapitulées par le tableau 67, cette direction des écoulements des eaux de la nappe alluviale n'est, à nouveau, pas systématique.

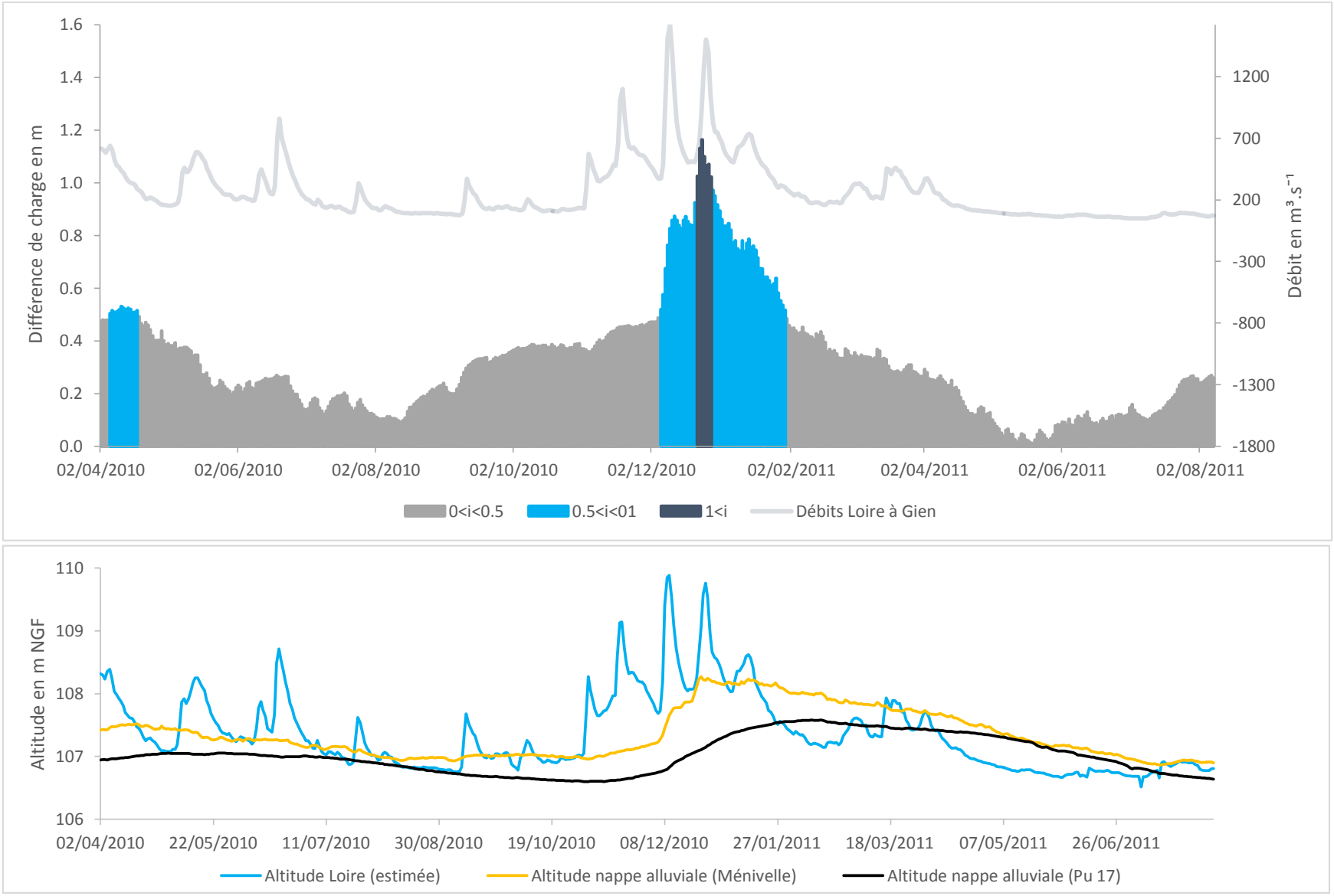


Fig. 183. *Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Ménivelle et au Pu 17 (avec i = Z (Ménivelle) – Z (Pu 17). Sont également représentées les lignes d'eau de la Loire au point L_1.*

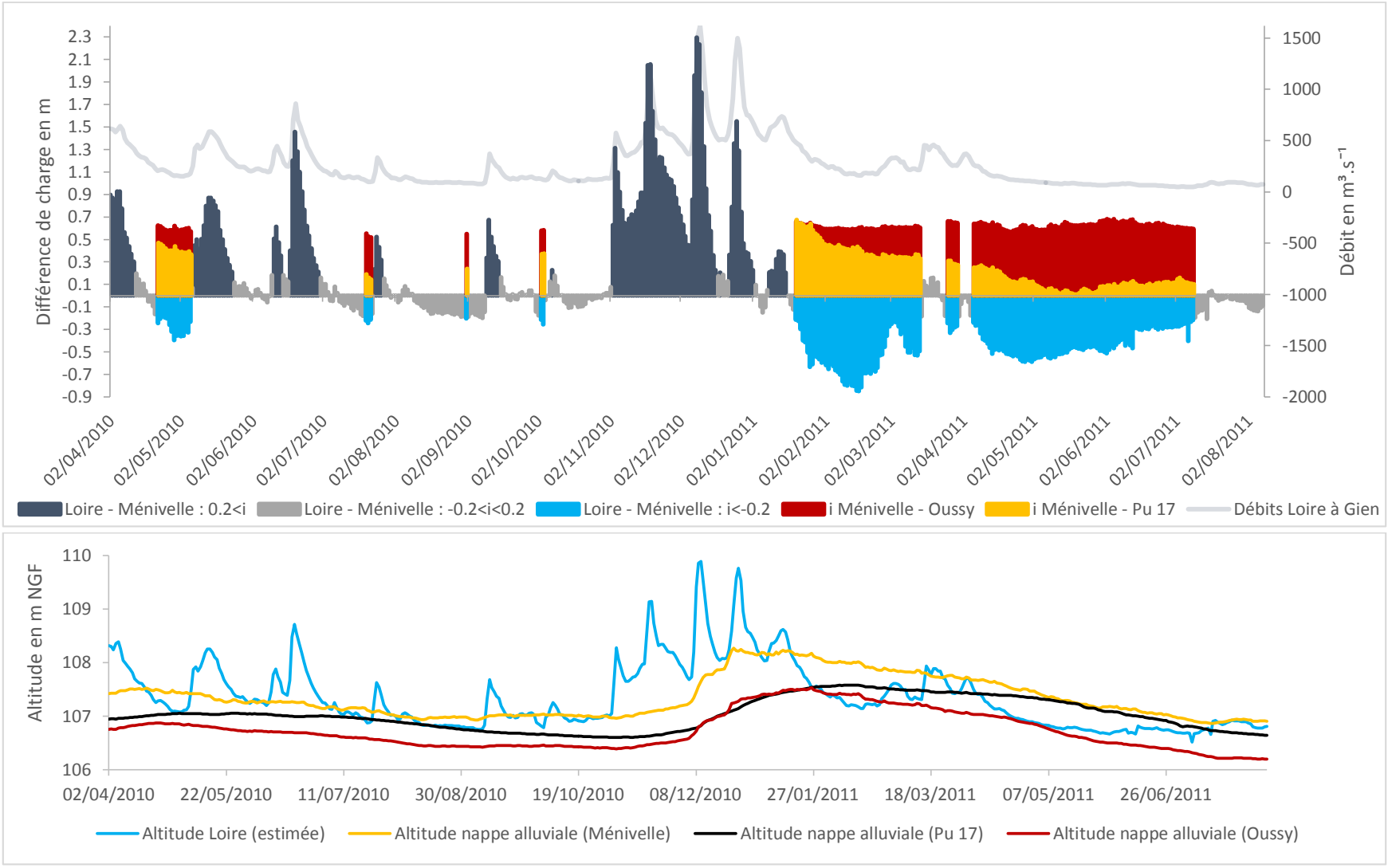


Fig. 184. *Synthèse de l'occurrence des circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée, dans le secteur amont du méandre, grâce aux différences de charge entre, d'une part, la Loire (L_1) ou la nappe alluviale à Oussy ou au Pu 17, et d'autre part, la nappe alluviale à Ménivelle. Ces circulations transverses surviennent lorsque i (Loire – Ménivelle) < 0,2 m. Les différences de charge au sein de la nappe alluviale ne sont représentées ici que pour ces périodes.*

Carte piézométrique	Date	Direction de l'écoulement de la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre	Différence de charge au sein de la nappe alluviale entre Ménivelle et Pu 17 (en m)	Différence de charge entre la Loire (L_1) et la nappe alluviale à Ménivelle (en m)
Fig. 169	20/06/2010	Circulation parallèle à la levée	0,26	1,45
Fig. 166	10/12/2010	Circulation parallèle à la levée	0,82	2,23
Fig. 167	20/01/2011	Circulation transversale à la levée	0,67	-0,21
Fig. 168	01/06/2011	Circulation transversale à la levée	0,08	-0,50

Tab. 67. *Récapitulatif de la direction de l'écoulement de la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre pour les quatre situations hydrologiques illustrées par les cartes piézométriques des figures 166 à 169 (cf. 5.4.3.).*

La direction et le sens de la circulation des eaux de la nappe alluviale est régie par les points hauts et les points bas de sa surface piézométrique. Dans ce secteur amont du méandre, ce sont les points hauts qui sont déterminants. En effet, tant que les lignes d'eau de la Loire constituent ces points hauts, donc dans les situations où la Loire recharge la nappe alluviale, la circulation des eaux de la nappe alluviale est en direction de l'aval du méandre, donc parallèle à la levée (fig. 166). La complexité est apportée par la baisse des lignes d'eau de la Loire, qui devient donc un point bas du système (fig. 167 et 168).

Dans cette situation, où la nappe soutient les débits de la Loire, le point haut de la surface piézométrique du secteur amont du méandre est représenté par le puits de Ménivelle. Or les points bas sont multiples : la Loire (L_1) évidemment, mais également, la nappe alluviale au sein du méandre, de l'autre côté de la levée (Pu 17), ainsi que la nappe alluviale à l'aval du méandre (Oussy). Les directions de l'écoulement de la nappe alluviale à partir de ce dôme piézométrique au niveau de Ménivelle sont donc multiples et divergentes (fig. 168). Mais l'une de ces directions pointe néanmoins vers l'intérieur du méandre.

A nouveau, la modification de la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale dépend donc de la différence de charge entre les lignes d'eau de la Loire à l'amont du méandre et la nappe

alluviale à Ménivelle. Cette différence de charge, comme démontré précédemment pour le secteur amont du méandre, est contrôlée essentiellement par les variations du débit de la Loire. Lorsque que la différence de charge est positive, la Loire recharge la nappe alluviale et la direction des écoulements au sein de la nappe alluviale traversent globalement le méandre d'amont vers l'aval (tab. 67). Lorsque la différence est négative, au contraire, la nappe alluviale soutient les débits de la Loire et se forme un dôme piézométrique, plus ou moins marqué, au niveau de Ménivelle. Une fraction des eaux de la nappe alluviale circule alors de l'amont vers l'intérieur du méandre, transversalement à la levée. Entre avril 2010 et août 2011, cette situation hydrogéologique représente 35% du temps (tab. 68).

La figure 184 synthétise l'occurrence de ces deux situations hydrogéologiques. L'ensemble des différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale est représenté avec un dégradé de couleurs : en bleu clair les différences positives où la Loire recharge la nappe alluviale, en gris ceux reflétant une situation d'équilibre entre les masses d'eau et enfin en bleu soutenu les valeurs négatives révélatrices ici des périodes où une partie des eaux de la nappe alluviale de la plaine héritée s'écoulent vers le méandre. Pour ces dernières périodes, sont indiqués les différences de charges hydrauliques au sein de la nappe alluviale entre d'une part, Ménivelle, et d'autre part, Pu 17 (en orange) ou Oussy (en rouge). Ainsi, les différences de charge en bleu soutenu, orange et rouge indiquent la répartition des volumes écoulés vers l'une ou l'autre direction : vers la Loire en bleu ; vers l'aval, toujours au-delà de la levée (Oussy) en rouge ; vers l'intérieur du méandre en orange.

Ainsi, ces circulations transverses à la levée des eaux de la nappe alluviale surviennent pour des périodes continues pendant les basses eaux de la Loire et ponctuellement pendant le reste de l'année hydrologique, dès que la nappe alluviale soutient les débits de la Loire dans le secteur amont du méandre, ce qui n'est pas le plus fréquent comme on l'a déjà démontré.

Par ailleurs, la stabilité des différences de charge au sein de la nappe alluviale entre Ménivelle et Oussy est à souligner, d'autant plus qu'en allant vers la Loire ou le méandre, ces

différences sont très variables. La répartition des eaux entre ces différents secteurs à partir du dôme piézométrique de Ménivelle, est donc hétérogène et variable au cours du temps.

	Période d'étude	Nombre de jours total	Circulation parallèle à la levée	Stabilité	Circulation transversale à la levée
Amont (Ménivelle - Pu 17)	du 02/04/2010 au 08/08/2011	494	121	198	175
			24%	40%	35%
Aval (Oussy - Pu 12)	du 02/04/2010 au 08/08/2011	494	341	95	58
			69%	19%	12%
	du 30/03/2009 au 29/01/2012	1034	617	288	129
			60%	28%	12%

Tab. 68. *Synthèse des occurrences des circulations transversales à la levée des eaux de la nappe alluviale.*

Les circulations des eaux de la nappe alluviale de la plaine héritée, au-delà des levées, vers le méandre, d'une part dans le secteur amont du méandre et d'autre part, dans le secteur aval, sont donc le résultat de situations hydrologiques opposées (fig. 185). En effet, l'eau circule selon une direction transverse à la levée, dans le secteur amont, lorsque la nappe alluviale soutient les débits de la Loire et, au contraire, dans le secteur aval, lorsque la Loire recharge la nappe alluviale. Ces résultats n'apparaissent pas dans la synthèse du tableau 68 à cause des périodes intermédiaires d'équilibre entre les masses d'eau qui ne couvrent pas des périodes équivalentes entre les deux secteurs.

De plus, les variations du débit de la Loire, en plus de contrôler les échanges d'eau entre la Loire elle-même et sa nappe d'accompagnement, déterminent donc également la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale toute entière.

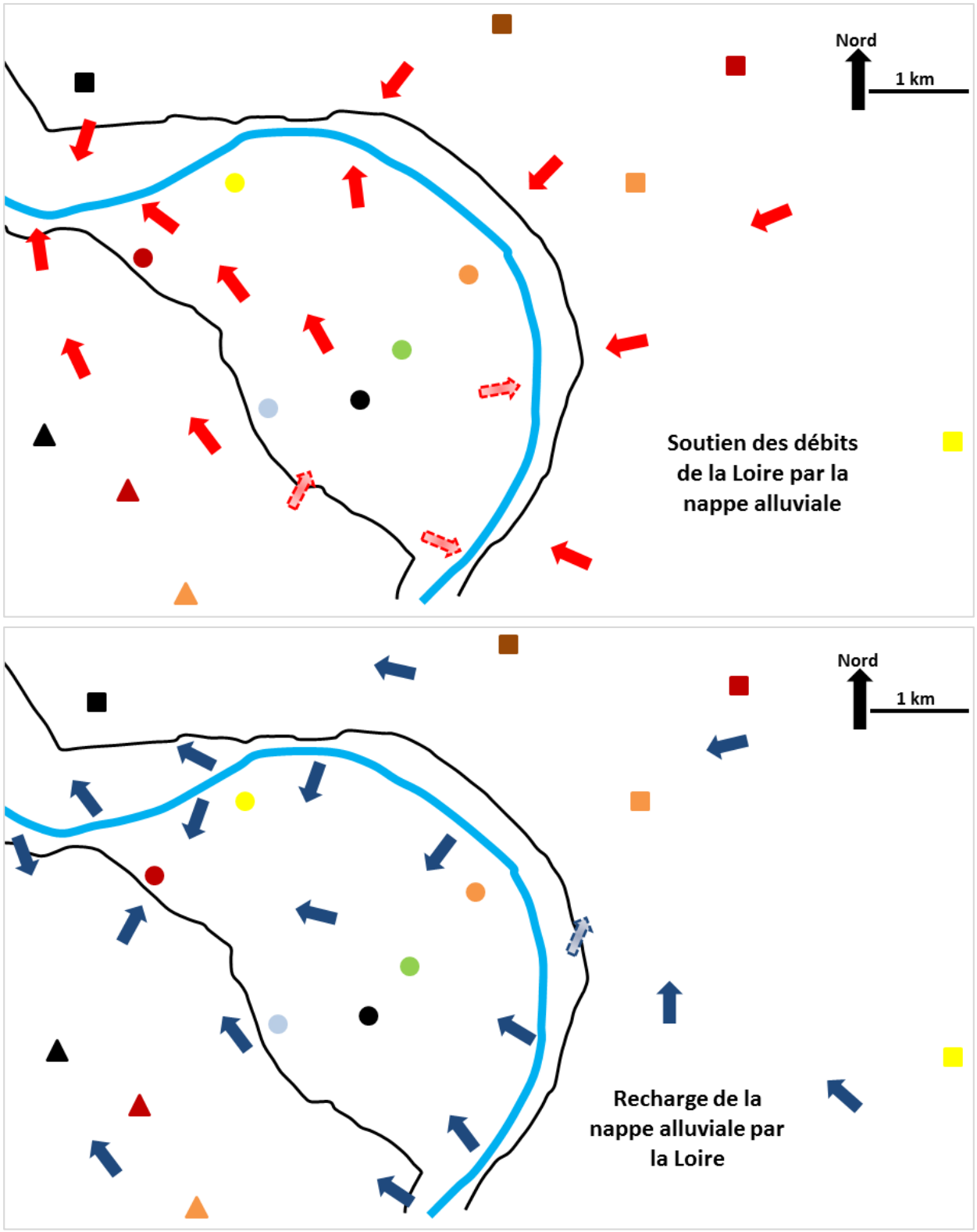


Fig. 185. *Schéma de synthèse des circulations et échanges d'eau mettant en oeuvre la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly (les écoulements notés par des flèches en pointillés ne sont observables que pour les différences de charge les plus importantes en valeur absolue).*

Synthèse de l'apport du suivi piézométrique de la nappe alluviale

La ressource que représente la nappe alluviale et sa fonction de stockage est donc entièrement contrôlée par les variations du débit de la Loire, et plus précisément par la cote de la Loire par rapport à celle de la nappe. Ce sont les lignes d'eau de la Loire qui contrôlent le sens et la direction de la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale, synthétisée par la figure 185.

Le rôle des forts débits de hautes eaux et de crue est donc primordial à la recharge de la nappe alluviale ; ils permettent la saison suivante un soutien efficace des débits de la Loire par restitution des eaux de la nappe au fleuve.

Toutefois, comme on l'a vu, le soutien des débits par la nappe se fait dès que s'amorce une baisse des débits, quelle que soit la saison ; et à l'inverse la recharge de la nappe intervient dès une augmentation des débits, même faible, qui accroît la différence de charge entre les masses d'eau. Ces recharges ponctuelles au printemps, ou même en été, atténuent l'effet de « vidange » de la nappe alluviale par la Loire, d'autant plus s'il s'agit de débits importants comme pendant la crue de mai 2013, ou bien s'il s'agit de recharges prolongées.

Etant donné que ce sont les lignes d'eau de la Loire qui contrôlent le sens des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale, les lignes d'eau très élevées atteintes par la Loire en période de crue revêtent donc une importance primordiale pour la recharge de la nappe alluviale, d'autant plus si elles mènent à l'inondation du méandre.

Pour les années où les saisons hydrologiques sont contrastées, il est donc possible de décrire un scénario du fonctionnement de la nappe alluviale en fonction des hautes et des basses eaux. Cependant, étant donnée la variabilité des débits de la Loire, ce scénario est souvent perturbé par de faibles périodes de hautes eaux, par des étiages prolongés ou bien par des pics de débits, même faibles, au printemps ou en été. Les multiples variations du débit de la Loire et leur variabilité interannuelle sont donc responsables de l'inversion des échanges d'eau entre la Loire et sa nappe alluviale et donc du fonctionnement de la nappe alluviale.

5.5. L'apport des mesures isotopiques : caractérisation des mélanges des eaux au sein de la nappe alluviale

Les échanges entre la Loire et la nappe alluviale ainsi que la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale ont été décrits à partir des données piézométriques. Il convient maintenant de vérifier, à l'aide des mesures isotopiques réalisées, si les mélanges des eaux - dont résultent les signatures isotopiques de la nappe alluviale - confirment les précédents résultats.

5.5.1. Chroniques des données isotopiques dans le secteur du méandre de Guilly

La représentation graphique en fonction du temps des rapports isotopiques permet une vision globale de la variabilité temporelle des données et des fonctionnements similaires entre différentes zones de la nappe alluviale. Ainsi les figures 186 (^{18}O) et 190 (^{2}H) rassemblent l'ensemble des données collectées au sein de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce (Carrière, triangles roses) et de la Loire. Rappelons que les données isotopiques de la Loire ont été mesurées à partir des prélèvements effectués au pont de Châteauneuf-sur-Loire, en aval du méandre de Guilly. Comme ces figures 186 et 190 sont difficiles à lire, étant donné le nombre de sites suivis, elles ont été déclinées en trois secteurs pour la figure 186 (^{18}O ; fig. 187 : rive gauche au sein du méandre ; fig. 188 : rive gauche au-delà de la levée ; fig. 189 : rive droite) et en deux secteurs pour la figure 190 (^{2}H ; fig. 191 : rive gauche ; fig. 192 : rive droite).

Les figurés pour un même site de prélèvements sont reliés entre eux par des lignes pour faciliter la lecture mais ces lignes ne présagent en rien de l'évolution des signaux entre deux données.

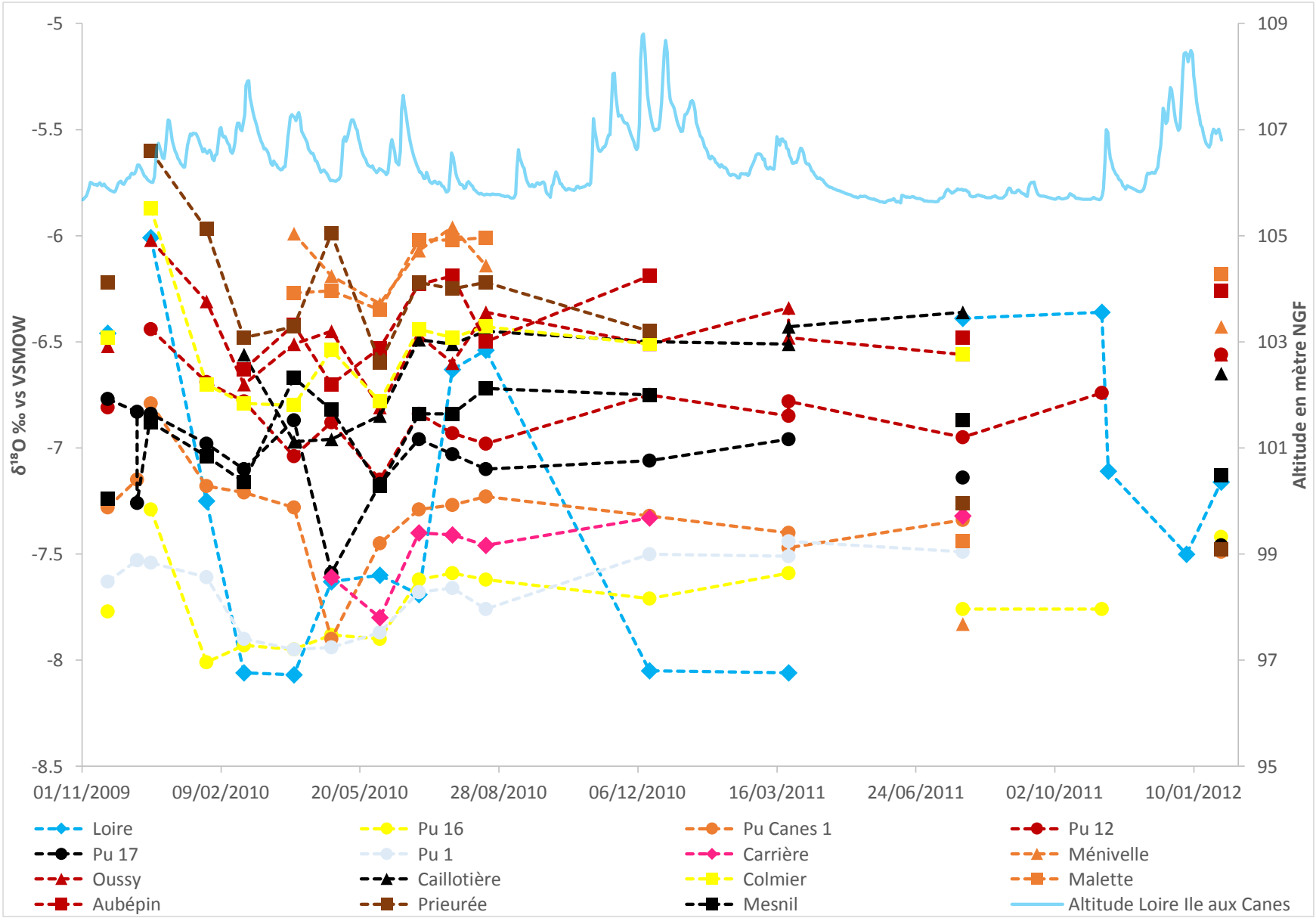


Fig. 186. *Chroniques de ^{18}O, dans le secteur du méandre de Guilly, pour tous les sites suivis.*

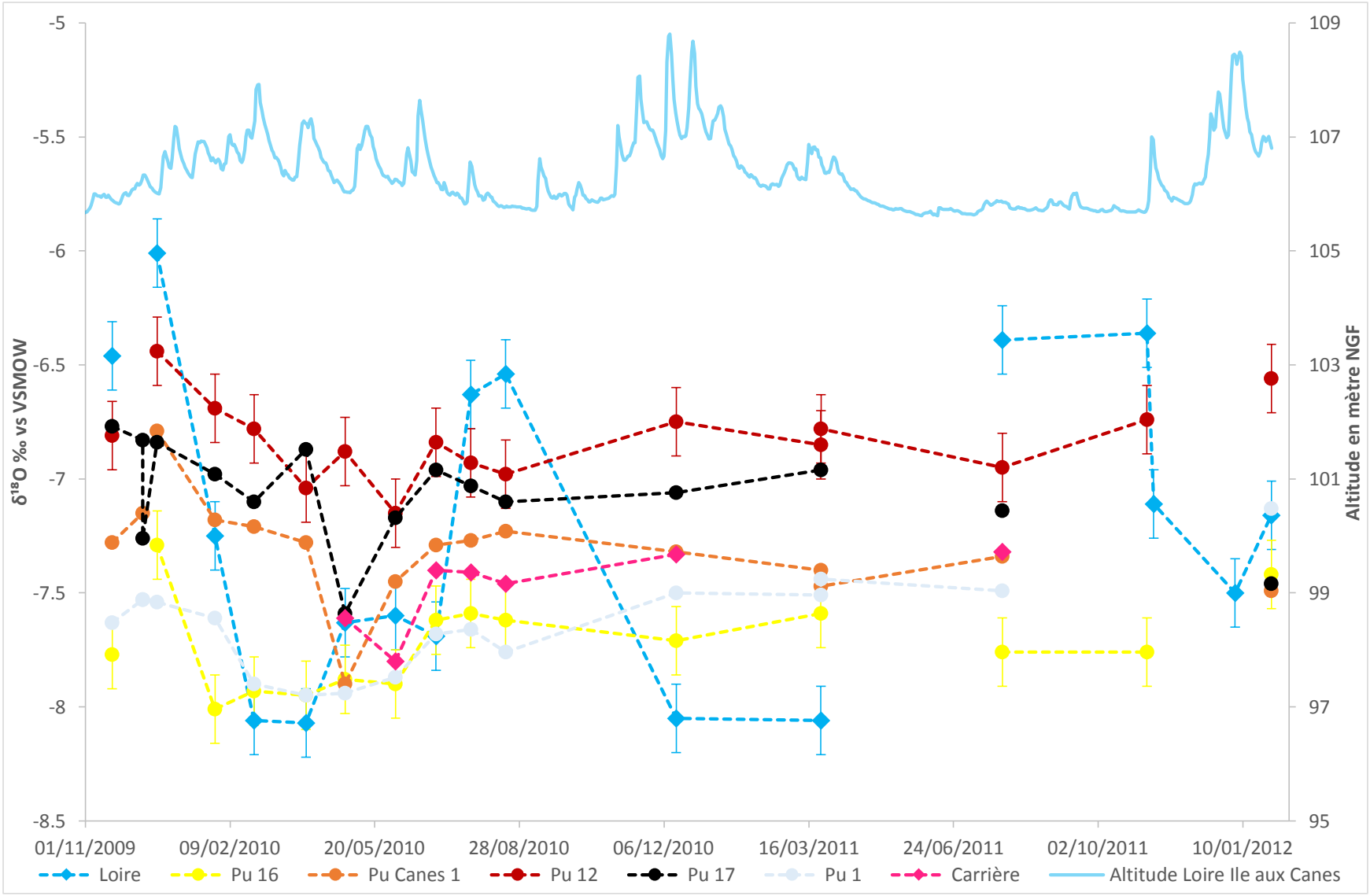


Fig. 187. *Chroniques de ^{18}O, en rive gauche, pour tous les sites suivis au sein du méandre de Guilly.*

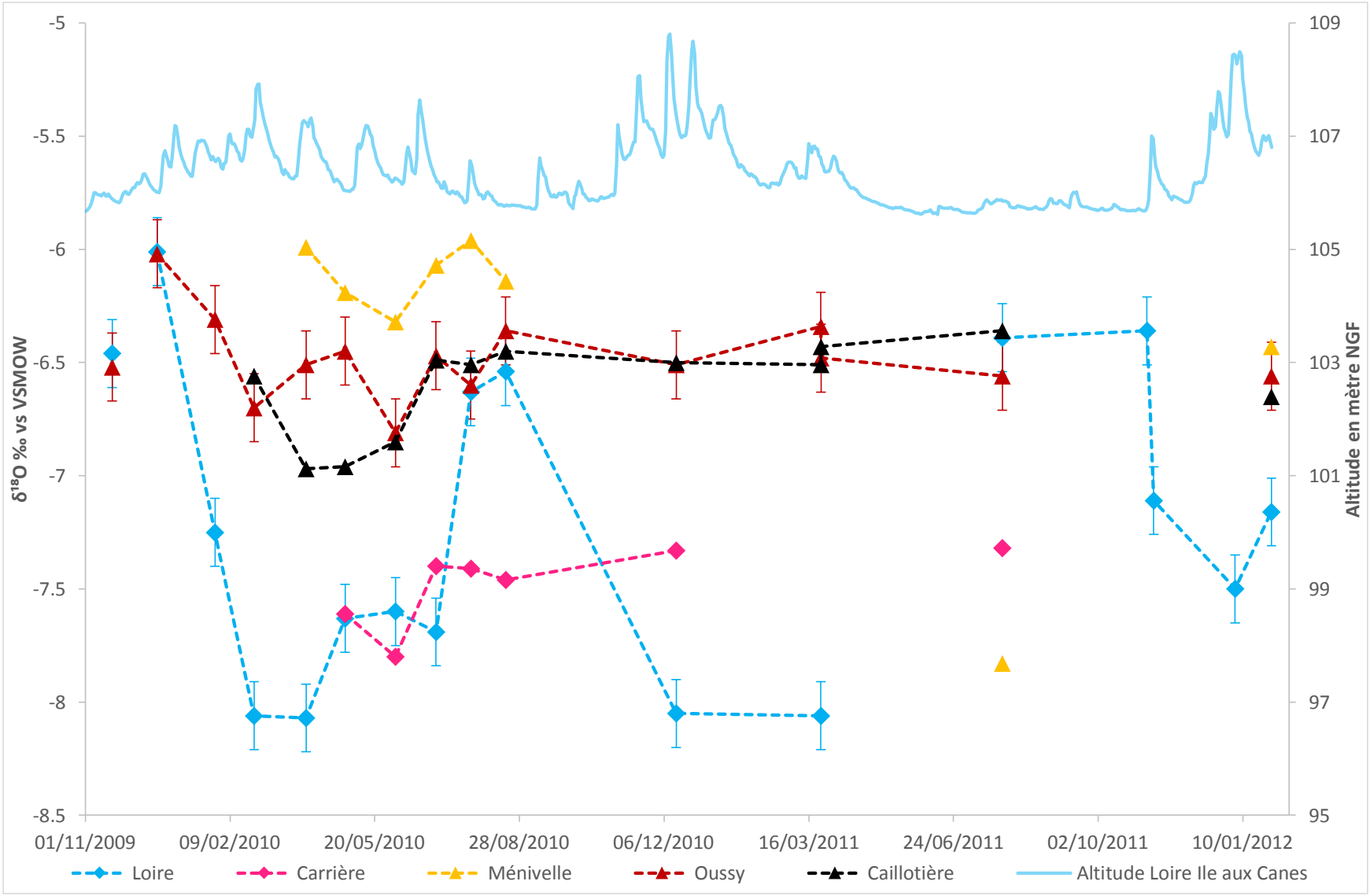


Fig. 188. *Chroniques de ^{18}O, en rive gauche, pour tous les sites suivis au-delà de la levée.*

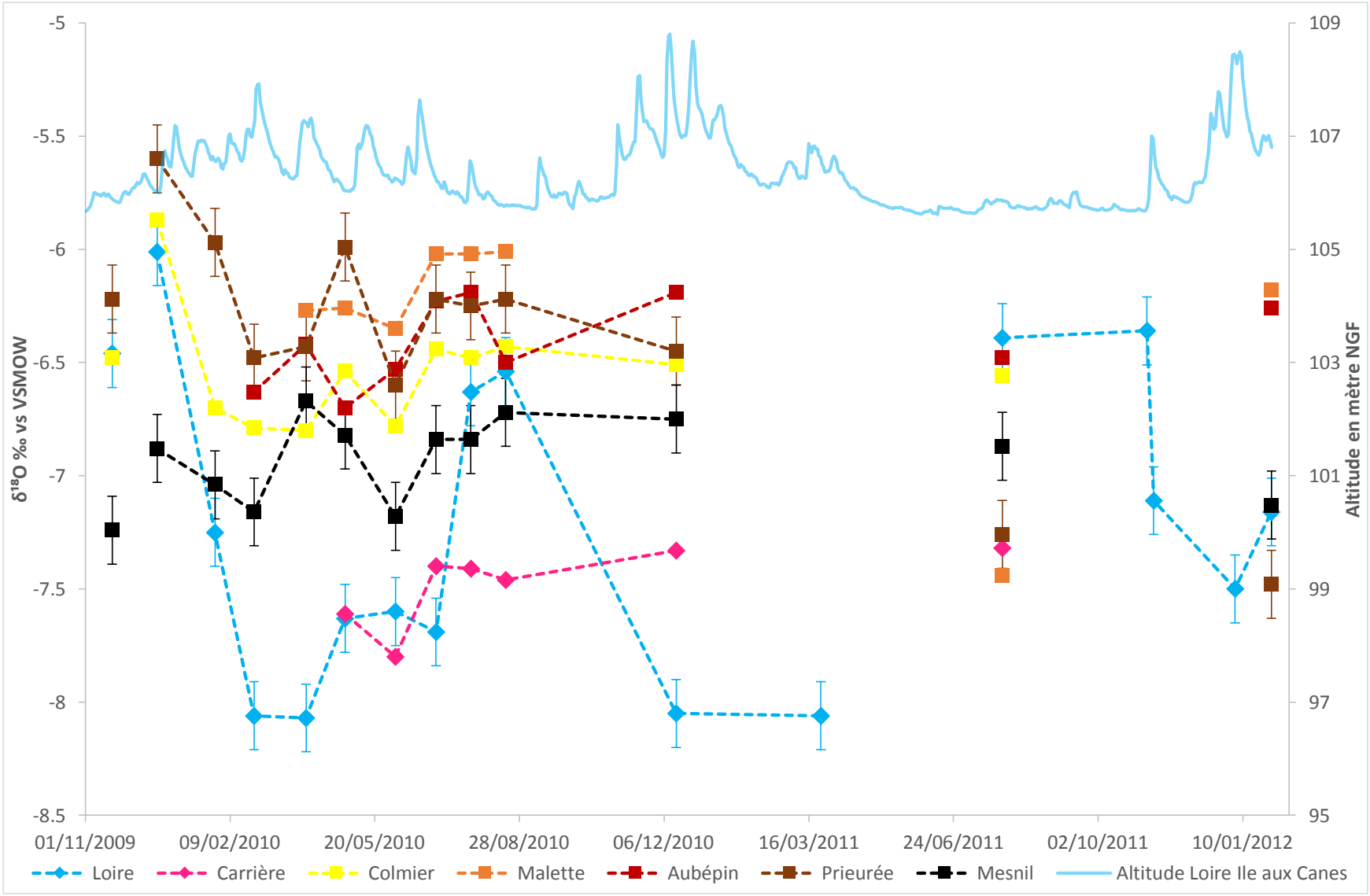


Fig. 189. *Chroniques de ^{18}O, pour tous les sites suivis en rive droite, dans le secteur du méandre de Guilly.*

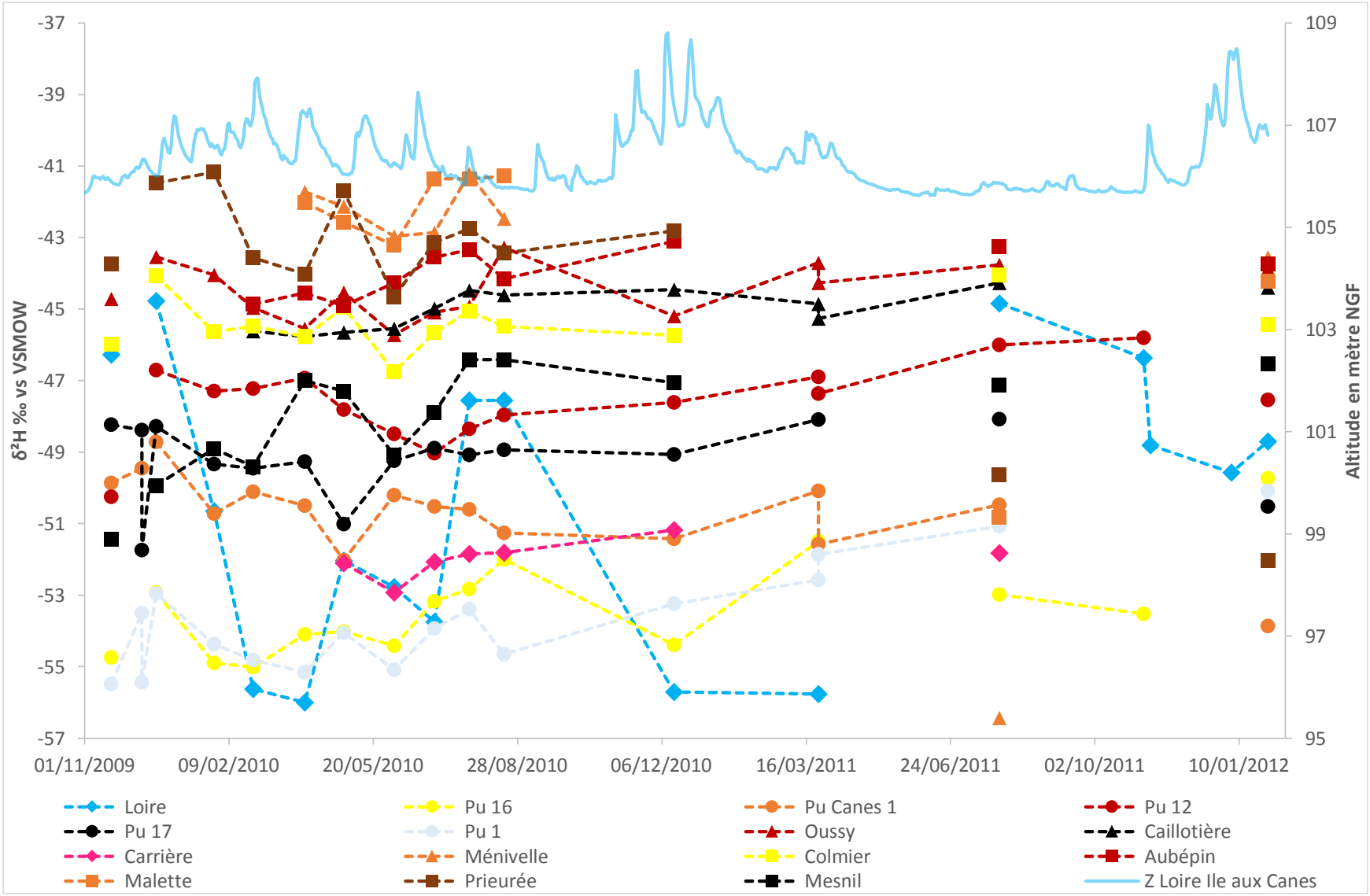


Fig. 190. *Chroniques de ²H, dans le secteur du méandre de Guilly, pour tous les sites suivis.*

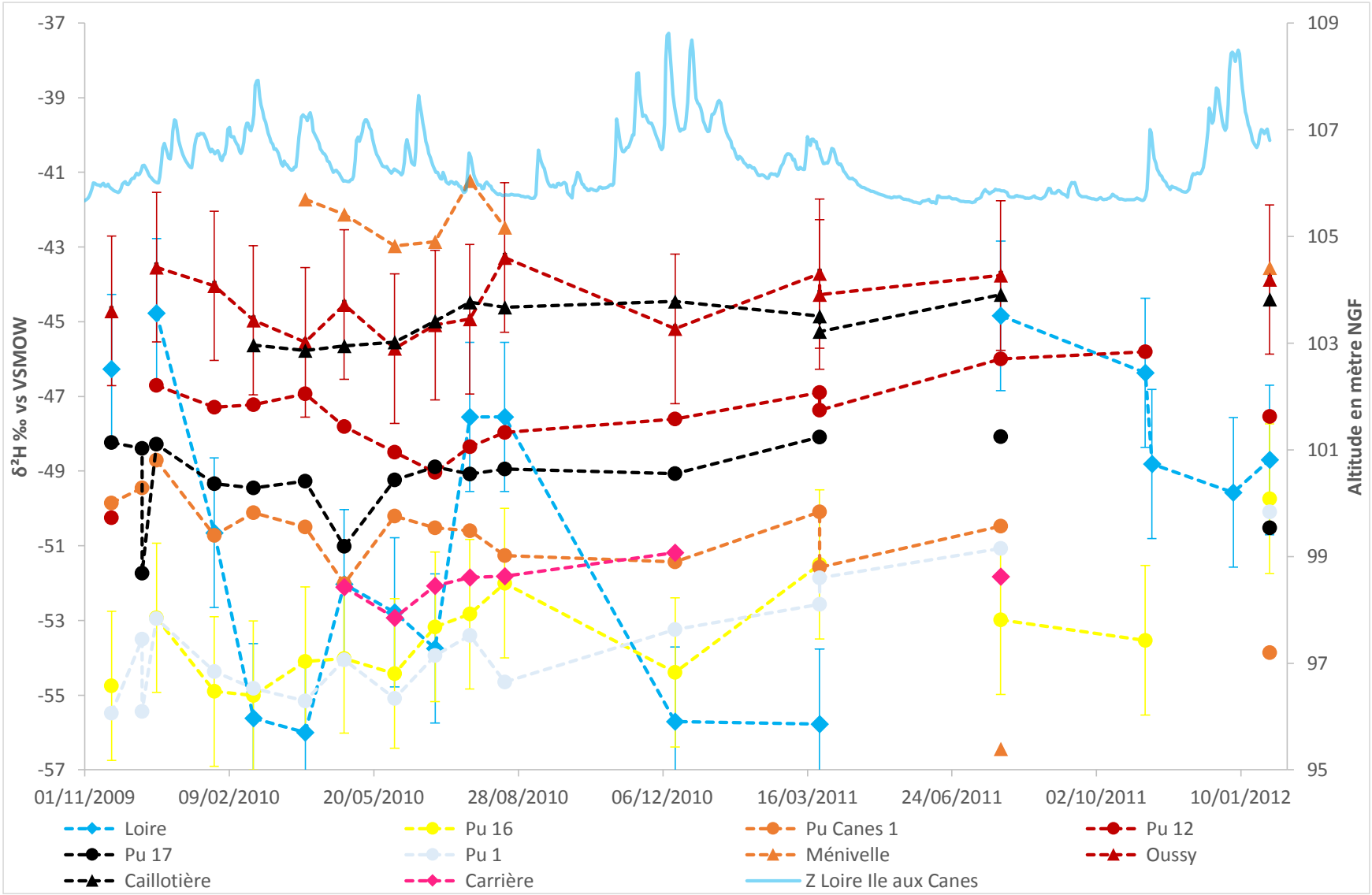


Fig. 191. *Chroniques de ²H, pour tous les sites suivis en rive gauche, dans le secteur du méandre de Guilly.*

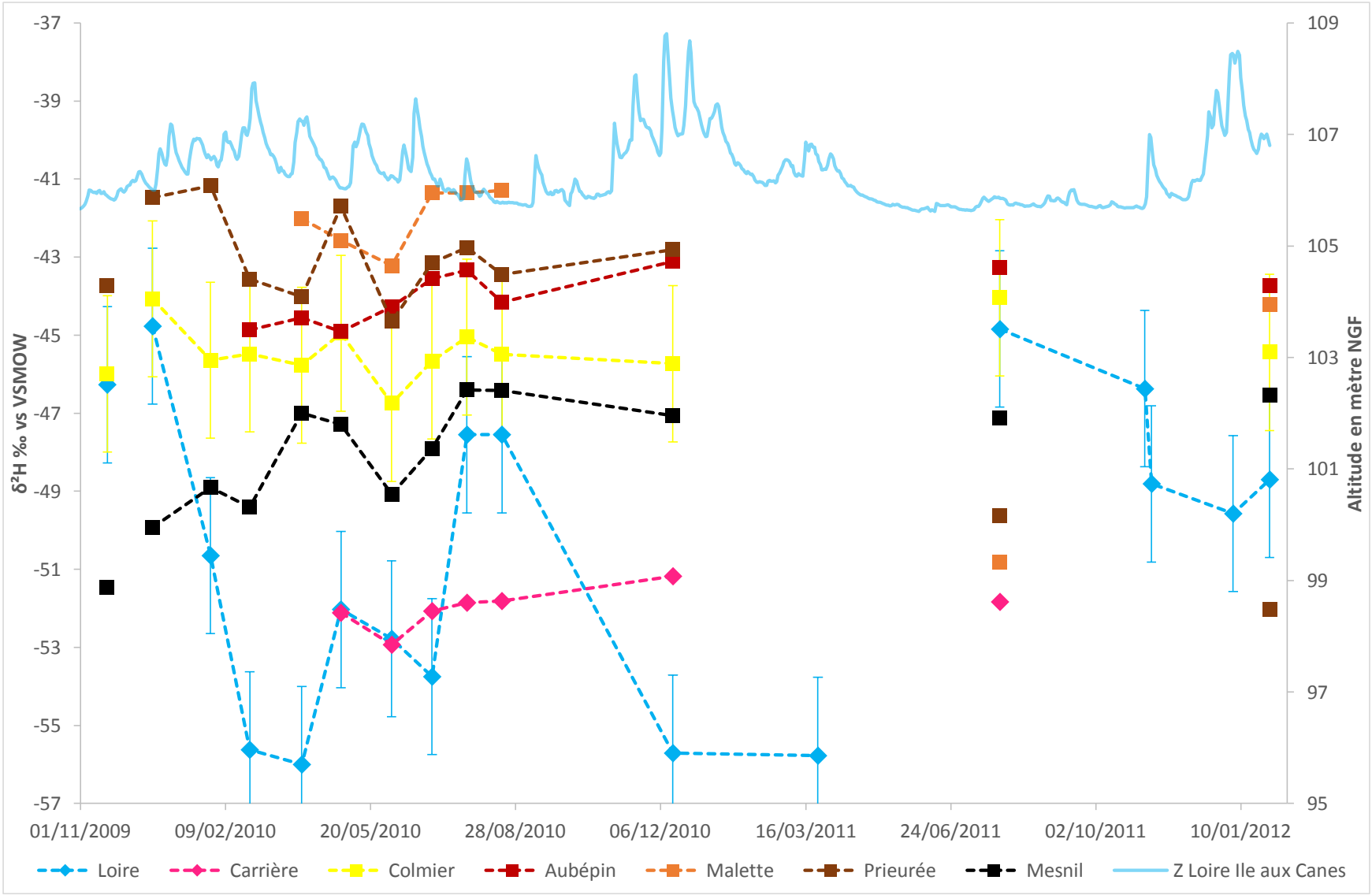


Fig. 192. *Chroniques de ²H, pour tous les sites suivis en rive droite, dans le secteur du méandre de Guilly.*

Globalement, les signatures isotopiques de la nappe alluviale présentent de très faibles variations à un même puits (fig. 186 à 192) : la plus part du temps elles restent dans les marges d'erreur ($\delta^{18}O$: ± O,15 ‰ ; $\delta^{2}H$: ± 2 ‰). Néanmoins, avec un décalage de temps plus ou moins important selon les puits, **les signatures isotopiques de la nappe alluviale semblent être influencées par les variations saisonnières de celles de la Loire : un enrichissement en période de basses eaux et un appauvrissement en période de hautes eaux.**

Afin de regrouper les puits suivis selon des variations communes, des coefficients de corrélations entre les chroniques des signatures isotopiques des différents sites de prélèvements ont été calculés (tab. 69 et 70). Les coefficients de corrélation supérieurs à 0,7 sont surlignés en bleu. Les cellules roses indiquent les coefficients de corrélation supérieurs à 0,7 pour les deux rapports isotopiques. Cette recherche de corrélation n'apporte néanmoins pas plus d'éclairage étant donné que ces variations ne sont pas significatives. Que ces petites variations soient assez particulières d'un puits à l'autre le confirment.

	Pu16 (12)	**Pu17** (13)	**Pu12** (12)	**Pu Canes1** (13)	**Pu1** (13)	**Oussy** (12)	**Caillotière** (9)	**Ménivelle** (6)	**Colmier** (11)	**Aubépin** (8)	**Malette** (6)	**Prieurée** (11)	**Mesnil** (11)	**Loire** (12)
Pu 16	1,00	0,32	0,49	0,47	0,60	0,56	0,81	0,39	0,93	0,69	0,96	0,53	0,31	0,56
Pu 17		1,00	0,31	0,67	0,37	0,26	0,43	0,57	0,25	0,65	0,34	0,07	-0,13	0,30
Pu 12			1,00	0,53	0,62	0,74	0,57	0,44	0,68	0,22	0,63	0,75	-0,05	0,33
Pu Canes 1				1,00	0,41	0,49	0,54	0,49	0,50	0,51	0,53	0,33	-0,05	0,51
Pu 1					1,00	0,44	0,77	0,38	0,61	0,84	0,87	0,41	0,02	0,26
Oussy						1,00	0,24	0,40	0,78	0,15	0,55	0,90	0,37	0,54
Caillotière							1,00	0,30	0,60	0,54	0,93	0,00	0,04	0,26
Ménivelle								1,00	0,25	0,70	0,55	0,22	0,72	0,14
Colmier									1,00	0,47	0,88	0,77	0,24	0,73
Aubépin										1,00	0,64	-0,11	0,40	0,14
Malette											1,00	0,43	0,45	0,68
Prieurée												1,00	0,15	0,65
Mesnil													1,00	-0,10
Loire														1,00

Tab. 69. *Coefficients de corrélation entre les chroniques des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ des différents sites suivis, pour toutes les données disponibles entre novembre 2009 et mars 2011. Entre parenthèses est indiqué le nombre de mesures prises en compte pour chaque site de prélèvements.*

	Pu16 (12)	Pu17 (13)	Pu12 (12)	Pu Canes1 (13)	Pu1 (13)	Oussy (12)	Caillotière (9)	Ménivelle (6)	Colmier (11)	Aubépin (8)	Malette (6)	Prieurée (11)	Mesnil (11)	Loire (12)
Pu 16	1,00	0,39	0,13	-0,21	0,65	0,49	0,42	0,14	0,46	0,37	0,85	0,09	0,51	0,18
Pu 17		1,00	-0,17	0,06	0,43	0,22	0,40	-0,12	-0,02	0,63	0,50	-0,22	-0,43	0,26
Pu 12			1,00	-0,03	0,38	0,24	-0,39	0,50	0,46	-0,48	-0,13	0,40	0,31	-0,29
Pu Canes 1				1,00	-0,32	0,04	-0,19	-0,12	0,21	-0,02	-0,02	-0,07	-0,69	0,48
Pu 1					1,00	0,32	0,42	0,40	0,70	0,74	0,51	0,66	0,32	-0,08
Oussy						1,00	0,36	0,00	0,62	-0,08	0,52	0,60	-0,05	0,60
Caillotière							1,00	0,20	0,23	0,86	0,77	0,27	0,59	0,51
Ménivelle								1,00	0,64	0,12	0,34	0,37	0,74	0,26
Colmier									1,00	-0,04	0,56	0,73	0,09	0,46
Aubépin										1,00	0,63	0,10	0,42	0,20
Malette											1,00	0,27	0,74	0,43
Prieurée												1,00	0,02	0,33
Mesnil													1,00	-0,31
Loire														1,00

Tab. 70. *Coefficients de corrélation entre les chroniques des rapports isotopiques δ^2H des différents sites suivis, pour toutes les données disponibles entre novembre 2009 et mars 2011. Entre parenthèses est indiqué le nombre de mesures prises en compte pour chaque site de prélèvements.*

L'interprétation des variations des signatures isotopiques des eaux de la nappe alluviale pour un même puits ne peut donc pas être menées plus loin. Mais, il est possible de comparer les données moyennes des différents puits de la nappe alluviale à celles des pôles de mélange, étant donné qu'il existe une réelle différenciation des données au-delà des marges d'erreur (fig. 193).

Sont donc ici identifiés les quatre pôles de mélange entrant dans la composition des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly (fig. 193) : la Loire (à Châteauneuf-sur-Loire), les précipitations locales (données de la station d'Orléans mesurées de 1996 à 2003 ; Chéry et al., 2004), la nappe de Beauce (Carrières) et la nappe alluviale elle-même, au-delà de la levée en rive gauche (Oussy, Caillotière et Ménivelle). La nappe de Beauce présente un signal assez appauvri et stable dans le temps (fig. 186 à 192).

	$\delta^{18}O$ en ‰		$\delta^{2}H$ en ‰	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Loire (19)	-7,21	0,70	-50,4	3,98
Nappe de Beauce (Carrières ; 7)	-7,48	0,17	-52,0	0,52
Pu 16 (16)	-7,72	0,20	-53,4	1,45
Pu 1 (17)	-7,63	0,21	-53,6	1,55
Pu Canes 1 (16)	-7,32	0,23	-50,7	1,17
Pu 17 (17)	-7,07	0,22	-49,2	1,06
Pu 12 (16)	-6,82	0,18	-47,6	1,11
Oussy (15)	-6,48	0,18	-44,5	0,76
Caillotière (12)	-6,60	0,21	-45,0	0,56
Ménivelle (8)	-6,37	0,61	-44,2	5,01
Mesnil (13)	-6,93	0,19	-48,0	1,58
Colmier (13)	-6,51	0,25	-45,4	0,74
Aubépin (10)	-6,41	0,19	-44,0	0,67
Prieurée (13)	-6,40	0,51	-44,2	3,17
Malette (8)	-6,32	0,47	-43,4	3,19

Tab. 71. *Moyennes et écart-types des signatures isotopiques des différentes masses d'eau en présence dans le secteur du méandre de Guilly. Entre parenthèses est indiqué, pour chaque site, le nombre de prélèvements utilisés pour les calcul de ces moyennes entre mars 2009 et janvier 2012.*

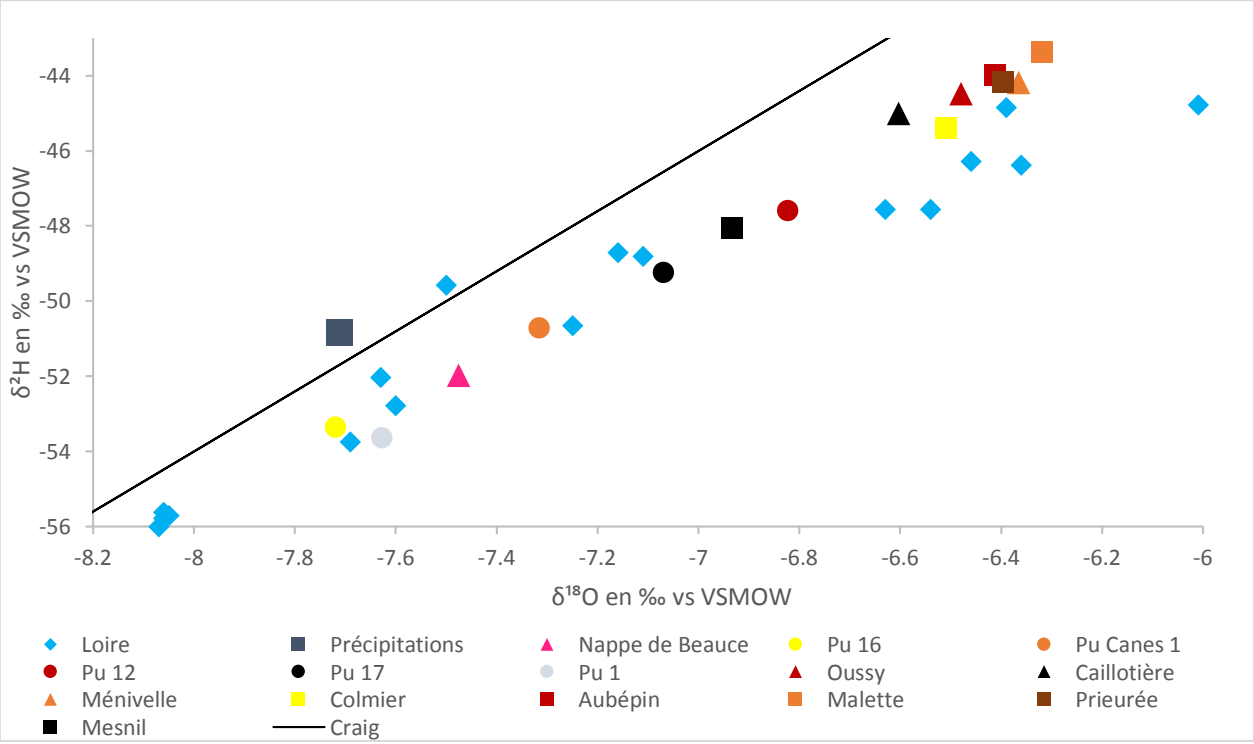


Fig. 193. *Signatures isotopiques moyennes des différentes masses d'eau en présence dans le secteur du méandre de Guilly (données : tab. 69), des précipitations à Orléans (moyenne pondérée des mois d'octobre à mars par les hauteurs de précipitations, 1996-2003 ; Chéry et al., 2004) et variabilité des signatures isotopiques de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire.*

Les moyennes des signatures isotopiques de la nappe alluviale varient entre -7,7 et -6,3‰ pour $\delta^{18}O$ et entre -53,6 et -43,4‰ pour $\delta^{2}H$ (tab. 71). Les rapports isotopiques les plus élevés de la nappe alluviale sont observés au niveau des puits les plus éloignés de la Loire, au-delà des levées. On peut rappeler ici que le puits du Mesnil est proche de la Loire en rive droite, ce qui explique ses rapports isotopiques relativement faibles comparés à ceux des autres puits de la rive droite.

Au sein du méandre, les signatures isotopiques de la nappe alluviale s'échelonnent donc entre les données de la Loire (en période de hautes eaux, les données les plus appauvries), **des précipitations et de la nappe alluviale au-delà de la levée, globalement selon un gradient déterminé par la distance des puits à la Loire** (fig. 193 : Pu 16, Pu Canes 1, Pu 17). Les eaux de la nappe alluviale pour les puits les plus proches de la Loire présentent donc les signatures isotopiques les plus appauvries (Pu 16 et Pu Canes 1). Leurs valeurs moyennes sont d'ailleurs parfois inférieures à celles de la Loire, comme pour Pu 16 ou Pu Canes 1 (tab. 71). Comme la recharge de la nappe alluviale survient lors des débits les plus importants, moment où les eaux de la Loire présentent des rapports isotopiques les plus appauvris, il est logique que la moyenne des signatures isotopiques de la nappe alluviale proche de la Loire soit inférieure à celle de cette dernière (fig. 187 et 191).

On peut noter ici qu'une étude de la géochimie de la nappe alluviale de l'Allier en Grande Limagne (Auvergne) a également démontrée, pour un secteur proche de la rivière, l'importance des eaux de l'Allier dans la composition des eaux de sa nappe d'accompagnement (Nabaz, 2014) avec un gradient en fonction de l'éloignement des sites de prélèvements par rapport à l'Allier.

Ce gradient déterminé par la distance des puits à la Loire souffre néanmoins deux exceptions. D'une part, les signatures isotopiques des la nappe alluviale au puits Pu 12 sont les plus enrichies du méandre alors que ce puits est relativement proche de la Loire (fig. 162). Ceci sera expliqué grâce aux résultats du suivi piézométrique (cf. 5.5.2). D'autre part, les signatures isotopiques de la nappe alluviale au puits Pu 1 (Petit Riot) sont assez appauvries au vu de celles de Pu 17 (tous deux au centre du méandre). Ses rapports isotopiques sont de l'ordre de ceux que l'on retrouve au niveau de puits les plus proches de la Loire (Pu 16 et Pu Canes 1). L'explication de cette particularité sera recherchée plus loin (cf. 5.5.4).

Revenons donc aux circulations et échanges d'eau globaux démontrés à partir des données piézométriques de la nappe alluviale, afin de vérifier leur cohérence grâce au suivi réalisé des signatures isotopiques des différentes masses d'eau en présence.

5.5.2. Les hautes eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly

On dispose de données pour trois périodes de hautes eaux différentes. Ainsi, la comparaison entre les hautes eaux 2009 – 2010, 2010 – 2011 et 2011 – 2012 est possible. Comme on l'a vu précédemment, il s'agit de hautes eaux différentes les unes des autres en termes de débits et de durée.

Il s'agit donc ici, à la lumière des résultats obtenus grâce au suivi piézométrique de la nappe alluviale, de vérifier si les différents fonctionnements hydrologiques mis en évidence, sont exprimés par les mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly.

Pour la période des hautes eaux, les logiques à confirmer sont l'influence des eaux de la Loire qui rechargent massivement la nappe alluviale lors des forts débits d'une part, et d'autre part, la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale, dans le secteur aval du méandre, de la plaine héritée vers l'intérieur du méandre (transversalement à la levée).

Lecture des figures 194 et 195 : remarques préliminaires

Ces deux figures présentent les résultats des mélanges des eaux au sein de la nappe alluviale en période de hautes eaux. Les hautes eaux 2009 – 2010 ont fait l'objet d'un suivi géochimique mensuel contrairement aux deux périodes de hautes eaux suivantes où ce suivi n'était que ponctuel.

Les figures 194 et 195 (et 196) combinent trois graphiques présentant (i) les résultats obtenus à partir des différences de charge, (ii) les hauteurs des précipitations journalières à Saint-Benoît-sur-Loire (rive droite) et (iii) les rapports isotopiques pour les différentes périodes de

hautes eaux. Les échelles des différents axes sont identiques pour les deux figures, excepté pour l'axe horizontal des graphiques des différences de charge et des précipitations.

Les différences de charge :

- Les chroniques de différences de charge représentées illustrent les écoulements des eaux de la nappe alluviale dans les secteurs amont et aval du méandre.
- Pour le secteur aval, seules les valeurs positives de ces différences (en rouge) entre les lignes d'eau de la Loire (L_4) et la nappe alluviale au Pu 12 (i = Z (Loire en L_4) – Z (Pu 12)) sont représentées. Elles indiquent les périodes de recharge de la nappe alluviale par la Loire, dans ce secteur. Il faut rappeler que ces périodes correspondent également aux échanges au sein de la nappe alluviale au-dessous de la levée, vers l'intérieur du méandre.
- Pour le secteur amont, sont représentés les différences de charge entre la Loire (L_1) et la nappe alluviale au niveau de Pu 17 (i = Z (Loire en L_1) – Z (Pu 17)). Les données du puits de Ménivelle n'ont pas été utilisées ici car la chronique est trop incomplète. Les périodes d'équilibre entre les masses d'eau (seuil des différences de charge à -0.2 et 0.2 mètres) ne sont pas représentées. Les valeurs positives de ces différences (en noir) mettent donc en évidence les périodes de recharge de la nappe alluviale par la Loire. Ses valeurs négatives (en orange), au contraire, indiquent les périodes, plus rares, où la nappe soutient les débits de la Loire dans ce secteur amont du méandre. Ces périodes sont ici importantes, non pas pour le soutien de la Loire, mais parce qu'elles correspondent également aux circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée, vers l'intérieur du méandre.

Les signatures isotopiques :

- Afin d'évaluer les parts de mélange des eaux composant la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly, **différents pôles de mélange** sont représentés : les précipitations, la Loire, la nappe de Beauce et la nappe alluviale en rive gauche, au-delà de la levée.
- La Loire (à Châteauneuf-sur-Loire), la nappe de Beauce (Carrières) et la nappe alluviale ont fait l'objet d'un suivi géochimique. L'ensemble des données collectées en période de hautes eaux sont donc représentées.

- Pour les seules précipitations, les données proviennent de la bibliographie (Chéry et al., 2004). Le point représentant les précipitations sur les figures 194 et 195, est la moyenne des signatures isotopiques des précipitations (^{18}O et ^{2}H), pondérées par leurs hauteurs, des mois d'octobre à mars, mesurés à la station d'Orléans, de 1996 à 2003 (Chéry et al., 2004). Les données retenues ici ne couvrent donc que les mois d'octobre à mars car ces mois correspondent à la période où, la végétation étant en sommeil, les phénomènes d'évaporation et d'évapotranspiration ne consomment pas l'ensemble des précipitations. Une part des précipitations participe donc à la recharge de la nappe alluviale pendant ces six mois.
- Le type de figuré (losange, carré, rond ou triangle) et sa couleur indiquent le site de prélèvements (en cohérence avec les figures de ce chapitre). L'aspect des figurés (vide ou plein et taille) change en fonction de la date du prélèvement afin de pouvoir identifier toutes les données d'une même campagne. La légende de ces figurés est à lire pour chaque figure sur son graphique des différences de charge : les ronds rouges surimposés à la chronique des débits de la Loire indiquent les dates des prélèvements.
- Les marges d'erreur sont identiques pour toutes les analyses isotopiques réalisées au cours de la thèse ($\delta^{18}O$: ± 0,15 ‰ ; $\delta^{2}H$: ± 2 ‰). Afin de permettre la lecture des graphiques, ces marges d'erreur ne sont donc représentées que pour quelques données.

Les hautes eaux 2009 – 2010 (fig. 194)

Tout d'abord, il faut noter que les signatures isotopiques de la nappe alluviale aux Pu 16 et Pu 1 sont très stables pendant toute la période des hautes eaux (dans les marges d'erreur). De plus, globalement, plus on avance dans la période de hautes eaux 2009 – 2010, plus les signatures isotopiques de la nappe alluviale pour les puits Pu 12, Pu 17 et Pu Canes 1 se rapprochent de celles de la Loire et des précipitations. Il faut rappeler ici que, dans le cadre d'un suivi géochimique mensuelle d'un aussi grand nombre de puits, il était inenvisageable de réaliser un pompage des puits systématique et donc d'y renouveler la colonne d'eau. On peut donc supposer que certains puits sont plus colmatés que d'autres. Néanmoins, pour certains, les variations pré-citées sont significatives.

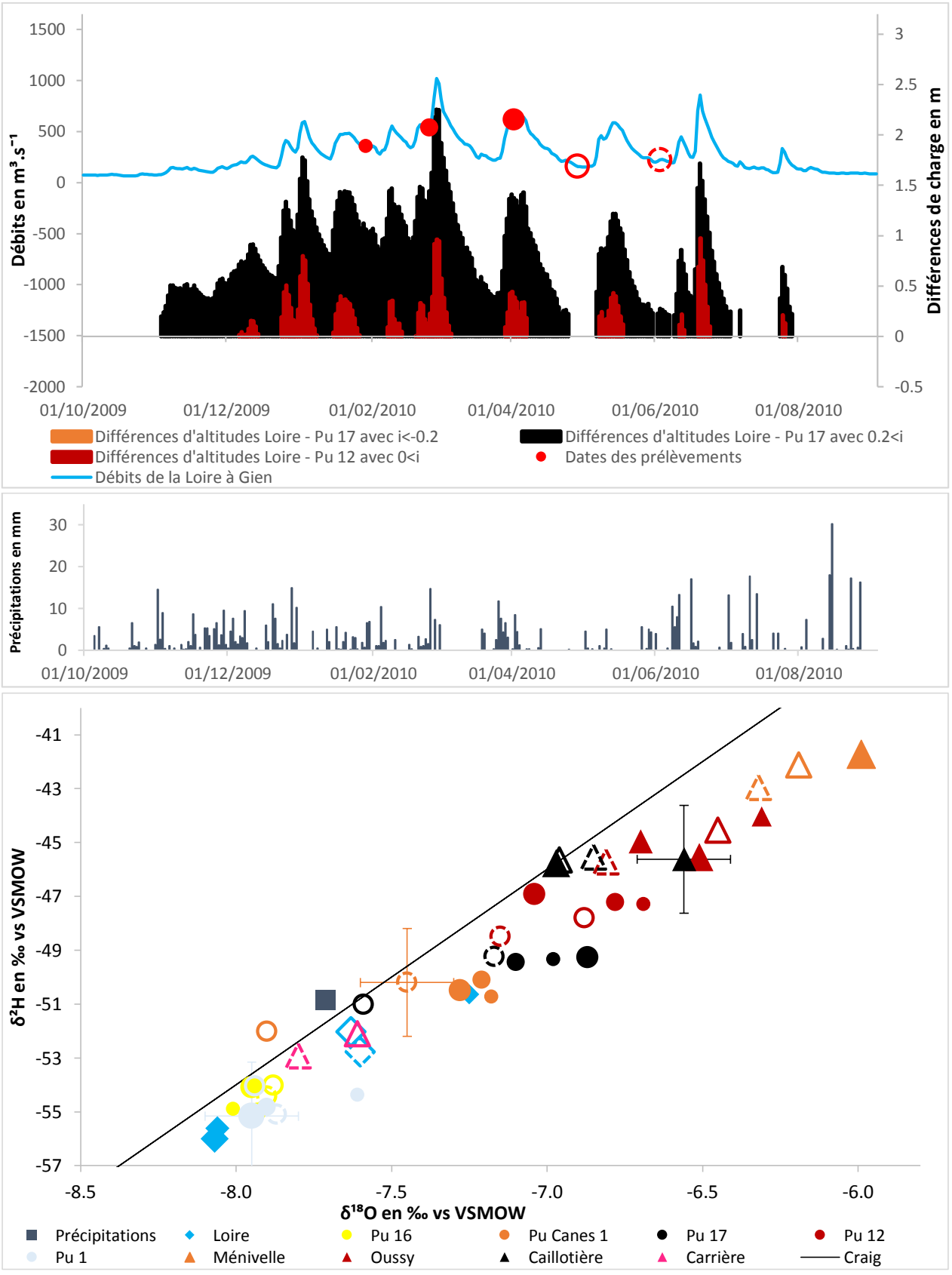


Fig. 194. *Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les hautes eaux 2009 – 2010.*

Ensuite, il s'agit de se demander lequel des pôles de mélange, entre la Loire et les précipitations locales est à l'origine des variations observées pendant cette période de hautes eaux. En termes de chronologie, en novembre et décembre 2009, la moyenne des cumuls de précipitations mensuelles à Saint-Benoît-sur-Loire est de 90 mm, puis 50 mm pour les mois de janvier à mars 2010, et enfin 24 mm pour avril et mai. Or les variations les plus signicatives de la composition isotopique de la nappe alluviale sont observées d'avril à juin. Ces variations seraient donc bien plus liées au pic de crue de début mars 2010 qu'à l'impact des précipitations locales.

En toute vraisemblance, on peut donc supposer que la nappe alluviale, en rive gauche, est impactée, dans sa globalité, par la recharge de la Loire, pendant la période des hautes eaux 2009 – 2010. Il faut rappeler que cette période des hautes eaux est caractérisée par sa médiocrité. Bien que sa durée ait été longue, les débits de la Loire n'ont dépassé qu'une seule journée le seuil de 1 000 $m^3.s^{-1}$ à Gien, comme on l'a précédemment noté.

La recharge de la nappe alluviale par la Loire est donc, une nouvelle fois démontrée. **Ceci indique que le changement piézométrique de la nappe alluviale correspond bien à un transport d'eau de la Loire vers la nappe.** Il ne s'agit pas d'un transfert de pression du fleuve vers la nappe.

En ce qui concerne la circulation des eaux de la nappe alluviale de la plaine alluviale héritée vers l'intérieur du méandre, transversalement à la levée, les données isotopiques sont également cohérentes avec les résultats du suivi piézométrique. En effet, au cours des hautes eaux 2009 – 2010, il apparaît, d'une part, que les signatures isotopiques de la nappe alluviale au Pu 17 s'éloignent de celles des puits de Ménivelle, Oussy, Caillotière, au profit de celles de la Loire (notamment pour le prélèvement de fin avril). D'autre part, même si l'on n'observe pas de rapprochements significatifs des signatures isotopiques au Pu 12 de celles de la nappe alluviale au-delà de la levée, il est notable que la nappe alluviale au Pu 12 présente les rapports isotopiques les plus enrichis au sein du méandre. Ainsi, il est confirmé qu'en période de hautes eaux, l'amont du méandre est plus influencé par les eaux de la Loire que celles de la nappe alluviale au-delà de la levée, alors qu'au contraire, le secteur aval est lui doublement influencé par la Loire et la nappe au-delà de la levée.

Les hautes eaux 2010 – 2011 et 2011 - 2012 (fig. 195)

Les résultats des hautes eaux 2010-2011 (figurés pleins) et 2011-2012 (figurés vides), confirment à nouveau ces conclusions.

Les signatures isotopiques de la nappe alluviale au Pu 12 sont très stables entre les deux prélèvements pendant les hautes eaux 2010-2011, mais proches de celles d'Oussy et Caillotière. De plus, au niveau du secteur amont du méandre, les échanges entre la Loire et la nappe alluviale se sont inversés, entre les deux prélèvements (en février 2011). Ainsi, une circulation des eaux transversales à la levée a eu lieu. La signature isotopique de la nappe alluviale a donc subi l'influence des eaux provenant de Ménivelle, ce qui se traduit par un léger enrichissement des eaux au Pu 17 (dans les marges d'erreur).

Le prélèvement pendant les hautes eaux 2011-2012 a été effectué vingt jours après un pic de crue ayant atteint 1320 $m^3.s^{-1}$ à Gien. Les cumuls de précipitations mensuelles ont été relativement modestes en novembre 2011 et janvier 2012 (respectivement 24,5 et 40,4 mm) mais importants aux mois de décembre 2011 (149,7 mm). Les eaux de la nappe alluviale, fin janvier 2012, à Pu 16, Pu 1 et Pu 17 sont ainsi en position intermédiaire entre les signatures isotopiques des précipitations et de la Loire. On peut noter les rapports isotopiques appauvris pour Pu 17 comparativement aux hautes eaux précédentes. On peut penser que les cumuls de précipitations en décembre ajoutés à la longueur du pic de crue de début janvier 2012 en sont responsables : les différences de charge ont été à ce moment très importantes ce qui a entraîné une forte recharge de la nappe par la Loire. Au Pu 12, les eaux de la nappe alluviale sont à nouveau le résultat d'un mélange entre les eaux de la Loire et de celles provenant du secteur de Oussy-Caillotière.

Contrairement à l'analyse des données piézométriques, on retrouve donc bien l'influence des précipitations dans la recharge de la nappe alluviale à partir des données isotopiques. Cependant, en période de forts débits de la Loire, cette influence est comme masquée par celle des eaux de la Loire.

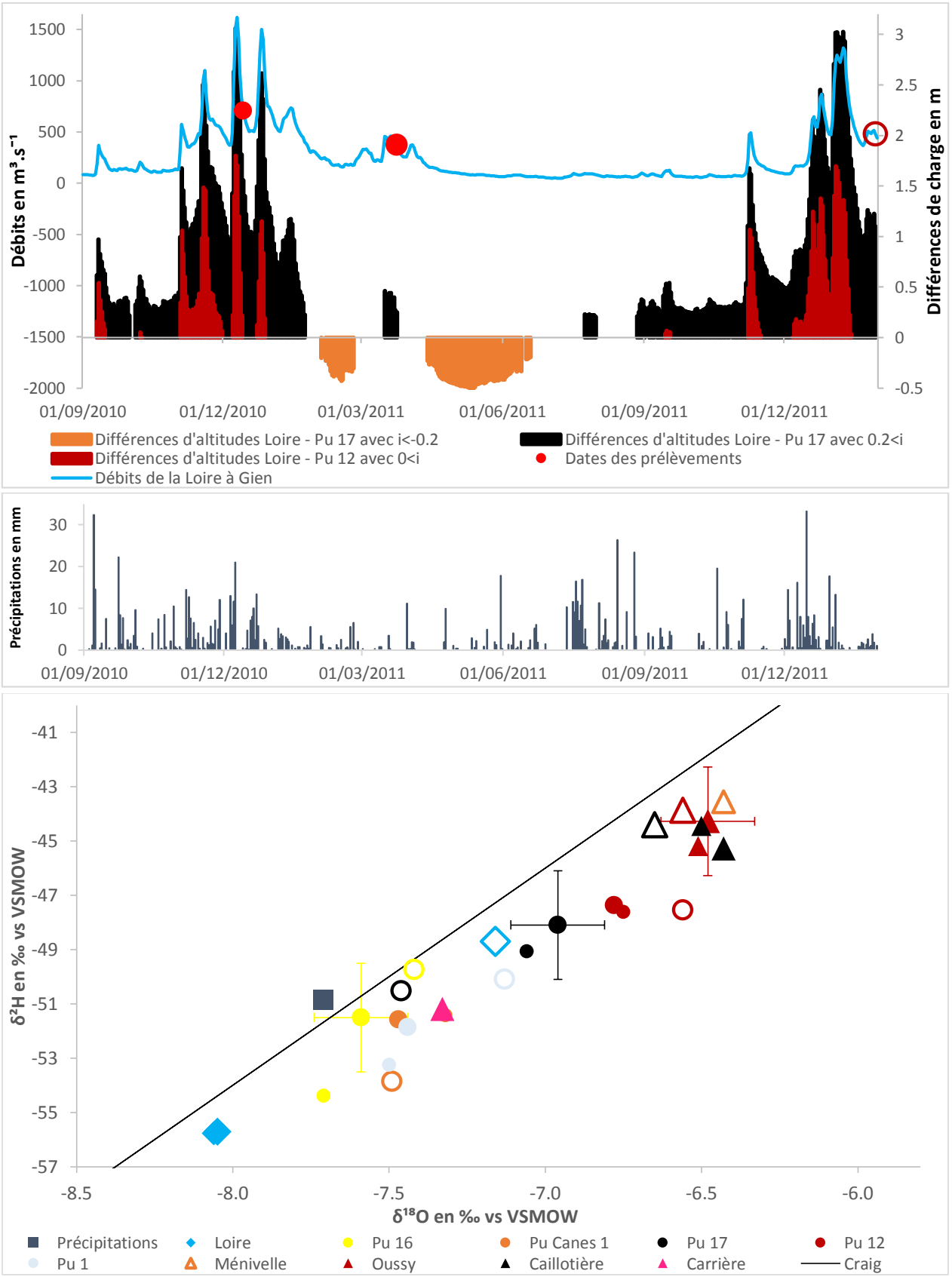


Fig. 195. *Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les hautes eaux 2010-2011 et 2011-2012.*

De plus, les phénomènes de recharge de la nappe alluviale par la Loire et les circulations des eaux de la nappe alluviale, qui se modifient en fonction des lignes d'eau de la Loire, sont bien confirmés par les résultats du suivi isotopique des eaux de la nappe alluviale.

5.5.3. Les basses eaux : résultats des mélanges des eaux de la nappe alluviale au sein du méandre de Guilly

L'objectif ici pour les périodes de basses eaux est d'identifier les phénomènes de soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale et de confirmer l'influence des circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée dans le secteur amont du méandre.

Pour les périodes de basses eaux, on dispose de données isotopiques pour trois années différentes : 2009, 2010 et 2011. Ces résultats sont présentés dans la figure 196, dont la lecture est identique à celle des figures 194 et 195 portant sur les périodes de hautes eaux.

Il est nécessaire d'indiquer que pour la signature isotopique des précipitations, la moyenne pondérée des mois de mars à octobre y a été reportée (carré plein, fig. 196), mais a été ajoutée la moyenne annuelle (carré vide, fig. 196) des signatures isotopiques des précipitations à Orléans, également pondérée par les hauteurs des précipitations, issues des données de 1996 à 2003 (Chéry et al., 2004).

De plus, pour les signatures isotopiques de la Loire, en plus des données correspondantes aux campagnes de prélèvements en basses eaux, les moyennes des signatures isotopiques des eaux de la Loire de la période de hautes eaux précédente sont représentées par des croix bleues claires (la plus fine pour les hautes eaux 2009-2010 et la plus épaisse pour les hautes eaux 2010-2011, fig. 196).

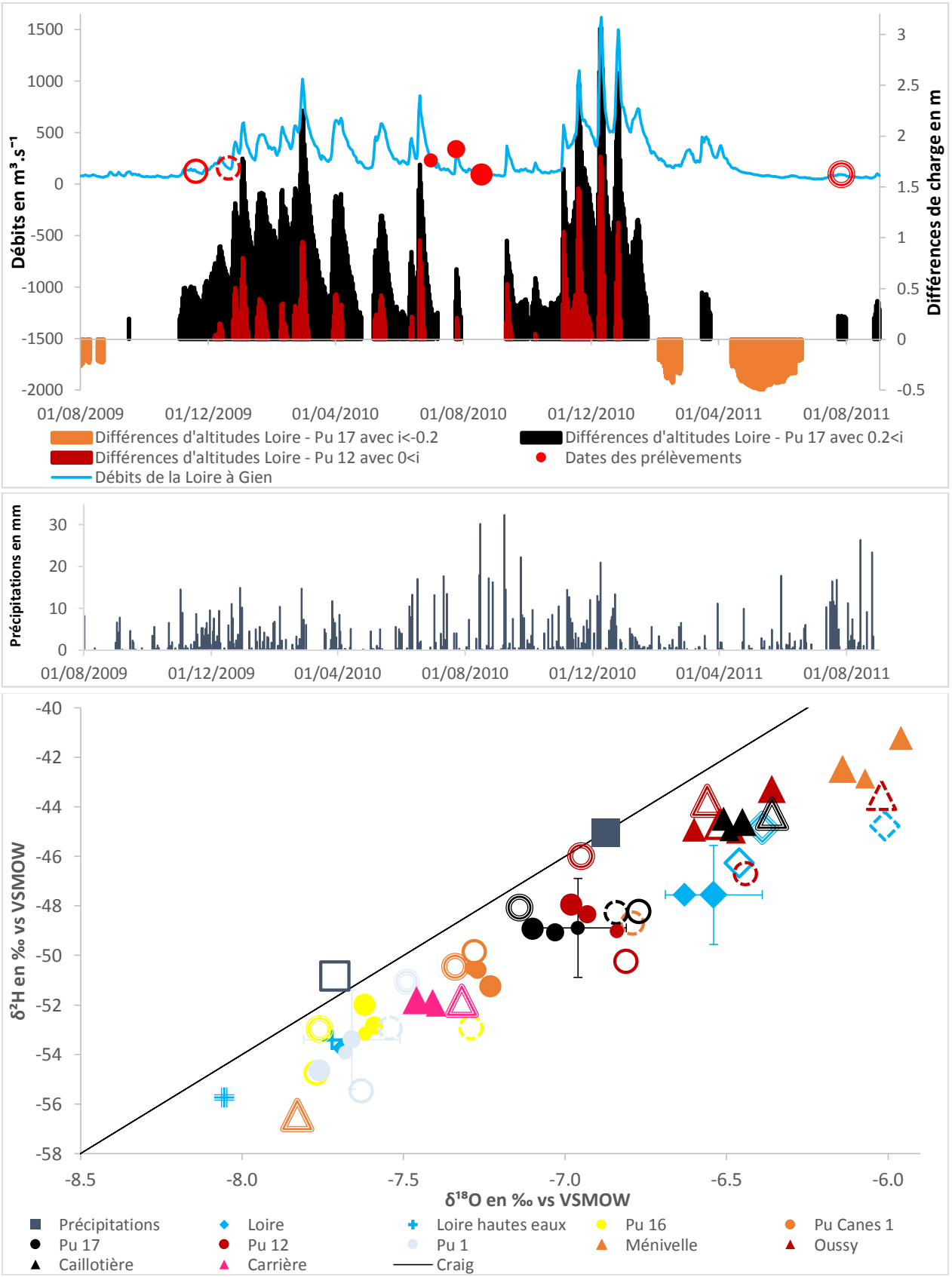


Fig. 196. *Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les basses eaux 2009, 2010 et 2011.*

Tout d'abord, il faut expliquer la signature isotopique au niveau de Ménivelle pour l'étiage de 2011. Ce puits était soupçonné de collecter directement les eaux de pluie par déversement en cas d'averses intenses. Le cumul des précipitations, juste avant le prélèvement du 27 juillet 2011, entre le 16 et le 27 juillet est de 90,2 mm. Cette donnée confirme donc que, pour ces situations, les données de Ménivelle ne sont pas représentatives des eaux de la nappe alluviale.

On peut noter ici la très grande stabilité des signatures isotopiques des eaux de la nappe de Beauce (à Carrières). En effet, tant en période de hautes que de basses eaux, leurs rapports isotopiques oscillent autour de la moyenne des données des précipitations pour les mois d'octobre à mars. Les eaux de la nappe de Beauce proviennent donc essentiellement de la recharge par les précipitations en période hivernale. Il convient de préciser ici qu'aucun apport de la nappe de Beauce à la nappe alluviale n'a été identifié à partir des données piézométriques et géochimiques.

Globalement, en période de basses eaux, les signatures isotopiques de la nappe alluviale sont très stables, au cours d'une même saison mais aussi d'une année sur l'autre. Cette stabilité correspond à une période où elle ne collecte pas d'apports importants (peu de recharge par les précipitations ou la Loire). Les rapports isotopiques de ces eaux ne peuvent donc pas être modifiés par de nouveaux apports. Les données de la nappe alluviale aux Pu 16 et Pu 1 sont situées entre les signatures des eaux de la Loire des hautes eaux précédentes et celles des précipitations hivernales. Pu 17 et Pu 12 s'intercalent, dans cet ordre, depuis ces deux premiers pôles jusqu'aux signatures isotopiques des eaux de la nappe alluviale au-delà de la levée.

Dans le détail, pour l'étiage 2009, les deux prélèvements surviennent en fin d'étiage, alors que la Loire recharge déjà la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre, mais aussi dans une moindre mesure dans le secteur aval. Les effets de cette recharge sont très notables au niveau des Pu 16, Pu 12 et Pu Canes 1 (les trois puits les plus proches de la Loire). En effet, les eaux de la Loire présentant des rapports isotopiques assez enrichis, leur influence est facilement détectable.

En ce qui concerne les signatures isotopiques de la Loire, pour toutes les basses eaux suivies, de 2009 à 2011, on observe qu'elles sont très proches de celles de la nappe alluviale des puits d'Oussy et de la Caillotière (excepté la mesure du 01/07/2010, dont les rapports isotopiques des eaux de la Loire relèvent encore des hautes-eaux précédentes). Ce ne peut pas être la Loire qui influence les eaux de la nappe alluviale tout au long de ces périodes puisque les échanges majoritaires d'eau en cours sont dans le sens de la nappe alluviale vers la Loire. Ces signatures isotopiques pourraient donc révéler l'ampleur du soutien des débits d'étiage de la Loire par les nappes alluviales. On reviendra au sous-chapitre suivant à cette remarque en prenant un peu plus de recul (cf. 5.6).

Pour faire le bilan des réponses à l'objectif de mettre en évidence, en période sèche, le soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale ainsi que les circulations des eaux au sein de la nappe alluviale, transversalement à la levée dans le secteur amont du méandre, les conclusions ne sont pas toujours très tranchées. Pour le soutien des débits de la Loire par la nappe, les signatures isotopiques de la Loire semblent l'indiquer.

Par ailleurs, en ce qui concerne le secteur amont, la stabilité des rapports isotopiques de la nappe alluviale au niveau du Pu 17 pendant l'étiage soulève quelques doutes.

Néanmoins, en comparant les données des étiages de 2009 et de 2010, on s'aperçoit que lors des basses eaux 2009, la nappe alluviale y présente des signatures isotopiques légèrement enrichies (à la limite des marges d'erreur) par rapport à 2010, c'est-à-dire également plus proches des eaux de la nappe alluviale au-delà de la levée (Ménivelle-Oussy-Caillotière).

Rappelons que l'été 2010 a été particulièrement humide. D'ailleurs les différences de charge entre la Loire et Pu 17 n'indiquent pas d'inversion des échanges entre la Loire et la nappe alluviale, vers un soutien des débits de la Loire, dans le secteur amont du méandre. Donc les circulations transversales à la levée n'auraient pas eu lieu pendant l'étiage 2010.

Au contraire, pour l'étiage 2009, ces mêmes différences de charge indiquent un transfert au sein de la nappe alluviale, de la plaine héritée vers l'intérieur du méandre. Bien que les deux campagnes de prélèvements pendant les basses eaux 2009 soient survenues sur leur fin, alors que la Loire rechargeait déjà la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre, les rapports

isotopiques des eaux de la nappe alluviale révèlent encore l'influence des eaux des puits d'Oussy, Caillotière et Ménivelle. Les données isotopiques semblent donc confirmer l'occurrence de ces circulations d'eau au sein de la nappe alluviale, transverses à la levée, dans le secteur amont, lors de l'inversion des différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale.

Les circulations d'eau au sein de la nappe alluviale « à travers » la levée sont donc confirmées par les données piézométriques et les données isotopiques, dans les secteurs aval et amont du méandre. La levée ne semble donc pas exercer d'influence sur les écoulements souterrains, ce qui, *a priori*, pouvait être supposé, mais qui maintenant, est démontré.

5.5.4. Influence des formes fluviales héritées : les zones humides dans les anciens bras de la Loire

La présence de paléochenaux aux sein du méandre marque ses paysages, notamment le Grand et le Petit Riots (fig. 197). Ils ont un rôle important dans la remise en eau du méandre lors de l'augmentation des lignes d'eau de la Loire, comme on l'a vu (cf. 5.1). Cependant, leur importance dans le fonctionnement de l'hydrosystème ne se cantonne pas aux périodes de débordement des eaux de la Loire.

Rappelons que deux sites de prélèvements sont associés à ces anciens bras : la zone humide du Trou Robert, située en plein cœur du Grand Riot (rond vert sur la fig. 197), et Pu 1 également situé dans un ancien bras de la Loire, le Petit Riot (rond bleu clair sur la fig. 197). Tous deux ont fait l'objet d'un suivi géochimique au même titre que la nappe alluviale. Le Trou Robert est en eau pratiquement toute l'année, ainsi que les mouilles aux alentours de Pu 1, bien qu'elles s'assèchent plus rapidement que le Trou Robert en période estivale.

Au fur et à mesure de ce chapitre, les particularités de la nappe alluviale au puits Pu 1 ont été plusieurs fois soulignées, contrairement au Trou Robert dont il a peu été question. Il s'agit donc ici de synthétiser ses particularités afin de démontrer leur rôle, localement, dans la recharge de la nappe alluviale.

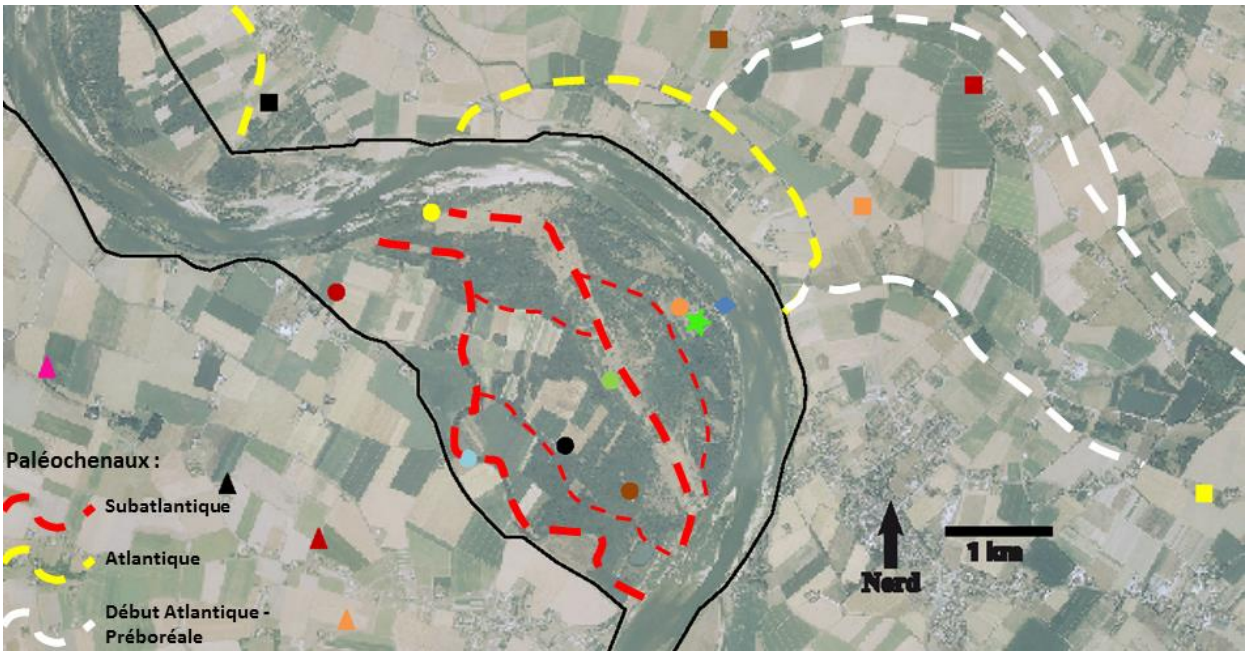


Fig. 197. *Localisation des paléochenaux au sein du méandre de Guilly (Source données : Castanet, 2008). Noter que les paléochenaux subatlantiques sont datés du 19ème siècle (Gautier et al., 2008).*

Les résultats des mesures isotopiques réalisées sur les eaux de la zone humide du Trou Robert sont présentés figure 198. Les moyennes des rapports isotopiques des eaux du Trou Robert sont -5,5‰ pour ^{18}O (écart-type : 1,7‰) et -42,5‰ pour ^{2}H (écart-type de 8,8‰). Ce sont donc les variations très importantes du signal qui caractérisent ces signatures isotopiques. Elles sont dues à une évaporation forte des eaux de la zone humide dès que les températures de l'air augmentent. Ces eaux sont donc trop évaporées pour permettre une quelconque interprétation. La droite de tendance de ces données, sur le graphique $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ est néanmoins cohérente avec les précipitations locales (données identiques qu'à la figure 196).

Cependant, les eaux du Trou Robert sont très faiblement minéralisées. Leur conductivité électrique moyenne est de 0,166 $mS.cm^{-1}$ (tab. 59 ; cf. 5.3.). Une telle valeur est révélatrice de l'importance des précipitations dans le mélange des eaux qui les composent.

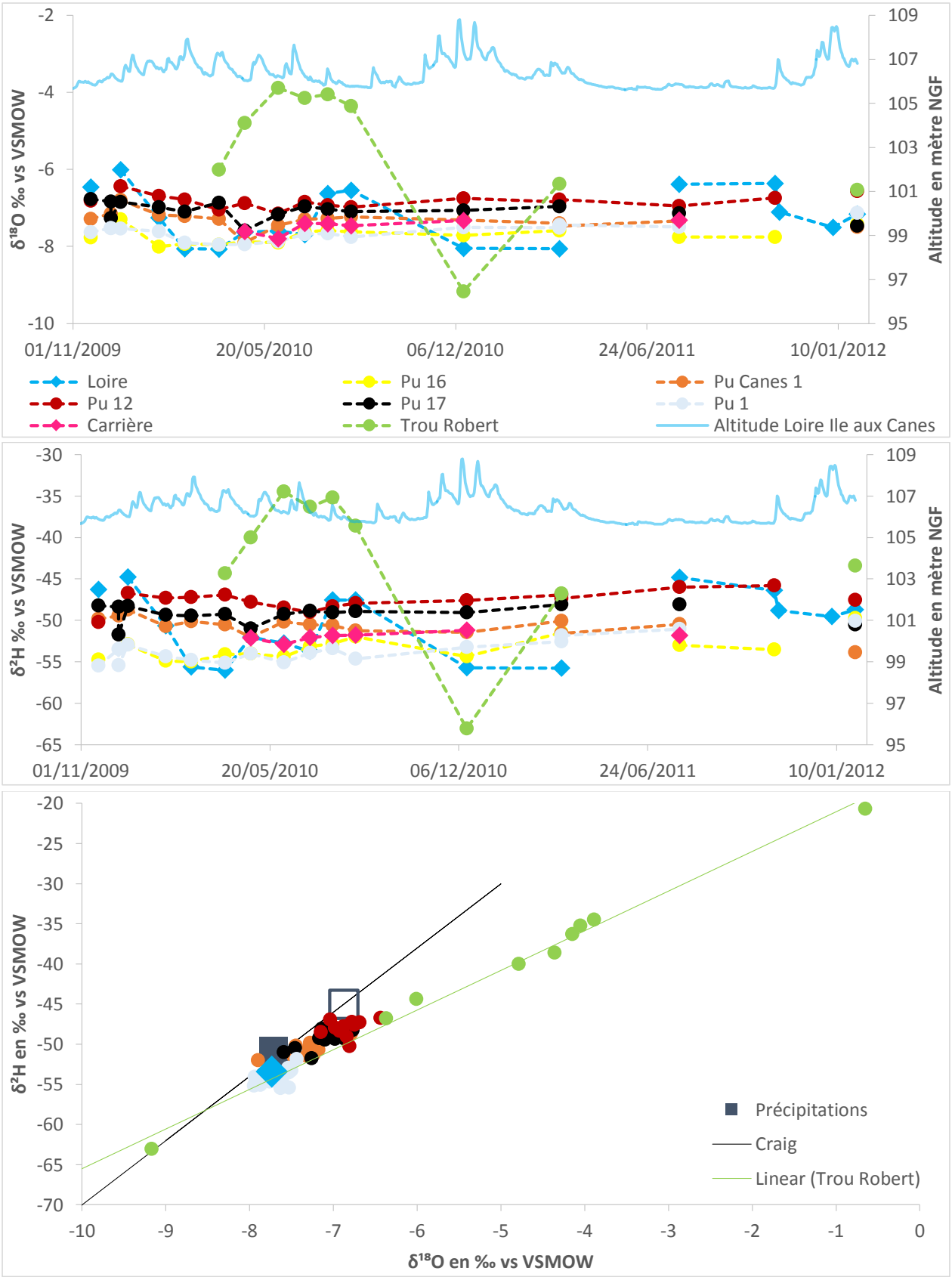


Fig. 198. *Signatures isotopiques des eaux de la zone humide du Trou Robert au sein du Grand Riot.*

De plus, on a vu que les signatures isotopiques de la nappe alluviale au puits Pu 1 dans le Petit Riot, au-delà de leur stabilité dans le temps, présentent des valeurs appauvries comparativement à Pu 17 (au centre du méandre). La différence entre les signatures isotopiques de la nappe alluviale au Pu 1 et Pu 17 sont d'ailleurs frappantes, alors qu'ils sont localisés dans le même secteur du méandre. Ces rapports isotopiques du Pu 1 se situent donc toujours entre les pôles des hautes eaux de la Loire et des précipitations. Du point de vue des données piézométriques, les temps de réponse de la nappe alluviale à Pu 1 aux variations de la Loire sont par ailleurs assez semblables à ceux de Pu 17 (respectivement 68 et 65 jours).

Finalement, les signatures isotopiques des eaux de Pu 1 révèlent donc un autre mélange, entre les eaux de la nappe alluviale (elles-mêmes influencées par les eaux de la Loire) et les eaux de la zone humide du Petit Riot. En effet, de même que les eaux du Trou Robert sont essentiellement composées d'eau de pluie, les mouilles du Petit Riot collectent les eaux des précipitations et les stockent, jusqu'à leur infiltration complète et leur assèchement en période estivale.

Les zones humides ont donc une réelle influence sur la recharge de la nappe alluviale, même hors des périodes de crues de la Loire. En effet, en collectant et stockant les eaux des précipitations, elles participent, localement, à la recharge progressive de la nappe alluviale par infiltration des eaux qui les composent. Ce phénomène explique donc l'influence ponctuelle, au niveau du puits Pu 1, des précipitations dans la composition des eaux de la nappe alluviale.

Les données isotopiques collectées dans le secteur du méandre de Guilly confirment donc les résultats obtenus à partir des données piézométriques.

La recharge de la nappe alluviale par la Loire est identifiée ainsi que les circulations transverses à la levée des eaux de la nappe alluviale vers l'intérieur du méandre dans son secteur aval.

Ces mêmes circulations dans le secteur amont sont moins aisément mises en évidence à cause de leur occurrence plus rare et des dates des prélèvements qui ne correspondent jamais

tout à fait à ces circulations en période de basses eaux. Elles sont néanmoins démontrées en période de hautes eaux lors d'un soutien ponctuel des débits de la Loire par la nappe alluviale.

Enfin, le rôle de collecte des précipitations par les zones humides est mis en évidence ainsi que leur contribution à la recharge de la nappe alluviale, même en l'absence de crue de la Loire.

Il convient maintenant de synthétiser l'ensemble de ces résultats à l'échelle de la Loire moyenne en combinant ceux du secteur du méandre de Guily à ceux du suivi géochimique des eaux de la Loire (chapitre 4).

5.6. Généralisation au fonctionnement hydrologique de la Loire moyenne

Lors d'une étude à grande échelle, se pose finalement le problème de la généralisation des résultats. On a vu que le secteur de la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur-Loire est géologiquement homogène (cf. 1.3.2.). Dans ce chapitre, le fonctionnement de la nappe alluviale au sein d'un méandre de la Loire moyenne a été étudié en détail. Le site qualifié d'atelier du méandre de Guilly est particulier en Loire moyenne géomorphologiquement mais pas hydrogéologiquement. Une généralisation des résultats est donc envisageable à l'échelle du tronçon de la Loire moyenne du Bec d'Allier à Châteauneuf-sur-Loire.

En effet, dans le secteur du méandre de Guilly, les levées s'écartent de la Loire en rive gauche, ce qui permet au lobe du méandre d'être connecté aux eaux de surface de la Loire et de présenter des remises en eau liées aux inondations de la Loire. La nappe alluviale dans le secteur de Guilly est donc certainement plus influencée par la Loire en période d'inondations que dans bien des secteurs de la Loire moyenne. Néanmoins, les résultats des suivis géochimiques présentés ne comportent pas de période de crue de la Loire. Cette particularité du site de Guilly n'est donc pas présente dans ces données. De plus, on a vu que les levées n'empêchent aucunement les échanges d'eau au sein de la nappe alluviale, de part et d'autre de celles-ci. Le jeu de données géochimiques est donc représentatif du fonctionnement des nappes alluviales du tronçon de la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Châteuneuf-sur-Loire.

Grâce aux données du suivi géochimique des eaux de la Loire (chapitre 4), il est possible d'effectuer une synthèse de l'évolution de ses eaux à travers cette portion de la Loire moyenne, et notamment de l'influence des nappes alluviales faute d'affluents majeurs contribuant aux débits de la vallée moyenne. Le site de prélèvements de référence pour la caractérisation des eaux de la Loire à leur entrée en Loire moyenne est celui de La Charité-sur-Loire, qui est comparé aux données collectées à Châteauneuf-sur-Loire (fig. 199 et 201).

On considère ici que les signatures isotopiques de la nappe alluviale collectée dans le secteur de Guilly sont représentatives des nappes alluviales de ce secteur de la Loire moyenne. Leur mode de recharge étant identique (Loire et précipitations locales), les rapports isotopiques

des nappes alluviales doivent logiquement présenter des valeurs comparables. D'ailleurs, la signature isotopique moyenne de la nappe alluviale dans le secteur du Bec d'Allier, échantillonnée en période de basses eaux, se situe dans la même gamme de valeurs qu'à Guilly (-7,1‰ pour $\delta^{18}O$ et -50,2‰ pour $\delta^{2}H$; Négrel et al., 2001). Sur la figure 199, cette donnée se situerait entre les valeurs de Pu Canes 1 et de Pu 12.

Pour faciliter la lecture des figures 199 et 201, les données isotopiques de la nappe alluviale de certains puits, en rive droite et en rive gauche n'ont pas été représentées.

En période de basses eaux (fig. 199)

Tout d'abord, pour toutes les campagnes de prélèvements, la signature isotopique des eaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire se situe entre celle de la Loire à La Charité-sur-Loire et celles de la nappe alluviale au niveau des puits relativement éloignés de la Loire. Les rapports isotopiques de la Loire à Châteauneuf sont donc systématiquement enrichis (au-delà des marges d'erreur) par rapport à ceux de la Loire à son entrée en Loire moyenne (La Charité) en période de basses eaux.

Cet enrichissement s'explique par deux phénomènes qui se complètent et font évoluer les données isotopiques de la Loire dans le même sens : l'évaporation des eaux de la Loire pendant leur cheminement en Loire moyenne et les apports des nappes alluviales à la Loire.

Démêler l'influence de l'un ou l'autre de ces deux facteurs n'est pas possible à partir des données isotopiques. Néanmoins, lorsque l'on compare l'influence de l'évaporation des eaux du Trou Robert sur les rapports isotopiques de ce site (fig. 198), l'effet y est très important et sans commune mesure avec ce que l'on observe ici pour les eaux de la Loire. De plus, pour les cinq campagnes de prélèvements en période de basses eaux, si l'on soustrait les deux données isotopiques de la Loire moyenne d'une même campagne et que l'on compare cette différence à la température maximale journalière, de la date du prélèvement, à Saint-Benoît-sur-Loire (fig. 200), on se rend compte qu'il n'y a pas de lien évident entre l'évolution des rapports isotopiques en Loire moyenne et l'évaporation de ses eaux.

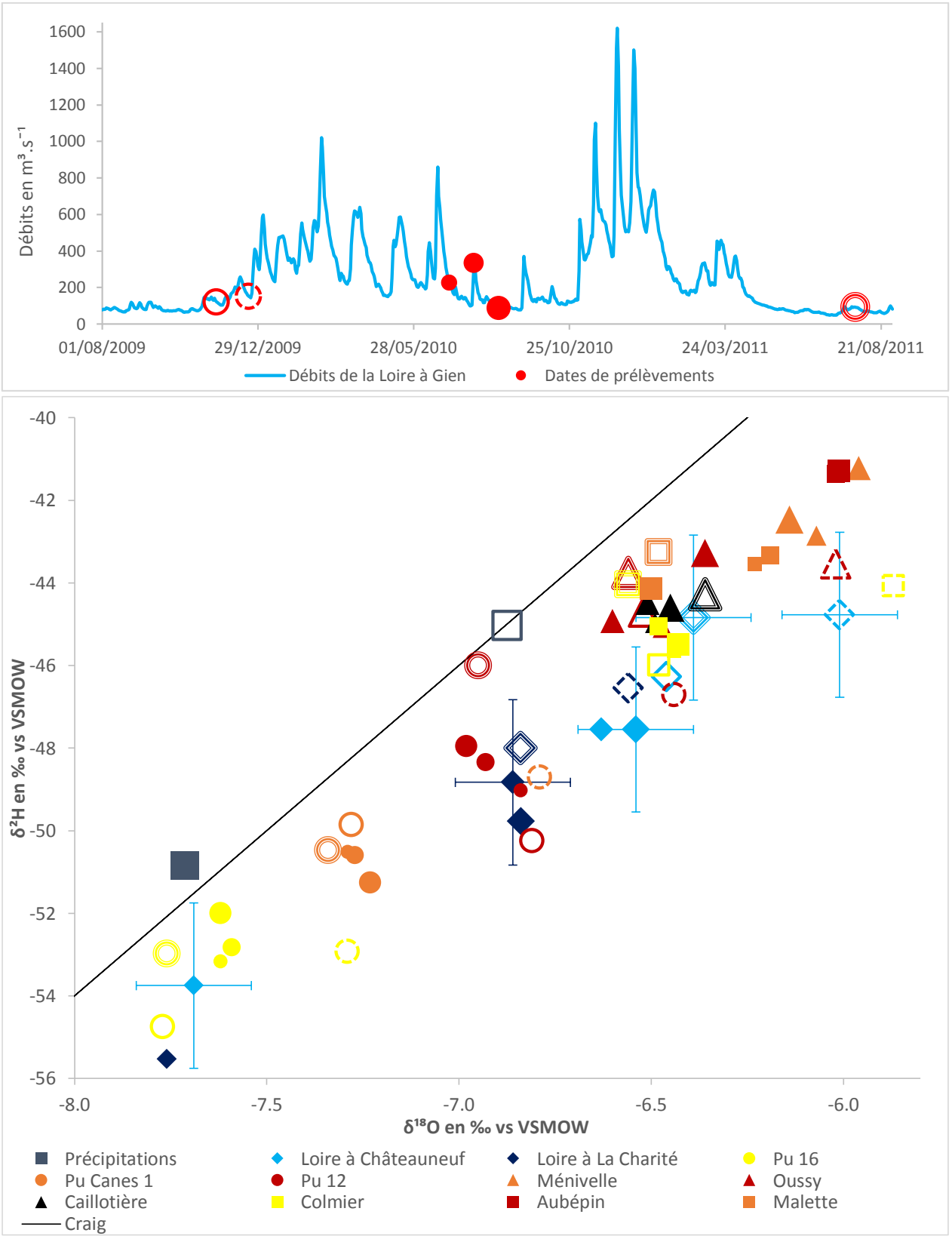


Fig. 199. *Evolutions des signatures isotopiques de la Loire en Loire moyenne pendant les basses eaux 2009, 2010 et 2011 (lecture de la légende identique à la figure 196).*

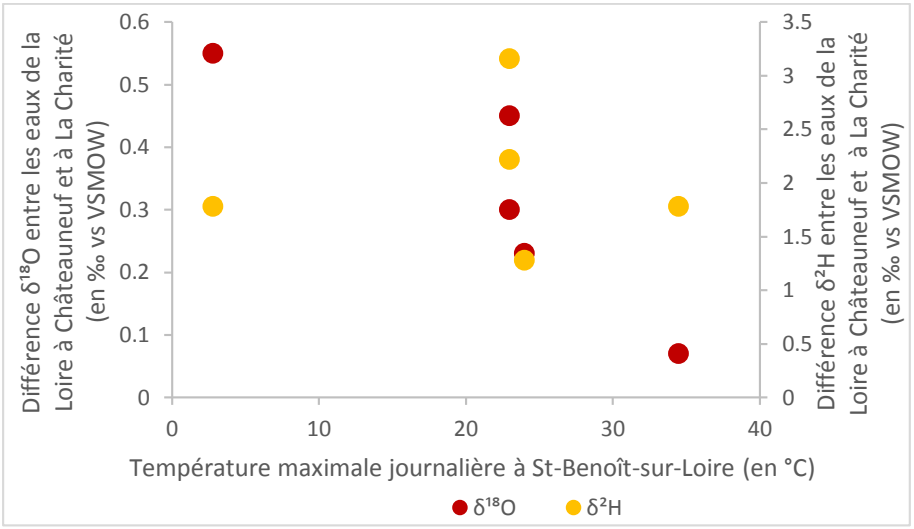


Fig. 200. *Impact de la température journalière maximale à Saint-Benoît-sur-Loire à la date du prélèvement sur la différence entre les rapports isotopiques des eaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire et à La Charité-sur-Loire.*

On peut donc conclure que l'évolution des signatures isotopiques des eaux de la Loire en période de basses eaux est essentiellement liée aux apports des nappes alluviales qu'elle draine au fur et à mesure.

Dans le détail de la figure 199, on remarque que la plus importante évolution des rapports isotopiques en Loire moyenne, entre la Charité-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire, est observée pour la campagne de prélèvements de juillet 2011 (figurés vides à bordures épaisses). Les basses eaux de 2011 sont les plus faibles en termes de débits et les plus longues, comparées à celles de 2009 et 2010. L'évolution des données sur ce tronçon de la Loire moyenne pour les basses eaux 2009 sont également importantes (figurés vides), alors qu'elle est plus limitée pour les basses eaux de 2010 (été le plus humide, figurés pleins).

En période de hautes eaux (fig. 201)

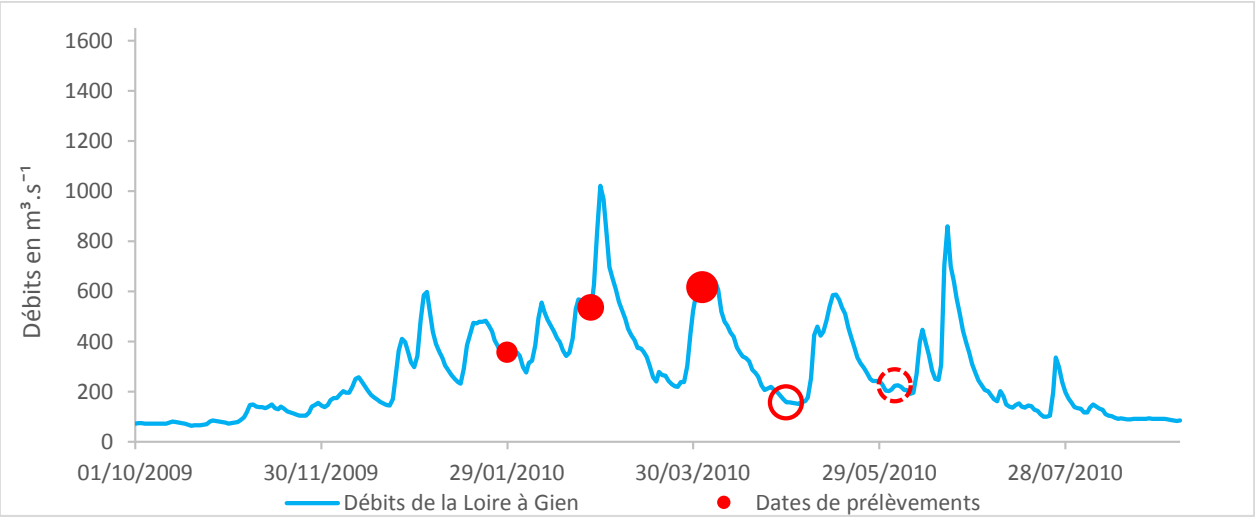
Au contraire, au cœur de la période de hautes eaux, pour les débits les plus importants les rapports isotopiques des eaux de la Loire s'appauvrissent en parcourant l'amont de la Loire moyenne (fig. 201). Il faut néanmoins souligner que les données de la Loire à La Charité sont très

proches de celles de Châteauneuf-sur-Loire pour la majorité des campagnes de prélèvements (dans les marges d'erreur).

En effet, pour les débits les plus importants, les nappes ne fournissent plus d'apport à la Loire. Les échanges se sont inversés. Le faible appauvrissement des rapports isotopiques des eaux de la Loire est donc causé par les apports des précipitations locales.

Néanmoins, pour les campagnes de prélèvements réalisées entre deux pics de débit, en période de baisse du débit de la Loire (campagnes de janvier 2010, petit figuré plein et d'avril 2010, figuré vide et bordure continue), on observe qu'à nouveau, les rapports isotopiques des eaux de la Loire s'enrichissent très légèrement (dans les marges d'erreur) entre la Charité-sur-Loire et Châteauneuf-sur-Loire, ce qui ne fait que confirmer la complexité de l'occurrence des échanges entre la Loire et les nappes alluviales, en fonction des différences de charge entre ces masses d'eau.

Ainsi, globalement, en période de hautes eaux, la Loire ne reçoit plus d'apports des nappes. Les signatures isotopiques en Loire moyenne, entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur-Loire, évoluent très peu en comparaison des périodes de basses eaux.



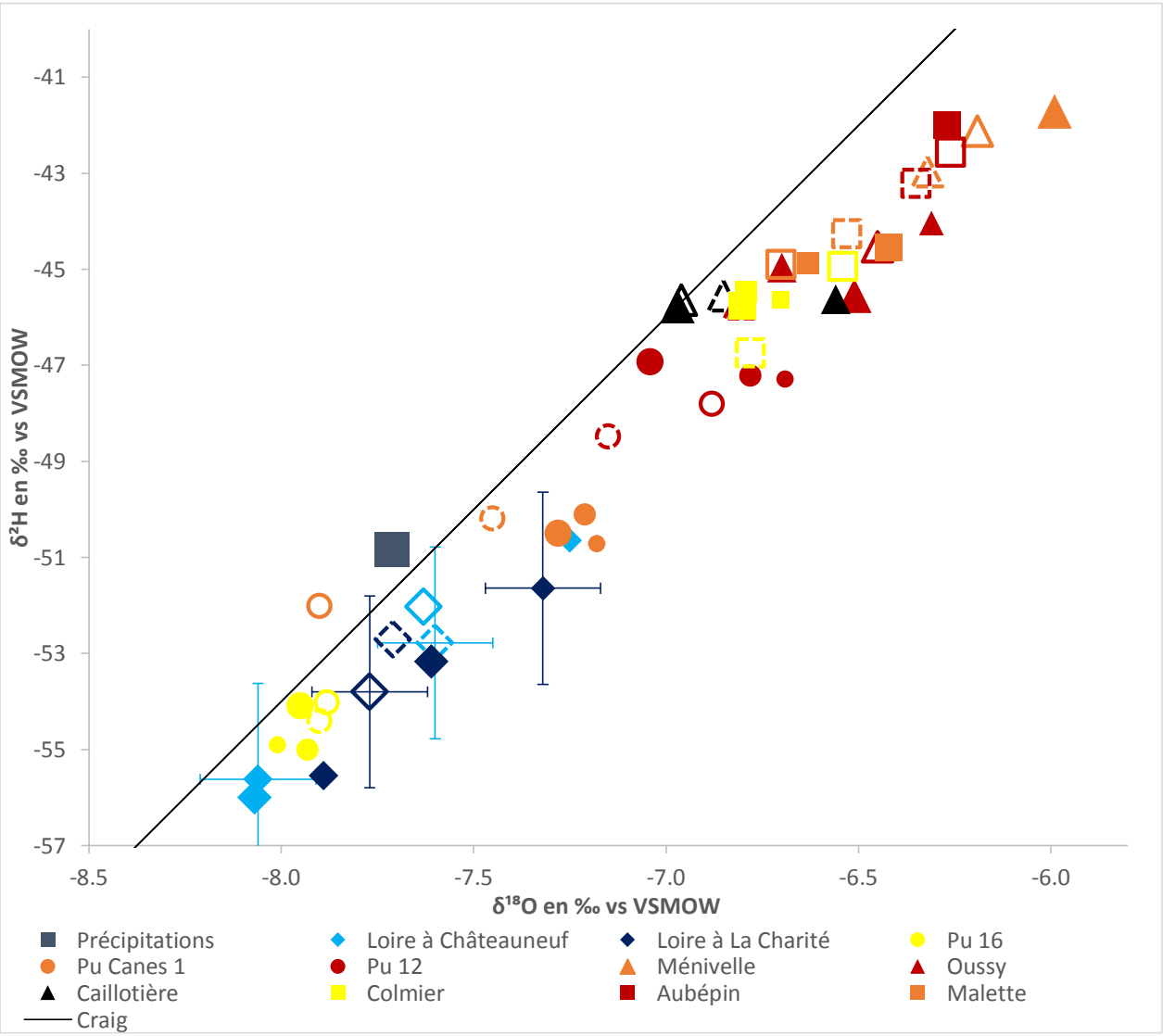


Fig. 201. *Evolutions des signatures isotopiques de la Loire en Loire moyenne pendant les hautes eaux 2009 – 2010 (lecture de la légende identique à la figure 194).*

Le soutien des débits d'étiage par les nappes alluviales est donc confirmé à l'échelle d'un tronçon la Loire moyenne, entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur-Loire. De plus, étant donné le rapprochement des signatures isotopiques de la Loire de celles de la nappe alluviale, la part du débit de la Loire fournie par les nappes est importante, bien qu'elle ne puisse être quantifiée.

Ce résultat est fondamental car il est impossible, à partir des données de débits, d'estimer ce soutien des débits par les nappes alluviales en période d'étiage. En effet, la Loire moyenne est également une zone où une partie de ses eaux percolent dans les réseaux karstiques, à l'aval de Châteauneuf-sur-Loire. Entre ces pertes et le soutien des débits par les nappes, le bilan hydrologique ne peut être réalisé. La quantification des effets des pertes dans le karst est en effet difficilement estimable (cf. 1.3.2, Joigneaux, 2011).

Ces suivis piézométriques et géochimiques, mis en place à grande échelle, dans le secteur du méandre de Guilly, ont donc permis de décrire précisément le fonctionnement de ce continuum transversal et longitudinal au fleuve que représente la nappe alluviale.

En effet, malgré le corsetage de la Loire par les levées, sa nappe alluviale conserve son rôle dans l'hydrosystème et assure le transfert des eaux et la continuité entre la Loire et sa plaine alluviale, aujourd'hui déconnectée, en surface, du fleuve. La nappe alluviale joue donc un rôle d'accumulateur des eaux de surface en périodes d'abondance, ce qui lui permet ensuite d'amortir les périodes de pénurie des eaux de surface en les restituant à la Loire. Longtemps affirmé, ce principe n'a que très rarement été démontré.

La Loire, et plus particulièrement ses lignes d'eau et leur variabilité, contrôlent entièrement le fonctionnement de sa nappe alluviale. Les échanges entre les deux réservoirs se font en fonction des débits de la Loire. Leur saisonnalité implique que, globalement, en période de hautes eaux, la Loire recharge la nappe alluviale et que, pendant les basses eaux, la nappe soutient les débits de la Loire. Cependant, étant donné la variabilité des débits de la Loire, ce schéma est largement perturbé par les pics de débits de la Loire, même faibles, en période de basses eaux, ou bien par les baisses des débits pendant les hautes eaux.

Au sein de ce système, les zones humides, situées au cœur des anciens bras de la Loire, peuvent être considérés comme des réservoirs pour la recharge de la nappe alluviale, alimentée par les précipitations et plus rarement pas les crues de la Loire si elles les atteignent. Les eaux de ces zones humides sont également composées par les eaux de la nappe alluviale en cas d'affleurement de cette dernière.

La morphologie du méandre de Guilly implique un gradient amont-aval important qui définit des zones préférentielles de recharge de la nappe alluviale (à l'amont du méandre) ou de soutien des débits de la Loire (à l'aval du méandre). Enfin, la plupart du temps la circulation des eaux de la nappe alluviale concordent avec ce gradient amont-aval, circulation qui est néanmoins perturbées par les plus fortes différences de charge entre la Loire et la nappe alluviale.

La généralisation de ces résultats à un tronçon de la Loire moyenne, entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur-Loire, a été permise par le suivi géochimique des eaux de la Loire en amont et en aval du site-atelier du méandre de Guilly. Ainsi, l'importance des apports des nappes alluviales pour ce secteur amont de la Loire moyenne en période d'étiage a été démontrée. La part de ces apports est d'autant plus significative que les débits sont faibles. Ce rôle majeur des nappes alluviales dans le soutien des débits de la Loire a été mis en évidence grâce aux signatures isotopiques de ces différents réservoirs. Cette démonstration ne pouvant pas être réalisée à partir des données de débits, à cause des pertes liées au réseau karstique sous-jacent entre Châteauneuf-sur-Loire et Chécy, les apports de la géochimie ont ici été déterminants dans la compréhension de l'origine des eaux composant les débits de la Loire en période de basses eaux.

Synthèse des résultats du 5ème chapitre

- Les variations de la surface piézométrique de la nappe alluviale sont fortement corrélées aux variations de la ligne d'eau de la Loire.

- Mise en évidence des échanges entre la Loire et la nappe alluviale, dans les deux sens, selon les différences de charge entre les deux masses d'eau.

- L'occurrence de la recharge de la nappe alluviale par la Loire ou du soutien des débits de la Loire par la nappe alluviale s'inverse en fonction de la saison hydrologique : hautes eaux ou basses eaux. Cependant, la forte variabilité des débits de la Loire entraîne également la complexité de ces échanges. Au sein d'une même saison hydrologique, les échanges entre les masses d'eau s'inversent en fonction des débits de la Loire.

- Les pics de débit de la Loire, quelle que soit leur puissance et la saison de leur occurrence, jouent un rôle majeur dans la recharge de la nappe alluviale.

- L'inondation du méandre de Guilly, même partielle, engendre une recharge la plus efficace de la nappe alluviale.

- Les lignes d'eau de la Loire contrôlent l'ensemble de la circulation des eaux au sein de la nappe alluviale. Ces circulations internes à la nappe s'effectuent majoritairement parallèlement à la Loire, d'amont en aval.

- Les levées ne sont en rien un obstacle à la circulation des eaux de la nappe alluviale et à leur diffusion à travers la plaine d'inondation héritée de la Loire.

- La morphologie du méandre détermine les échanges : la zone amont du méandre est préférentiellement une zone de recharge de la nappe alluviale alors que le secteur aval est le plus fréquemment une zone de soutien des débits de la Loire.

- Les précipitations locales jouent un rôle moindre dans la recharge de la nappe alluviale comparativement à la Loire.

- Les zones humides au sein des anciens bras de la Loire, en l'absence de crue, collectent les précipitations hivernales et permettent leur infiltration progressive jusqu'à la nappe alluviale.

- Les débits d'étiage en Loire moyenne, entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur-Loire, sont fortement marqués par les eaux en provenance des nappes alluviales, qui jouent donc un rôle majeur de soutien de ces débits.

Cette troisième et dernière partie s'achève sur un retour aux problématiques principales de ce travail. Ce cinquième chapitre a permis de conclure l'étude de la formation des débits de la Loire moyenne jusqu'à Châteauneuf-sur-Loire, grâce à l'étude des principaux apports de ce tronçon : ceux des nappes alluviales.

Ces nappes alluviales sont les principaux vecteurs des transferts d'eau à l'échelle de la plaine alluviale de la Loire moyenne alors que le fleuve en surface est coupé de la majeure partie de sa plaine d'inondation. Les nappes alluviales assurent donc la continuité hydrologique entre ces différentes unités fluviales.

Cette continuité hydrologique, transversale et longitudinale à la Loire, permet donc ces transferts d'eau avec tout ce qu'ils comportent en termes d'aléas dans l'abondance ou la pénurie, ou encore les pollutions, qui peuvent ainsi être transmis, répercutés d'un réservoir à l'autre, du fleuve à sa plaine alluviale et inversement.

Ce fonctionnement hydrologique avec cette continuité entre le fleuve et la plaine alluviale est un atout majeur pour la société. Mais si ce fonctionnement est perturbé, par une pénurie majeure par exemple, elle s'étendra également à l'ensemble du système. Grâce aux nappes alluviales, l'hydrosystème a les capacités de suppléer à une sécheresse saisonnière. Mais si la sécheresse, l'indigence des apports annuels des hautes eaux perdurait et gagnait l'ensemble des réservoirs, les effets de cette pénurie seraient généralisés à tout le système et amplifiés par son mode de fonctionnement. Ainsi, le bilan hydrologique pour la Loire pourrait être catastrophique l'étiage suivant.

Cette continuité hydrologique représente donc un atout essentiel de la régulation des débits de la Loire mais elle comporte aussi des risques de transmission et d'amplification des aléas majeurs (crues de nappes derrière les levées ou épuisement des stocks qui limiterait ou interromprait le soutien des débits d'étiage).

La préservation des nappes alluviales représentent donc un enjeu en Loire moyenne puisqu'elles sont les principaux soutiens des débits d'étiage. La vulnérabilité des centrales nucléaires à de fortes baisses des débits estivaux n'est pas à démontrer. Par la préservation des

nappes alluviales, il faut donc entendre la préservation de leur recharge par la Loire. Cette recharge est déjà amputée des bénéfices des crues, même moyenne, de la Loire dont l'inondation ne peut s'étendre qu'à des secteurs très limités. On a démontré que les pics de débits, même moyens, ont un effet de recharge sur la nappe alluviale. Ainsi, ces variations brusques des débits de la Loire sont à préserver.

La régulation des débits ne peut donc qu'être néfaste à la recharge des nappes alluviales en période de hautes eaux. Et, en période de basses eaux, ces tentatives finiront par être dérisoires face au déficit de volume que pourrait engendrer une succession de hautes eaux médiocres.

Enfin, cet enjeu de la préservation des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale doit être relié à l'évolution du lit de la Loire. Entre 1978 et 2005, le plancher alluvial s'est enfoncé de 17 cm dans le secteur du méandre de Guilly (Nabet, 2013). De Cours-les-Barres à Saumur, sur la même période, le lit de la Loire a connu un enfoncement sur 91% de ce tronçon, avec un taux moyen annuel d'abaissement de 1,5 cm. A terme, ces processus en cours pourraient impacter les échanges entre la Loire et sa nappe alluviale étant donnée l'importance des différences de charge entre ces deux masses d'eau démontrée ici. L'enfoncement du lit de la Loire doit donc demeurer un enjeu majeur et faire l'objet de suivis et de recherches sur ses impacts.

Les nappes alluviales sont, dans le secteur amont de la Loire moyenne, le principal moyen de stockage des eaux. La connaissance de leur fonctionnement hydrologique et de leur variabilité est donc nécessaire pour dans un deuxième temps pouvoir bénéficier du suivi de ces nappes. En effet, la connaissance de l'état de leur réserve peut permettre une réactivité, une certaine anticipation de crises majeures. Faute de pouvoir les empêcher, les anticiper permet de s'y préparer.

Conclusion générale

Cette thèse a permis de faire un bilan des connaissances de l'hydrologie de la Loire moyenne, d'en pointer les lacunes, mais aussi d'apporter des résultats inédits en démontrant des fonctionnements soupçonnés par les gestionnaires et enfin, d'ouvrir de nombreuses perspectives de recherche.

En effet, les eaux de la Loire sont le moteur des nombreuses dynamiques en œuvre au sein de l'hydrosystème. La puissance, l'abondance ou la rareté des eaux de la Loire rythment les évolutions de sa géomorphologie, et par là, sont l'un des facteurs de contrôle de la biodiversité et des cycles biologiques. Les rythmes hydrologiques jouent également un rôle fondamental dans les relations qu'entretient la société avec le fleuve, du point de vue de la ressource en eau, de la gestion des risques naturels, mais aussi dans la relation symbolique très forte qui lie les riverains à la Loire.

L'hydrosystème ligérien fait l'objet de nombreuses recherches, de nombreux projets de gestion, mais la compréhension de son hydrologie et ses variabilités doit être maîtrisée afin que ces perspectives puissent reposer sur des bases et des connaissances solides.

Tout d'abord, il convient de revenir sur les apports méthodologiques de ce travail. La principale originalité de cette thèse de géographie est la synthèse entre les approches des problématiques et enjeux ligériens analysés à partir de la géographie physique, enrichies des méthodes de sciences de la Terre. Si l'intérêt des projets de recherches pluridisciplinaires, alliant des équipes aux compétences multiples, était encore à démontrer, les résultats de ce travail en confirment l'efficacité. En effet, les considérations globales des géographes dans leurs approches des hydrosystèmes permettent d'intégrer à l'interprétation des données des paramètres nombreux et variés, de l'impact direct des sociétés aux influences climatiques par exemple, qui influent sur l'hydrologie de bassins versants aussi vastes. De plus, le « matériel de base » du travail d'un hydrologue que sont les chroniques de débits, avait été largement étudié, notamment par M. Dacharry (1974). Néanmoins, la décomposition des chroniques de débits en différents indices a permis d'orienter leur analyse sur les principaux enjeux en Loire moyenne et de caractériser les modifications récentes des écoulements. Ainsi, des évolutions, certes précises, mais qui méritent

d'être identifiées, ont pu être décrites, telles que l'occurrence des saisons hydrologiques ou celles des débits à pleins bords.

De plus, ces chroniques de débits présentent de nombreuses limites quant à la fiabilité des données, à l'étude d'apports diffus (petits affluents qui ne peuvent être tous jaugés ou de sources), ou encore, à l'étude des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Le recours à la géochimie a donc permis d'analyser la complexité hydrologique du secteur de la confluence Loire – Allier et de mettre en lumière l'importance hydrologique des apports en Loire bourbonnaise et notamment ceux provenant du Massif du Morvan.

Enfin, la synthèse, d'une part, du suivi de la surface piézométrique de la nappe alluviale en lien avec le nivellement des lignes d'eau de la Loire, et d'autre part, du suivi géochimique des différentes masses d'eau en présence (suivi dans le temps et dans leurs diversités géographiques), a permis la description et l'explication du rôle majeur des nappes alluviales dans l'hydrologie de la Loire moyenne, entre le Bec d'Allier et Châteauneuf-sur Loire. On peut souligner ici l'efficacité et la fiabilité des données isotopiques comparativement à celles des éléments majeurs, plus complexes à interpréter en raison de la multitude des sources et des processus qui peuvent être à l'origine de variations. De plus, la chimie des eaux de la Loire et de la nappe alluviale intègre de nombreux apports anthropiques qui font des éléments majeurs de piètres indicateurs des origines des eaux.

On peut donc conclure que la combinaison de ces méthodes a tenu ses promesses en termes d'efficacité et de résultats. Ces principaux résultats sont synthétisés, ci-après.

L'étude des longues chroniques de débit à Blois montre la stabilité du régime de la Loire depuis 150 ans, au-delà de la variabilité interannuelle. Toutefois, des évolutions sont néanmoins apparues. Les débits supérieurs à 3 000 $m^3.s^{-1}$ ont disparu à Blois. Le nombre de jours par an où la Loire atteint son débit à pleins bords (1 000 $m^3.s^{-1}$) est relativement stable, mais leur saisonnalité a évolué. Leurs occurrences en période estivale ont pratiquement disparu alors que leur fréquence en période hivernale a augmenté. De plus, les occurrences exceptionnellement précoces ou tardives des saisons hydrologiques ont également disparu des chroniques de débits.

Enfin, les évolutions des débits de basses eaux et d'étiage sont essentiellement imputables à la politique de soutien des débits par les grands barrages.

En ce qui concerne les données climatiques étudiées, deux tendances ont été identifiées : (i) une légère hausse des maxima et minima annuels de température depuis les années 1950, augmentation qui s'accélère au cours du temps pour les maxima annuels et (ii) l'affaiblissement de la tendance à la hausse des cumuls annuels de précipitations en amont de la Loire moyenne depuis les années 1950 pour arriver à une baisse de ce cumul sur les trente dernières années. L'impact de ces tendances n'est pas identifiable dans les chroniques de débits, pour l'instant. Néanmoins, si elles se confirment et s'accentuent, les débits de la Loire pourraient en être modifiés.

Des questions restent donc en suspens concernant certaines évolutions des débits au niveau des bassins amont de la Loire, notamment au sujet de l'augmentation des débits maximaux annuels : quelles en sont les causes ? Cette tendance perdurera-t-elle ? Elle semble pour l'instant géographiquement limitée, mais ne pourrait-elle pas se diffuser au sein du bassin ? D'autres évolutions significatives au sein des chroniques de débits de ces bassins amont sont-elles identifiables ?

Le suivi géochimique des eaux de la Loire entre Roanne et Orléans, ainsi que des eaux de ses principaux affluents (Allier et Arroux), a permis l'étude des apports des différents bassins amont dans la formation des débits de la Loire moyenne, ce qui représente un apport majeur de la thèse. Ainsi, l'importance des apports en Loire bourbonnaise a été mise en évidence. Ils sont relativement réduits en période d'étiage, mais les affluents drainant le Morvan sont responsables de l'inversion de la proportion entre la Loire amont et les affluents de la Loire bourbonnaise en période de hautes eaux, avec un rapport de 25% pour la Loire amont et 75% pour les affluents de la Loire bourbonnaise. Ces résultats sont validés par les données de débits disponibles. De plus, les résultats pour la confluence entre la Loire et l'Allier ont révélé des apports supplémentaires dans ce secteur, en plus des deux principaux tributaires : il s'agit probablement d'apports de sources et de la nappe alluviale, qu'il conviendrait de caractériser plus finement.

A son entrée dans le Bassin Parisien, après avoir collecté les apports du Morvan et de l'Allier, la Loire ne reçoit pas d'apports d'affluents significatifs jusqu'au Bec de Cher en aval de Tours. L'importance des nappes alluviales est donc majeure en Loire moyenne. L'étude du site-atelier du méandre de Guilly (Val d'Orléans, Loiret), a permis le suivi piézométrique ainsi que géochimique de la nappe alluviale en parallèle de celui de la Loire. Ce site offre un élargissement de la plaine alluviale active grâce à un relatif éloignement des levées.

A l'échelle de ce méandre, le fonctionnement hydrologique global de la nappe alluviale a pu être analysé en détail. Les échanges entre la nappe alluviale et la Loire ont été mis en évidence. La Loire contribue à la recharge de la nappe alluviale et la nappe alluviale soutient les débits de la Loire, mais ces échanges ne s'inversent pas selon un scénario simple hautes eaux – basses eaux. La recharge de la nappe alluviale par la Loire se produit préférentiellement en période de hautes eaux et le soutien des débits de la Loire en basses eaux. Cependant, les deux phénomènes d'échanges entre la Loire et la nappe alluviale sont observés en toutes saisons hydrologiques. Le facteur de contrôle du sens de ces échanges est la ligne d'eau de la Loire. La variabilité saisonnière et interanuelle des débits de la Loire inverse donc les différences d'altitudes entre la Loire et sa nappe alluviale à tout moment de l'année. La recharge de la nappe alluviale, dépendant essentiellement de la Loire, est donc favorisée par les plus forts débits, quelle que soit leur date d'occurrence. La nappe alluviale joue donc un rôle majeur de soutien des débits de la Loire, dans la mesure où plus ses réserves sont reconstituées, plus le soutien des débits lors de leur baisse pourra mobiliser une réserve importante. La nappe alluviale au sein du méandre est également alimentée par les eaux provenant de la plaine alluviale s'infiltrant transversalement aux levées, en fonction des lignes d'eau de la Loire. Enfin, l'importance des apports provenant des nappes alluviales en période d'étiage dans la partie amont de la Loire moyenne a été mise en évidence grâce à la comparaison des signatures isotopiques des eaux de la Loire à La-Charité-sur-Loire et à Châteauneuf-sur-Loire.

Malgré l'absence d'apports de surface et le corsetage de son lit par les levées, la Loire moyenne est donc connectée à l'ensemble de sa plaine alluviale à travers ses échanges avec la nappe d'accompagnement. Ainsi, potentiellement, l'impact des prélèvements d'eau dans les nappes alluviales et des pollutions diffuses de leurs eaux, liées dans cette zone aux activités

agricoles intensives, est ainsi transmis à la Loire. Dans la perspective de la gestion de la ressource en eau, même en l'absence de crue, l'importance des débits annuels les plus importants de la Loire est une nouvelle fois démontrée pour conserver un fonctionnement hydrologique dynamique et abondant tout au long de l'année hydrologique. Ces débits maximaux annuels sont d'autant plus primordiaux que la recharge des nappes alluviales ne bénéficient que très partiellement des inondations liées aux crues de la Loire étant donné son endiguement. Même si notre période de suivi n'a pas enregistré de grande crue, l'évènement de mai 2013 a démontré le rôle des débordements du fleuve sur la recharge de la nappe. Le méandre de Guilly est à ce titre particulièrement instructif. Le site-atelier de Guilly devra conserver son suivi piézométrique afin d'enrichir les chroniques de situations hydrologiques variées.

Se posent donc maintenant les perspectives de recherche, mais aussi des pistes de gestion des débits ouvertes par ce travail. Il est possible de les regrouper autour de trois thématiques majeures :

(i) **Les changements environnementaux et leurs impacts sur l'hydrologie de la Loire** : le principal obstacle auquel s'est confrontée cette recherche en ce qui concerne l'étude des impacts des changements environnementaux sur l'hydrologie de la Loire est la définition et la description des changements environnementaux eux-mêmes. En effet, l'étude des évolutions climatiques, notamment au niveau des bassins amont, ou encore l'impact de l'évolution de l'occupation du sol dans le Massif Central n'ont pas pu être menés, dépassant le cadre de la thèse. Ainsi, l'étude de l'enneigement, de l'évolution des précipitations ou encore des températures maximales est un préalable aux prochaines études hydrologiques des bassins amont de la Loire. Elles sont d'autant plus nécessaires que les évolutions climatiques seront plus marquées dans ces secteurs, en altitude, soumis à des extrêmes, en termes de précipitations par exemple, plus intenses (influences cévenoles).

(ii) **Formations et variabilité des débits à pleins bords** : les débits à pleins bords correspondent à des débits en Loire moyenne de l'ordre de 1 000 $m^3.s^{-1}$. On peut noter qu'ils

ne surviennent pas tout à fait chaque année. L'importance de ces débits a été démontrée : les études précédentes avaient démontré leur impact géomorphologique (Grivel, 2008 ; Nabet, 2013), et dans cette thèse, nous avons dévoilé leur impact hydrologique sur la recharge des nappes alluviales. Il s'agit donc de débits seuil dont les effets s'apparentent, même si ce n'est que dans une moindre mesure, à ceux de crues plus puissantes. L'étude de leur occurrence annuelle et saisonnière a été menée dans ce travail. Néanmoins, étant donné leur rôle déterminant dans des processus variés et leur période de retour faible, ils mériteraient un suivi plus continu et particulier. Ce message s'adresse également aux gestionnaires du fleuve, en particulier du côté du barrage de Villerest : n'est-il pas possible d'envisager une gestion des barrages qui permettrait de « laisser passer » certains débits importants lorsque les écoulements provenant du Massif du Morvan sont abondants, de manière à améliorer la fréquence des débits à pleins bords en Loire moyenne ? La « perte en eau » enregistrée l'hiver serait très amplement « récupérée » l'été grâce à un meilleur soutien des étiages par les nappes alluviales.

(iii) **Les étiages en Loire moyenne et les nappes alluviales** : il a été démontré que les nappes alluviales jouent un rôle majeur dans le soutien des débits d'étiage de la Loire. Deux axes de recherche sont possibles et complémentaires, pour poursuivre ce travail. D'une part, il faudrait mener des études à grande échelle sur d'autres sites-ateliers à l'image du suivi mis en place à l'échelle du méandre de Guilly. De telles études de cas permettraient de confirmer définitivement cette importance des nappes alluviales en Loire moyenne et la variabilité de leurs échanges avec le fleuve mises en évidence ici. D'autre part, la quantification des volumes d'eau perdus par la Loire au sein de son lit mineur dans le réseau karstique complexe, complétée de la quantification des volumes d'eau fournis par les nappes en période d'étiage devraient être des objectifs à atteindre. Ces quantifications ne peuvent être réalisées simplement à partir des données de débits. Ces données, notamment en période d'étiage ne sont pas très fiables en Loire moyenne, excepté à la station de Gien. De plus, les processus de perte et de soutien des débits par les nappes alluviales sont contradictoires et se masquent, en partie, l'un l'autre. Néanmoins, après la collecte de

données plus variées sur les nappes alluviales en Loire moyenne, cette quantification pourrait être envisageable à partir des outils qu'offre la modélisation.

Ces trois thèmes impliquent donc une approche globale du fonctionnement de l'hydrosystème alliée à des études de cas, à grande échelle, permettant la description de processus hydrologiques précis. Cette thèse est une illustration de tels changements entre différentes échelles d'étude, qui se révèlent efficaces. De plus, ces thématiques se rapportent toutes aux principaux enjeux en Loire moyenne : gestion de la ressource, débit minimum nécessaire aux centrales nucléaires, meilleure compréhension de l'aléa en période de crue.

La Loire oppose donc sa variabilité interannuelle et l'étendue de son bassin qui synthétise de nombreuses influences variées. L'étendue du bassin ligérien est telle, que pour chaque secteur étudié dans ce travail, il a été nécessaire de comprendre les mélanges et les différentes influences qui contrôlent les débits de chaque tronçon de la Loire. Ces débits résultent systématiquement de l'accumulation d'amont en aval de régimes hydrologiques différents, impactés par des substrats différents, une géomorphologie hétérogène et des influences climatiques variées. Comprendre et s'approprier cette logique de continuum, tant longitudinal que transversal, est indispensable à toute recherche. Cette complexité intrinsèque de l'hydrosystème ligérien renferme néanmoins toute sa diversité, son intérêt et sa richesse.

Bibliographie

Albéric P., Lepiller, M., 1998. Oxidation of organic matter in a karstic hydrologic unit supplied through stream sinks (Loiret, France). *Water Research*, 32-7, p. 2051-2064.

Alcaydé G. et al., 1990. Guides géologiques régionaux, Le Val de Loire. Masson.

Andriamahefa, H., 1999. Les hydro-écorégions du bassin de la Loire : Morphologie, hydrologie, pressions anthropiques sur les cours d'eau et les bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Jean Monnet – Saint-Etienne, 287 p.

Arnaud-Fassetta, G., Astrade, L., Bardou, E., Corbonnois, J., Delahaye, D., Fort, M., Gautier, E., Jacob, N., Peiry, J.-L., Piégay, H., Penven M.-J., 2009. Fluvial geomorphology and flood-risk management. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2009, n°2, p.109-128.

Audebert, A., 2000. Interactions sociétés/milieux en val d'Orléans. Mémoire de maîtrise d'archéologie, Université de Tours.

Babillot, P., Margat, J., 1996. Ressources et utilisations de l'eau du bassin de la Loire. Essai de comptabilité régionale de l'eau. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p. 41-46.

Babonaux, Y., 1970. Le lit de la Loire. Etude d'hydrodynamique fluviale. Paris, Bibl. Nat. 240 p.

Bachoc, A., Thépot, R., Camp'huis, N.-G., 1996. Stratégie d'écrêtement des crues en Loire moyenne. Méthode, limites et impacts. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p.63-69.

Bachoc, A., Thépot, R., Mérillon, Y., Lefèvre, J., Camp'huis, N.-G., 2000. Statégie globale de réduction des risques inondation en Loire moyenne. Démarche intégrée de prévention du plan Loire. La Houille Blanche, n°3/4-2000, p. 83-89.

Bader, J.-C., Lemoalle, J., Leblanc, M., 2011. Modèle hydrologique du Lac Tchad. Hydrological Sciences Journal, 56 (3), p.1-15.

Bard, A., Renard, B., Lang, M., 2012. Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin. La Houille Blanche, n°1-2012, p.38-43.

Bazin, P., Gautier, E., 1996. Un espace de liberté pour la Loire et l'Allier : de la détermination géomorphologique à la gestion. In Revue de géographie de Lyon. Vol. 71 n°4, p. 377-386.

Béchet, C., 1983. La crue de la Loire de septembre 1980. Revue de Géographie de Lyon, 1983/4, p.355-368.

Bernard, A., 2010. Impact du changement climatique sur les étiages de la Loire. Evaluation et projections pour le 21ème siècle. Rapport TFE, ENTPE, Cemagref Lyon (unité Hydrologie – Hydraulique), 70p. + annexes.

Berner-Kay, E., Berner, R.-A., 1987. The global water cycle. Geochemistry and environment, Prentice-Hall, London, 394 p.

Bertrand, G., 2009. De la pluie à l'eau souterraine. Apport du traçage naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques (Bassin d'Argnat, Auvergne, France). Thèse d'hydrologie, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 251 p.

Bethemont J., Andriamahefa H., Rogers C., Wasson J.-G., 1996. Une approche régionale de la typologie morphologique des cours d'eau. Application de la méthode "morphorégions" au bassin de la Loire et perspectives pour le bassin du Rhône (France). Revue de géographie de Lyon. Vol. 71 n°4, 1996. pp. 311-322.

Blavoux, B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du Tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes en milieu en hydrologie de la zone tempérée. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, France.

Bocher, E., 2005. Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale : application au bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (22). Thèse de Géographie de l'Université de Rennes.

Bontron, G., Menez, G., Duband, D., Gautier, J.-N., 1999. Application de la méthode du gradex à des grands bassins versants : cas de la Loire au Bec d'Allier (32 000 km²). La Houille Blanche, n°6-1999, p.29-36.

Braque, R., Loiseau, J.-E., 1980.- Les forêts alluviales intéressantes du cours moyen méridien de la Loire et de l'Allier. Colloques phytosociologiques, IX, Strasbourg, p. 601-605.

Bravard, J.-P., 2000. Les extrêmes hydrologiques : handicaps réductibles ou composantes patrimoniales à sauvegarder ? p.5-14. In Bravard, J.-P. (dir.), Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques, gestion des excès et de la pénurie, Sedes, 287 p.

Burnouf J., Carcaud N., 2000. L'homme et les vallées : les vals de Loire de Tours à Angers. Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest, tome 107, numéro 1, p. 7-22.

Camp'Huis, N.-G., 2007. 1856 sur le bassin de la Loire : un évènement hydrologique, hydraulique et humain tout à fait reproductible dans son ampleur spatiale et sa gravité. La Houille Blanche, n°01-2007, p.39-45.

Castanet, C., 2008. La Loire en val d'Orléans. Dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30 000 ans : de l'hydrosystème à l'anthroposystème. Thèse de Doctorat d'Archéologie, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 589 p.

Carcaud, N., 2004. D'espace et de temps : un itinéraire de recherche et d'enseignement sur les anthroposystèmes fluviaux. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches, synthèse scientifique, Université d'Angers, 450 p.

Chambaud, F., Lemaire, E., Oberti, D., 1996. Opération Locale Val de Loire Val d'Allier. Suivi écologique et évaluation des Mesures Agri - Environnementales. Pré-étude écologique et typologie fonctionnelle des prairies, landes et pelouses inondables. Rapport Cellule d'Application en Écologie, Université de Bourgogne pour le compte de la Chambre d'Agriculture de la Nièvre et de la DIREN Bourgogne, 100 p. + annexes.

Chéry, J.-L., 1983. Etude hydrochimique d'un aquifère karstique alimenté par perte de cours d'eau (La Loire) : le système des calcaires de Beauce sous le val d'Orléans. Thèse de Géologie Appliquée (Hydrologie) - Université d'Orléans, U.F.R de Sciences Fondamentales et Appliquées. 205 p.

Chéry, L., Garnier, J., Petelet-Giraud, E., Baraton, A., Ruppert, N., Dray, M., Faillat, J.-P., Michelot, J.-L., Travi, Y., Simler, R., Stievenard, M., Gibert, M., 2004. Projet de mise en place d'une banque de données isotopoqies. Etat d'avancement année 2003. Rapport final. BRGM. 98p.

Civiate, M., Mandel, F., 2008. La mesure de la hauteur des précipitations. Fiche descriptive sur les instruments de mesure météorologique. Version 1.0, décembre 2008. Météo France. 11 p.

Claude, N., 2012. Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo graveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne. Thèse de doctorat de l'Université François Rabelais de Tours.

Clérin, J., Duranton, R., Thépot, R., 1992. Alimentation complémentaire du réservoir de Naussac dans le bassin du Haut-Allier. La Houille blanche, n°2/3-1992, p. 225-230.

Cœur, D., 2004. Les inondations de mai-juin 1856 en France : de l'évènement hydrométéorologique au nouvel engagement de l'Etat. La Houille Blanche, n°5-2004, p.71-79.

Corillion, R., 1982. Flore et végétation du cours de la Loire. Jouve, Paris : 736 et 365 p.

Cornier, T., 2002.- La végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou : essai de modélisation de l'hydrosystème. Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Tours, 227 p.

Cossalter, F., 2009. La Loire, un hydrosystème en intéraction avec les sociétés humaines : irrigation et fonctionnement d'une nappe alluviale. Mémoire de 1ère année de Master de Géographie de l'Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis, 188 p.

Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D., 2005. The hydrological impact of the Mediterranean forest : e review of French research. Journal of Hydrology, 301 (2005), p.235-249.

Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science 133, 1702–1703.

Curie, F., 2006. Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Approche multi-échelle dans le bassin de la Seine. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie, 211 p.

Dacharry, M., 1974. Hydrologie de la Loire en amont de Gien. Publication du Département de Géographie de l'Université de Paris-Sorbonne 1. Nouvelles éditions Latines, Paris, 640 p.

Dacharry, M., 1991. Effets des aménagements anciens. La Houille blanche, n°7/8-1991, p. 523-526.

Dacharry, M., 1996. Les grandes crues historiques de la Loire. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p.47-53.

DDE, Service hydrologique centralisateur du bassin de la Loire, 1975. Les débits de crues de la Loire, La Loire à Gien. 22 pages.

Depret, T., 2006. Evolution morphodynamique de la Loire dans les méandres de Guilly entre 1995 et 2005. Mémoire de master Géographie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 262 p.

Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., Olivry, J.-C., Albergel, J., Amogu, O., Cappelaere, B., Dessouassi, R., Diedhiou, A., Le Breton, E., Mamadou, I., Sighmnou, D., 2009. Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa : a synthesis. Journal of Hydrology, 375 (2009), p.90-102.

Dion, R., 1934. Le Val de Loire : Etude de géographie régionale. Arrault, Tours, 752 p.

Dion, R., 1961. Histoire des levées de la Loire. Paris, 312 p.

Dreal, Centre de gestion des crues et des étiages, 2004. Crue de la Loire de décembre 2003, Premier bilan hydrologique en amont de Villerest. 15 p.

Duband, D., 1996. La génèse des crues dans le bassin de la Loire. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p.54-62.

Duband, D., Schoeneich, P., Stanescu, V. A., 2004. Exemple de l'étiage 1921 en Europe (Italie, France, Roumanie, Suisse, …) : climatologie et hydrologie. La Houille Blanche, n°5-2004, p.18-29.

Duband, D., 2010. Rétrospective hydro-pluviométrique des étiages rares depuis 140 ans, dans l'Ouest de l'Europe (bassins Loire, Seine, Rhin, Rhône, Pô). La Houille Blanche, n°4-2010, p.51-59.

Ducharne, A., Sauquet, E., Habets, F., Deque, M., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Oudin, L., Terray, L., Thiéry, D., Viennot, P., 2011. Evolution potentielle du régimes des crues de la Seine sous changement climatique. La Houille Blanche, n°1-2011, p.51-57.

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration. River Research and Applications, Vol.25, p. 568-581.

EDF, 2013. Centrales nucléaires et environnement, prélèvements d'eau et rejets. 256 p. http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/ebookedfbassedef.pdf

Etablissement Public Loire, 2006. Retour d'expérience sur la crue de 2003. 60 p.

Etablissement Public Loire, 2009. Villerest, un ouvrage de bassin au service des ligériens. http://www.eptb-loire.fr, Plaquette_Villerest-2.pdf, 8 p.

Etablissement Public Loire, 2012. Prévention et réduction du risque inondation. http://www.eptb-loire.fr/PDF/plaquette_savoirfaire_inondation_2012wf.pdf, 20 p.

Etude EGRIAN – Diagnostic, 2008. Le risque d'inondation sur l'agglomération de Nevers. Histoire des grandes crues de la Loire. 18 p.

Etude EGRIAN – Diagnostic, 2008. Le risque d'inondation sur l'agglomération de Nevers. L'ouvrage écrêteur de crues de Villerest et le projet du Veurdre. 5 p.

Ferreira, P., 2011. Etude de faisabilité de l'évacuation du val d'Orléans. Préfecture du Loiret (Direction Départementale des Territoires).

Fette, M., Kipfer, R., Schubert, C. J., Hoehn, E., Wehrli, B., 2005. Assessing river-groundwater exchange in the regulated Rhone River (Switzerland) using stable isotopes and geochemical tracers. Applied Geochemistry, 20 (2005), p.701-712.

Foussard, V., 2009. Evolution hydro-géo-morphologique de l'estuaire de la Seine, au regard des usages passés et présents. Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval, rapport de synthèse, 62 p.

Fustec, E., Lefeuvre, J.-C. (dir.) et al., 2000. Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris, 426 p.

Galéa, G., Mercier, G., Adler, M. J., 1999. Modèles débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionales des régimes de basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France et du Crisu-Alb (Roumanie). Revue des sciences de l'eau, vol. 12, n°1, 1999, p. 93-112.

Garcin, M., Carcaud, N., Gautier, E., Burnouf, J., Castanet, C., Fouillet, N., 2006. Impacts des héritages sur un hydrosystème : l'exemple des levées en Loire moyenne et océanique. In L'érosion entre société, climat et paléoenvironement, Phillipe Allée et Laurent Lespez, p. 225-236.

Garnier, E., 2010. Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes. La Houille Blanche, n°4-2010, p.26-42.

Gautier, E., Piegay, H., Bertaina, P., 2000. A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management : the Loire and Allier rivers case study. Geodynamica Acta, 13/1, p. 29-43.

Gautier, E., Bacchi, M., Barbier, J., Berton, J.-P., Chambaud, F., Couderchet, L., Denis, A., Dieu, N., Grosbois, C., Josselin, D., Kunesch, S., Lewis, N., Moine, A., Négrel, P., Oberti, D., Petelet-Giraud, E., Rousseau, O., De Sede, M.-H., 2001. PNRZH, Rapport final des travaux, La détermination d'un espace de liberté pour le système fluvial ligérien : identification et spatialisation des unités morphodynamiques et écologiques fonctionnelles dans les vals libres et endigués de la Loire, enjeux et acteurs sociaux. 171 p. + annexes.

Gautier, E., 2006. Recherches hydrogéomorphologiques sur le fonctionnement des plaines d'inondation – Approches croisées de trois grandes plaines. HDR, Université Panthéon – Sorbonne, CNRS LGP, 208p.

Gautier, E., Burnouf, J., Carcaud, N., Chambaud, F., Garcin, M., 2007. Les relations entre les sociétés et le fleuve Loire depuis le Moyen-Age. In Trémolières, M., Silan, P. (dir), Protéger, restaurer et gérer les zones alluviales : pourquoi et comment, Lavoisier, p. 83-97.

Gazowski, Z., 1986. Crues au Bec d'Allier. Reconstitution de débits de crues anciennes à Givry, Nevers, Le Veurdre. Etablissement de la loi de fréquences rares pour les crues. Service hydrologique centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, 35 p. + annexes.

Gazowski, Z., 1994. L'enfoncement du lit de la Loire. Revue de Géographie de Lyon, 69/1, p. 41-46.

Gazowski, Z., 1999. Derniers évènements hydrologiques marquant dans le bassin de la Loire (1er trimestre 1999). Etudes ligériennes, Nouvelle Série, 1, 33.

Géohyd, 2004. Etude préalable à l'établissement du SAGE Val Dhuy Loiret.

Geneslay, E., 1972. La Loire, crues et embâcles. Nouvelles Editions Latines, 110 p.

GICC-Rhône, 2005. Auteurs : Boone, A., Habots, F., Martin, E., Etchevers, P., Leblos, E., Ledoux, E., Noilhan, J.. Impacts des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin du Rhône. Rapport final révisé, version courte.

GICC-Seine, 2005. Auteurs : Ducharne, A., Théry, S., Billen, G., Benoit, M., Brisson, N., Garnier, J., Kieken, H., Ledoux, E. Mary, B., Mignolet, C., Mermet, L., Poux, X., Schott, C., Viennot, P., Abu Alkhair, A., Baubion, C., Curie, F., Ducos, G., Gomez, E., Lebonvallet, S., Olive, G.. Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Rapport final, 61 p.

Giuntoli, I., Maugis, P., Renard, B., 2012. Evolutions observées dans les débits des rivières en France. Sélection d'un réseau de référence et analyse de l'évolution temporelle des régimes des 40 dernières années. Onema. 8 p.

Gonzalès, R., 1991. Etude de l'organisation et évaluation des échanges entre la Loire moyenne et l'aquifère des calcaires de Beauce. Thèse de l'Université d'Orléans.

Goutx, D., Reinbold, D., Valette, J.-P., Maurin, J., Ferreira, P., 2011. Prise de décision d'évacuation des populations protégées par une digue lors d'une crue majeure de la Loire, exemple du Val d'Orléans. La Houille Blanche, n°3-2011, p. 29-35.

Grelat, D., 2002. Crues des hauts bassins de la Loire : modélisation géographiquement distribuée, Mike SHE : évaluation et perspectives. Thèse de doctorat d'Hydrologie, Université Paris 6. 350 pages

Grivel, S., 2008. La Loire des îles du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion. Thèse de doctorat de Géographie et Aménagement, Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis. 504 pages + annexes.

Groleau, A., Harrault, L., Viollier, E., Gaillard, A., Pepe, M., Benedetti, M., 2007. Variabilité temporelle du pH et du système CO2 carbonate dans la Seine à Paris. Rapport d'activité 2007, Piren Seine, 17 p.

Grosbois, C., 1998. Géochimie des eaux de la Loire : contributions naturelles et anthropiques, quantification de l'érosion. Thèse de doctorat de Sciences de la Terre de l'Université de Tours, 232 p.

Grosbois, C., Négrel, P., Fouillac, C., Grimaud, D., 2000. Dissolved load of the Loire River: chemical and isotopic characterization. Chemical Geology, 170 (2000), p.179-201.

Guérin, L., 1996. Etude morphodynamique de la Loire dans les méandres de Guilly (Loiret). Mémoire de master de Géographie de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 230 p.

Halbecq, W., 1996. Approche géomorphologique des brèches dans les levées de la Loire. Mémoire de DEA, Université d'Orléans.

Joigneaux, E., 2011. Etat qualitatif des eaux de la nappe du Val d'Orléans : Impact du changement climatique et gestion durable de la ressource. Thèse de doctorat de Sciences de la Terre de l'Université d'Orléans, 381 p.

Laganier, R., Arnaud-Fassetta, G. (dir.) et *al*., 2011. Les géographies de l'eau. Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème. L'Harmattan, collection Itinéraires géographiques, 298 p.

Lalot, E., Curie, F., Wawrzyniak, V., Baratelli, F., Schomburgk, S., Flipo, N., Piegay, H., Moatar, F., 2015. Quantification of the contribution of the Beauce groundwater aquifer to the discharge of the Loire River using thermal infrared satellite imaging. Hydrology and Earth System Sciences, n°19, p. 4479-4492.

Lang, C., 2007. Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de l'Université Paul Verlaine de Metz, 300 p. + annexes.

Lang Delus, C., 2011. Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. Cybergeo : European Journal of Geography [Online], Environment, Nature, Landscape, document 571, online since 30 November 2011.

Lang, M., Naulet, R., Recking, A., Coeur, D., Gigon, C., 2002. Etude de cas : l'analyse des pluies et crues extrêmes observés depuis 200 ans dans un bassin cévenol, l'Ardèche. La Houille Blanche, n°6/7-2002, p. 131-138.

Lang, M., Renard, B., 2007. Analyse régionale sur les extrêmes hydrométriques en France : détection de changements cohérents et recherche de causalité hydrologique. La Houille Blanche, n°6-2007, p.83-89.

Larousse, I., 1998. Etude d'une plaine alluviale de la Loire dans les méandres de Guilly (Loiret) : évolution du paysage et de la végétation, leurs relations avec la dynamique fluviale de formation du méandre. 151 p.

Larue, J.-P., 1999. L'évolution morphodynamique de la vallée inférieure de l'Allier, de Varennes-sur-Allier au Bec d'Allier (Sud du Bassin Parisien). Géologie de la France, n°2-1999, p.55-63.

Larue, J.-P., Giret, A., 2004. L'assèchement de cours d'eau dans le bassin de la Maine entre 1989 et 1992. Norois, Environnement, aménagement, société. N°192, 2004/3 : La Loire. Sociétés, risques, paysages, environnement, p.117-133.

Larue, J.-P., 2008. Profils longitudinaux des cours d'eau et tectonique : l'exemple du bassin de l'Aumance (Massif Central, France). Norois, n°207, 2008/2, p.71-84.

Larue, J.-P., 2009, Etude morphologique et dynamique des têtes de vallon en milieux forestiers et cultivés : exemple dans le nord du Massif central français. Norois, n°212, 2009/3, p.53-68.

Lavrieux, M., 2011. Biomarqueurs moléculaires d'occupation des sols, du sol au sédiment : exemple du bassin versant et du lac d'Aydat (Puy-de-Dôme). Thèse de l'Université François Rabelais de Tours, 210p. + annexes.

Lefèvre, J., 1974. Le soutien des étiages en Loire à l'aide de réservoirs situés dans le haut bassin. Application au barrage de Naussac. La Houille blanche, n°4/5-1974, p. 271-278.

Lelong, F., Jozja, N., 2008. Fonctionnement du système karstique du Val d'Orléans : les acquis, les interrogations. Actes des journées techniques du Comité Français de l'Association Internationale des hydrogéologues « Hydrogéologie et Karst au travers des travaux de Michel Lepiller », 16-17 mai 2008, p. 107-116.

Lemoalle, J., Bader, J.-C., Leblanc, M., Sedick, A., 2010. L'évolution récente du Lac Tchad : contexte général et données de base. Forum Mondial pour le Développement Durable « Pour la sauvegarde du Lac Tchad », 31 octobre 2010.

Lepiller, M., 2006. Aquifères et eaux souterraines de France. Tome 1, III, 6. Val d'Orléans. Edition BRGM, p. 200 à 214.

Lepiller, M., Leclerc, B., Albéric, P., Boismoreau, P., 2000. Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans.

Lescure, S., Arnaud-Fassetta, G., Cordier, S., 2011. Sur quelques modifications hydromorphologiques dans le Val de Seine (Bassin parisien, France) depuis 1830 : quelle part accorder aux facteurs hydrologiques et anthropiques ? EchoGéo, n° 18-2011, 16p.

Leteinturier, B., Engels, P., Petit, F., Chiffaut, A., Malaisse, F., 2000. Morphodynamisme d'un tronçon de Loire bourbonnaise depuis le XVIII^{ème} siècle. Géomorphologie : relief, processus, environnement, octobre-décembre, vol.6, n°4, p.239-251.

L'Hermitte, E., 1996. EDF et la Loire : 50 ans d'histoire commune. La Houille blanche, n°6/7-1996, p. 92-97.

Lino, M., Mériaux, P., Royet, P., 2000. Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne. Cemagref Editions, 232 p.

Lins, H.F., Slack, J.R., 1999. Streamflow trends in the United States. Geophys. Res. Lett. 26, 227.

Lioeddine, A., 2010. Etude hydrodynamique des échanges hydriques entre la Loire et la nappe alluviale au niveau du méandre de Guilly. Mémoire de 2ème année de Master de Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Pars Sud – Orsay, 49 p.

Llasat, M. d. C., Barriendos, M., Rigo, T., 2002. L'analyse de la fréquence et de l'occurrence temporelle des fortes precipitations d'origine méditerranéenne, causes de crues rares en Espagne et dans le Sud de la France. La Houille Blanche, n°6/7-2002, p.139-144.

Loiseau, J.-E., Felzines, J.-C., 1995. Étude, évaluation et évolution de la végétation naturelle du cours oriental de la Loire. C.R. Acad. Agric. Fr., 81 (1), p. 83-98.

Mahé, G., Olivry, J.-C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F., Servat, E., 2000. Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. Earth and Planetary Sciences, 330 (2000), p.698-692.

Mahé, G., Paturel, J.-E., 2009. 1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. Geoscience 341 (2009) p.538-546.

Malavoi, J.-R., Andriamahefa, H., 1993, modifié en 1996. Eléments pour une typologie morphologique des cours d'eau du bassin de la Loire, E.P.T.E.A.U. et Cémagref Lyon B.E.A./L.H.Q. Rapport d'étape, 48 p + annexes.

Malavoi, J.-R., Gautier, J.-N., Ginestet, P., 1999. Découpage géomorphologique de la Loire entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine. Études Ligériennes, Nouvelle série (1) : p. 19-26.

Manickam, S., Barbaroux, L., Ottmann, F., 1985. Composition and mineralogy of suspended sediment in the fluvio-estuarine zone of the Loire river, France. Sedimentology 32, p. 721-741.

Manoha, B., Hendrickx, F., Dupeyrat, A., Bertier, C., Parey, S., 2008. Impacts des évolutions climatiques sur les activités d'EDF (projet impec). La Houille Blanche, n°02-2008, p.55-60.

Martin, E., Etchevers, P., 2002. Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale, les avalanches. La Houille blanche, n°8-2002, p.84-88.

Martonne, E. De, 1942. Géographie physique de la France. Armand Colin.

Mathevet, T., Perret, C., Garçon, R., Periers, P., Goutx, D., Gibey, J.-M., Oudin, R., Xhaard, H., Roy, J.-L., 2010. Modèles de prévision et prise de décision pour le soutien d'étiage de la Loire. La Houille blanche, n°5-2010, p. 40-51.

Mercier, G.X., Galéa, G., 1996. Transposition du concept QdF crue à la régionalisation des régimes d'étiage du bassin versant de la Loire (France) et du Crisu-Alb (Roumanie). Cemagref (groupement de Lyon), ENGEES (Ecole Nationales du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg).

Meybeck, M., 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Sci. Géol. Bull., 39, p.3–77.

Meybeck, M., de Marsily, G., Fustec, E., 1998. La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Editions scientifiques et médicales Elsevier, 749 p.

Miéjac, E., 1997. Passer la Loire, ponts, bacs et gués au fil du fleuve autour de la boucle d'Orléans. Les lieux de franchissement de la Loire de Cosne-sur-Loire à Chaumont-sur-Loire aux

époques médiévales et modernes. Thèse de doctorat d'archéologie, Université Paris I Panthéon-Sorbonne.

Mignot, J.-F., Lefèvre, J., 1996. La problématique des étiages. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p.85-87.

Millot, R., Petelet-Giraud, E., Guerrot, C., Négrel, P., 2010. Multi-isotopic composition (δ^7Li-δ^{11}B-δ^{18}O) of rainwater in France: origin and spatio-temporal characterization. Applied Geochemistry 25 (2010) 1510-1524.

Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., 2000. Wetlands, third edition. Jonh Wiley & Sons, Inc, 920 p.

Moatar, F., Fessant, F., Poirel, A., 1999. pH modelling by neural networks. Application of control and validation data series in the Middle Loire river. Ecological Modelling 120, p.141-156.

Moatar, F., Meybeck, M., Poirel, A., 2009. Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance à long terme : exemple de la Loire moyenne. La Houille Blanche, Société Hydrotechnique de France, 2009, p.91-99.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E., Vidal, J.-P., 2010. La Loire à l'épreuve du changement climatique. Géosciences, n°12, p.78-87.

Moisselin, J.-M., Schneider, M., 2002. Homogénéisation des séries françaises de précipitations couvrant le 20ème siècle. La Houille Blanche, N° 6/7, p.126-130.

Monteil, C., 2011. Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Thèse de doctorat d'Hydrologie et Hydrogéologie quantitatives de l'Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 262 p.

Moreau, F., 2004. Gestion des étiages extrêmes : cas de la Loire. La Houille blanche, n°4-2004, p. 70-76.

Moulin, L., 2009. Prévisions des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Applications aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques. Thèse de doctorat d'Agro Paris Tech, spécialité Sciences de l'eau. 294 pages + annexes.

Nabaz, M., 2014. Investigating the behavior of alluvial systems thanks to the classical, isotopic and emerging tracers. Case study of the alluvial aquifer of the Allier River (Auvergne, France). Université de Clermont-Ferrand.

Nabet, F., 2013. Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée.

Thèse de doctorat de Géographie et Aménagement de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

Négrel, P., 1997.Traçage des apports anthropiques sur un petit bassin versant : utilisation des rapports isotopiques du strontium, des éléments majeurs et traces. Académie des Sciences, t.324, série II a, 1997, p. 907 – 914.

Négrel, P., Fouillac, C., Brach, M., 1997. Occurrence of mineral water springs in the stream channel of the Allier River (Massif Central, France): chemical and Sr isotope constraints. Journal of Hydrology, 203 (1997), p.143-153.

Négrel, P., Barbier, J., Petelet-Giraud, E., 2001. Caractérisation géochimique et isotopique des relations eaux de surface – eaux souterraines de la zone humide de la Loire au niveau du Bec d'Allier. BRGM/RP-50668-FR, 67 p.

Négrel, P., Petelet-Giraud, E., Barbier, J., Gautier, E., 2003. Surface water-groundwater interactions in an alluvial plain: chemical and isotopic systematic. Journal of Hydrology, 277 (2003), p.248-267.

Négrel, P., Petelet-Giraud, E., 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). Journal of Hydrology, 305 (2005), p.99-119.

Neppel, L., Bouvier, C., Vient, F., Desbordes, M., 2003. Sur l'origine de l'augmentation apparente des inondations en région méditerranéenne. Revue des Sciences de l'Eau, 16/3(2003), p.475-494.

Ochoa-Salazar, B.-X., 2008. Etude conjuguée géochimique/hydrologique des relations nappe-rivière dans une zone humide: cas de la zone humide alluviale de Monbéqui, France. Thèse de doctorat d'hydrogéochimie de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier, 215 p.

Ogrinc, N., Kanduc, T., Stichler, W., Vreca, P., 2008. Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}O$ and δD values in the River Sava in Slovenia. Journal of Hydrology (2008) 359, p.303-312.

Païen, P.-Y., 2006. Evaluation du fonctionnement du méandre de Guilly (Loiret). Rapport de stage Master 2 Pro, Université Angers, 43 p. + annexes.

Pardé, M., 1964. Etudes potamologiques sur la Loire et ses affluents. Norois, Poitiers, n°44 bis, 183 p.

Petelet-Giraud, E., Négrel, P., Gourcy, L., Schmidt, C., Schirmer, M., 2007. Geochemical and isotopic constraints on groundwater-surface water interactions in a highly anthropized site. The Wolfen/Bitterfeld megasite (Mulde subcatchment, Germany). Environmental Pollution, 184 (2007), p.707-717.

Pichard, G., 1995. Les crues sur le bas Rhône de 1500 à nos jours. Pour une histoire hydro-climatique. Méditerranée, Tome 82, 3-4-1995, Les origines de Marseille, Environnement et archéologie, p.105-116.

Pointet, T., 2004. Les relations nappes-rivières, observations à partir des étiages de petites rivières. La Houille Blanche, n°4-2004, p.87-91.

Poitrineau, A., 1996. L'histoire de la Loire de la Guerre de cent ans à nos jours. La Houille Blanche, n°6/7-1996, p. 15-19.

Pushpalatha, R., 2013. Low-flow simulation and forecasting on Frech river basins: a hydrological modelling approach. Thèse d'hydrologie, AgroParisTech, 172p. + annexes.

Ramond, S., 2006. Diagnostic fonctionnel d'une zone humide : l'exemple du Gour des Fontaines (Vallée de la Loire, Nièvre). Propositions de gestion. Mémoire de master de Géographie de l'Université Paris 8 Vincennes – Saint-Denis, 120 pages.

Raymond, P.A., Cole, J.J., 2003. Increase in the export of alkalinity from North America's largest river. Science 301, 88.

Reinbold, D., Maurin, J., 2008. Niveaux de crue et évacuation du val d'Orléans. Diren Centre.

Renard, B., 2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de l'INP Grenoble, spécialité Océan, atmosphère, hydrologie, 364 p.

Rode, S., 2010. De l'aménagement au ménagement des cours d'eau : le bassin de la Loire, miroir de l'évolution des rapports entre aménagement fluvial et environnement. Cybergeo, European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, article 506, 19 p.

Rodrigues, S., 2004. Dynamique sédimentaire et végétation : évolution de chenaux fluviatiles en Loire moyenne (France), thèse 3ème cycle, Université de Tours.

Rodrigues, S., Bréhéret, J.-G., Moatar, F., Macaire, J.-J., 2005. Impact des crues sur les bilans sédimentaires de chenaux secondaires de la Loire moyenne (France). Geoscience n°337, p. 487–495.

Rossi, A., Massei, N., Laignel, B., Sebag, D., Copard, Y., 2009. The response of the Mississippi River to climate fluctuations and reservoir construction as indicated by wavelet analysis of streamflow and suspended-sedimend load, 1950-1975. Journal of Hydrology, 377 (2009), p.237-244.

Russo, T. A., Fisher, A., T., Roche, J. W. Improving riparian wetland conditions based on infiltration and drainage behavior during and after controlled flooding. Journal of Hydrology, 432-433 (2012), p.98-111.

Sainjon, H., 1864. De l'annonce des crues dans le bassin de la Loire. Orléans.

Sainjon, H., 1888. La Loire, le Loiret et les courants souterrains du Val d'Orléans.

Salhi, H., 2012. Etude des relations nappe-rivière dans le méandre de Guilly (Loire). Mémoire de 1ère année de Master Sciences de la Terre et de l'Univers, Université Paris Sud – Orsay, 33 p.

Schilling, K. E., Chan, K.-S., Lui, H., Zhang, Y.-K., 2010. Quantifying the effect of land use land cover change on increasing discharge in the Upper Mississippi River. Journal oh Hydrology, 387 (2010), p.343-345

Schnitzler, A, 1995.- Les forêts alluviales des lits majeurs de l'Allier etde la Loire moyenne entre Villeneuve/Allier et la Charité/Loire. Etude phytosociologique, diagnostic de naturalité et propositions de renaturation. Loire Nature : 31 p.

Schulé, C.-A., 2000. Les situations critiques dans la gestion de la Loire et de son bassin. p. 232-246. In Bravard, J.-P. (dir.), Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques, gestion des excès et de la pénurie, Sedes, 287 p.

Sherwood, W.C., 1989. Chloride loading in the South Fork of the Shenandoah River, Virginia, USA. Environ. Geol. Water Sci., 14, 2, p.99-106.

SOGREAH (ingénieurs conseils), 1988. Etudes des écoulements de crues de la Loire entre le Bec d'Allier et Briare. 52 pages + annexes.

Staron, G., 1981. Hydrologie : la crue des 21 et 22 septembre 1980 sur le bassin de la Loire supérieure. Revue de Géographie de Lyon, 1981/1, p.49-74.

Temam, S., 2012. Stratégie de gestion du risque inondation, ouvrages d'art et ingénieurs, en Loire nivernaise depuis le 18ème siècle. Thèse de doctorat Géographie et Aménagement de l'Université de Paris 8 Vincennes – Saint-Denis.

Thuillier, J.-L., 1969. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la Loire moyenne entre Gien et Cosne-sur-Loire. Thèse d'ingénieur du Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.

Tombozafy, M., 2011. Méthodologie de l'analyse de l'enfoncement du lit mineur d'un fleuve : approche combinée, modélisation hydraulique-géochimie. Application à la Loire forézienne (France). Thèse de doctorat de Sciences et Génie de l'Environnement de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, 225 p.

Tukey, J. W., 1977. Exploratory data analysis.

Verbunt, M., Groot Zwaaftink, M., Gurtz, J., 2005. The hydrologic impact of land cover changes and hydropower stations in the Alpine Rhine basin. Ecological Modelling, n°187(2005), p.71-84.

Wasson, J.-G., Bethemont, J., Degorce, J.-N., Dupuis, B., Joliveau, T., 1993. Approche écosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase 1 : État Initial – Problématique / Rapport d'étape, CEMAGREF : 102 et 81 p.

Wasson, J.-G., 1996. Structures régionales du bassin de la Loire. La Houille blanche, n°6/7-1996, p.25-31.

Wasson, J.-G., Chandresris, A., Pella, H., Souchon, Y., Nappey, E., 2001. Définition des hydroécorégions françaises. Méthodologie de détermination des conditions de référence au sens de la Directive cadre pour la gestion des eaux. Rapport de phase 1. 35p. + annexes.

Weng, P., 2000. Fonctionnement hydrologique d'une zone humide alluviale, relations avec l'aquifère sous-jacent et les rivières. Exemple de la Seine moyenne. Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie. 202 pages.

Woessner, W. W., 2000. Stream and fluvial plain ground water interactions: rescaling hydrogeologic thought. Ground Water, 38, p.423-429.

Zhang, Y.-K., Schilling, K. E., 2006. Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940's: effect of land use change. Journal of Hydrology, 324 (2006), p.412-422.

Zunino, C., 1979. Contribution à l'étude hydrogéologique du val d'Orléans (établissement d'un modèle mathématique de simulation de nappe). Thèse, Université d'Orléans.

http://www.berryprovince.com

http://www.developpement-durable.gouv.fr

http://www.eau-loire-bretagne.fr

http://www.eptb-loire.fr/

http://www.etude-egrian.fr

http://www.europe-centre.eu/

http://dagi.pagesperso-orange.fr/page-inondation-loire.html

http://infoterre.brgm.fr/

http://www.lthe.fr/RIWER2030/CaseStudies.html

http://www.zones-humides.eaufrance.fr

Table des figures

Introduction :

Fig. 1. Bassin versant de la Loire 4

Fig. 2. La Loire dans tous ses états 5

Fig. 3. Quelques vues des usages et paysages au sein de l'hydrosystème anthropisé ligérien 7

Fig. 4. Répartition géographiques et répartition par usages des prélèvements annuels moyens calculés à partir des données partielles disponibles des années 1998 à 2011 11

Fig. 5. Limites du bassin versant de la Loire au Bec d'Allier, à Blois et au Bec de Vienne 15

Fig. 6. Les différents secteurs de la Loire amont contribuant à la formation des débits de la Loire au Bec d'Allier 16

Fig. 7. Bassins étudiées et leurs stations de jaugeage 17

Fig. 8. Méandre de Guilly et puits faisant l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique 20

Fig. 9. Synthèse des objectifs et méthodes de la thèse 22

Chapitre 1 :

Fig. 10. Les hydro-écorégions du bassin de la Loire 28

Fig. 11. Relief du bassin versant de la Loire 31

Fig. 12. Carte géologique du bassin versant de la Loire extraite de la carte géologique de la France au 1/1000000 31

Fig. 13. Carte lithologique du bassin versant de la Loire 32

Fig. 14. Carte des précipitations du bassin versant de la Loire 32

Fig. 15. Principales lignes de relief et trajectoires les plus fréquentes des vents dans le bassin amont de la Loire 33

Fig. 16. Relations précipitations / écoulements au sein du bassin de la Loire 34

Fig. 17. Carte des écoulements moyens annuels dans le bassin de la Loire amont 36

Fig. 18. Situation des principales stations de jaugeauge de la zone d'étude 37

Fig. 19. Répartition et importance relative des apports au fil de la Loire 38

Fig. 20. Débits moyens mensuels pour différentes stations de jaugeage en Loire amont et moyenne 40

Fig. 21. Débits moyens annuels de la Loire et de ses principaux affluents 42

Fig. 22. Débit moyen minimal annuel calculé sur 3 jours consécutils (VCN3) de la Loire à Gien 44

Fig. 23. Chronologie des crues en Loire moyenne depuis 1846 45

Fig. 24. Histogramme de fréquence des plus grandes crues de la Loire comparé au régime moyen global à Gien entre 1825 à 1970 46

Fig. 25. Débits moyens mensuels en Loire moyenne en quatre stations hydrométriques (Givry, Gien, Orléans et Blois) 49

Fig. 26. Carte des circulations karstiques du Val d'Orléans 51

Fig. 27. Perte en bordure de Loire à Jargeau 52

Fig. 28. Fontis (ou avens) à Jargeau 52

Fig. 29. Lithologie du substratum de la plaine alluviale orléanaise 53

Fig. 30. Localisation du site du méandre de Guilly (Loiret) 55

Fig. 31. Pente de la plaine alluviale de la Loire au sein des vals de Loire orléanais 55

Fig. 32. Coupe schématique du Val de Loire aux environs d'Orléans 56

Fig. 33. Extrait de la carte géologique au 1/50000 de Châteauneuf-sur-Loire 56

Fig. 34. Connectivités actuelles de la Loire avec sa plaine alluviale dans le secteur du méandre de Guilly 58

Chapitre 3 :

Fig. 35. Situation des stations de jaugeage 84

Fig. 36. Situation des stations de Météo France dont les données ont été homogénéisées et tronçons de référence de ces stations sur la Loire et ses affluents 92

Fig. 37. Moyennes mobiles sur période de 5 ans des cumuls annuels des précipitations pour chaque station, répartition en trois secteurs géographiques 96

Fig. 38. Situation des centrales nucléaires implantées le long de la Loire moyenne et des barrages de Naussac et Villerest en Loire amont 103

Fig. 39. Evolution du volume de la retenue de Villerest depuis 1983 107

Fig. 40. Evolution du volume de la retenue de Naussac depuis 1981 107

Fig. 41. Moyenne interannuelle du volume des retenues de Naussac (1983-2011) et de Villerest (1985-2011) 107

Fig. 42. Situation des deux grands barrages du bassin de la Loire et des stations de jaugeage utilisées ……109

Fig. 43. Débits moyens annuels pour les stations de Vieille-Brioude (Allier), Villerest (Haute Loire) et Gien (Loire moyenne) ……111

Fig. 44. Débits moyens mensuels avant et après la mise en service des deux grands barrages pour l'Allier à Vieille-Brioude, et la Loire à Bas-en-Basset, à Villerest et à Gien ……113

Fig. 45. Comparaison des débits moyens mensuels mesurés et des « débits naturels reconstitués » pour la période de 1989 à 2011 ……115

Fig. 46. Moyennes mobiles de période 5 ans des chroniques de températures maximales et minimales annuelles ……118

Fig. 47. Evolutions des pentes des droites de régression linéaire des chroniques des maxima et des minima annuels de températures en fonction du temps, calculées pour des périodes de 30 ans ……120

Fig. 48. Moyennes mobiles sur période de 5 ans des cumuls annuels de précipitations pour les stations météorologiques regroupées et moyennées par zone géographique ……121

Fig. 49. Evolutions des pentes des droites de régression linéaire des cumuls annuels de précipitations, regroupés par zones géographiques, en fonction du temps, par périodes de 30 ans ……123

Fig. 50. Débits moyens annuels au sein du bassin de la Loire ……125

Fig. 51. Analyse spectrale des chroniques de débits moyens annuels de la Loire, de l'Allier et de l'Arroux ……127

Fig. 52. Maxima des pics de puissance supérieurs à 4, en fonction de la durée des cycles identifiés dans les débits moyens annuels de six stations hydrométriques du bassin de la Loire ……127

Fig. 53. Mise en évidence d'alternance de périodes plus ou moins humides à partir des moyennes mobiles de période 5 ans des débits moyens annuels ……128

Fig. 54. Corrélations entre les données climatiques et les débits moyens annuels de la Loire à Blois ……129

Fig. 55. Analyse spectrale des cumuls annuels de précipitations à Châteauneuf-de-Randon (haut Allier) ……131

Fig. 56. Analyse spectrale des minima et maxima annuels de températures à Clermont-Ferrand (bassin de l'Allier), Chadrac et Andrézieux-Bouthéon (bassin de la haute Loire) ……131

Fig. 57. Moyennes mobiles par périodes de 5 ans des cumuls annuels moyens de précipitations des différentes stations de chaque secteur géographique ……132

Fig 58. Moyennes mobiles de période 5 ans des VCN3 annuels de la Loire, de l'Allier (Vieille-Brioude) et de l'Arroux (Etang-sur-Arroux) ……134

Fig. 59. Evolutions des VCN3 annuels pour la Loire à Bas-en-Basset et Blois et à Etang-sur-Arroux pour l'Arroux ……135

Fig. 60. Boîtes à moustaches caractérisant les chroniques de VCN3 pour les stations de Bas-en-Basset et Blois pour la Loire et Etang-sur-Arroux pour l'Arroux ……137

Fig. 61. Recherche de corrélations entre les VCN3 de la Loire à Blois et les longues chroniques de données climatiques ……138

Fig. 62. Absence de corrélation entre les VCN3 de la Loire et l'occurrence des débits à pleins bords à Blois ……138

Fig. 63. Moyennes mobiles de période 5 ans des maxima de débits pour la Loire à Bas-en-Basset, à Villerest, à Gien et à Blois, pour l'Allier à Vieille-Brioude et pour l'Arroux à Etang-sur-Arroux ..139

Fig. 64. Maxima des débits de la Loire à Bas-en-Basset, Villerest et Blois ……140

Fig. 65. Boîtes à moustaches caractérisant des périodes de trente ans de la chronique des maxima des débits de la Loire à Blois ……142

Fig. 66. Boîtes à moustaches caractérisant des périodes de trente ans des chroniques des maxima de débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest ……142

Fig. 67. Evolutions entre 1863 et 2009 des pourcentages, par mois, des occurrences des maxima de débits de la Loire à Blois ……144

Fig. 68. Absence de corrélation entre les maxima de débits de la Loire à Blois et les données de précipitations ……144

Fig. 69. Illustrations des indices hydrologiques qui caractérisent les basses-eaux ……146

Fig. 70. Limites des indices des dates de début et de fin des basses-eaux ……147

Fig. 71. Nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à la station de Blois ……149

Fig. 72. Boîtes à moustaches caractérisant les périodes de trente ans de la chronique du nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à Blois ……149

Fig. 73. Déficit de volume de la Loire en période de basses-eaux à Blois ……150

Fig. 74. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les périodes de trente ans de la chronique du déficit annuel de volume de basses-eaux de la Loire à Blois ……151

Fig. 75. Occurrence des basses-eaux (indices des dates de début et de fin d'étiage) à Blois de 1863 à 2010 ……153

Fig. 76. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les trois indices (dates de début, de milieu et de fin des basses-eaux) définissant l'occurrence des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……154

Fig. 77. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de début des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……155

Fig. 78. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de milieu des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……156

Fig. 79. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de fin des basses-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……157

Fig. 80. Evolutions des déficits de volume de basses-eaux entre les périodes 1952-1981 et 1982-2010, à Blois et à Gien ……158

Fig. 81. Illustration des indices hydrologiques qui caractérisent les hautes-eaux ……163

Fig. 82. Limites des indices des dates de début et de fin des hautes-eaux ……164

Fig. 83. Evolution du nombre de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois ……165

Fig. 84. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jours de hautes-eaux de la Loire à Blois ……165

Fig. 85. Evolution de l'excédent de volume par rapport au débit-seuil de 550 $m^3.s^{-1}$ en période de hautes-eaux de la Loire à Blois ……167

Fig. 86. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le volume excédentaire par rapport au débit-seuil de 550 $m^3.s^{-1}$ en période de hautes-eaux de la Loire à Blois ……167

Fig. 87. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les trois indices (dates de début, de milieu et de fin) définissant l'occurrence des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……168

Fig. 88. Occurrence des hautes-eaux de la Loire (indices des dates de début et de fin) à Blois de 1863 à 2010 ……169

Fig. 89. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de début des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……170

Fig. 90. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de milieu des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……171

Fig. 91. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant les dates de fin des hautes-eaux de la Loire à Blois entre 1863 et 2010 ……172

Fig. 92. Nombre de jours par an où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$ 175

Fig. 93. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jour où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$ entre 1863 et 2011 176

Fig. 94. Occurrences mensuelles des débits à pleins bords, à Blois, rapportées à leur total sur la période de trente ans considérés, entre 1863 et 2011 177

Fig. 95. Nombre de jours où les débits moyens journaliers de la Loire à Blois dépassent le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$ entre les mois de décembre d'une année n-1 et de mars de l'année n (les quatre mois où de tels débits sont les plus fréquents) 178

Fig. 96. Définitions statistiques et boîtes à moustaches caractérisant le nombre de jour où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse le seuil de 1000 $m^3.s^{-1}$ entre le mois de décembre d'une année n-1 et celui de mars de l'année n 178

Fig. 97. Nombre de jours entre les mois de juillet et septembre où le débit moyen journalier de la Loire à Blois dépasse les 1000 $m^3.s^{-1}$ 179

Fig. 98. Tendances détectées à l'échelle de la France métropolitaine pour quatre indices hydrologiques : sévérité des étiages, précocité des étiages, moyenne annuelle du débit et maximum annuel du débit 184

Chapitre 4 :

Fig. 99. Affluents drainant le Massif du Morvan et stations de jaugeage de l'Arroux 187

Fig. 100. Situation des stations de mesure de débits et sites de prélèvements sur la Loire et ses affluents 189

Fig. 101. Résultats des tests d'homogénéité des tranches d'eau des différents sites de prélèvements, basés sur la conductivité électrique et le pH 190

Fig. 102. Particularités hydrologiques des années 2009 et 2010 au sein du bassin de la Loire 192

Fig. 103. Courbes des débits classés pour les années 2009 et 2010 193

Fig. 104. Débits de la Loire à Gien et dates de prélèvements entre juillet 2009 et janvier 2012 ...194

Fig. 105. Illustration du protocole de prélèvement des eaux de la Loire et de ses affluents 195

Fig. 106. Sonde multi-paramètres Horiba et son système d'étalonnage 196

Fig. 107. Kit de prélèvement, bidon de 500 ml et bouteille en verre ambré pour l'analyse des isotopes 196

Fig. 108. Unité de filtration avec sa pompe à vide et kit de mesure de l'alcalinité 197

Fig. 109. Bilan ionique des échantillons prélevés dans la Loire, l'Allier et l'Arroux ……199

Fig. 110. Isolignes de la composition isotopique moyenne annuelle de ^{18}O des précipitations en France ……201

Fig. 111. Composition isotopique des précipitations à Sayat (Massif Central) et à Orléans (Loire moyenne) ……202

Fig. 112. Composition isotopique des précipitations, à Saint-Brisson, dans le Massif du Morvan ……202

Fig. 113. Diagramme de Piper réunissant les résultats de l'ensemble des prélèvements effectués dans la Loire et ses affluents ……206

Fig. 114. Moyennes sur une année hydrologique (2009 - 2010), moyennes des eaux d'été (2009 – 2011) et moyennes des eaux d'hiver (2009 - 2012) de la conductivité électrique, du pH et de la concentration en éléments majeurs pour chaque site de prélèvements ……207

Fig. 115. Abondance des éléments majeurs dans les eaux de la Loire et de ses affluents ……209

Fig. 116. Relation Na^+ / Cl^- dans les eaux de la Loire et de ses affluents ……210

Fig. 117. Evolutions de la conductivité électrique, du pH et de la concentration en éléments majeurs dans les eaux de la Loire et de ses principaux affluents, et relations entre ces paramètres et les débits :

a : Conductivité électrique ……218
b : pH ……219
c : HCO_3^- … ……220
d : Ca^{2+} ……221
e : Cl^- ……222
f : SO_4^{2-} ……223
g : Na^+ ……224
h : Mg^{2+} ……225
i : K^+ ……226
j : SiO_2 ……227
k : NO_3^- ……228

Fig. 118. Saisonnalité des moyennes journalières de pH (1990-2005) de la Loire à Avoine (entre Tours et Angers) ……231

Fig. 119. Evolutions de l'indice de saturation de la calcite des eaux de la Loire et de ses affluents, en fonction du temps et des débits ……235

Fig. 120. Relation Ca^{2+} / HCO_3^- dans les eaux de la Loire et de ses affluents ……236

Fig. 121. Moyennes sur une année hydrologique (2009-2010), moyennes des eaux d'été (2009 - 2011) et moyennes des eaux d'hiver (2009 - 2012) des valeurs $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ pour chaque site de prélèvements ……241

Fig. 122. Evolutions de la signature isotopique des eaux de la Loire et de ses principaux affluents, en fonction du temps et des débits :

a : $\delta^{18}O$ ……242

b : $\delta^{2}H$ ……243

Fig. 123. Comparaisons des teneurs isotopiques des précipitations avec celles de la Loire et de ses affluents aux différents sites de prélèvements ……245

Fig. 124. Signatures isotopiques des eaux de la Loire et de l'Allier à leur confluence pour différentes classes de débits ……254

Fig. 125. Comparaison entre la somme des débits de la Loire à Nevers et de l'Allier à Cuffy (somme des apports amont) et le débit de la Loire à l'aval de sa confluence avec l'Allier, à Gien ……257

Fig. 126. Influence des apports locaux dans les eaux de la Loire à La Charité-sur-Loire, à l'aval de la confluence Loire – Allier ……259

Fig. 127. Importance des apports du Morvan dans les débits de la Loire à Imphy pour différentes gammes de débits de la Loire à Gien ……268

Fig. 128. Moyennes des coefficients d'abondance mensuelle en Loire bourbonnaise (1970-2011) ……273

Fig. 129. Synthèse des débits moyens mensuels en Loire bourbonnaise et de la proportion des différents apports par rapport au débit de la Loire à Nevers (1970-2011) ……274

Fig. 130. Mélanges des apports de la haute Loire, du Morvan et de l'Allier à l'entrée de la Loire moyenne à partir des rapports isotopiques (a, c, e) et des concentrations des chlorures (b, d, f), pour différentes gammes de débits de la Loire à Gien :

a et b : $Q < 150\ m^3.s^{-1}$ à Gien ……276

c et d : $150 < Q < 500\ m^3.s^{-1}$ à Gien ……277

d et e : $Q > 500\ m^3.s^{-1}$ à Gien ……278

Chapitre 5 :

Fig. 131. Situation du méandre de Guilly en Loire moyenne ……290

Fig. 132. Diversité des habitats au sein du méandre de Guilly en 2006 ……291

Fig. 133. Toponymie des principales entités du méandre de Guilly ……293

Fig. 134. Photographies des paléochenaux au sein du méandre de Guilly ……294

Fig. 135. Paléochenaux du Val d'Orléans ……295

Fig. 136. Évolutions de l'occupation du sol au 19ème siècle au sein du méandre de Guilly ……296

Fig. 137. Carte de synthèse de l'épaisseur et de la composition granulométrique des dépôts alluvionnaires au sein du méandre de Guilly ……298

Fig. 138. Hauteurs d'eau simulées au sein du méandre de Guilly pour un débit de la Loire entre 900 et 1000 $m^3.s^{-1}$ (crue de période de retour de 1 an) ……300

Fig. 139. Hauteurs d'eau simulées au sein du méandre de Guilly pour un débit de la Loire entre 1700 et 2100 $m^3.s^{-1}$ (crue de période de retour de 5 ans) ……300

Fig. 140. Illustrations de l'inondation du méandre de Guilly lors de la crue de mai 2013, pendant laquelle le débit moyen journalier de la Loire à Gien a atteint 2 000 $m^3.s^{-1}$ (le 07/05/2013) ……301

Fig. 141. Simulation de la répartition des hauteurs d'eau et des courants au sein du méandre de Guilly lors de la crue de décembre 2003 pendant laquelle le débit de la Loire a atteint 3320 $m^3.s^{-1}$ (crue vicennale) ……302

Fig. 142. Synthèse des différentes unités fluviales de la plaine alluviale de la Loire dans le secteur de Guilly ……303

Fig. 143. Synthèse du suivi réalisé des différentes masses d'eaux dans le secteur du méandre de Guilly ……305

Fig. 144. Dates des campagnes, complètes ou partielles, de prélèvements et de mesures des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly, et de celles de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire ……305

Fig. 145. Photographies de quelques puits ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique ……306

Fig. 146. Sonde Diver installée dans la Loire à l'Ile aux Canes, lestée par deux poids de pêche à brochet et reliée à l'un des arbres de la berge ……307

Fig. 147. Distances entre la Loire et les puits sélectionnés de la nappe alluviale ……307

Fig. 148. Localisation des sites du suivi piézométrique et/ou géochimique dans le secteur du méandre de Guilly ……308

Fig. 149. Illustrations des méthodes et matériels utilisés pour les tests de pompage des eaux de puits agricoles de la nappe alluviale ……311

Fig. 150. Bilan ionique des échantillons prélevés dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce et le Trou Robert, dans le secteur du méandre de Guilly ……313

Fig. 151. Charge cationique et anionique en fonction de la conductivité électrique des eaux prélevées dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce et le Trou Robert, dans le secteur du méandre de Guilly ……314

Fig. 152. Stations de mesures des hauteurs d'eau de la Loire, de la Dreal ……317

Fig. 153. Localisation des sites de calcul des lignes d'eau de la Loire dans le secteur du méandre de Guilly ……318

Fig. 154. Diagramme de Piper réunissant l'ensemble des données collectées lors des prélèvements dans le secteur du méandre de Guilly (nappe alluviale, Loire, Trou Robert, nappe de Beauce) et données des précipitations ……321

Fig. 155. Teneurs des éléments majeurs dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce, du Trou Robert et de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire ……322

Fig. 156. Concentrations en potassium dans les eaux de la nappe alluviale au niveau du puits d'Aubépin ……328

Fig. 157. Activités agricoles au sein du méandre de Guilly……328

Fig. 158. Evolution des concentrations de nitrates, potassium et sulfates dans les eaux de la nappe alluviale au Colmier et à Aubépin, en fonction de l'utilisation d'engrais à proximité ……330

Fig. 159. Chroniques de la surface piézométrique de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly associées aux lignes d'eau de la Loire à l'Ile aux Canes ……332-334

Fig. 160. Surface piézométrique de la nappe alluviale entre le 01/11/2010 et le 01/04/2011 ……334

Fig. 161. Altitudes moyennes de la nappe alluviale, classées selon 3 critères différents : a) l'altitude moyenne de la nappe, b) la distance orthogonale à la Loire et c) d'amont en aval ……336

Fig. 162. Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations de la ligne d'eau de la Loire ……338

Fig. 163. Temps de réponse de la nappe alluviale aux variations de la ligne d'eau de la Loire : valeur maximale des coefficients de corrélation r(K) pour chaque puits suivis ……339

Fig. 164. Coefficents de corrélation r(K), entre les précipitations journalières à Saint-Benoît-sur-Loire et la dérivée de la chronique des altitudes du toit de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly ……341

Fig. 165. Schéma théorique des échanges saisonniers entre la Loire et sa nappe alluviale ……342

Fig. 166. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du 10 décembre 2010, pour un débit de la Loire à Gien de 1620 $m^3.s^{-1}$, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique ……343

Fig. 167. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du 20 janvier 2011, pour un débit de la Loire à Gien de 482 $m^3.s^{-1}$, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique ……344

Fig. 168. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du 1er juin 2011, pour un débit de la Loire à Gien de 64 $m^3.s^{-1}$, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique 345

Fig. 169. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly, en date du 20 juin 2010, pour un débit de la Loire à Gien de 859 $m^3.s^{-1}$, accompagnée d'un aperçu de la situation hydrologique .346

Fig. 170. Schéma de la distance séparant les puits du centre du méandre, de la Loire ……..……348

Fig. 171. Différences de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_1) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 17 ……..……350

Fig. 172. Gradients de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_2) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu Canes 1 ……..……351

Fig. 173. Gradients de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_3) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 16 ……..……352

Fig. 174. Gradients de charge (i) entre les lignes d'eau de la Loire (L_4) et la surface piézométrique de la nappe alluviale au Pu 12 ……..……353

Fig. 175. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly en date du 02 juillet 2011 ……..361

Fig. 176. Carte piézométrique du secteur du méandre de Guilly en date du 4 novembre 2011 …361

Fig. 177. Mobilisation progressive de la ressource en eau de la nappe alluviale pour le soutien des débits de la Loire lors de l'étiage 2011 ……..……362

Fig. 178. Rythme de la baisse de la cote piézométrique de la nappe alluviale pendant l'étiage 2011 : en fonction de la distance à la Loire et du temps ……362

Fig. 179. Impact d'une crue printanière sur la recharge de la nappe alluviale puis sa vidange pendant l'étiage ……365

Fig. 180. Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Oussy et au Pu 12 ……..……..369

Fig. 181. Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Caillotière et au Pu 12 ……..……..370

Fig. 182. Synthèse de l'occurrence des circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée, dans le secteur aval du méandre grâce aux différences de charge (i) entre d'une part, la Loire (L_4) ou la nappe alluviale à Oussy ou à Caillotière et d'autre part la nappe alluviale au Pu 12 ……..……371

Fig. 183. Différences de charge (i) entre la surface piézométrique de la nappe alluviale à Ménivelle et au Pu 17 ……374

Fig. 184. Synthèse de l'occurrence des circulations des eaux de la nappe alluviale transversalement à la levée, dans le secteur amont du méandre, grâce aux différences de charge entre, d'une part, la Loire (L_1) ou la nappe alluviale à Oussy ou au Pu 17, et d'autre part, la nappe alluviale à Ménivelle ……375

Fig. 185. Schéma de synthèse des circulations et échanges d'eau mettant en oeuvre la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly ……379

Fig. 186. Chroniques de ^{18}O, dans le secteur du méandre de Guilly, pour tous les sites suivis ……382

Fig. 187. Chroniques de ^{18}O, en rive gauche, pour tous les sites suivis au sein du méandre de Guilly ……383

Fig. 188. Chroniques de ^{18}O, en rive gauche, pour tous les sites suivis au-delà de la levée ……384

Fig. 189. Chroniques de ^{18}O, pour tous les sites suivis en rive droite, dans le secteur du méandre de Guilly ……385

Fig. 190. Chroniques de ^{2}H, dans le secteur du méandre de Guilly, pour tous les sites suivis ……386

Fig. 191. Chroniques de ^{2}H, pour tous les sites suivis en rive gauche, dans le secteur du méandre de Guilly ……387

Fig. 192. Chroniques de ^{2}H, pour tous les sites suivis en rive droite, dans le secteur du méandre de Guilly……388

Fig. 193. Signatures isotopiques moyennes des différentes masses d'eau en présence dans le secteur du méandre de Guilly, des précipitations à Orléans et variabilité des signatures isotopiques de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire ……391

Fig. 194. Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les hautes eaux 2009-2010 ….396

Fig. 195. Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les hautes eaux 2010-2011 et 2011-2012 ……399

Fig. 196. Mélange des eaux au sein de la nappe alluviale pendant les basses eaux 2009, 2010 et 2011 ……401

Fig. 197. Localisation des paléochenaux au sein du méandre de Guilly ……405

Fig. 198. Signatures isotopiques des eaux de la zone humide du Trou Robert au sein du Grand Riot ……406

Fig. 199. Evolutions des signatures isotopiques de la Loire en Loire moyenne pendant les basses eaux 2009, 2010 et 2011 ……411

Fig. 200. Impact de la température journalière maximale à Saint-Benoît-sur-Loire à la date du prélèvement sur la différence entre les rapports isotopiques des eaux de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire et à La Charité-sur-Loire ……..412

Fig. 201. Evolutions des signatures isotopiques de la Loire en Loire moyenne pendant les hautes eaux 2009 – 2010 ……..414

Table des tableaux

Chapitre 1 :

Tab. 1. Synthèse des principales caractéristiques physiques du bassin amont et moyen de la Loire ……35

Tab. 2. Débit de référence des principales stations de jaugeauge de la zone d'étude ……37

Tab. 3. Débits spécifiques pour les débits minima connus sur la Loire et quelques autres cours d'eau français ……43

Tab. 4. Périodes de retour des crues de la Loire au Bec d'Allier ……45

Chapitre 3 :

Tab. 5. Caractéristiques des stations de jaugeage ……86

Tab. 6. Séries de données par station de jaugeage ……87-88

Tab. 7. Chroniques dont les données climatiques sont homogénéisées, au sein des bassins de la Loire amont et moyenne ……93-94

Tab. 8. Synthèse des données homogénéisées de hauteurs de précipitations disponibles au sein des bassins de la Loire amont et moyenne ……97

Tab. 9. Synthèse des données homogénéisées de températures disponibles au sein des bassins de la Loire amont et moyenne ……97

Tab. 10. Objectifs de débit minimum d'étiage pour l'Allier et la Loire jusqu'à Gien ……105

Tab. 11. Principales caractéristiques des barrages de Naussac et de Villerest ……105

Tab. 12. Caractérisation des chroniques de débits moyens annuels pour les stations de Vieille-Brioude (Allier), de Villerest (haute Loire) et de Gien (Loire moyenne) en fonction des dates de travaux et de mise en service des barrages de Naussac et de Villerest ……110

Tab. 13. Caractérisation de deux périodes des chroniques de cumuls annuels de précipitations pour les stations météorologiques de Châteauneuf-de-Randon (haut Allier) et de Charolles (Loire bourbonnaise) ……110

Tab. 14. Caractérisation de deux périodes différentes de la chronique des débits moyens annuels de la Loire à Bas-en-Basset ……112

Tab. 15. Evolutions des débits mensuels moyens de deux périodes (avant 1976 et après 1985-2011) pour quatre stations (Bas-en-Basset, Villerest et Gien sur la Loire et Vieille-Brioude sur l'Allier) ……114

Tab. 16. Augmentation moyenne des débits moyens mensuels due à la politique de soutien d'étiage entre 1989 et 2011, pour les débits de l'Allier à Vieille-Brioude et de la Loire à Villerest et à Gien pour les mois de juillet, août et septembre ……115

Tab. 17. Pentes des droites de régression linéaire des chroniques des minima et des maxima annuels de températures en fonction du temps ……118

Tab. 18. Pentes des droites de régression linéaire des chroniques de cumuls annuels de précipitations pour chacune des stations disponibles, en fonction du temps ……122

Tab. 19. Caractérisation des débits moyens annuels du bassin de la Loire : Bas-en-Basset et Villerest pour la Loire amont, Vieille-Brioude sur l'Allier, Etang-sur-Arroux pour l'Arroux, le principal affluent drainant le Morvan et enfin Blois en Loire moyenne ……124

Tab. 20. Pentes des droites de régression linéaire des débits moyens annuels en fonction du temps ……124

Tab. 21. Pentes des droites de régression linéaire des chroniques de VCN3 en fonction du temps ……135

Tab. 22. Caractérisation par périodes de 30 ans des chroniques de VCN3 pour la Loire à Bas-en-Basset et Blois et pour l'Arroux à Etang-sur-Arroux ……136

Tab. 23. Pentes des droites de régression linéaire des chroniques des maxima annuels de débits sur la Loire, l'Allier et l'Arroux, en fonction du temps ……140

Tab. 24. Caractéristiques des chroniques des maxima annuels de débits de la Loire à Blois, Bas-en-Basset et Villerest divisées en périodes de trente ans ……141

Tab. 25. Occurrences saisonières des maxima annuels de débits de la Loire à Bas-en-Basset et à Villerest de 1920 à 2009 ……143

Tab. 26. Caractérisation des périodes de trente ans et de l'ensemble de la chronique du nombre de jours de basses-eaux de la Loire par année hydrologique à la station de Blois ……149

Tab. 27. Comparaison des principales caractéristiques statisques entre les périodes 1892-1961 et 1962-2010, d'une part de l'indice de déficit de volume en période de basses-eaux de la Loire à Blois et d'autre part de ce même indice dont on a supprimé les valeurs égales à 0 qui correspondent aux années sans basses-eaux ……160

Tab. 28. Caractérisation statistique et moyennes mensuelles des débits de la Loire à Blois inférieurs à 105 $m^3.s^{-1}$ ……161

Tab. 29. Evolutions des débits de la Loire à Blois supérieurs à 550 $m^3.s^{-1}$ ……173

Tab. 30. Moyennes mensuelles des débits de la Loire à Blois supérieurs à 550 $m^3.s^{-1}$ ……173

Tab. 31. Synthèse théorique des changements environnementaux ayant une influence sur les débits de la Loire moyenne ……181

Chapitre 4 :

Tab. 32. Synthèse des campagnes de prélèvements réalisées qui concernent des évènements hydrologiques particuliers, les étiages et les crues ordinaires ……194

Tab. 33. Dominances moyennes des substances alcalines pour chaque site de prélèvements ….198

Tab. 34. Moyennes pondérées des compositions isotopiques des précipitations à Orléans, Sayat et Saint-Brisson ……203

Tab. 35. Concentration moyenne en éléments majeurs dans les eaux de la Loire et de ses affluents (moyenne de tous les prélèvements réalisés de 2009 à 2012) ……208

Tab. 36. Synthèse des caractéristiques chimiques qui distinguent les eaux de la Loire amont, du Morvan, de l'Allier et de la Loire moyenne ……211

Tab. 37. Coefficients de corrélation linéaire entre les espèces ioniques pour chaque site de prélèvements de tous les échantillons disponibles ……212 à 214

Tab. 38. Synthèse des corrélations entre les espèces ioniques au sein de la zone d'étude ……215

Tab. 39. Synthèse des variations saisonnières des différents paramètres physico-chimiques et espèces chimiques ……239

Tab. 40. Apports relatifs de la Loire amont et de l'Allier dans les débits de la Loire en aval de la confluence Loire – Allier pour la période du 10/01/2010 au 31/01/2012 pour différentes classes de débits de la Loire à Gien (calculés à partir des données de débits) ……248

Tab. 41. Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir du rapport isotopique $\delta^{18}O$ ……249

Tab. 42. Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir du rapport isotopique $\delta^{2}H$ ……250

Tab. 43. Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir de la concentration des ions Cl^- ……250

Tab. 44. Parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire-Allier, calculées à partir de la concentration de silice dissoute ……251

Tab. 45. Synthèse des parts de mélange entre la Loire amont et l'Allier à la confluence Loire – Allier, calculées à partir des données de débits, des isotopes stables de la molécule d'eau, de la silice dissoute et des chlorures ……251

Tab. 46. Moyennes des estimations des « débits inexpliqués » à la confluence Loire-Allier du 10/01/2010 au 31/01/2012 ……256

Tab. 47. Estimations des « débits inexpliqués » pour chaque campagne de prélèvements dans la zone de la confluence Loire – Allier ……258

Tab. 48. Estimations des rapports isotopiques pour les apports autres que ceux de la Loire amont et de l'Allier dans le secteur de la confluence Loire – Allier ……258

Tab. 49. Parts de mélange entre la Loire haute et l'Arroux à la confluence Loire – Arroux ……..260
Les parts de mélange sont calculées à partir de différents indicateurs : a. débits ……261
b. $\delta^{18}O$ ……261
c. $\delta^{2}H$ ……262
d. Cl^- ……262
e. synthèse ……263

Tab. 50. Petits affluents de la Loire non jaugés entre les stations de jaugeage de Digoin et de Gilly-sur-Loire ……264

Tab. 51. Evolutions de la part des apports en Loire bourbonnaise dans les débits de la Loire à Imphy pour différentes classes de débits (débits du 10/01/2010 au 31/01/2012) ……265

Tab. 52. Les affluents jaugés de la Loire en Loire bourbonnaise, entre Villerest et Decize ……..266

Tab. 53. Moyennes mensuelles de la proportion que représentent d'une part les affluents drainant le Morvan (Arroux à Digoin et Aron) et d'autre part les autres affluents significatifs de la Loire bourbonnaise (Rhins, Sornin, Arconce et Besbre) dans les débits de la Loire à Nevers, du 01/01/2010 au 31/01/2012 ……269

Tab. 54. Parts de mélange entre la haute Loire à Villerest et les apports en Loire bourbonnaise dans les eaux de la Loire à Imphy ……270

Chapitre 5 :

Tab. 55. Principales caractéristiques des puits dont les eaux ont fait l'objet d'un suivi piézométrique et géochimique ……..309

Tab. 56. Impacts sur la géochimie des eaux prélevées du renouvellement, par pompage, de la colonne d'eau de six puits de la nappe alluviale ……312

Tab. 57. Synthèse des bilans ioniques de 117 échantillons analysés, prélevés dans le secteur du méandre de Guilly ……313

Tab. 58. Données piézométriques disponibles dans le secteur du méandre de Guilly ……316

Tab. 59. Teneurs moyennes des éléments majeurs dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce et de la Loire à Châteauneuf-sur-Loire ……322

Tab. 60. Coefficients de corrélation linéaire entre les données de conductivité électrique de chaque site de prélévements dans la nappe alluviale, la nappe de Beauce à Carrières et la Loire à Châteauneuf-sur-Loire ……323

Tab. 61. Abondances moyennes des espèces minérales carbonées pour chaque site de prélèvements du secteur de Guilly ……324

Tab. 62. Moyenne pondérée des concentrations des différents éléments majeurs, pour les mois d'octobre à mars, des précipitations à Orléans, et des eaux de « recharge » ……324

Tab. 63. Caractérisation des engrais utilisés au printemps 2010 dans les champs les plus proches des puits de Colmier et d'Aubépin ……329

Tab. 64. Illustration de la fonction Crosscorrelation du logiciel Past ……337

Tab. 65. Synthèse de l'amplitude temporelle de chacun des sens des échanges entre la Loire et sa nappe alluviale au sein du méandre de Guilly ……358

Tab. 66. Impacts des pics de débit de la Loire supérieurs à 1000 $m^3.s^{-1}$ à Gien sur les variations de la nappe alluviale au Pu 12 de mars 2009 à janvier 2015 ……364

Tab. 67. Récapitulatif de la direction de l'écoulement de la nappe alluviale dans le secteur amont du méandre pour les quatre situations hydrologiques illustrées par les cartes piézométriques des figures 166 à 169 ……376

Tab. 68. Synthèse des occurrences des circulations transversales à la levée des eaux de la nappe alluviale ……378

Tab. 69. Coefficients de corrélation entre les chroniques des rapports isotopiques $\delta^{18}O$ des différents sites suivis ……389

Tab. 70. Coefficients de corrélation entre les chroniques des rapports isotopiques $\delta^{2}H$ des différents sites suivis ……390

Tab. 71. Moyennes et écart-types des signatures isotopiques des différentes masses d'eau en présence dans le secteur du méandre de Guilly ……391

Annexes

Annexe A : Signatures isotopiques des précipitations dans le Massif du Morvan, à Saint-Brisson (58, Nièvre) ……466

Annexe B : Paramètres physico-chimiques et concentrations des éléments majeurs des eaux de la Loire ……467

Annexe C : Profils géologiques au sein du méandre de Guilly ……470

Annexe D : Test de pompage de puits agricoles faisant l'objet d'un suivi géochimique (23 et 24 mars 2011) : évolution de la conductivité électrique, du pH et de la température pendant le pompage et calcul de la perméabilité et de la transmissivité (méthode de Jacob) ……474

Annexe E : Graphiques de l'évolution de la conductivité électrique, du pH et des concentrations des éléments majeurs en fonction du temps, dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce et de la Loire à Châteuneuf-sur-Loire ……479

Annexe F : Paramètres physico-chimiques et concentrations des éléments majeurs des eaux de la nappe alluviale, dans le secteur du méandre de Guilly ……491

Annexe G : Variogrammes des cartes piézométriques du secteur du méandre de Guilly ……496

Annexe H : Données piézométriques de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly ……502

Annexe I : Validité des débits mesurés : informations disponibles dans la Banque Hydro ……536

A_ Signatures isotopiques des précipitations dans le Massif du Morvan, à Saint-Brisson (58, Nièvre)

Date	Hauteurs précipitations (en mm)	$\delta^{18}O$ (en ‰ vs VSMOW)	$\delta^{2}H$ (en ‰ vs VSMOW)
27/01/2011	50	-9.14	-63.37
21/02/2011	50	-1.19	-22.91
28/03/2011	40	-1.31	-22.49
02/05/2011	60	-1.18	-22.88
07/06/2011	25	-1.98	-20.09
20/06/2011	20	-2.41	-24.57
26/06/2011	25	-2.40	-23.78
25/07/2011	50	2.50	-2.07
24/08/2011	55	2.52	-4.25
30/08/2011	?	-5.91	-39.75
23/11/2011	70	-12.61	-88.42
04/12/2011	10	-8.71	-61.62
12/12/2011	80	-11.23	-82.65
20/12/2011	150	-12.03	-85.95
23/12/2011	20	-8.44	-61.77
04/01/2012	150	-11.26	-77.79
06/01/2012	150	-8.71	-61.41
10/01/2012	150	-11.01	-77.88
20/01/2012	150	-9.05	-60.92
15/02/2012	neige	-8.16	-61.61

B_ Paramètres physico-chimiques et concentrations des éléments majeurs des eaux de la Loire

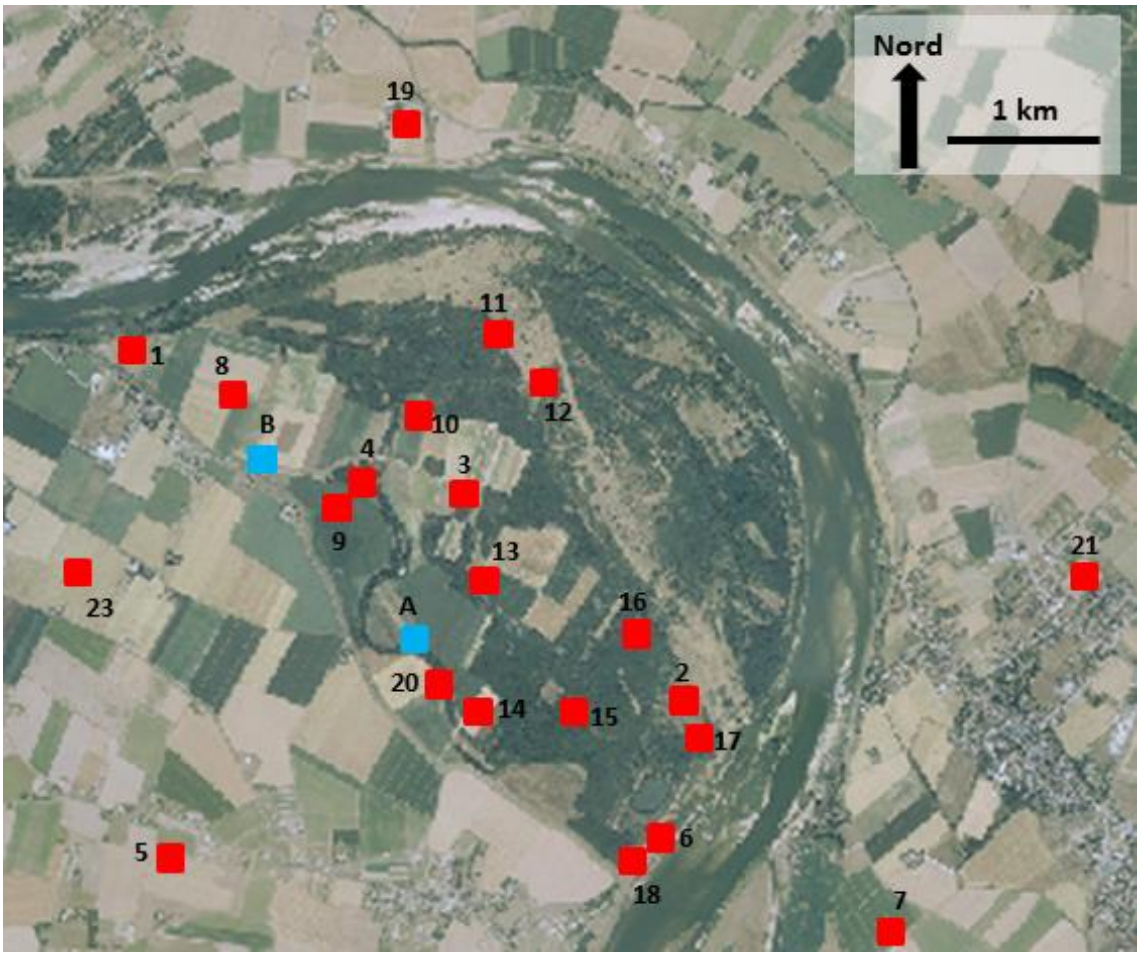
Date	Cours d'eau	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
			$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$										‰ vs VSMOW	
20/07/2009	Loire	Vindecy	0.251	7.9							24.8	4.6	19.0	4.8		
26/11/2009			0.231	7.3		27.6	4.4	17.4			19.8	4.9	21.6	5.5	-7.14	-50.4
14/12/2009			0.152	7.5		20.7	9.8	15.9		9.4	19.0	4.0	16.6	4.9	-6.66	-49.1
27/01/2010			0.183	6.5		34.0	9.8	14.3	50.8	10.4	17.8	3.9	23.0	5.3	-8.15	-56.1
28/02/2010			0.206	7.6		38.1	11.1	15.5	39.5	10.3	19.1	3.8	20.4	5.2	-9.08	-60.9
30/03/2010			0.166	7.3		21.9	7.9	11.3	30.3	8.8	15.4	3.0	13.2	4.1	-8.57	-60.8
26/04/2010			0.197	8.9		20.4	4.7	11.3	32.2	2.4	15.0	3.0	13.9	4.0	-8.09	-57.3
31/05/2010			0.215	7.2		18.6	5.3	12.7	50.8	9.6	12.0	3.5	15.2	4.3	-8.72	-61.4
28/06/2010			0.245	7.5		18.0	5.5	13.3	46.8	18.2	10.9	3.8	13.5	4.6	-8.64	-60.3
22/07/2010			0.182	6.4		11.5	5.9	11.0	29.3	14.6	12.7	5.7	10.0	3.5	-6.63	-43.1
15/08/2010			0.255	8.9		19.6	3.3	15.4	58.6	15.0	15.9	4.0	16.1	5.1	-7.40	-54.1
16/12/2010			0.153	7.2		23.3	11.1	13.7	39.0	11.8	15.7	3.6	12.7	4.2	-8.49	-58.2
27/07/2011			0.273	7.0		26.7	2.5	18.4	58.6	20.8	21.5	4.6	21.3	5.8	-7.32	-51.7
05/11/2011			0.212	7.5		26.1	5.3	18.7	48.8	5.4	20.6	5.1	21.7	5.2	-7.21	-49.6
06/11/2011			0.244	6.7		25.8	4.3	19.5	63.4	3.7	20.0	4.9	23.4	5.9	-6.94	-51.2
27/01/2010	Arroux	Rigny-sur-Arroux	0.112	6.8		12.1	9.3	10.2	48.3	11.2	20.2	2.4	7.1	2.6	-7.45	-49.3
28/02/2010			0.107	7.3		7.1	6.6	7.0	32.2	8.8	14.7	2.4	5.0	2.0	-8.18	-53.4
30/03/2010			0.132	7.4		9.2	4.4	7.9	35.1	8.4	17.1	2.4	5.5	2.2	-7.65	-52.0
26/04/2010			0.155	8.5		10.0	3.5	10.2	25.9	4.8	14.9	2.2	7.2	2.5	-7.42	-49.0
31/05/2010			0.181	7.8		12.1	3.1	11.4	47.8	6.5	15.7	3.0	7.6	2.8	-6.66	-46.1
28/06/2010			0.217	7.6		12.3	4.6	10.3	51.2	16.9	15.2	2.9	7.6	2.8	-7.06	-49.3
22/07/2010			0.224	7.8		18.0	5.5	11.8	39.0	13.7	18.3	4.3	8.1	2.8	-5.49	-38.8
15/08/2010			0.254	7.9		18.2	2.1	16.9	68.3	12.5	21.4	3.8	10.5	3.8	-5.97	-43.8
16/12/2010			0.118	7.0		11.4	10.3	10.3	34.2	10.7	16.1	2.4	6.3	2.4	-7.78	-53.1
27/07/2011			0.214	7.0		20.5	3.0	20.1	39.0	23.9	23.4	3.6	9.3	3.3	-6.55	-46.5
05/11/2011			0.140	7.3		12.3	7.3	16.6	34.2	9.7	17.4	5.0	8.7	2.9	-7.25	-50.5
06/11/2011			0.159	7.0		11.4	11.5	18.6	29.3	9.9	20.3	4.7	7.9	3.4	-7.69	-52.9
20/07/2009	Loire	Diou	0.240	7.8							27.1	5.0	13.7	4.2		
26/11/2009			0.159	7.8		16.1	6.1	13.0			18.8	4.7	12.3	3.9	-6.12	-43.9
15/12/2009			0.130	7.9		15.7	10.1	15.1		13.2	21.0	3.7	12.0	4.1	-6.27	-45.2
27/01/2010			0.154	7.5		26.3	10.1	13.8	55.1	9.9	19.8	3.6	17.9	4.6	-7.79	-54.6
28/02/2010			0.161	7.0		18.8	8.2	10.7	40.5	7.2	17.6	4.6	10.8	3.4	-8.12	-56.4
30/03/2010			0.149	7.5		13.7	6.1	10.4	39.0	8.1	17.5	3.0	8.5	3.1	-8.12	-55.5
26/04/2010			0.197	8.8		18.1	4.8	12.8	43.9	3.6	17.6	2.9	11.7	3.8	-7.64	-54.2
31/05/2010			0.209	8.2		17.8	5.0	13.7	52.2	8.2	13.9	3.5	12.7	4.1	-7.84	-55.7
28/06/2010			0.252	7.7		17.1	5.6	13.6	54.2	15.7	13.5	3.8	13.1	4.4	-8.17	-58.1
22/07/2010			0.204	7.5		17.3	5.2	15.1	43.9	13.9	17.0	4.6	12.2	4.2	-6.82	-48.0
15/08/2010			0.270	9.1		19.9	3.0	18.0	58.6	12.5	20.3	4.2	14.9	5.0	-6.97	-49.7
16/12/2010			0.162	6.5		17.6	11.4	13.9	39.0	11.1	16.6	3.4	10.5	3.7	-8.08	-56.5
27/07/2011			0.275	8.1		24.9	2.2	20.8	53.7	21.1	24.3	4.7	17.8	5.2	-6.94	-47.9
05/11/2011			0.232	7.6		25.7	5.5	20.2	53.7	5.7	23.4	5.3	20.5	5.1	-6.96	-50.2
06/11/2011			0.214	7.3		23.6	7.1	18.8	53.7	5.8	20.2	5.2	19.2	4.9	-7.21	-52.1

Date	Cours d'eau	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
			$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$										‰ vs VSMOW	
21/07/2009	Loire	Imphy	0.234	7.6							29.3	5.6	10.6	4.0		
27/01/2010			0.140	7.8		17.2	12.3	12.0	52.2	10.5	23.1	3.1	11.0	3.5	-7.30	-50.7
27/02/2010			0.122	7.5		12.1	7.3	8.7	38.1	3.8	17.3	3.3	7.6	2.5	-8.02	-55.4
30/03/2010			0.148	7.5		10.9	7.1	9.9	45.9	7.8	19.4	3.0	7.5	2.9	-7.78	-53.7
27/04/2010			0.213	7.6		16.3	5.9	13.2	61.0	3.5	20.6	2.9	11.5	3.9	-7.83	-54.4
31/05/2010			0.221	8.3		14.4	5.5	13.5	66.4	8.5	18.2	3.6	11.9	4.0	-7.54	-52.7
28/06/2010			0.249	7.6		16.3	6.1	13.5	59.5	18.1	14.7	3.7	12.2	4.2	-7.93	-56.4
22/07/2010			0.258	8.3		17.1	5.2	16.9	58.6	13.9	20.4	4.1	14.3	4.7	-7.10	-50.8
15/08/2010			0.266	8.4		15.8	4.2	16.4	63.4	14.5	21.4	4.0	13.4	4.8	-6.81	-48.9
15/12/2010			0.142	7.3		15.0	11.7	13.2	43.9	11.0	17.6	3.3	9.5	3.5	-8.01	-55.7
27/07/2011			0.270	8.6		22.2	2.1	20.8	73.2	20.8	25.1	4.3	16.3	4.7	-6.62	-48.1
05/11/2011			0.246	7.7		17.1	9.4	17.1	83.0	5.0	35.7	4.6	14.1	4.7	-6.73	-47.6
07/11/2011			0.194	7.0		20.3	9.4	17.2	48.8	6.8	22.2	5.3	16.3	4.2	-7.22	-50.8
04/01/2012			0.147	6.8		11.9	11.8	11.5	14.6	14.5	19.7	3.7	7.9	2.9	-7.48	-50.7
21/07/2009	Allier	Le Guétin	0.301	8.2							29.9	5.6	16.6	7.5		
27/11/2009			0.197	7.7		20.0	4.6	13.7			23.7	4.6	17.6	7.1	-7.38	-51.0
16/12/2009			0.131	7.6		14.3	7.4	11.4		14.9	17.8	3.7	13.3	5.6	-6.91	-49.8
28/01/2010			0.158	7.5		18.6	10.8	11.8	62.5	15.2	19.4	3.4	14.0	5.7	-7.99	-54.3
27/02/2010			0.133	7.6		12.4	7.3	8.8	45.9	11.8	16.0	3.4	8.5	4.1	-8.66	-58.4
30/03/2010			0.140	7.7		11.2	4.8	8.0	47.8	10.8	15.2	2.7	8.6	3.9	-8.49	-57.7
27/04/2010			0.233	8.1		15.1	4.3	10.9	81.0	6.3	18.5	4.1	13.4	5.7	-8.18	-55.8
01/06/2010			0.221	7.5		13.5	5.8	12.4	83.9	12.7	17.4	3.7	12.8	6.0	-8.09	-55.5
29/06/2010			0.272	7.4		14.4	6.6	12.2	78.1	22.0	16.9	3.7	12.4	6.2	-7.95	-54.9
23/07/2010			0.295	7.5		17.8	6.9	15.7	95.2	18.5	24.0	4.7	16.1	7.1	-6.92	-46.7
16/08/2010			0.327	8.0		19.7	6.8	18.0	112.2	20.0	28.7	4.7	17.7	8.5	-6.98	-50.2
15/12/2010			0.153	7.5		15.0	10.4	12.7	63.4	13.9	17.8	3.1	9.8	5.5	-8.21	-55.9
27/07/2011			0.270	8.1		20.4	5.3	14.4	73.2	26.6	23.3	4.5	17.1	6.5	-7.32	-50.4
05/11/2011			0.245	7.8		22.7	6.3	16.2	83.0	10.6	26.5	4.8	19.4	6.8	-7.39	-51.4
08/11/2011			0.110	7.4		8.9	5.3	8.3	39.0	8.7	13.1	2.9	6.8	3.0	-7.74	-48.9
04/01/2012			0.126	7.0		11.3	9.3	10.9	34.2	16.9	15.1	3.2	8.1	3.7	-7.93	-52.9
27/11/2009	Loire	La Charité-sur-Loire	0.191	7.9		18.0	6.8	15.0			28.6	5.0	13.6	5.1	-6.47	-45.8
16/12/2009			0.145	7.7		13.8	10.4	13.8		12.1	24.8	3.7	11.3	4.4	-6.56	-46.6
28/01/2010			0.171	7.6		19.2	12.1	12.7	66.9	11.6	24.7	3.2	12.8	4.1	-7.32	-51.6
27/02/2010			0.150	7.1		12.8	7.8	9.7	53.7	8.1	22.4	3.4	9.0	3.2	-7.89	-55.6
31/03/2010			0.165	7.4		9.9	7.3	9.9	63.4	8.4	23.9	2.9	6.8	3.1	-7.61	-53.2
27/04/2010			0.238	8.0		16.5	5.3	12.8	76.1	6.2	21.3	3.1	12.0	4.6	-7.77	-53.8
01/06/2010			0.229	7.8		14.3	6.1	13.1	80.0	10.5	18.8	3.6	12.1	4.8	-7.71	-52.7
29/06/2010			0.263	7.8		15.8	6.4	13.5	73.7	17.9	16.8	3.8	12.1	4.8	-7.76	-55.5
23/07/2010			0.297	7.9		18.2	5.9	17.4	92.7	15.5	24.9	4.3	14.8	6.3	-6.86	-48.8
16/08/2010			0.293	8.0		17.7	5.5	17.7	92.7	15.8	25.9	4.2	14.6	6.2	-6.84	-49.8
15/12/2010			0.159	7.1		14.9	11.8	13.1	58.6	11.7	20.0	3.3	8.4	3.9	-8.01	-56.6
27/07/2011			0.270	8.3		20.6	3.5	17.2	68.3	21.9	25.4	4.3	16.3	5.7	-6.84	-48.0
05/11/2011			0.259	7.4		20.0	6.0	18.7	83.0	4.8	34.1	4.4	16.7	5.3	-7.12	-51.3
08/11/2011			0.178	7.3		15.5	7.4	13.8	53.7	7.0	20.4	4.2	13.4	4.0	-7.16	-49.4
04/01/2012			0.159	7.3		12.0	11.8	12.3	43.9	14.6	22.9	3.5	7.7	3.0	-7.61	-50.0

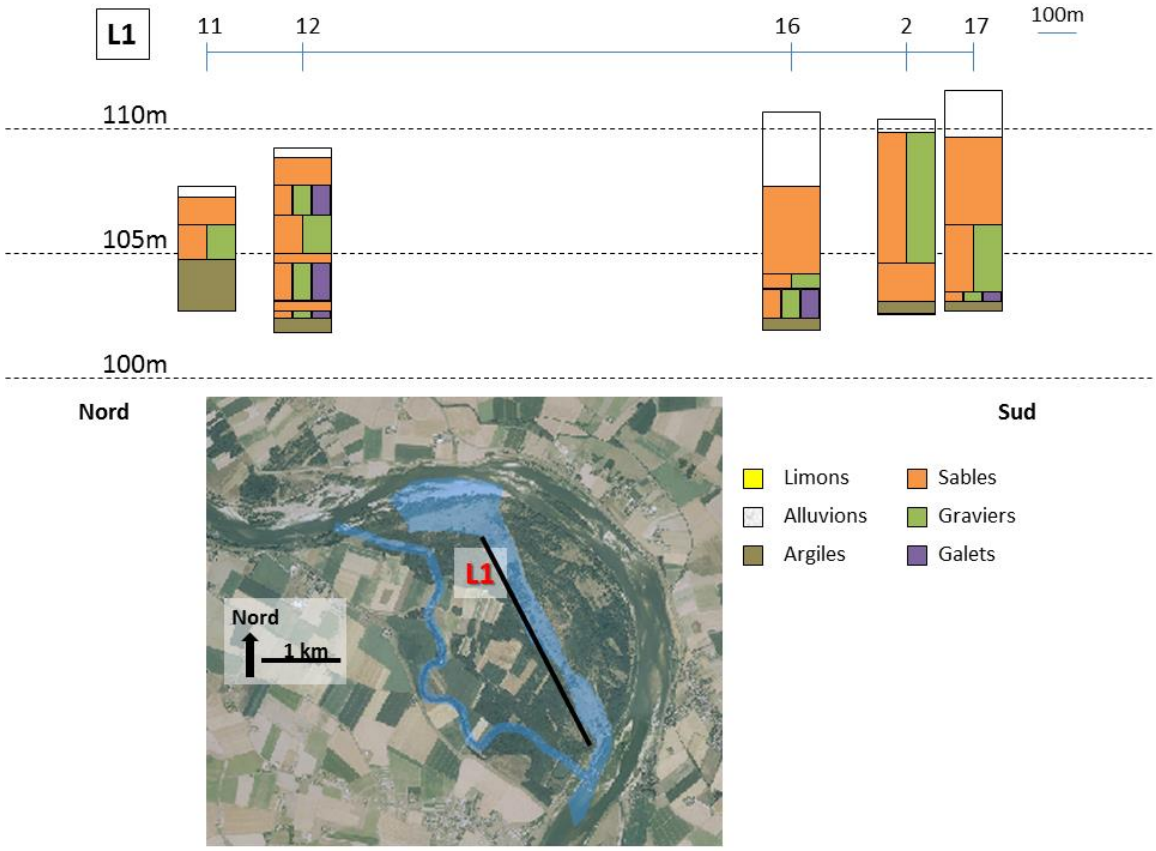
Date	Cours d'eau	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
			$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$										‰ vs VSMOW	
23/07/2009	Loire	Châteauneuf-sur-Loire	0.282	9.1							32.6	5.7	13.9	5.3		
15/09/2009			0.254	8.5	0.2	19.0	2.1	13.3								
27/11/2009			0.221	8.2		19.1	6.6	16.3			33.9	4.4	14.9	5.9	-6.46	-46.3
16/12/2009			0.158	7.7		13.9	11.1	14.2		11.7	28.6	3.6	11.0	4.5	-6.01	-44.8
28/01/2010			0.199	7.8		17.1	13.2	13.8	83.9	12.0	30.5	3.3	11.8	4.7	-7.25	-50.7
24/02/2010			0.210	7.6		20.6	11.1	13.1	63.0	10.6	26.5	3.5	13.6	4.5	-8.06	-55.6
31/03/2010			0.188	7.7		12.6	8.3	11.2	64.4	9.0	24.8	3.0	8.3	3.6	-8.07	-56.0
28/04/2010			0.269	8.2		17.3	6.9	13.8	93.2	4.9	27.2	3.1	12.2	4.7	-7.63	-52.0
01/06/2010			0.254	8.4		14.6	6.9	13.5	86.9	10.5	21.1	3.6	12.2	5.0	-7.60	-52.8
29/06/2010			0.279	8.2		15.1	6.5	13.0	78.1	17.5	18.8	3.7	11.5	5.0	-7.69	-53.8
23/07/2010			0.315	8.7		19.0	5.3	18.0	141.5	13.6	29.1	4.4	14.6	6.5	-6.63	-47.6
16/08/2010			0.310	8.3		16.9	6.4	16.4	117.1	17.4	28.9	4.2	14.6	6.1	-6.54	-47.6
13/12/2010			0.172	7.5		12.8	12.9	12.4	68.3	11.0	23.7	3.5	7.9	3.6	-8.05	-55.7
24/03/2011			0.184	7.9		15.3	10.1	13.6	63.4	9.6	22.4	3.1	11.0	4.5	-8.06	-55.8
27/07/2011			0.282	9.1		21.8	1.9	17.0	78.1	20.8	29.2	4.5	16.9	5.8	-6.39	-44.8
04/11/2011			0.265	7.6		23.1	4.8	18.1	78.1	4.0	34.6	4.6	18.9	6.0	-6.36	-46.4
09/11/2011			0.172	7.4		15.4	8.4	14.0	53.7	7.7	22.7	4.2	12.6	3.8	-7.11	-48.8
04/01/2012			0.171	7.4		11.9	12.1	12.5	43.9	14.6	25.6	3.7	7.7	3.3	-7.50	-49.6
29/01/2012			0.180	9.5		12.5	11.6	13.9	34.2	15.8	29.6	3.2	8.7	3.8	-7.16	-48.7

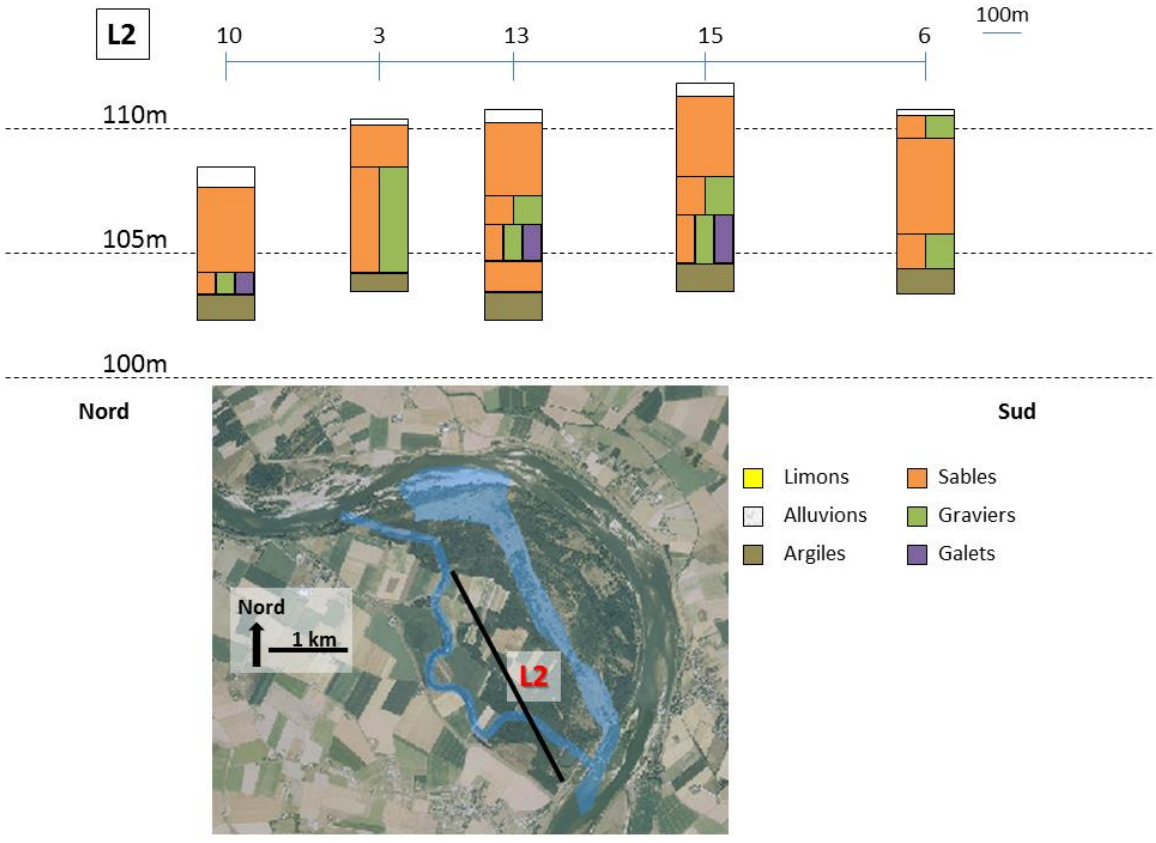
C_ Profils géologiques au sein du méandre de Guilly

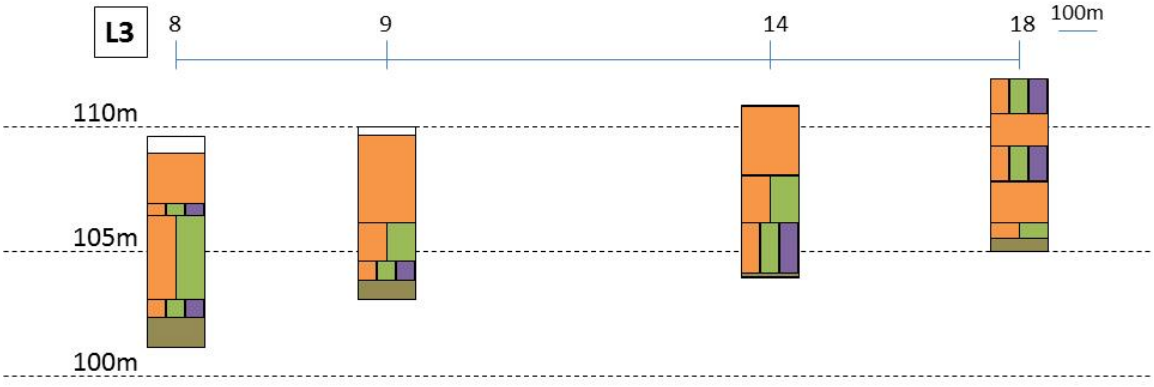
Source des données : Castanet, 2008. Altitudes en mètre NGF. Pour les différents profils, les données de chaque forage sont espacées en fonction de la distance qui les sépare. Les numéros attribués aux différents forages correspondent à ceux indiqués sur la carte ci-dessous.

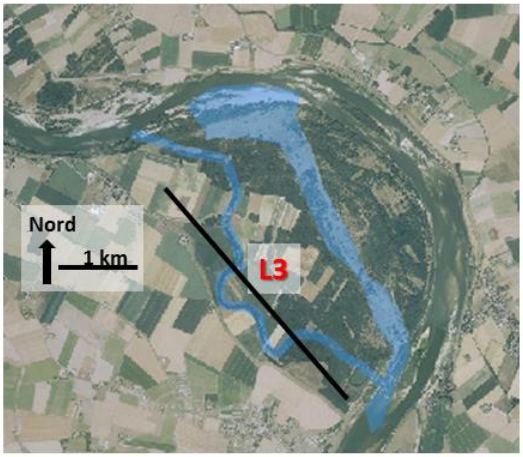


Carte de synthèse des forages présentant des indications sur la nature du sous-sol dans le secteur du méandre de Guilly.

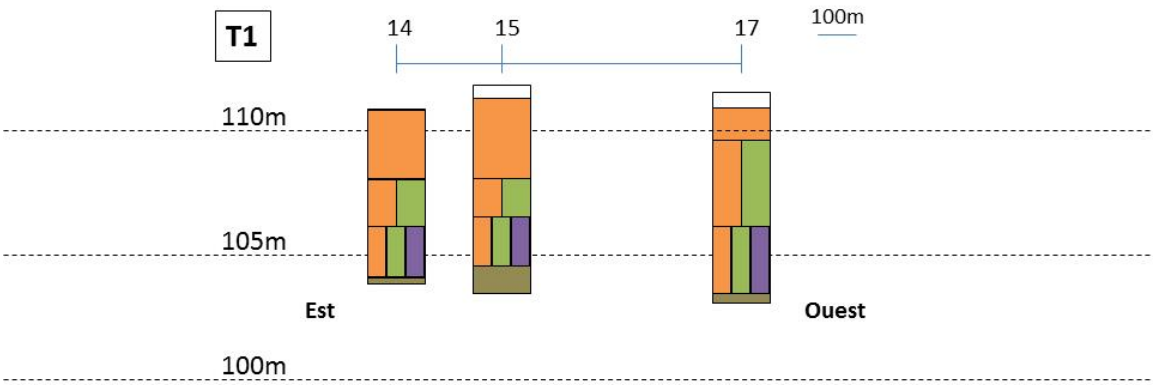

L1
11
12
16
2
17
100m
110m
105m
100m
Nord
Sud
Limons
Sables
Alluvions
Graviers
Argiles
Galets
L1
Nord
1 km

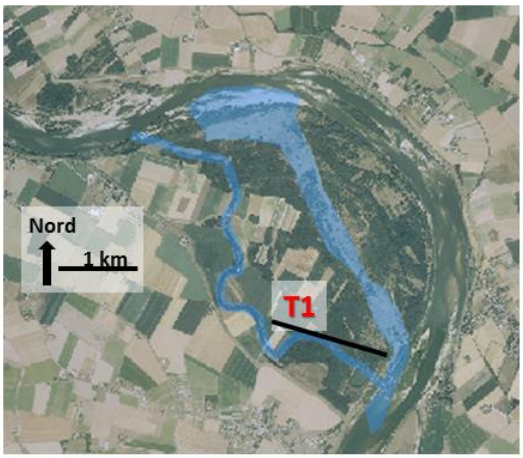

L2
10
3
13
15
6
100m
110m
105m
100m
Nord
Sud
Limons
Sables
Alluvions
Graviers
Argiles
Galets
Nord
1 km
L2


L3
8
9
14
18
100m
110m
105m
100m
Nord
Sud

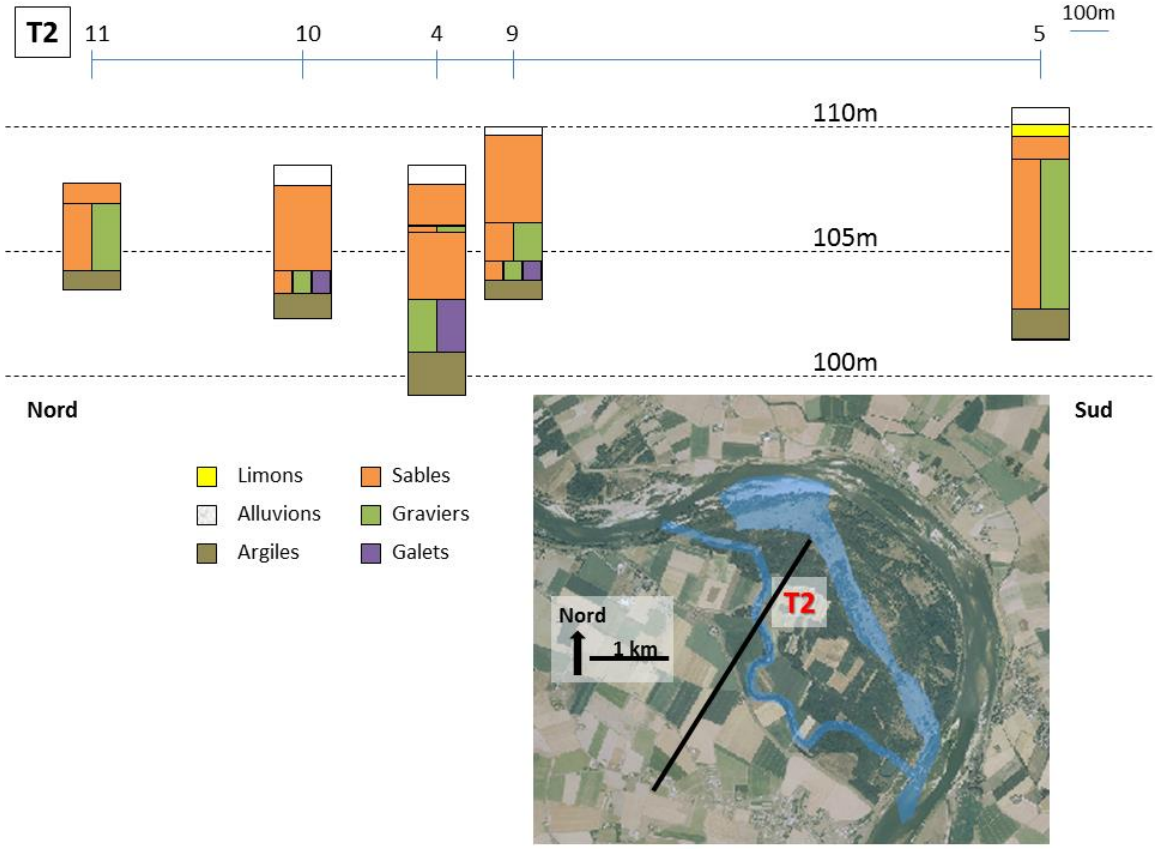

Nord
1 km
L3

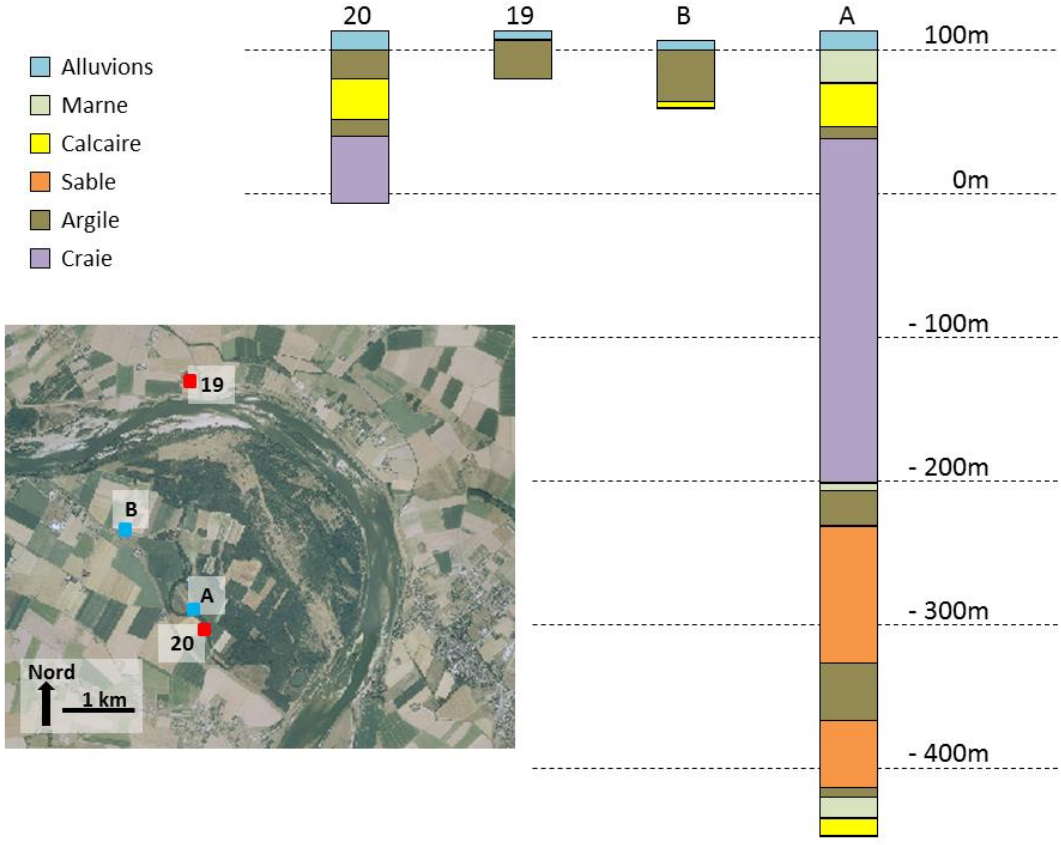

Limons
Sables
Alluvions
Graviers
Argiles
Galets


T1
14
15
17
100m
110m
105m
Est
Ouest
100m


Nord
1 km
T1


Limons
Sables
Alluvions
Graviers
Argiles
Galets

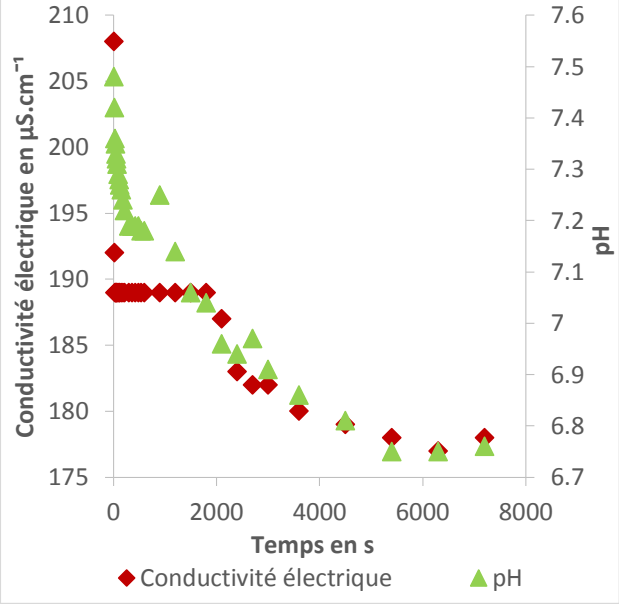

T2
11
10
4
9
5
100m
110m
105m
100m
Nord
Sud
Limons
Alluvions
Argiles
Sables
Graviers
Galets
T2
Nord
1 km

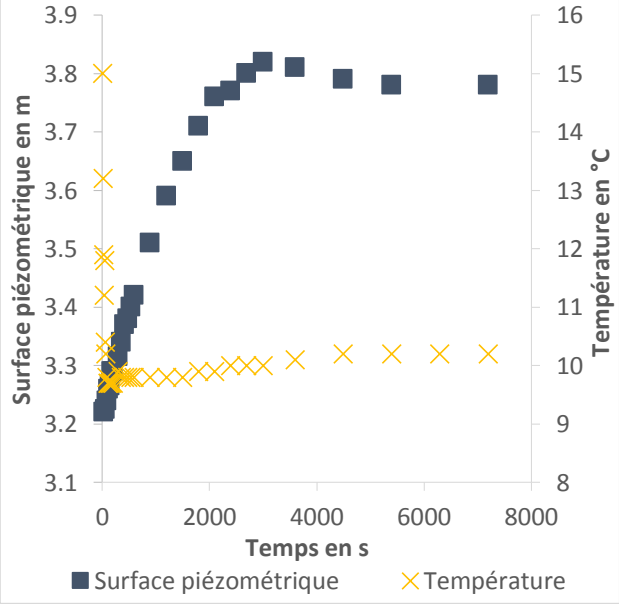

Alluvions
Marne
Calcaire
Sable
Argile
Craie
20
19
B
A
100m
0m
- 100m
- 200m
- 300m
- 400m
19
B
A
20
Nord
1 km

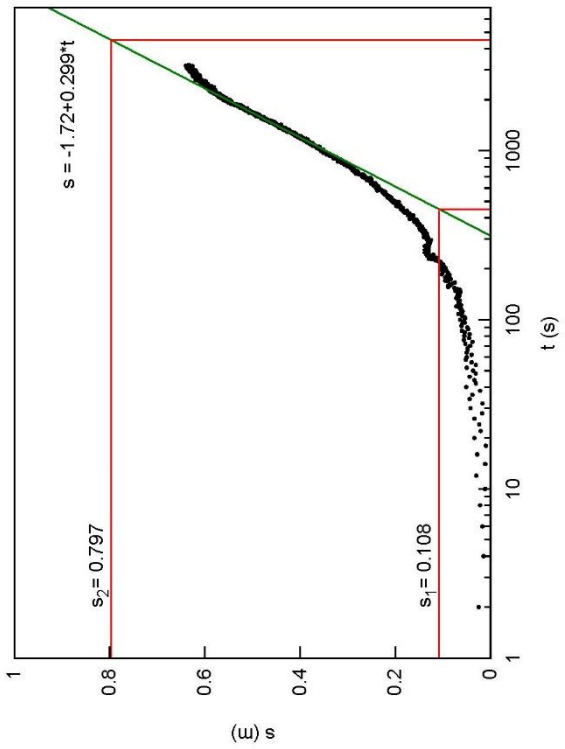
D_ Test de pompage de puits agricoles faisant l'objet d'un suivi géochimique (23 et 24 mars 2011) : évolution de la conductivité électrique, du pH et de la température pendant le pompage et calcul de la perméabilité et de la transmissivité (méthode de Jacob)

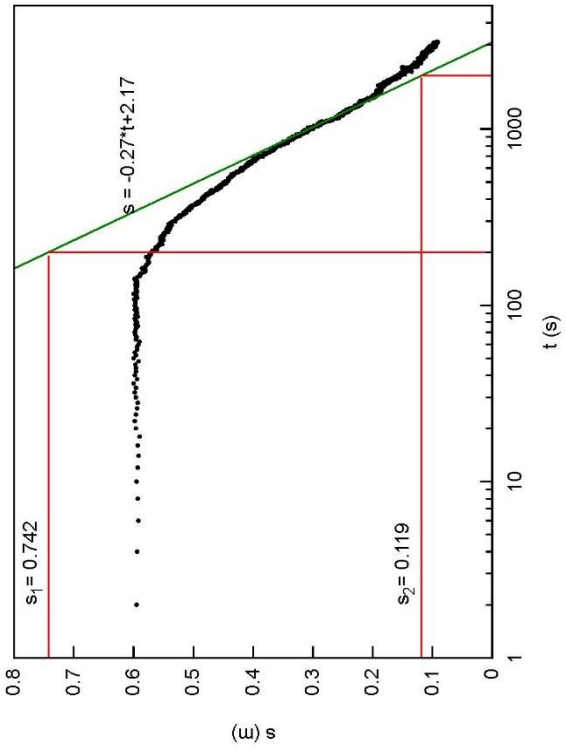
Avec t = 0 correspondant au début du pompage

1) Essai de débit au Pu Canes 1

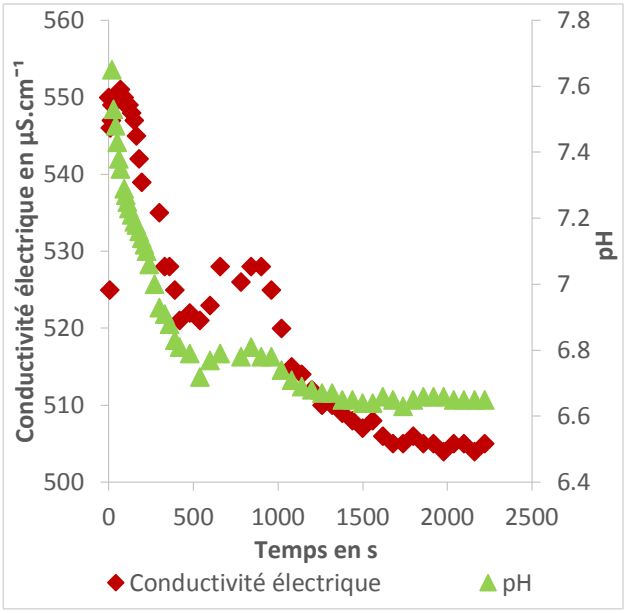


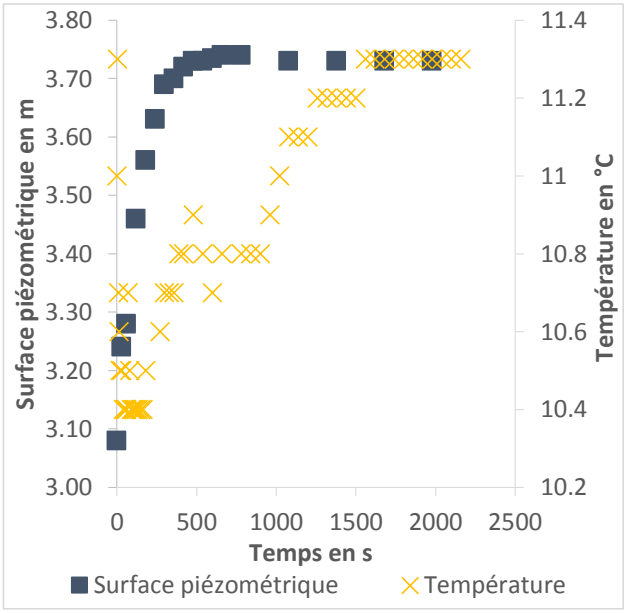


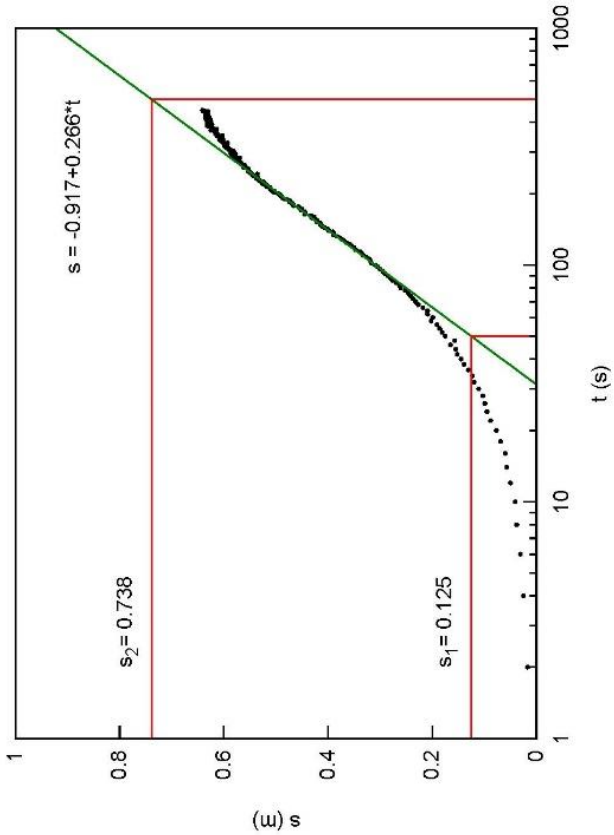


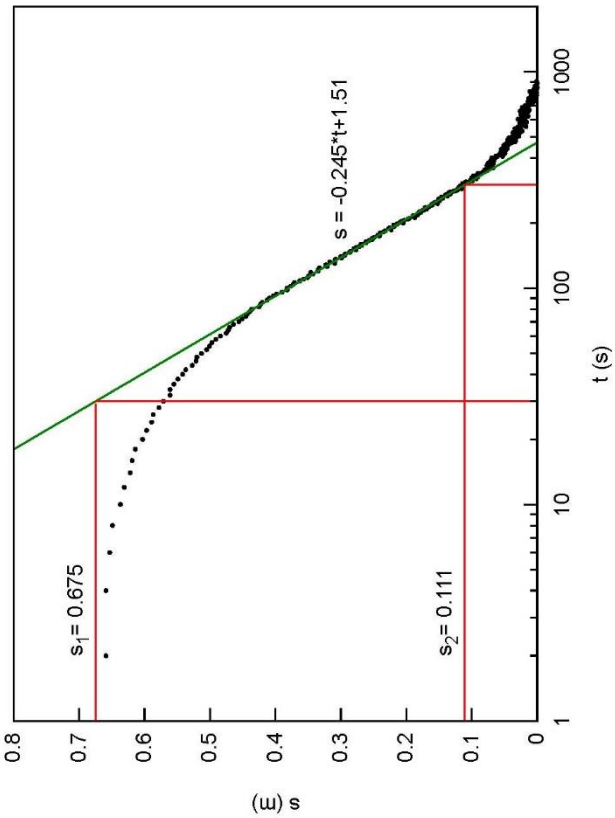


2) Essai de débit au Pu 12

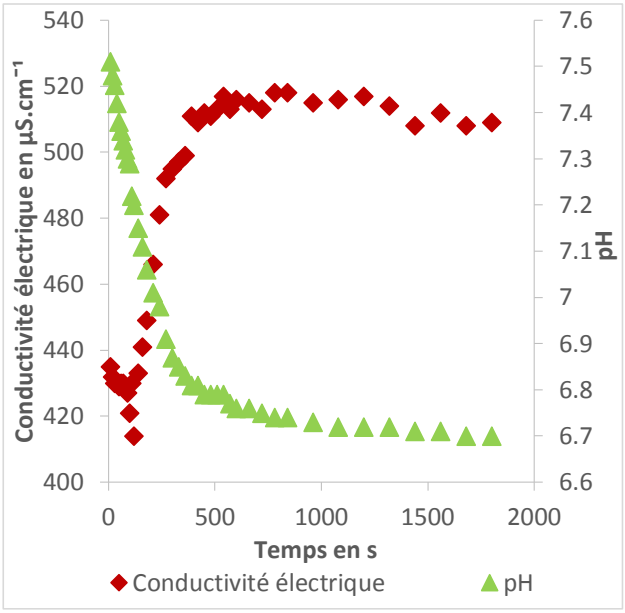


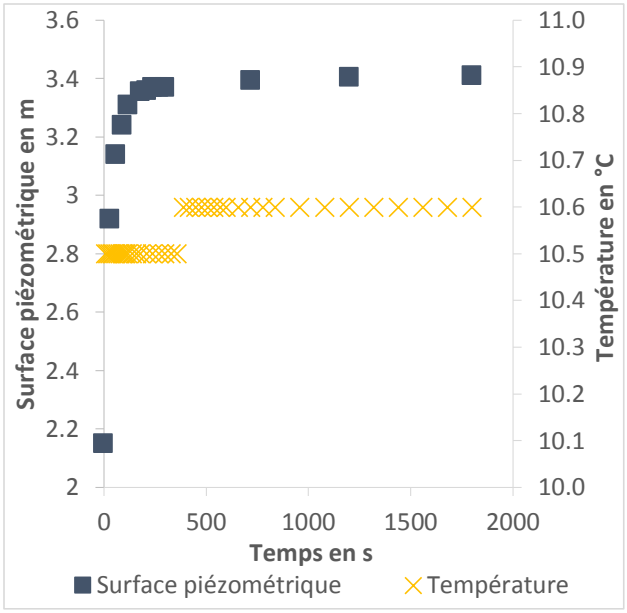


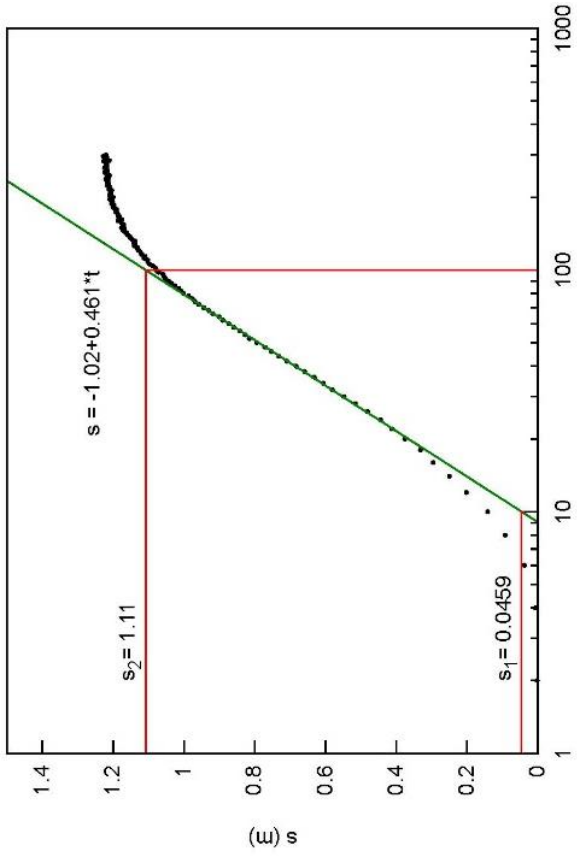


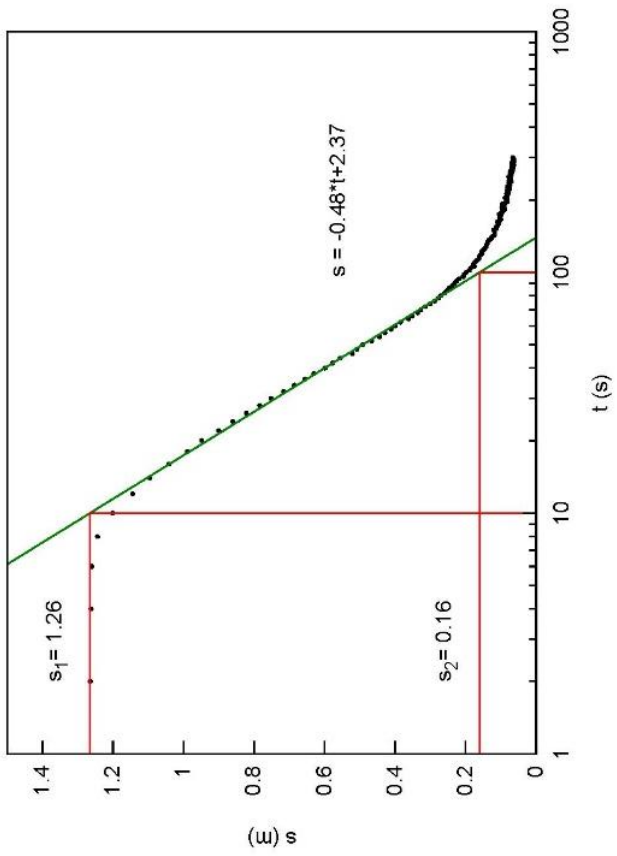


3) Essai de débit au Pu 1

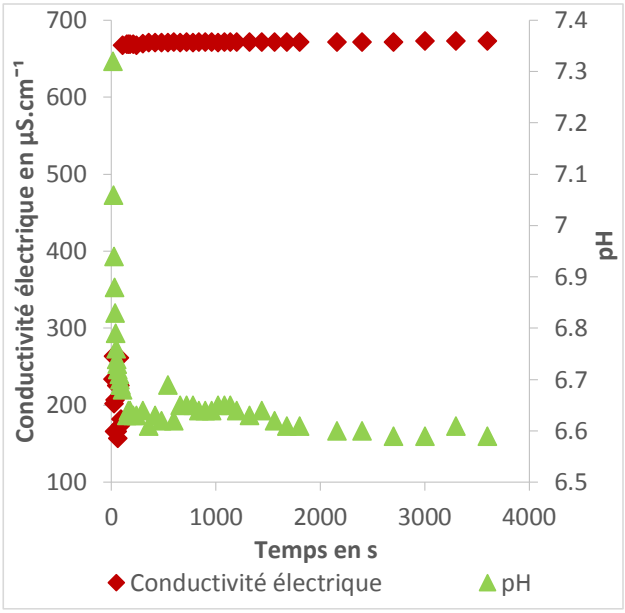


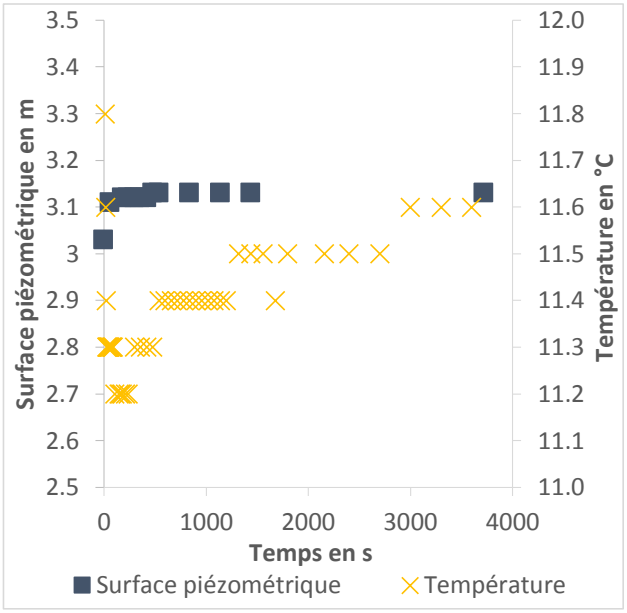


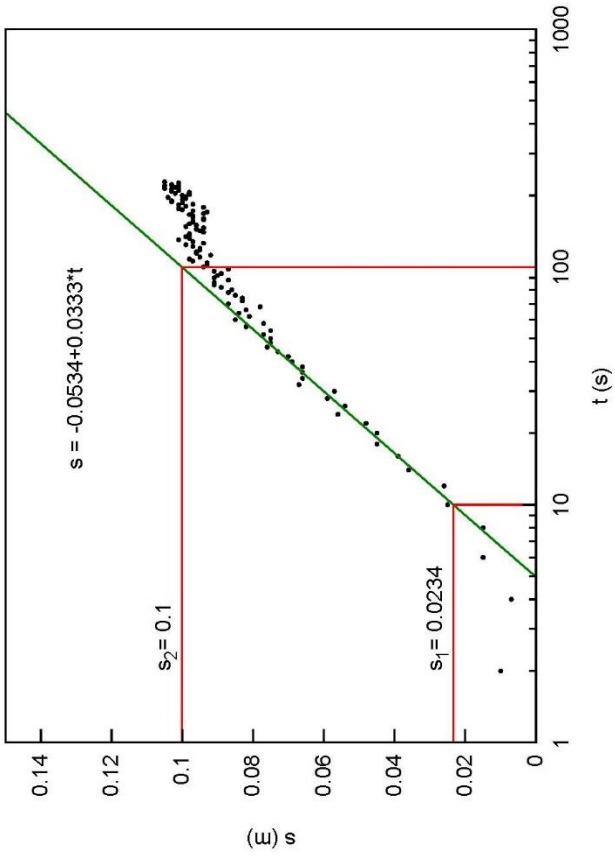


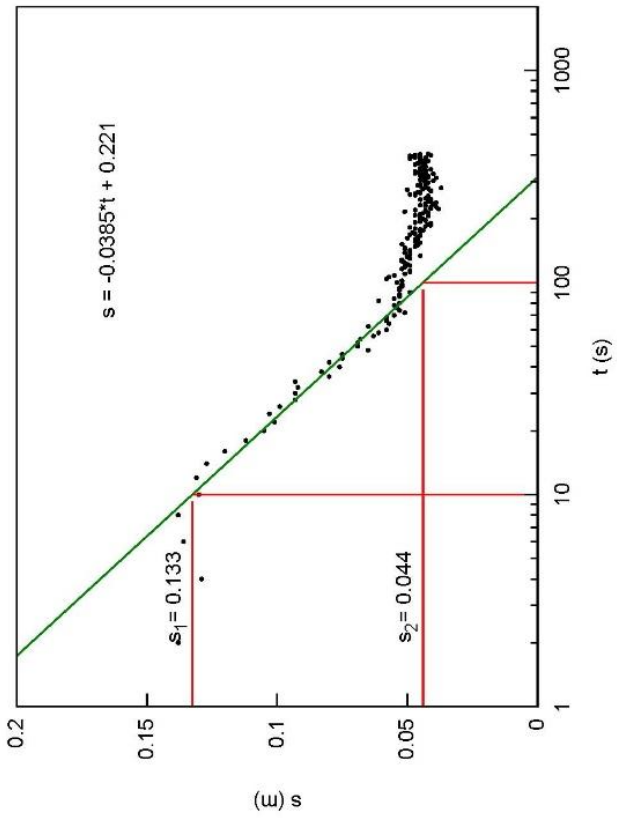


4) Essai de débit à Oussy

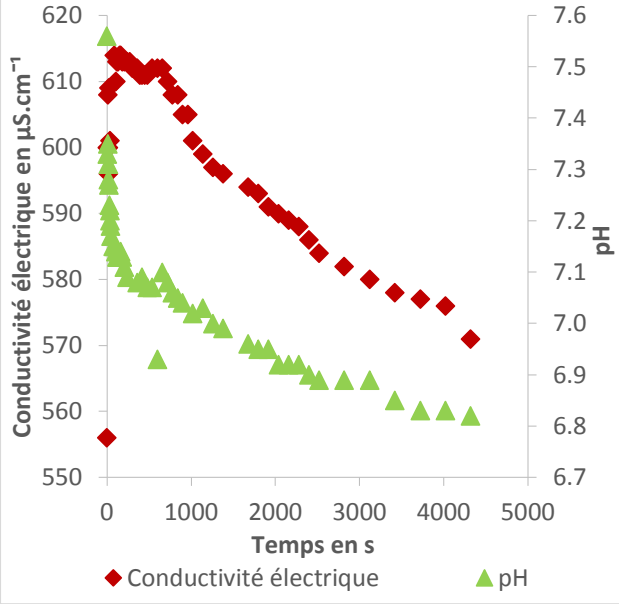


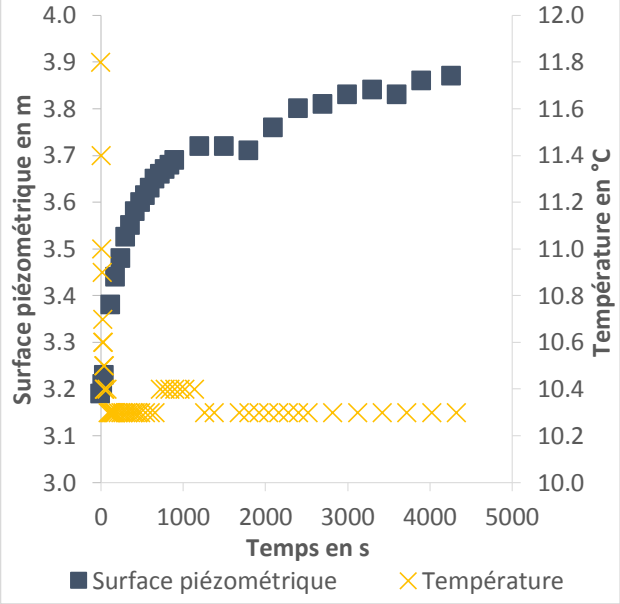


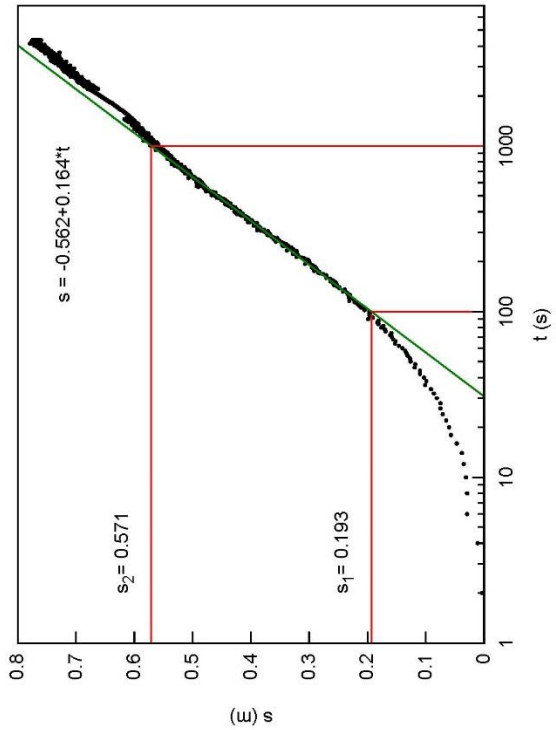


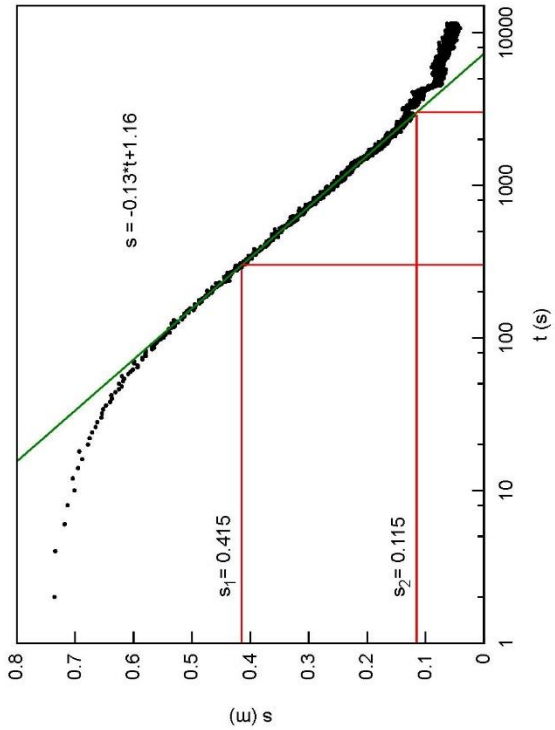


5) Essai de débit à Caillotière









6) Synthèse de la perméabilité et de la transmissivité calculées pour les puits pompés

	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 1	Oussy	Caillotière
Perméabilité en $m.s^{-1}$	7,38E-05	4,54E-04	9,91E-05	1,52E-03	2,95E-04
Transmissivité en $m^2.s^{-1}$	8,75E-05	9,52E-04	4,86E-04	6,80E-03	1,60E-03

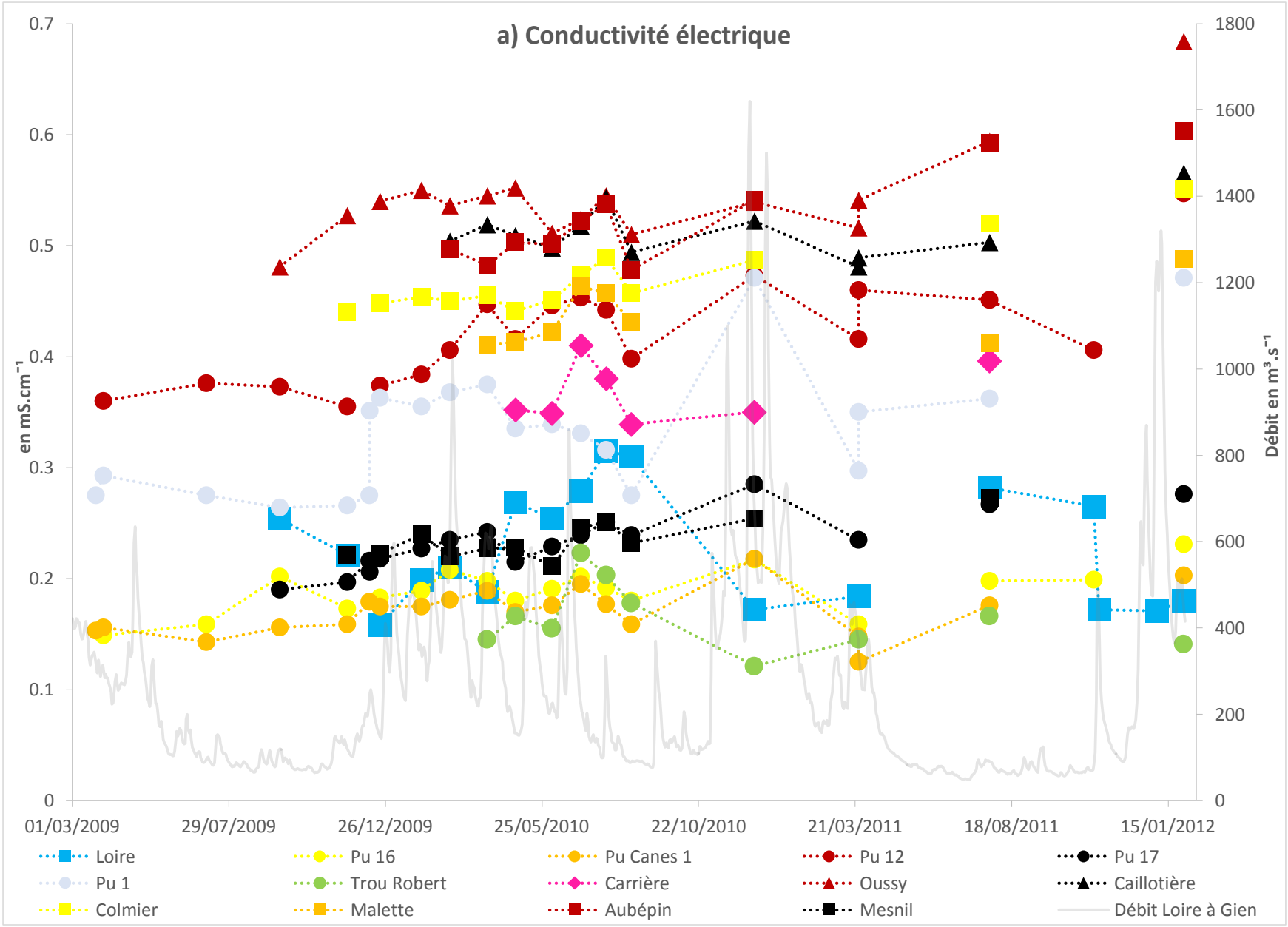
E_ Evolutions de la conductivité électrique (a), du pH (b) et de la concentration en éléments majeurs (c : HCO_3^- ; d : Ca^{2+} ; e : Cl^- ; f :SO_4^{2-} ; g : Na^+ ; h : Mg^{2+} ; i : K^+ ; j : SiO_2 ; k : NO_3^-) dans les eaux de la nappe alluviale, de la nappe de Beauce et de la Loire à Châteuneuf-sur-Loire.

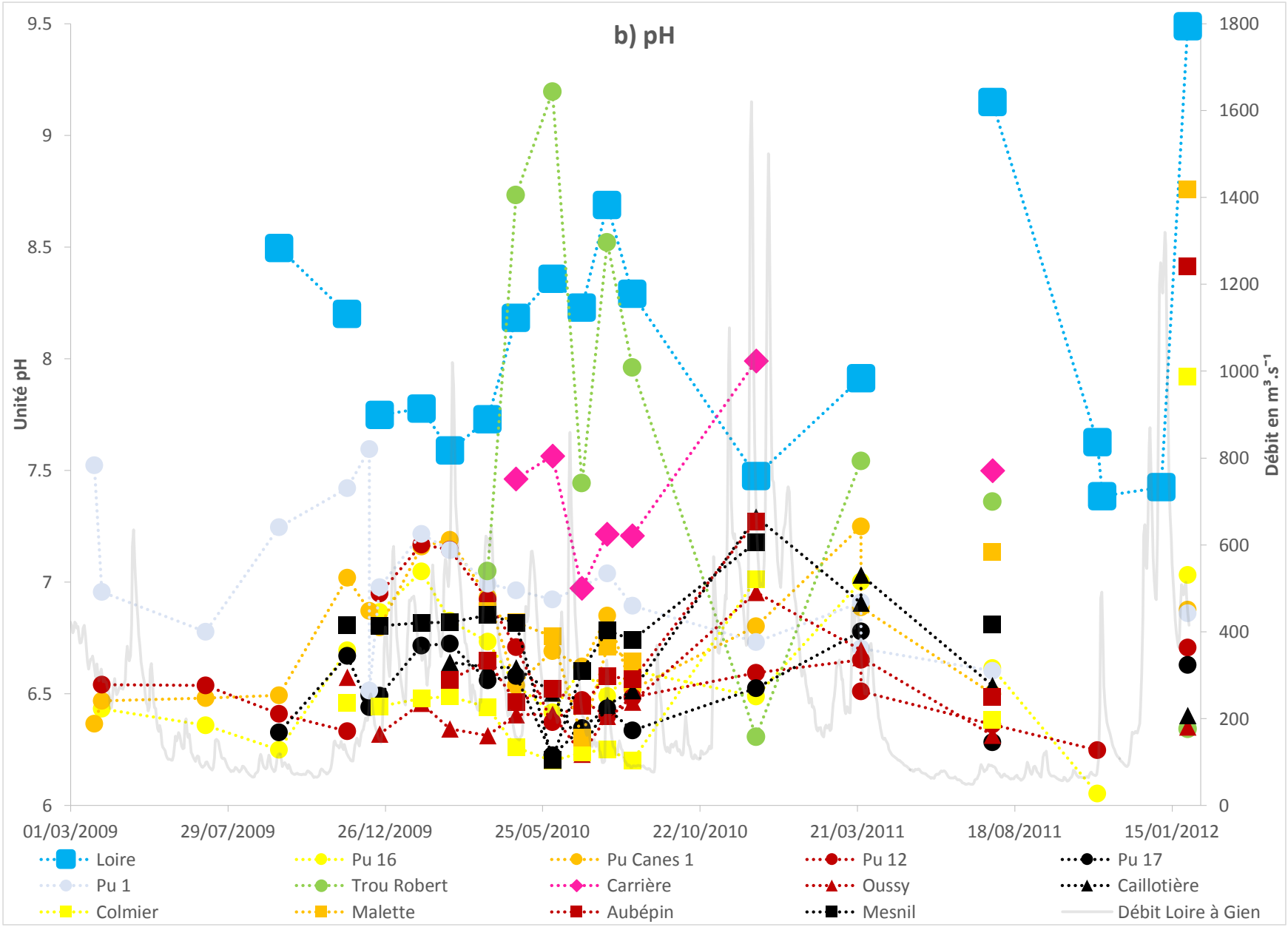
Légende identique pour tous les graphiques des pages suivantes.

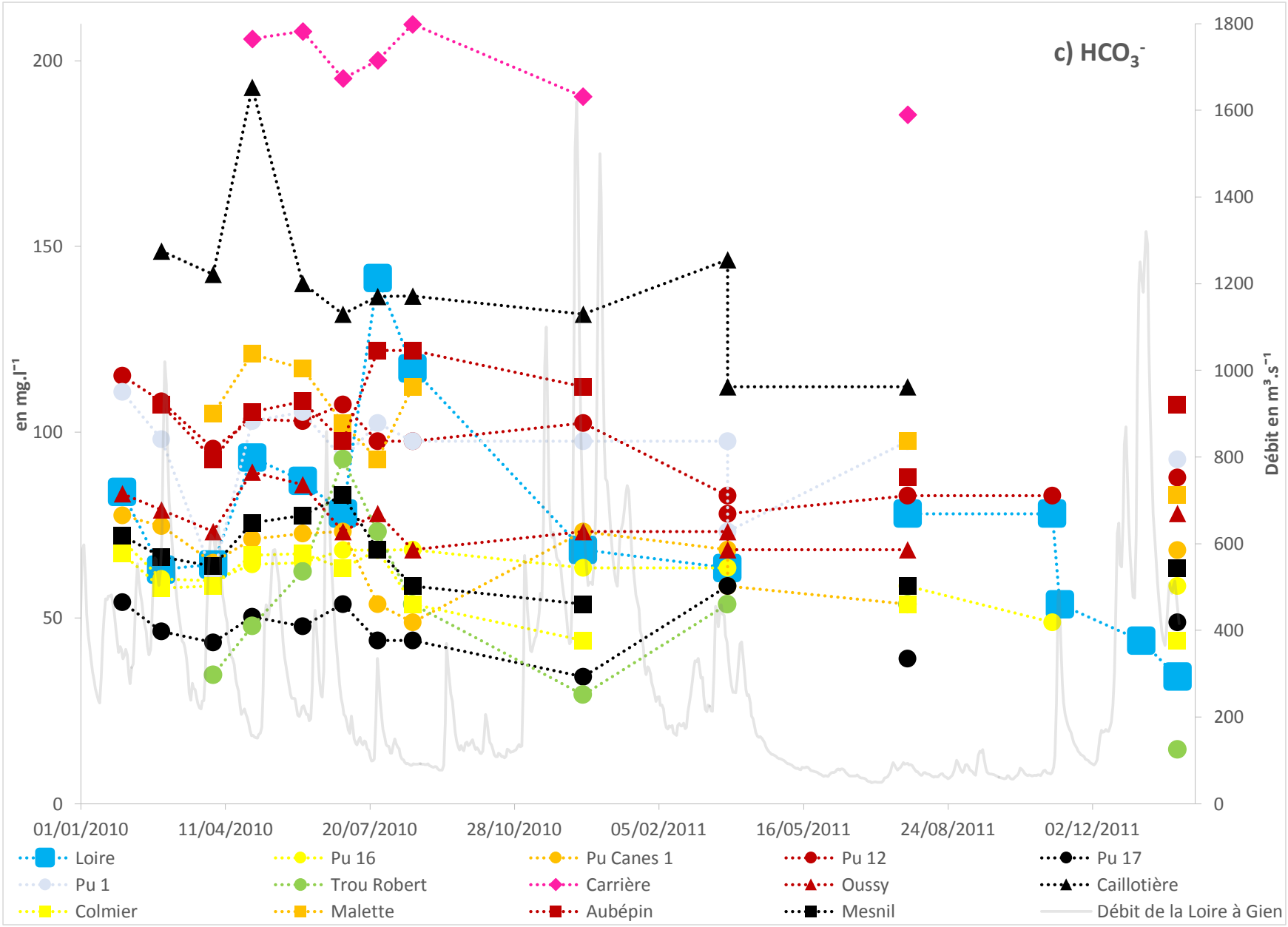
Une page est attribuée à chaque paramètre physico-chimique ou élément majeur :

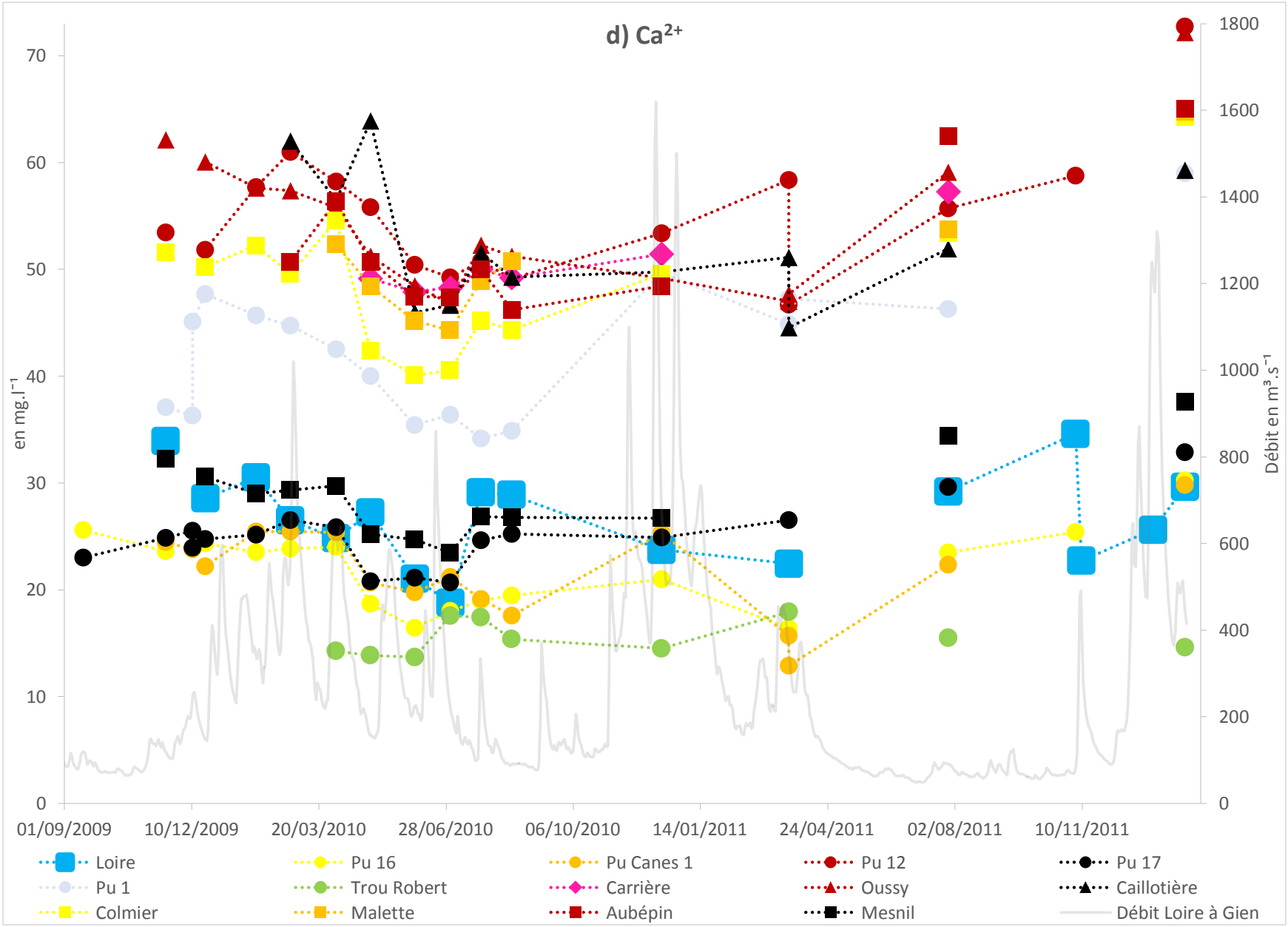
- Sur cette page, le graphique représente l'ensemble des mesures en fonction du temps pour chaque site de prélèvements.
- A ce graphique est ajouté, en gris clair, le débit de la Loire à Gien (à lire sur l'axe vertical secondaire).

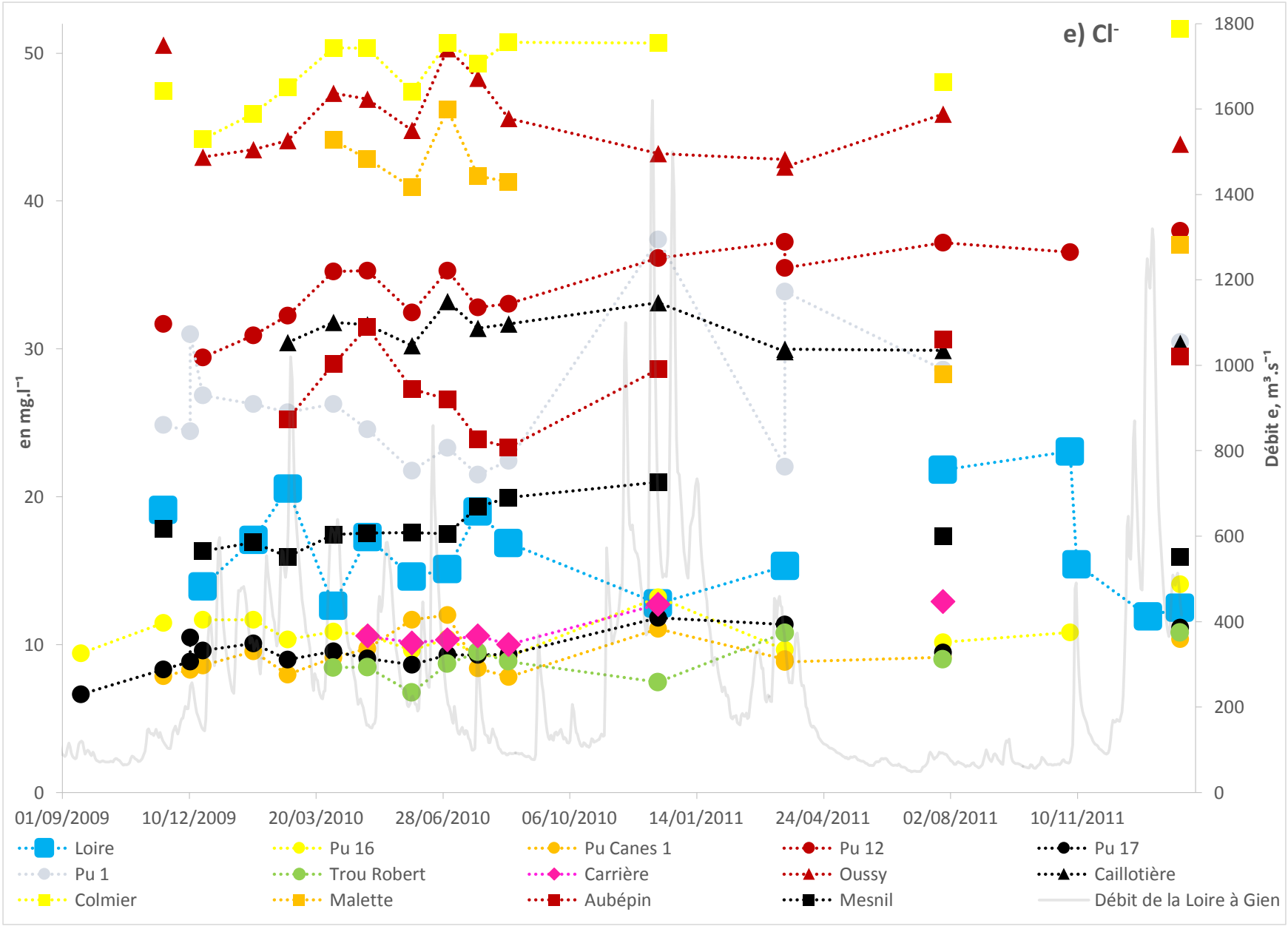
Remarque : les lignes pointillées qui relient les données d'un même site de prélèvements ont été ajoutées pour faciliter la lecture. Ces lignes ne doivent en aucun cas faire penser que l'évolution du paramètre représenté est linéaire entre deux points de mesure, d'autant plus s'ils sont espacés de plusieurs mois.

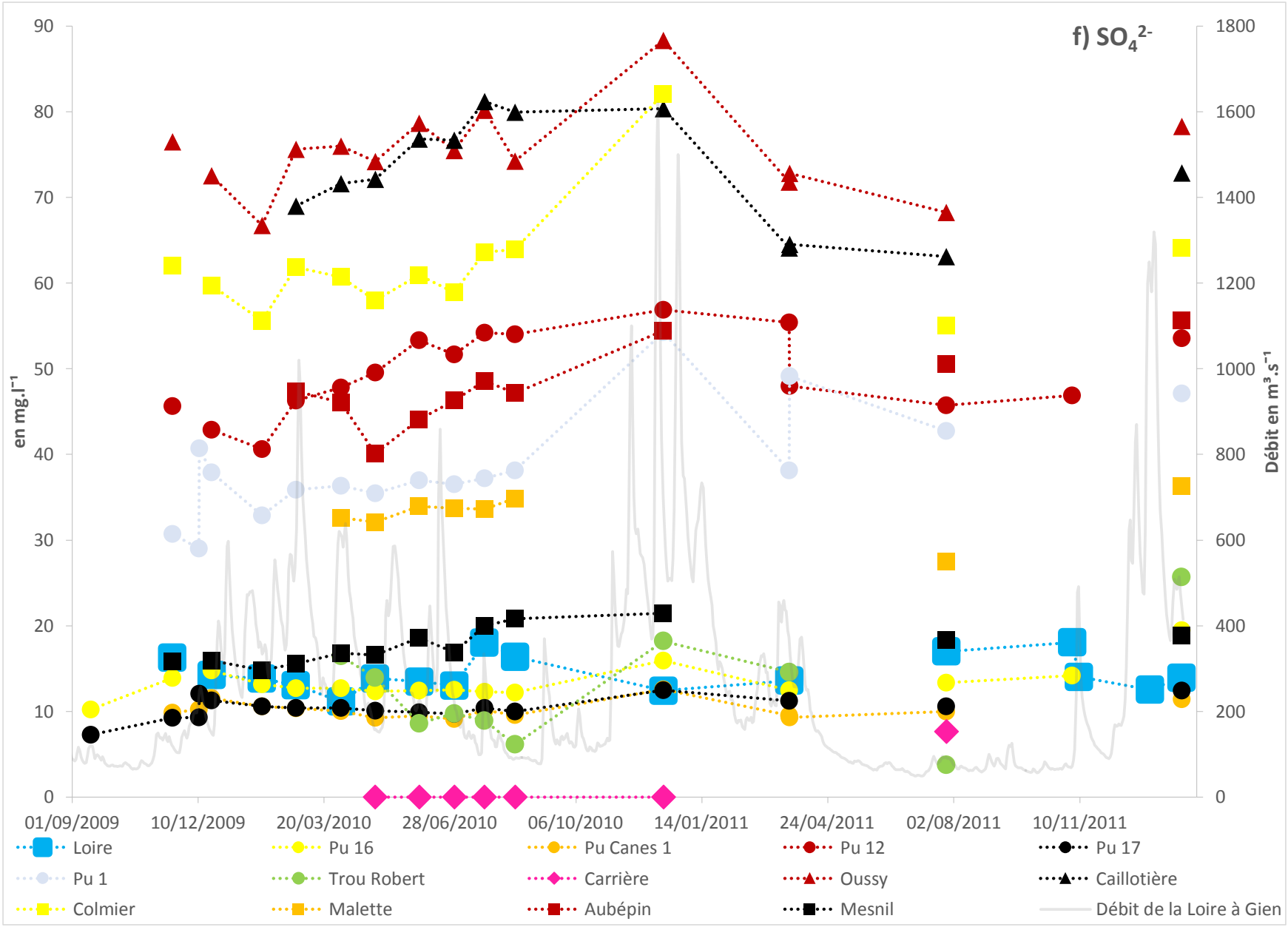

a) Conductivité électrique
en mS.cm⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/03/2009
29/07/2009
26/12/2009
25/05/2010
22/10/2010
21/03/2011
18/08/2011
15/01/2012
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien

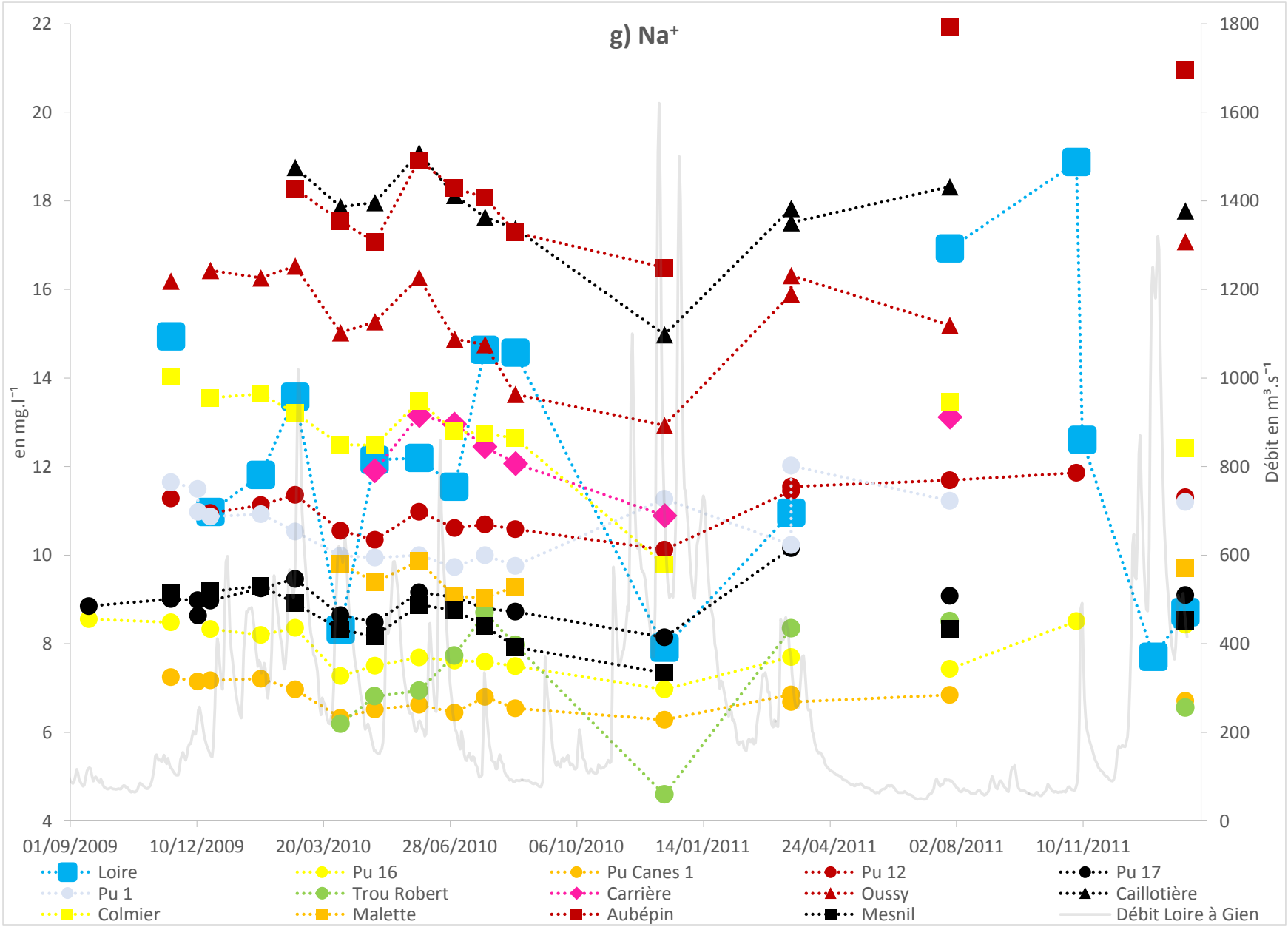

b) pH
Unité pH
Débit en m³.s⁻¹
9.5
9
8.5
8
7.5
7
6.5
6
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/03/2009
29/07/2009
26/12/2009
25/05/2010
22/10/2010
21/03/2011
18/08/2011
15/01/2012
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien

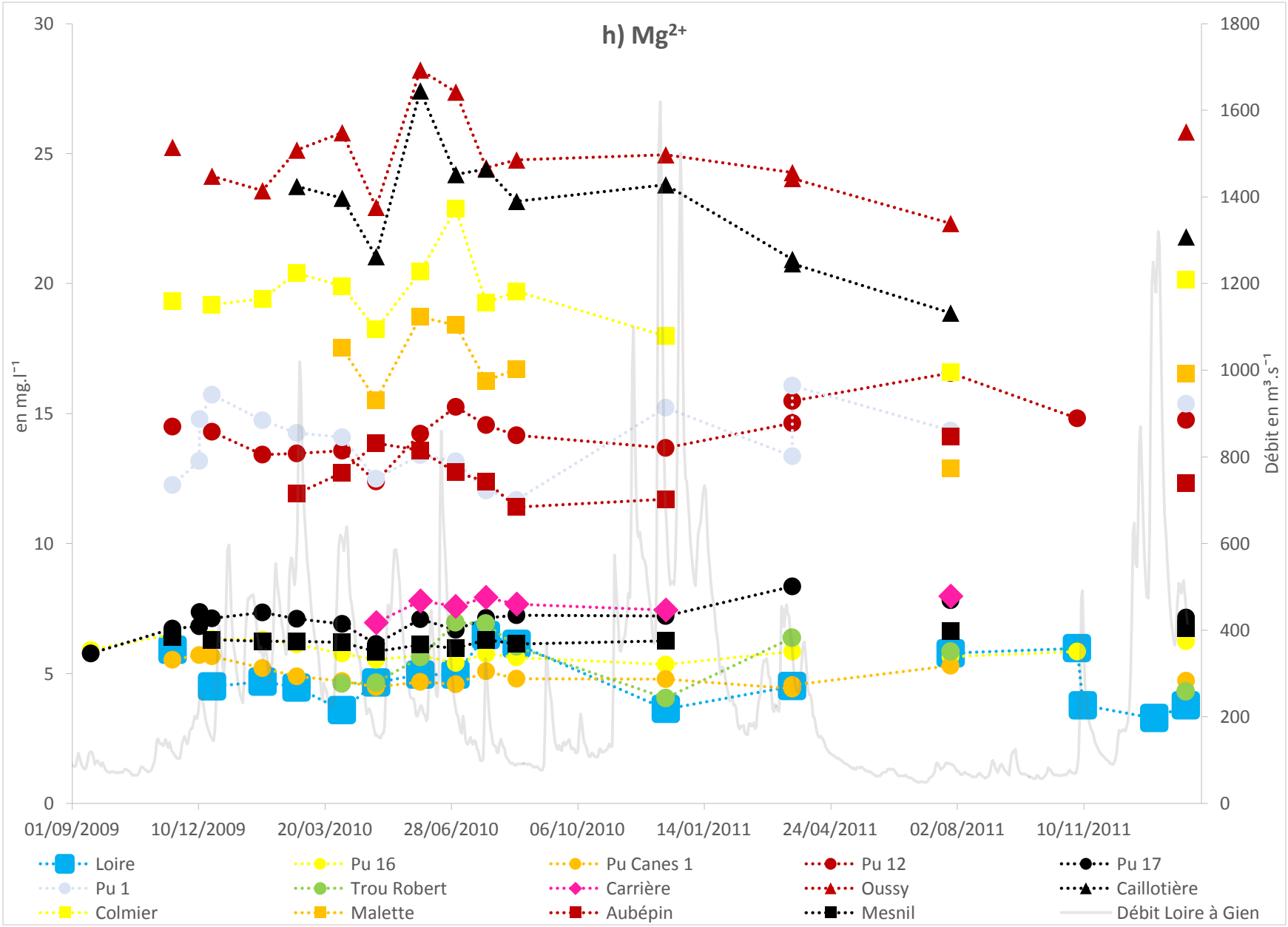

c) HCO3-
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
0
50
100
150
200
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/01/2010
11/04/2010
20/07/2010
28/10/2010
05/02/2011
16/05/2011
24/08/2011
02/12/2011
Loire
Pu 1
Colmier
Pu 16
Trou Robert
Malette
Pu Canes 1
Carrière
Aubépin
Pu 12
Oussy
Mesnil
Pu 17
Caillotière
Débit de la Loire à Gien

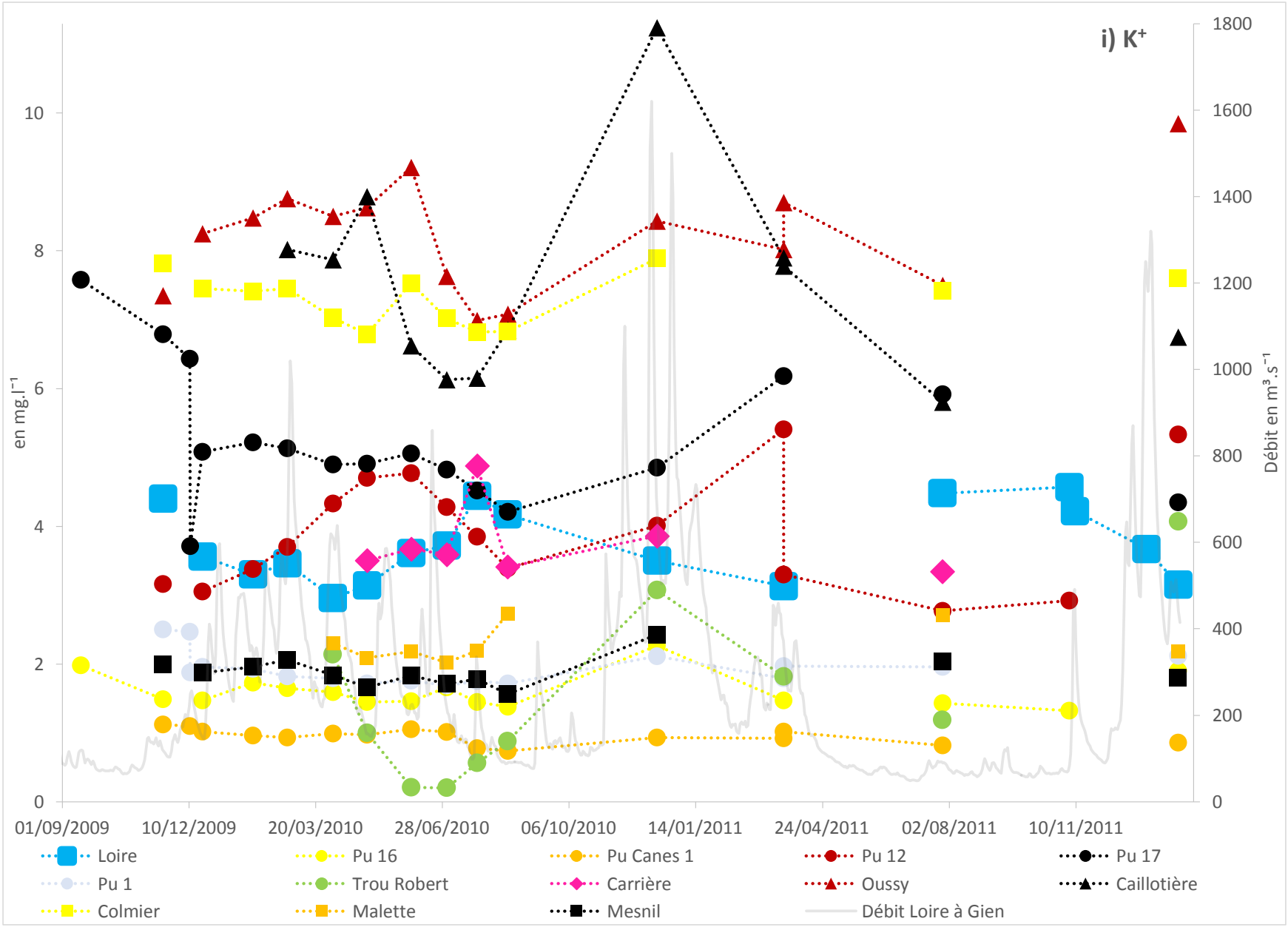

d) Ca2+
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
0
10
20
30
40
50
60
70
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien

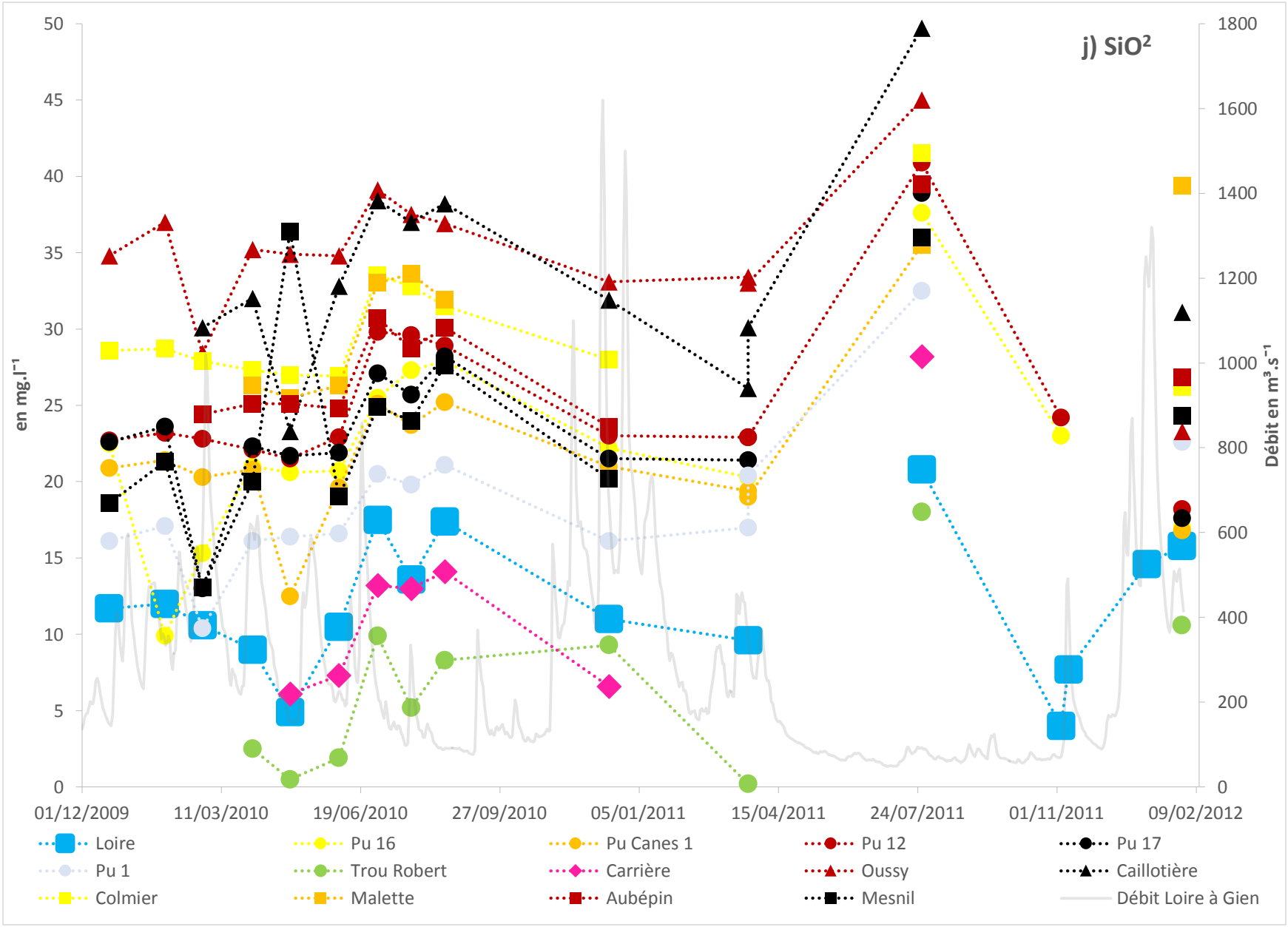

e) Cl-
en mg.l-1
Débit e, m3.s-1
0
10
20
30
40
50
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit de la Loire à Gien

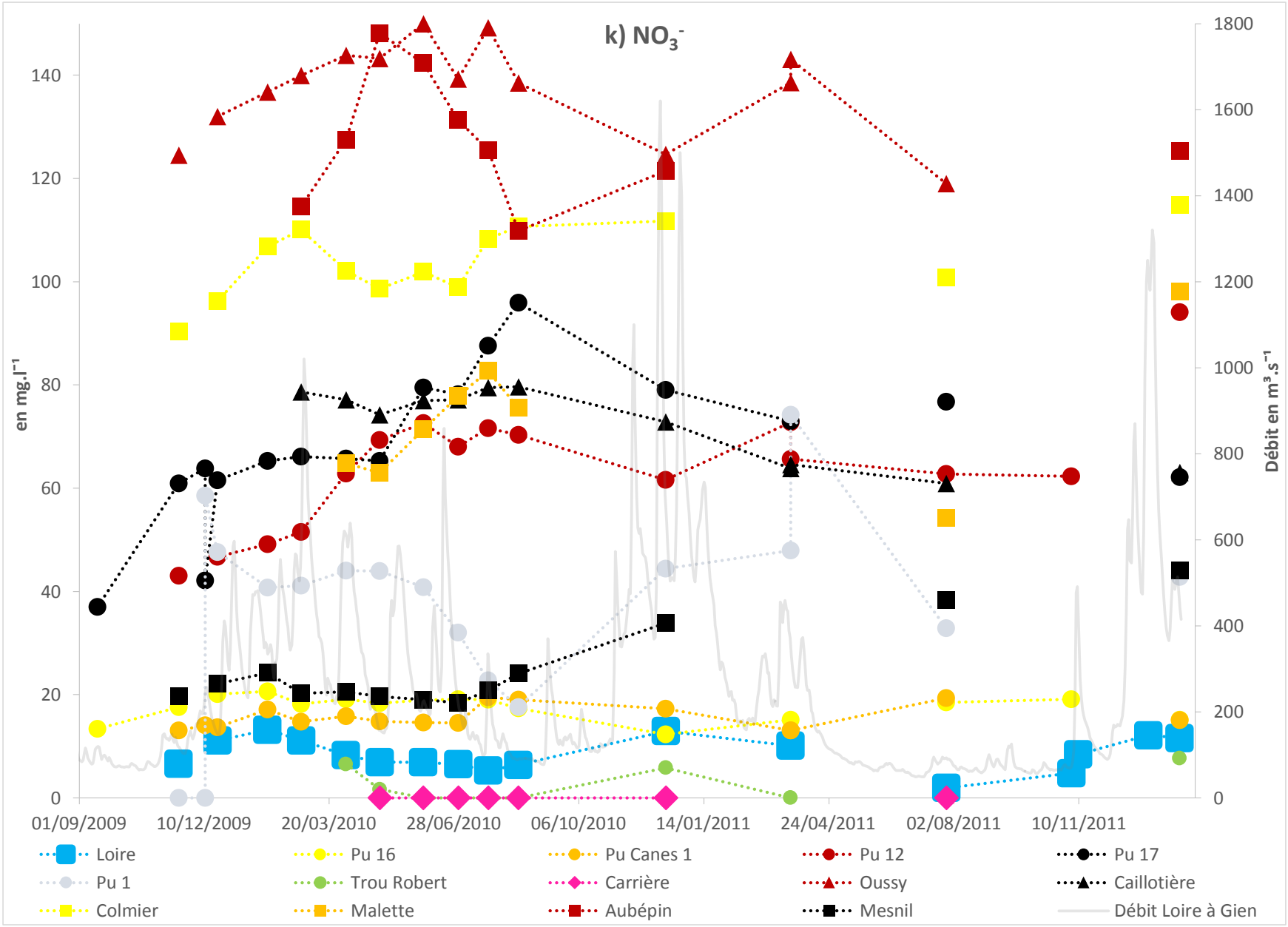

f) SO_4^{2-}
en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit de la Loire à Gien


g) Na+
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 1
Colmier
Pu 16
Trou Robert
Malette
Pu Canes 1
Carrière
Aubépin
Pu 12
Oussy
Mesnil
Pu 17
Caillotière
Débit Loire à Gien


h) Mg2+
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
30
25
20
15
10
5
0
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien


i) K+
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
0
2
4
6
8
10
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Mesnil
Débit Loire à Gien


j) SiO²
en mg.l⁻¹
Débit en m³.s⁻¹
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
01/12/2009
11/03/2010
19/06/2010
27/09/2010
05/01/2011
15/04/2011
24/07/2011
01/11/2011
09/02/2012
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien


k) NO3-
en mg.l-1
Débit en m3.s-1
0
20
40
60
80
100
120
140
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
01/09/2009
10/12/2009
20/03/2010
28/06/2010
06/10/2010
14/01/2011
24/04/2011
02/08/2011
10/11/2011
Loire
Pu 16
Pu Canes 1
Pu 12
Pu 17
Pu 1
Trou Robert
Carrière
Oussy
Caillotière
Colmier
Malette
Aubépin
Mesnil
Débit Loire à Gien

F_ Paramètres physico-chimiques et concentrations des éléments majeurs des eaux de la nappe alluviale, dans le secteur du méandre de Guilly

Date	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(NO_2)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
		$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$											‰ vs VSMOW	
15/09/2009	Pu 16	0.202	6.2		9.4	13.3		10.2			25.6	2.0	8.6	5.9		
19/11/2009		0.173	6.7		11.5	17.6		13.9			23.6	1.5	8.5	6.5	-7.77	-54.8
20/12/2009		0.183	6.9		11.7	20.1		14.8		22.5	24.4	1.5	8.3	6.3	-7.29	-52.9
29/01/2010		0.189	7.0		11.7	20.6		13.1	70.8	9.9	23.5	1.7	8.2	6.3	-8.01	-54.9
25/02/2010		0.208	6.8		10.4	18.2		12.7	60.5	15.3	23.9	1.7	8.4	6.1	-7.93	-55.0
02/04/2010		0.198	6.7		10.9	19.1		12.7	60.0	21.0	24.0	1.6	7.3	5.8	-7.95	-54.1
29/04/2010		0.180	6.5		10.7	18.3		12.3	64.4	20.6	18.7	1.5	7.5	5.5	-7.88	-54.0
03/06/2010		0.191	6.4		9.6	19.0		12.4	64.9	20.7	16.4	1.5	7.7	5.7	-7.90	-54.4
01/07/2010		0.202	6.6		10.4	19.1		12.5	68.3	25.5	18.0	1.7	7.6	5.4	-7.62	-53.2
25/07/2010		0.192	6.5		9.3	19.0		12.3	68.3	27.3	19.0	1.5	7.6	5.8	-7.59	-52.8
18/08/2010		0.180	6.6		9.2	17.3		12.2	68.3	27.9	19.5	1.4	7.5	5.6	-7.62	-52.0
14/12/2010		0.217	6.5		13.2	12.3		15.9	63.4	22.2	21.0	2.3	7.0	5.3	-7.71	-54.4
24/03/2011		0.159	7.0		9.7	15.2		12.5	63.4	20.3	16.4	1.5	7.7	5.9	-7.59	-51.5
28/07/2011		0.198	6.6		10.2	18.5		13.3	58.6	37.6	23.5	1.4	7.4	5.6	-7.76	-53.0
04/11/2011		0.199	6.1		10.8	19.1		14.2	48.8	23.0	25.4	1.3	8.5	5.8	-7.76	-53.5
30/01/2012		0.231	7.0		14.1	15.1		19.5	58.6	17.0	30.2	1.9	8.4	6.2	-7.42	-49.7
19/11/2009	Pu Canes 1	0.159	7.0		7.9	13.1		9.8			24.5	1.1	7.2	5.5	-7.28	-49.9
10/12/2009		0.179	6.9		8.3	14.1		10.2			23.8	1.1	7.2	5.7	-7.15	-49.5
20/12/2009		0.175	6.8		8.6	13.7		11.5		20.9	22.2	1.0	7.2	5.7	-6.79	-48.7
29/01/2010		0.175	7.2		9.6	17.1		10.6	77.6	21.4	25.5	1.0	7.2	5.2	-7.18	-50.7
25/02/2010		0.181	7.2		8.0	14.8		10.4	74.7	20.3	25.4	0.9	7.0	4.9	-7.21	-50.1
02/04/2010		0.189	6.9		9.1	15.8		10.0	64.9	20.8	25.4	1.0	6.3	4.7	-7.28	-50.5
29/04/2010		0.170	6.5		9.7	14.9		9.2	71.2	12.5	20.7	1.0	6.5	4.5	-7.90	-52.0
03/06/2010		0.176	6.7		11.7	14.6		9.5	72.7	19.6	19.8	1.1	6.6	4.7	-7.45	-50.2
01/07/2010		0.195	6.6		12.0	14.5		9.1	73.2	25.1	21.2	1.0	6.4	4.6	-7.29	-50.5
25/07/2010		0.177	6.9		8.4	19.5		10.1	53.7	23.7	19.1	0.8	6.8	5.1	-7.27	-50.6
18/08/2010		0.159	6.5		7.8	19.1		9.6	48.8	25.2	17.6	0.7	6.5	4.8	-7.23	-51.3
14/12/2010		0.218	6.8		11.1	17.3		12.6	73.2	21.0	25.4	0.9	6.3	4.8	-7.32	-51.4
24/03/2011		0.125	6.9		9.0	13.0		9.5	68.3	19.4	15.7	0.9	6.9	4.4	-7.40	-50.1
24/03/2011		0.148	7.3		8.8	13.1		9.3	58.6	19.0	12.9	1.0	6.7	4.6	-7.47	-51.6
29/07/2011		0.176	6.5		9.1	19.3		10.0	53.7	35.5	22.4	0.8	6.8	5.3	-7.34	-50.5
30/01/2012		0.203	6.9		10.4	15.0		11.4	68.3	16.8	29.8	0.9	6.7	4.7	-7.49	-53.9

Date	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(NO_2)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
		$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$											‰ vs VSMOW	
19/11/2009	Pu 12	0.355	6.3		31.7	43.0		45.6			53.5	3.2	11.3	14.5	-6.81	-50.3
20/12/2009		0.374	7.0		29.4	46.7		42.9		22.7	51.8	3.1	11.0	14.3	-6.44	-46.7
29/01/2010		0.384	7.2		30.9	49.1		40.6	115.2	23.2	57.7	3.4	11.1	13.4	-6.69	-47.3
25/02/2010		0.406	7.1		32.3	51.5		46.3	108.3	22.8	61.0	3.7	11.4	13.5	-6.78	-47.2
02/04/2010		0.447	6.9		35.2	62.8		47.8	95.6	22.1	58.2	4.3	10.6	13.6	-7.04	-46.9
29/04/2010		0.416	6.7		35.3	69.3		49.6	103.5	21.5	55.8	4.7	10.3	12.4	-6.88	-47.8
03/06/2010		0.446	6.4		32.5	72.6		53.3	103.0	22.9	50.4	4.8	11.0	14.2	-7.15	-48.5
01/07/2010		0.453	6.5		35.3	68.0		51.7	107.4	29.8	49.2	4.3	10.6	15.3	-6.84	-49.0
25/07/2010		0.442	6.4		32.8	71.6		54.2	97.6	29.6	50.7	3.9	10.7	14.6	-6.93	-48.4
18/08/2010		0.398	6.5		33.0	70.3		54.0	97.6	28.9	49.1	3.4	10.6	14.2	-6.98	-48.0
14/12/2010		0.473	6.6		36.1	61.6		56.9	102.5	23.0	53.4	4.0	10.1	13.7	-6.75	-47.6
23/03/2011		0.416	6.7		37.2	72.8		55.4	83.0	22.9	58.4	5.4	11.5	14.6	-6.85	-46.9
23/03/2011		0.460	6.5		35.5	65.6		48.0	78.1	22.9	46.7	3.3	11.6	15.5	-6.78	-47.4
28/07/2011		0.451	6.4		37.2	62.7		45.7	83.0	40.9	55.7	2.8	11.7	16.6	-6.95	-46.0
04/11/2011		0.406	6.2		36.6	62.3		46.9	83.0	24.2	58.8	2.9	11.9	14.8	-6.74	-45.8
30/01/2012		0.547	6.7		38.0	94.1		53.6	87.8	18.2	72.7	5.3	11.3	14.8	-6.56	-47.5
15/09/2009	Pu 17	0.190	6.3		6.7	37.0		7.3			23.0	7.6	8.9	5.8		
19/11/2009		0.197	6.7		8.3	61.0		9.2			24.9	6.8	9.0	6.7	-6.77	-48.2
10/12/2009		0.216	6.4		8.9	63.8		9.3			25.5	6.4	9.0	6.8	-6.83	-48.4
10/12/2009		0.206	6.5		10.5	42.1		12.1			23.9	3.7	8.6	7.4	-7.26	-51.7
20/12/2009		0.218	6.5		9.6	61.6		11.3		22.6	24.7	5.1	9.0	7.1	-6.84	-48.3
29/01/2010		0.227	6.7		10.1	65.3		10.6	54.2	23.6	25.2	5.2	9.3	7.4	-6.98	-49.3
25/02/2010		0.235	6.7		9.0	66.1		10.4	46.4	13.0	26.5	5.1	9.5	7.1	-7.10	-49.5
02/04/2010		0.242	6.6		9.6	65.8		10.4	43.4	22.3	25.9	4.9	8.6	6.9	-6.87	-49.3
29/04/2010		0.215	6.6		9.1	65.3		10.1	50.3	21.7	20.8	4.9	8.5	6.1	-7.59	-51.0
03/06/2010		0.229	6.2		8.6	79.5		9.9	47.8	21.9	21.1	5.1	9.2	7.1	-7.17	-49.2
01/07/2010		0.239	6.3		9.3	78.2		9.7	53.7	27.1	20.7	4.8	9.1	6.7	-6.96	-48.9
25/07/2010		0.251	6.4		9.3	87.6		10.4	43.9	25.7	24.6	4.5	8.8	7.1	-7.03	-49.1
18/08/2010		0.239	6.3		9.3	95.9		10.0	43.9	28.2	25.2	4.2	8.7	7.2	-7.10	-48.9
14/12/2010		0.285	6.5		11.8	79.0		12.5	34.2	21.5	24.9	4.9	8.1	7.2	-7.06	-49.1
24/03/2011		0.235	6.8		11.4	73.0		11.2	58.6	21.4	26.5	6.2	10.2	8.4	-6.96	-48.1
29/07/2011		0.267	6.3		9.5	76.7		10.6	39.0	38.9	29.6	5.9	9.1	7.8	-7.14	-48.1
30/01/2012		0.276	6.6		11.2	62.2		12.4	48.8	17.6	32.9	4.4	9.1	7.2	-7.46	-50.5
19/11/2009	Pu 1	0.266	7.4		24.9			30.7			37.1	2.5	11.6	12.3	-7.63	-55.5
10/12/2009		0.275	7.6		24.4			29.0			36.3	2.5	11.5	13.2	-7.53	-53.5
10/12/2009		0.351	6.5		31.0	58.6		40.7			45.1	1.9	11.0	14.8	-7.53	-55.4
20/12/2009		0.363	7.0		26.9	47.6		37.9		16.1	47.7	2.0	10.9	15.7	-7.54	-53.0
29/01/2010		0.355	7.2		26.3	40.7		32.9	110.8	17.1	45.7	1.9	10.9	14.7	-7.61	-54.4
25/02/2010		0.368	7.1		25.7	41.1		35.9	98.1	10.4	44.7	1.8	10.5	14.3	-7.90	-54.8
02/04/2010		0.375	7.0		26.3	44.0		36.3	61.5	16.1	42.5	1.8	10.0	14.1	-7.95	-55.2
29/04/2010		0.335	7.0		24.6	44.0		35.4	103.0	16.4	40.0	1.7	9.9	12.5	-7.94	-54.1
03/06/2010		0.339	6.9		21.8	40.8		37.0	105.4	16.6	35.4	1.8	10.0	13.4	-7.87	-55.1
01/07/2010		0.331	7.0		23.3	32.0		36.5	92.7	20.5	36.4	1.7	9.7	13.2	-7.68	-53.9
25/07/2010		0.316	7.0		21.5	22.8		37.2	102.5	19.8	34.2	1.8	10.0	12.0	-7.66	-53.4
18/08/2010		0.275	6.9		22.4	17.6		38.2	97.6	21.1	34.9	1.7	9.8	11.7	-7.76	-54.7
14/12/2010		0.471	6.7		37.4	44.4		54.3	97.6	16.1	49.7	2.1	11.3	15.2	-7.50	-53.2
24/03/2011		0.350	6.7		22.0	47.9		38.1	97.6	17.0	44.9	1.8	10.2	13.4	-7.51	-52.6
24/03/2011		0.297	6.9		33.9	74.2		49.1	73.2	20.4	47.2	2.0	12.0	16.1	-7.44	-51.9
29/07/2011		0.362	6.6		28.6	32.9		42.7	97.6	32.5	46.3	2.0	11.2	14.3	-7.49	-51.1
30/01/2012		0.471	6.9		30.5	42.8		47.1	92.7	22.6	59.0	2.1	11.2	15.4	-7.13	-50.1

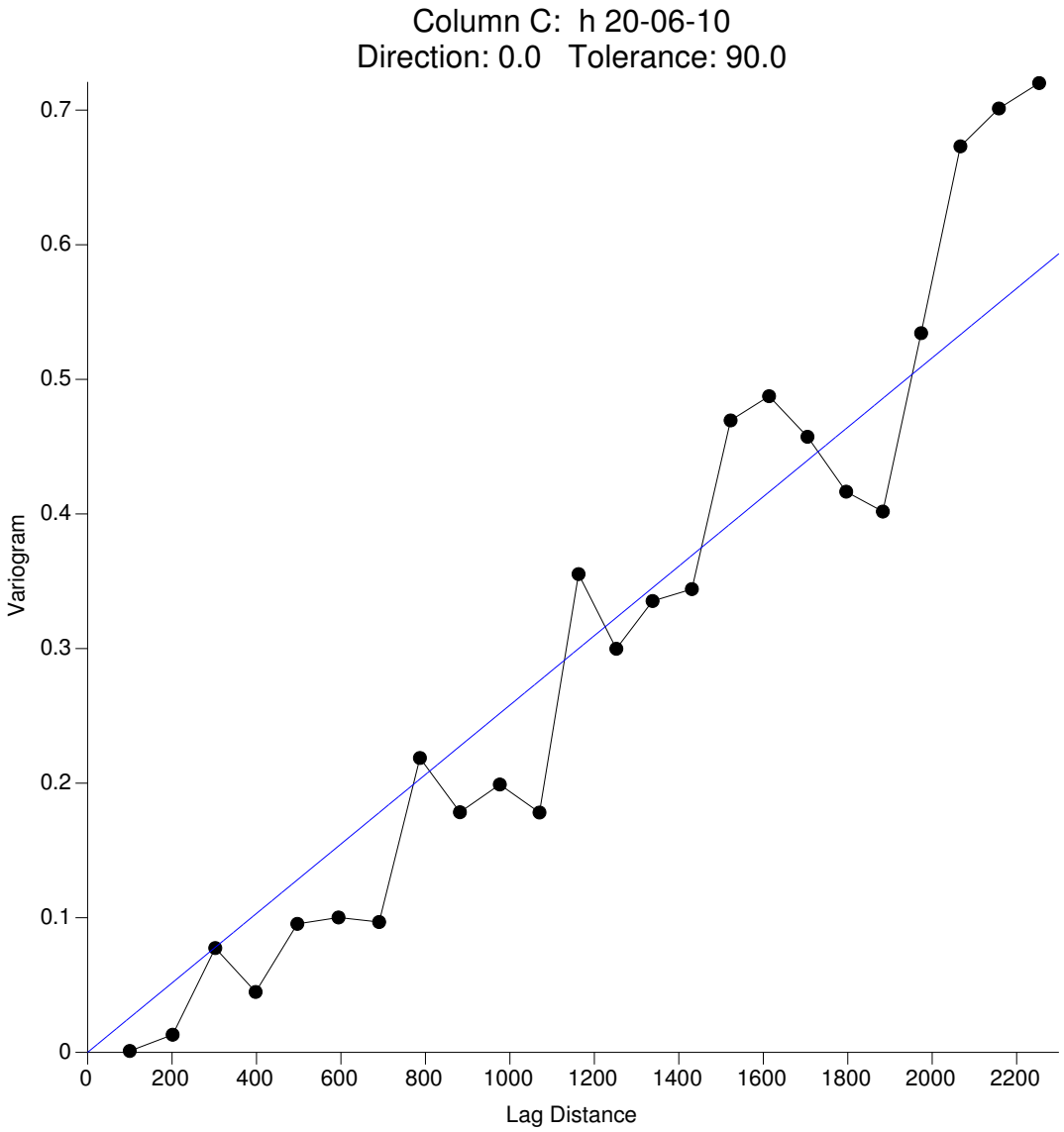
Date	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(NO_2)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
		$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$											‰ vs VSMOW	
01/04/2010	Trou Robert	0.145	7.0		8.5	6.5		16.4	34.6	2.5	14.3	2.1	6.2	4.6	-6.01	-44.4
29/04/2010		0.166	8.7		8.5	1.7		13.9	47.8	0.5	13.9	1.0	6.8	4.6	-4.79	-40.0
03/06/2010		0.155	9.2		6.8			8.6	62.5	1.9	13.7	0.2	6.9	5.6	-3.89	-34.5
01/07/2010		0.223	7.4		8.7			9.7	92.7	9.9	17.6	0.2	7.7	7.0	-4.15	-36.3
25/07/2010		0.203	8.5		9.5			8.9	73.2	5.2	17.4	0.6	8.7	6.9	-4.05	-35.2
18/08/2010		0.178	8.0		8.9			6.1	53.7	8.3	15.4	0.9	8.0	6.0	-4.36	-38.6
14/12/2010		0.121	6.3		7.5	5.8		18.2	29.3	9.3	14.5	3.1	4.6	4.1	-9.17	-63.1
24/03/2011		0.145	7.5		10.8			14.6	53.7	0.2	17.9	1.8	8.3	6.4	-6.37	-46.8
29/07/2011		0.166	7.4		9.0			3.7	53.7	18.0	15.5	1.2	8.5	5.8	-0.65	-20.7
30/01/2012		0.141	6.3		10.8	7.7		25.7	14.6	10.6	14.6	4.1	6.6	4.3	-6.53	-43.4
15/09/2009	Ménivelle	0.581	6.7		27.0	113.4	1.9	66.9			85.5	6.9	16.0	21.8		
02/04/2010		0.669	6.8		38.8	212.3		99.9	74.7	28.7	76.8	7.7	15.5	23.5	-5.99	-41.7
28/04/2010		0.626	6.9		39.6	212.7		96.1	84.9	20.6	74.4	7.4	15.2	21.5	-6.19	-42.1
02/06/2010		0.636	6.6		38.4	232.0		102.0	87.4	28.7	73.2	8.6	16.5	25.5	-6.32	-43.0
30/06/2010		0.659	6.8		39.9	231.6	3.5	106.4	97.6	33.8	73.8	8.4	16.5	25.5	-6.07	-42.9
24/07/2010		0.690	7.0		39.6	221.1		105.5	102.5	33.2	75.1	8.5	15.3	24.1	-5.96	-41.2
17/08/2010		0.635	7.1		39.8	218.7		104.9	117.1	34.8	76.1	8.5	15.3	23.5	-6.14	-42.5
13/12/2010		0.036	7.7			6.0		3.0	9.8	2.5	3.0	3.0	0.7	0.9	-11.95	-85.7
28/07/2011		0.208	6.8		9.0	34.9		19.1	19.5	25.8	21.2	6.4	4.3	5.9	-7.83	-56.4
30/01/2012		0.254	6.9		11.4	43.6		23.8	39.0	16.8	31.6	6.6	4.7	6.4	-6.43	-43.6
20/11/2009	Oussy	0.527	6.6		50.5	124.6		76.5			62.1	7.4	16.2	25.2	-6.52	-44.7
20/12/2009		0.540	6.3		43.0	132.0		72.6		34.8	60.0	8.3	16.4	24.1	-6.02	-43.5
29/01/2010		0.550	6.5		43.5	136.7		66.7	83.4	37.0	57.6	8.5	16.3	23.6	-6.31	-44.0
24/02/2010		0.536	6.3		44.1	140.0		75.6	79.1	28.4	57.4	8.8	16.5	25.1	-6.70	-45.0
01/04/2010		0.545	6.3		47.3	143.9		76.0	73.2	35.2	55.8	8.5	15.0	25.8	-6.51	-45.6
28/04/2010		0.552	6.4		46.9	143.3		74.2	89.3	34.9	51.2	8.6	15.3	22.9	-6.45	-44.5
02/06/2010		0.511	6.4		44.8	150.0		78.7	85.9	34.8	48.5	9.2	16.3	28.2	-6.81	-45.7
30/06/2010		0.524	6.2		50.3	139.3		75.5	73.2	39.1	46.8	7.6	14.9	27.4	-6.47	-45.1
24/07/2010		0.545	6.4		48.3	149.2		80.2	78.1	37.5	52.3	7.0	14.8	24.5	-6.60	-44.9
17/08/2010		0.510	6.5		45.6	138.5		74.3	68.3	36.9	51.2	7.1	13.6	24.8	-6.36	-43.3
13/12/2010		0.539	7.0		43.2	124.7		88.4	73.2	33.1	49.2	8.4	12.9	25.0	-6.51	-45.2
23/03/2011		0.541	6.7		42.8	138.6		71.8	73.2	33.4	47.0	8.0	15.9	24.3	-6.34	-43.7
23/03/2011		0.516	6.7		42.3	143.1		72.8	68.3	33.0	47.7	8.7	16.3	24.1	-6.48	-44.3
28/07/2011		0.594	6.3		45.9	119.0		68.3	68.3	45.0	59.1	7.5	15.2	22.3	-6.56	-43.8
30/01/2012		0.684	6.4		43.8	151.5		78.3	78.1	23.3	72.2	9.9	17.1	25.8	-6.56	-43.9
24/02/2010	Caillotière	0.504	6.6		30.4	78.6		69.0	148.8	30.1	62.0	8.0	18.8	23.7	-6.56	-45.6
01/04/2010		0.519	6.6		31.8	77.1		71.6	142.5	32.0	56.4	7.9	17.9	23.3	-6.97	-45.8
28/04/2010		0.509	6.6		31.6	74.3		72.2	192.8	23.3	63.9	8.8	18.0	21.0	-6.96	-45.7
02/06/2010		0.498	6.5		30.2	77.0		76.8	140.1	32.8	45.9	6.6	19.1	27.4	-6.85	-45.6
30/06/2010		0.518	6.3		33.2	77.1		76.7	131.8	38.4	46.7	6.1	18.1	24.2	-6.49	-45.0
24/07/2010		0.543	6.5		31.4	79.5		81.2	136.6	37.0	51.5	6.2	17.6	24.4	-6.51	-44.5
17/08/2010		0.494	6.5		31.7	79.6		80.0	136.6	38.2	49.3	6.9	17.4	23.2	-6.45	-44.6
13/12/2010		0.522	7.3		33.1	72.8		80.4	131.8	31.9	49.8	11.2	15.0	23.8	-6.50	-44.5
23/03/2011		0.489	7.0		29.8	63.9		64.1	146.4	26.1	51.1	7.9	17.8	20.9	-6.51	-44.9
23/03/2011		0.481	6.9		30.0	64.6		64.5	112.2	30.1	44.5	7.8	17.5	20.8	-6.43	-45.3
28/07/2011		0.503	6.5		29.9	61.0		63.1	112.2	49.7	51.9	5.8	18.3	18.9	-6.36	-44.3
30/01/2012		0.565	6.4		30.4	63.1		72.9	107.4	31.1	59.3	6.8	17.8	21.8	-6.65	-44.4

Date	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(NO_2)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
		$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$											‰ vs VSMOW	
19/11/2009	Colmier	0.440	6.5		47.4	90.3		62.0			51.6	7.8	14.0	19.3	-6.48	-46.0
16/12/2009		0.448	6.4		44.2	96.2		59.8		28.6	50.3	7.5	13.6	19.2	-5.87	-44.1
29/01/2010		0.454	6.5		45.9	106.8		55.6	67.3	28.7	52.2	7.4	13.6	19.4	-6.70	-45.6
24/02/2010		0.450	6.5		47.7	110.1		61.9	58.1	27.9	49.6	7.5	13.2	20.4	-6.79	-45.5
01/04/2010		0.455	6.4		50.4	102.1		60.7	58.6	27.3	54.6	7.0	12.5	19.9	-6.80	-45.8
28/04/2010		0.441	6.3		50.3	98.6		58.0	66.9	27.0	42.4	6.8	12.5	18.2	-6.54	-45.0
02/06/2010		0.451	6.2		47.4	101.9		61.0	67.3	26.9	40.1	7.5	13.5	20.4	-6.78	-46.8
30/06/2010		0.473	6.2		50.7	98.9		58.9	63.4	33.5	40.5	7.0	12.8	22.9	-6.44	-45.7
24/07/2010		0.489	6.3		49.3	108.3		63.6	68.3	32.8	45.2	6.8	12.7	19.3	-6.48	-45.1
17/08/2010		0.457	6.2		50.7	110.7		63.9	53.7	31.5	44.3	6.8	12.6	19.7	-6.43	-45.5
13/12/2010		0.487	7.0		50.7	111.8		82.1	43.9	28.0	49.6	7.9	9.8	18.0	-6.51	-45.7
28/07/2011		0.520	6.4		48.0	100.8		55.1	53.7	41.5	53.4	7.4	13.5	16.6	-6.56	-44.0
29/01/2012		0.551	7.9		51.6	114.9		64.1	43.9	26.2	64.2	7.6	12.4	20.2	-6.26	-45.4
31/03/2010	Malette	0.411	6.9		44.1	64.9		32.6	104.9	26.3	52.3	2.3	9.8	17.5	-6.27	-42.0
28/04/2010		0.413	6.8		42.9	63.0		32.1	121.0	25.5	48.4	2.1	9.4	15.5	-6.26	-42.6
02/06/2010		0.422	6.8		40.9	71.4		33.9	117.1	26.3	45.2	2.2	9.9	18.7	-6.35	-43.2
01/07/2010		0.463	6.3		46.2	77.8		33.7	102.5	33.0	44.3	2.0	9.1	18.4	-6.02	-41.4
24/07/2010		0.457	6.7		41.7	82.7		33.6	92.7	33.6	48.9	2.2	9.0	16.3	-6.02	-41.4
18/08/2010		0.431	6.6		41.3	75.5	2.3	34.9	112.2	31.9	50.8	2.7	9.3	16.7	-6.01	-41.3
28/07/2011		0.412	7.1		28.3	54.2		27.5	97.6	35.5	53.7	2.7	8.3	12.9	-7.44	-50.8
29/01/2012		0.488	8.8		37.0	98.1		36.3	83.0	39.4	64.7	2.2	9.7	16.5	-6.18	-44.2
25/02/2010	Aubépin	0.497	6.6		25.2	114.6		47.4	107.4	24.4	50.7	35.0	18.3	11.9	-6.63	-44.9
31/03/2010		0.482	6.6		29.0	127.5		46.1	92.7	25.1	56.4	33.1	17.5	12.7	-6.42	-44.6
28/04/2010		0.503	6.5		31.5	148.1		40.1	105.4	25.1	50.7	27.1	17.1	13.9	-6.70	-44.9
02/06/2010		0.501	6.5		27.3	142.3		44.1	108.3	24.8	47.5	23.9	18.9	13.6	-6.53	-44.3
30/06/2010		0.522	6.4		26.6	131.3		46.3	97.6	30.7	47.4	25.2	18.3	12.7	-6.23	-43.6
24/07/2010		0.537	6.6		23.9	125.5		48.6	122.0	28.7	50.0	26.0	18.1	12.4	-6.19	-43.3
17/08/2010		0.478	6.6		23.3	109.9		47.2	122.0	30.1	46.2	26.8	17.3	11.4	-6.50	-44.2
13/12/2010		0.541	7.3		28.6	121.5		54.4	112.2	23.6	48.4	45.4	16.5	11.7	-6.19	-43.1
28/07/2011		0.593	6.5		30.7			50.6	87.8	39.5	62.5	20.3	21.9	14.1	-6.48	-43.3
29/01/2012		0.603	8.4		29.5	125.3		55.7	107.4	26.8	65.1	35.5	20.9	12.3	-6.26	-43.7
20/11/2009	Prieurée	0.541	6.8		62.7	137.2		60.0			71.4	4.0	14.8	21.5	-6.22	-43.7
16/12/2009		0.521	6.8		55.2	147.0		57.6		24.2	69.3	3.6	14.1	20.8	-5.60	-41.5
29/01/2010		0.516	6.7		53.1	208.0		56.7	39.0	21.1	77.0	0.7	8.8	22.2	-5.97	-41.2
25/02/2010		0.546	6.6		57.8	220.6		58.7	40.0	20.9	72.5	0.8	10.3	24.8	-6.48	-43.6
31/03/2010		0.497	6.9		70.5	248.9		62.4	42.5	21.5	74.7	1.4	10.5	26.5	-6.43	-44.0
28/04/2010		0.572	6.5		73.4	270.6		62.3	43.9	21.5	76.6	1.0	10.0	25.4	-5.99	-41.7
02/06/2010		0.566	6.4		61.9	194.9		65.1	62.5	24.0	59.7	2.5	13.2	25.3	-6.60	-44.7
30/06/2010		0.578	6.6		61.3	213.1		66.1	53.7	28.1	62.4	1.7	11.3	23.3	-6.22	-43.1
24/07/2010		0.620	6.6		58.2	201.8		64.1	53.7	27.7	62.5	1.7	10.8	21.4	-6.25	-42.8
17/08/2010		0.573	6.6		58.6	193.5		64.7	63.4	30.1	61.6	2.0	11.4	22.5	-6.22	-43.4
13/12/2010		0.686	6.8		75.0	261.4		89.0	39.0	21.8	95.0	2.7	8.2	26.8	-6.45	-42.8
28/07/2011		0.584	6.7		42.2	134.3		73.2	39.0	38.6	67.5	1.1	9.7	18.0	-7.26	-49.6
29/01/2012		0.525	8.6		36.0	150.4		77.6	24.4	26.0	71.9	0.7	9.1	19.5	-7.48	-52.0

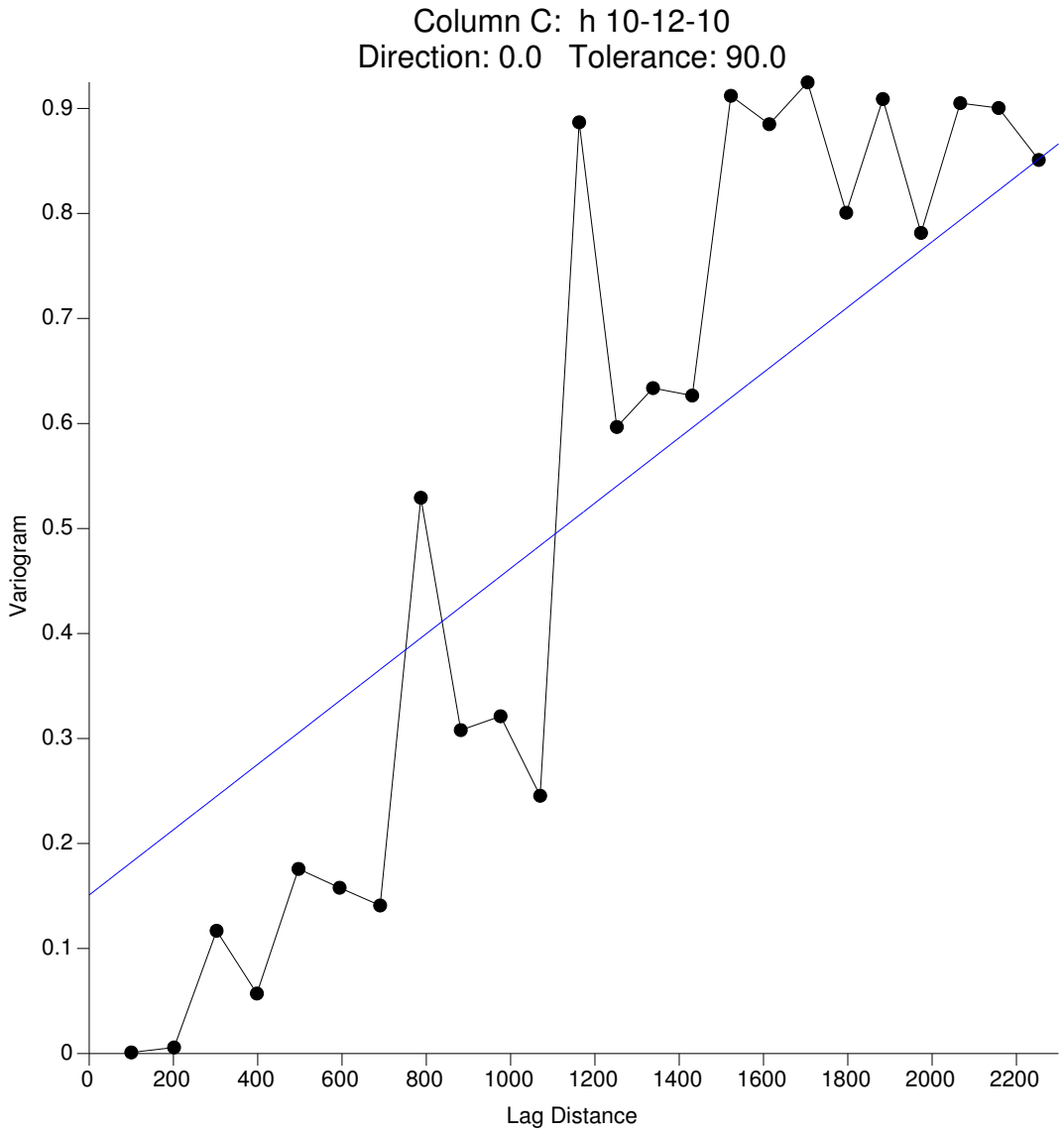
Date	Lieu	CE	pH	F^-	Cl^-	$(NO_3)^-$	$(NO_2)^-$	$(SO_4)^{2-}$	$(HCO_3)^-$	SiO_2	Ca^{2+}	K^+	Na^+	Mg^{2+}	$\delta^{18}O$	δ^2H
		$mS.cm^{-1}$		$mg.l^{-1}$											‰ vs VSMOW	
20/11/2009	Mesnil	0.221	6.8		17.8	19.7		15.8			32.3	2.0	9.1	6.4	-7.24	-51.5
16/12/2009		0.223	6.8		16.3	22.1		15.9		18.6	30.6	1.9	9.2	6.3	-6.88	-49.9
28/01/2010		0.240	6.8		16.9	24.3		14.8	72.2	21.3	29.0	2.0	9.3	6.2	-7.04	-48.9
24/02/2010		0.220	6.8		16.0	20.2		15.5	66.4	13.1	29.3	2.1	8.9	6.2	-7.16	-49.4
31/03/2010		0.227	6.9		17.5	20.6		16.8	63.9	20.0	29.8	1.8	8.3	6.2	-6.67	-47.0
28/04/2010		0.228	6.8		17.6	19.7		16.6	75.6	36.4	25.2	1.7	8.2	5.8	-6.82	-47.3
02/06/2010		0.211	6.2		17.6	19.1		18.6	77.6	19.0	24.7	1.8	8.9	6.1	-7.18	-49.1
30/06/2010		0.246	6.6		17.5	18.4		16.9	83.0	24.9	23.5	1.7	8.8	6.0	-6.84	-47.9
24/07/2010		0.251	6.8		19.3	20.8		20.0	68.3	24.0	26.8	1.8	8.4	6.3	-6.84	-46.4
17/08/2010		0.232	6.7		20.0	24.0		20.8	58.6	27.6	26.8	1.6	7.9	6.1	-6.72	-46.4
13/12/2010		0.254	7.2		21.0	33.8		21.5	53.7	20.2	26.7	2.4	7.3	6.3	-6.75	-47.1
28/07/2011		0.273	6.8		17.3	38.3		18.3	58.6	36.0	34.4	2.0	8.3	6.6	-6.87	-47.1
29/01/2012		0.272	8.6		16.0	44.1		18.9	63.4	24.3	37.6	1.8	8.5	6.8	-7.13	-46.5
30/04/2010	Carrière	0.352	7.5	0.6	10.6				205.9	6.1	49.1	3.5	11.9	7.0	-7.61	-52.1
02/06/2010		0.349	7.6	0.6	10.1				207.9	7.3	47.9	3.7	13.2	7.8	-7.80	-52.9
30/06/2010		0.410	7.0		10.3				195.2	13.2	48.3	3.6	13.0	7.6	-7.40	-52.1
24/07/2010		0.380	7.2		10.6				200.1	13.0	50.0	4.9	12.5	7.9	-7.41	-51.9
17/08/2010		0.339	7.2	0.6	10.0				209.8	14.1	49.2	3.4	12.1	7.7	-7.46	-51.8
13/12/2010		0.350	8.0	0.7	12.7				190.3	6.6	51.4	3.9	10.9	7.4	-7.33	-51.2
28/07/2011		0.396	7.5	0.7	12.9			7.7	185.4	28.2	57.3	3.3	13.1	8.0	-7.32	-51.8

G_ Variogrammes des cartes piézométriques du secteur du méandre de Guilly

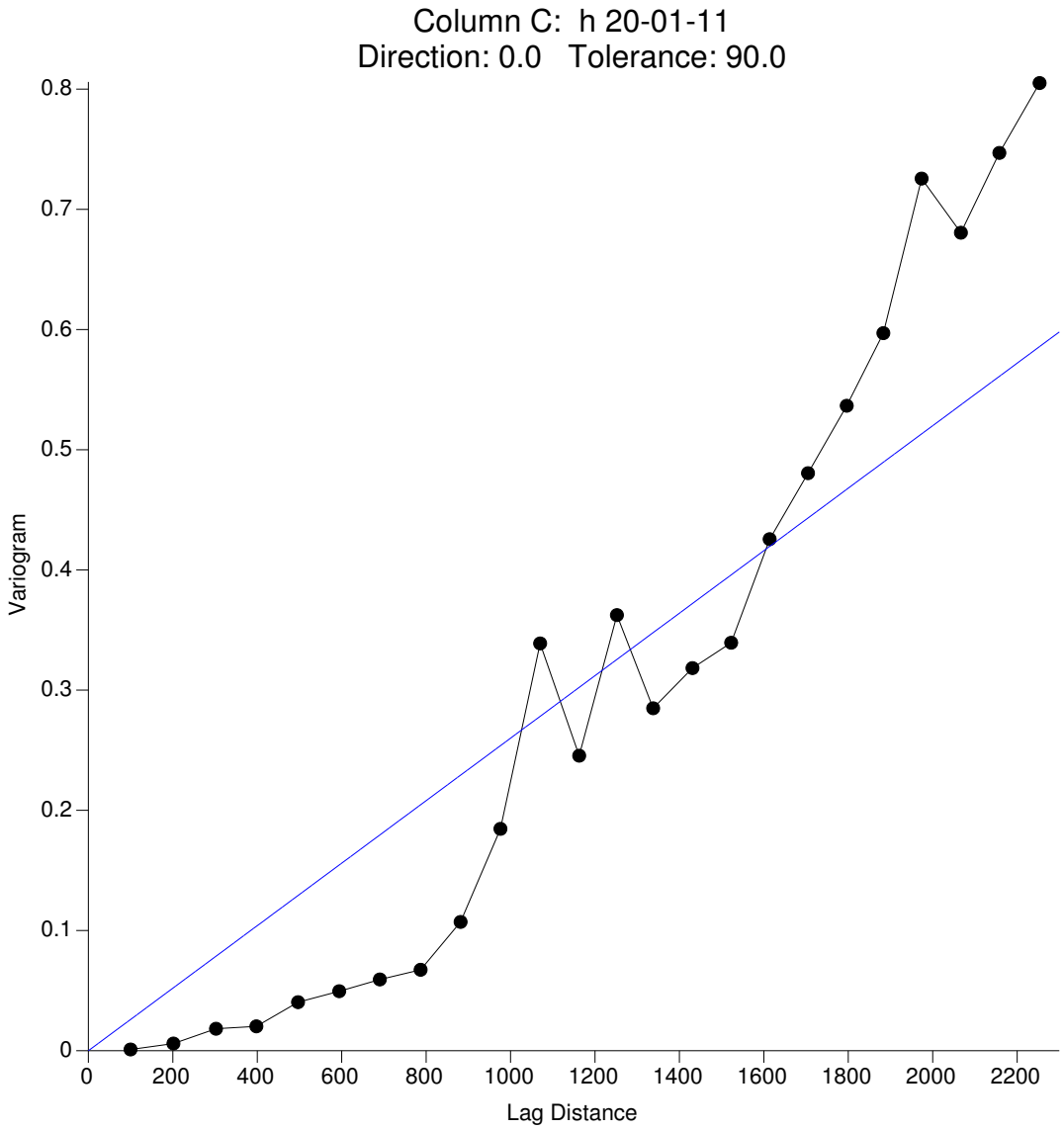
1) Variogramme de la carte piézométrique du 20/06/2010 (fig. 169)



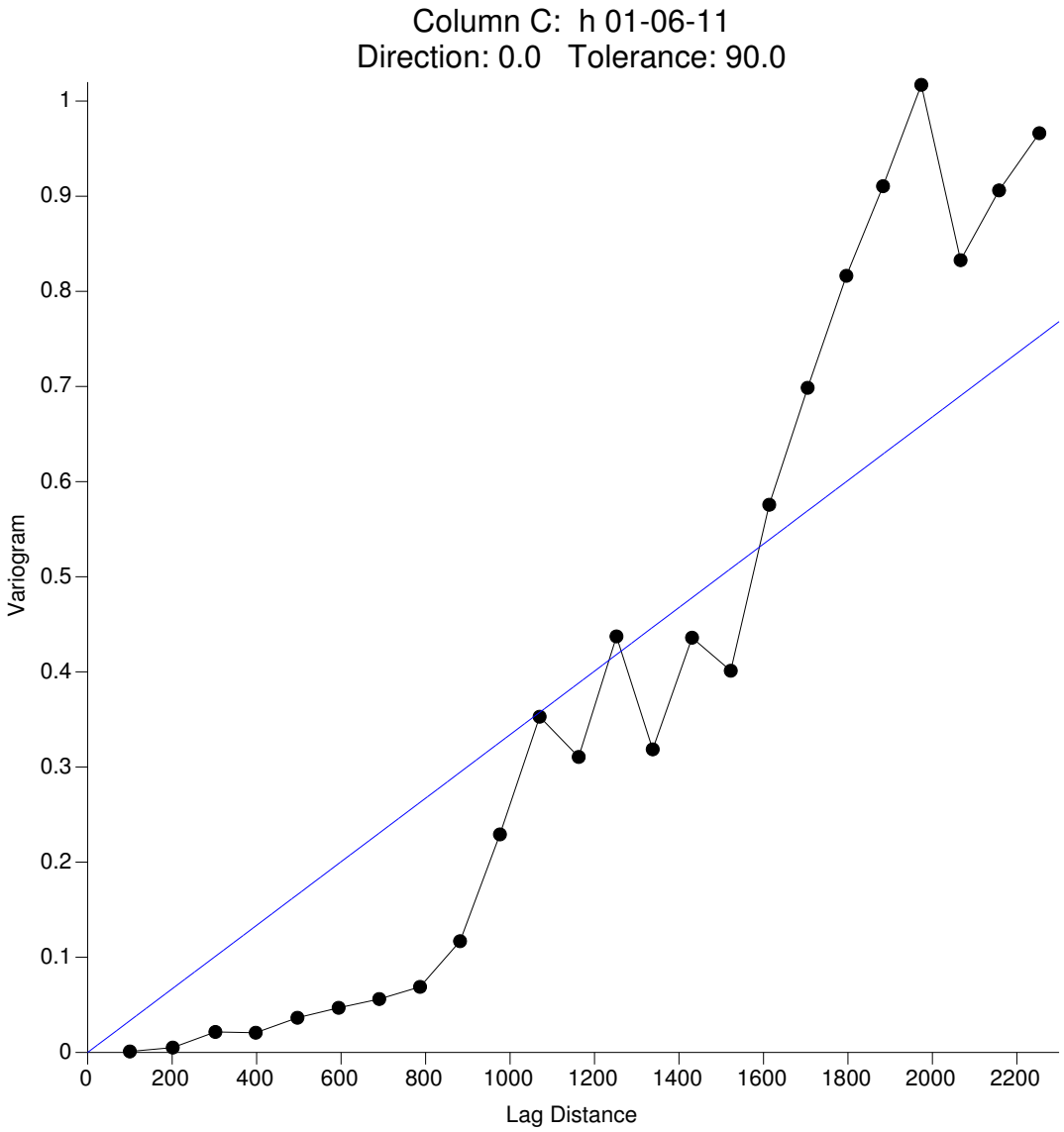
2) Variogramme de la carte piézométrique du 10/12/2010 (fig. 166)



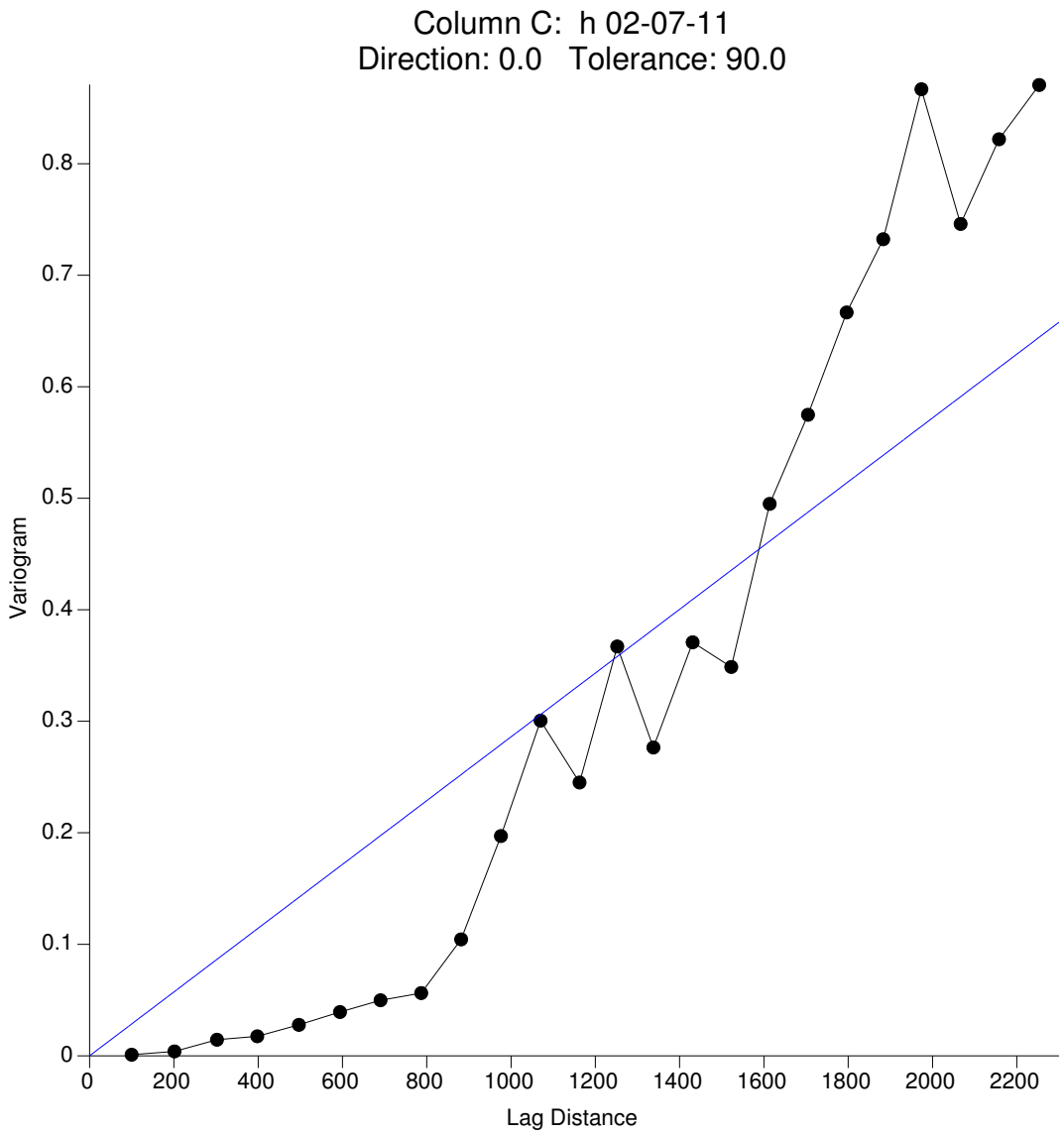
3) Variogramme de la carte piézométrique du 20/01/2011 (fig. 167)



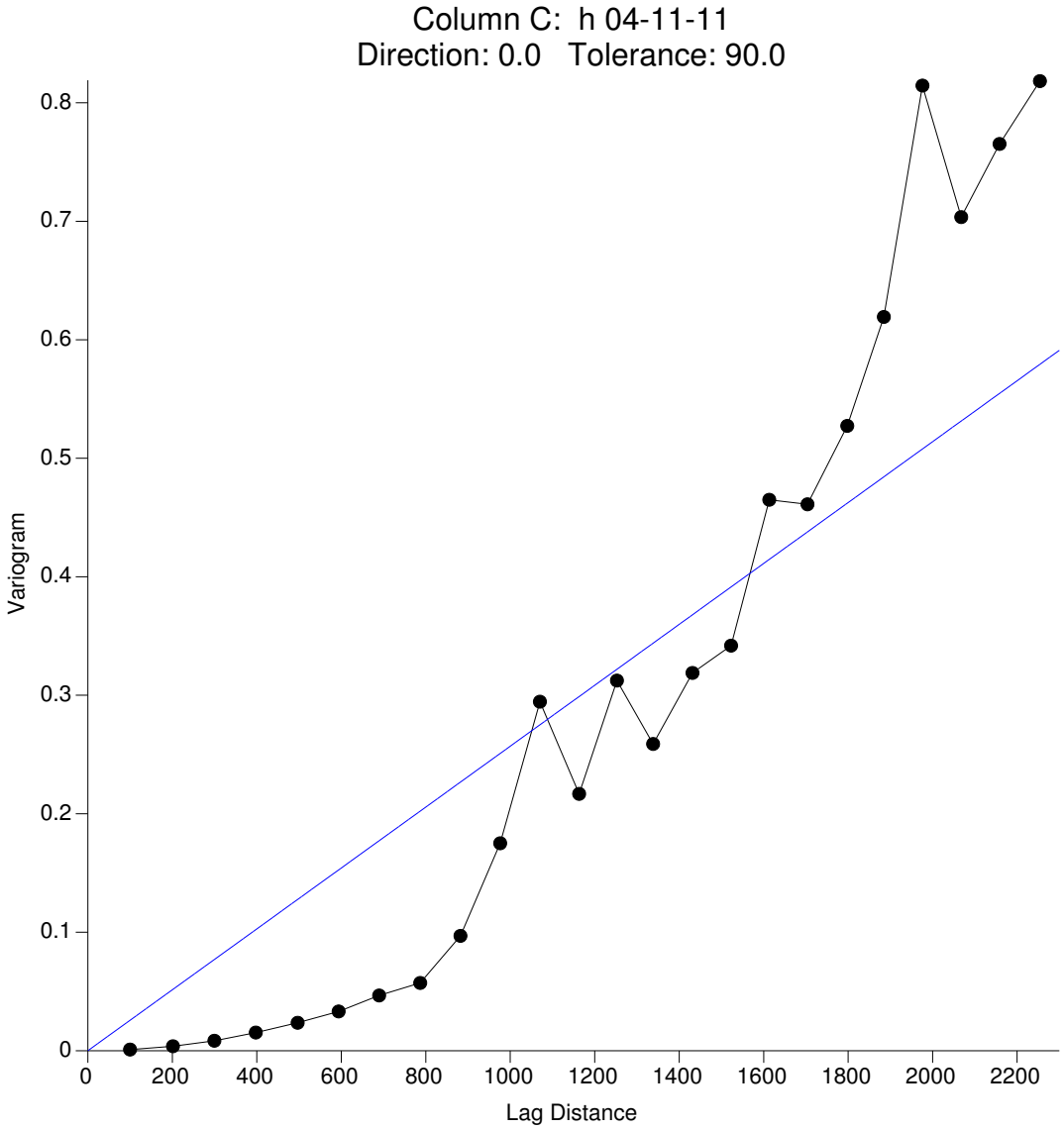
4) Variogramme de la carte piézométrique du 01/06/2011 (fig. 168)



5) Variogramme de la carte piézométrique du 02/07/2011 (fig. 174)



6) Variogramme de la carte piézométrique du 04/11/2011 (fig. 175)



H_ Données piézométriques de la nappe alluviale dans le secteur du méandre de Guilly (en mètres NGF)

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
23/03/2009	107.33	106.84												
24/03/2009	107.33	106.83												
25/03/2009	107.33	106.82												
26/03/2009	107.33	106.81												
27/03/2009	107.33	106.80												
28/03/2009	107.33	106.80												
29/03/2009	107.32	106.78												
30/03/2009	107.31	106.77	105.78	105.76										
31/03/2009	107.32	106.76	105.78	105.75										
01/04/2009	107.32	106.76	105.78	105.75										
02/04/2009	107.32	106.75	105.77	105.74										
03/04/2009	107.32	106.74	105.76	105.73										
04/04/2009	107.31	106.74	105.75	105.72										
05/04/2009	107.31	106.73	105.74	105.71										
06/04/2009	107.32	106.72	105.74	105.71										
07/04/2009	107.31	106.71	105.73	105.70										
08/04/2009	107.30	106.70	105.71	105.68										
09/04/2009	107.30	106.69	105.71	105.67										
10/04/2009	107.31	106.67	105.70	105.66										
11/04/2009	107.30	106.66	105.69	105.64										
12/04/2009	107.29	106.66	105.68	105.64										
13/04/2009	107.29	106.67	105.68	105.64										
14/04/2009	107.29	106.67	105.67	105.64										
15/04/2009	107.29	106.66	105.67	105.63										
16/04/2009	107.28	106.65	105.65	105.62										
17/04/2009	107.28	106.65	105.65	105.61										
18/04/2009	107.27	106.65	105.64	105.61										
19/04/2009	107.27	106.65	105.64	105.61										
20/04/2009	107.26	106.65	105.64	105.61										
21/04/2009	107.26	106.65	105.63	105.61										
22/04/2009	107.26	106.65	105.63	105.61										
23/04/2009	107.26	106.65	105.63	105.61										
24/04/2009	107.26	106.66	105.65	105.63										

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
25/04/2009	107.26	106.69	105.66	105.66										
26/04/2009	107.25	106.70	105.67	105.68										
27/04/2009	107.25	106.70	105.67	105.69										
28/04/2009	107.25	106.71	105.68	105.70										
29/04/2009	107.24	106.72	105.68	105.75										
30/04/2009	107.23	106.77	105.70	105.94										
01/05/2009	107.23	106.85	105.74	106.08										
02/05/2009	107.23	106.90	105.77	106.09										
03/05/2009	107.22	106.92	105.80	106.06										
04/05/2009	107.22	106.91	105.81	106.02										
05/05/2009	107.22	106.89	105.81	105.98										
06/05/2009	107.22	106.88	105.81	105.94										
07/05/2009	107.22	106.86	105.81	105.91										
08/05/2009	107.21	106.83	105.79	105.88										
09/05/2009	107.21	106.80	105.77	105.85										
10/05/2009	107.21	106.78	105.76	105.82										
11/05/2009	107.21	106.76	105.75	105.80										
12/05/2009	107.22	106.74	105.73	105.78										
13/05/2009	107.22	106.71	105.72	105.76										
14/05/2009	107.23	106.69	105.71	105.73										
15/05/2009	107.22	106.67	105.69	105.70										
16/05/2009	107.22	106.65	105.68	105.67										
17/05/2009	107.22	106.66	105.67	105.67										
18/05/2009	107.21	106.67	105.67	105.68										
19/05/2009	107.22	106.67	105.67	105.68										
20/05/2009	107.22	106.65	105.66	105.66										
21/05/2009	107.22	106.64	105.65	105.65										
22/05/2009	107.22	106.62	105.64	105.63										
23/05/2009	107.22	106.61	105.63	105.61										
24/05/2009	107.22	106.59	105.62	105.59										
25/05/2009	107.22	106.58	105.61	105.56										
26/05/2009	107.22	106.56	105.59	105.54										
27/05/2009	107.20	106.55	105.57	105.52										
28/05/2009	107.20	106.54	105.55	105.50										
29/05/2009	107.21	106.52	105.54	105.48										
30/05/2009	107.21	106.51	105.53	105.46										
31/05/2009	107.20	106.50	105.51	105.43										
01/06/2009	107.20	106.48	105.49	105.41										

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
02/06/2009	107.20	106.47	105.48	105.39										
03/06/2009	107.19	106.45	105.46	105.37										
04/06/2009	107.19	106.44	105.44	105.34										
05/06/2009	107.19	106.43	105.43	105.32										
06/06/2009	107.19	106.42	105.41	105.30										
07/06/2009	107.18	106.41	105.39	105.28										
08/06/2009	107.18	106.40	105.38	105.27										
09/06/2009	107.18	106.40	105.37	105.26										
10/06/2009	107.18	106.41	105.37	105.27										
11/06/2009	107.17	106.41	105.36	105.27										
12/06/2009	107.17	106.41	105.36	105.27										
13/06/2009	107.16	106.41	105.36	105.28										
14/06/2009	107.16	106.42	105.36	105.28										
15/06/2009	107.16	106.41	105.36	105.28										
16/06/2009	107.16	106.40	105.35	105.27										
17/06/2009	107.15	106.39	105.35	105.26										
18/06/2009	107.15	106.39	105.34	105.25										
19/06/2009	107.15	106.40	105.34	105.26										
20/06/2009	107.14	106.41	105.35	105.28										
21/06/2009	107.13	106.41	105.35	105.28										
22/06/2009	107.13	106.39	105.35	105.27										
23/06/2009	107.13	106.39	105.34	105.26										
24/06/2009	107.11	106.39	105.33	105.25										
25/06/2009	107.10	106.38	105.32	105.24										
26/06/2009	107.08	106.36	105.31	105.23										
27/06/2009	107.07	106.35	105.30	105.21										
28/06/2009	107.07	106.34	105.29	105.20										
29/06/2009	107.05	106.33	105.28	105.18										
30/06/2009	107.04	106.32	105.27	105.17										
01/07/2009	107.03	106.32	105.26	105.15										
02/07/2009	107.04	106.31	105.25	105.14										
03/07/2009	107.01	106.30	105.24	105.13										
04/07/2009	106.99	106.30	105.23	105.12										
05/07/2009	106.98	106.29	105.22	105.11										
06/07/2009	106.97	106.27	105.20	105.09										
07/07/2009	106.96	106.27	105.19	105.08										
08/07/2009	106.94	106.25	105.18	105.06										
09/07/2009	106.95	106.25	105.16	105.05										

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
10/07/2009	106.96	106.25	105.16	105.04										
11/07/2009	106.96	106.24	105.15	105.04										
12/07/2009	106.94	106.24	105.14	105.03										
13/07/2009	106.93	106.23	105.13	105.02										
14/07/2009	106.94	106.22	105.12	105.02										
15/07/2009	106.92	106.21	105.11	105.01										
16/07/2009	106.91	106.21	105.10	105.00										
17/07/2009	106.92	106.22	105.10	105.00	107.10									
18/07/2009	106.92	106.23	105.10	105.01	107.10									
19/07/2009	106.92	106.24	105.11	105.04	107.09									
20/07/2009	106.89	106.25	105.11	105.05	107.08									
21/07/2009	106.87	106.26	105.12	105.06	107.08									
22/07/2009	106.87	106.26	105.12	105.06	107.08									
23/07/2009	106.88	106.25	105.11	105.06	107.07									
24/07/2009	106.89	106.24	105.10	105.05	107.06									
25/07/2009	106.88	106.23	105.09	105.04	107.05									
26/07/2009	106.88	106.23	105.09	105.03	107.04									
27/07/2009	106.88	106.22	105.09	105.03	107.04									
28/07/2009	106.88	106.22	105.08	105.02	107.03									
29/07/2009	106.88	106.21	105.07	105.01	107.03									
30/07/2009	106.87	106.20	105.07	105.00	107.02									
31/07/2009	106.84	106.19	105.06	104.99	107.01									
01/08/2009	106.82	106.19	105.05	104.98	107.01									
02/08/2009	106.80	106.18	105.04	104.97	107.01									
03/08/2009	106.79	106.17	105.03	104.96	107.00									
04/08/2009	106.78	106.16	105.03	104.95	106.99									
05/08/2009	106.79	106.16	105.02	104.94	106.99									
06/08/2009	106.80	106.16	105.01	104.93	106.98									
07/08/2009	106.80	106.16	105.01	104.93	106.98									
08/08/2009	106.80	106.15	105.00	104.92	106.97									
09/08/2009	106.80	106.15	104.99	104.92	106.97									
10/08/2009	106.77	106.14	104.99	104.91	106.96									
11/08/2009	106.75	106.13	104.98	104.91	106.95									
12/08/2009	106.73	106.13	104.97	104.90	106.95									
13/08/2009	106.72	106.13	104.97	104.89	106.94									
14/08/2009	106.70	106.13	104.96	104.89	106.93									
15/08/2009	106.72	106.13	104.96	104.89	106.93									
16/08/2009	106.73	106.13	104.95	104.89	106.93									

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
17/08/2009	106.73	106.12	104.94	104.88	106.92									
18/08/2009	106.70	106.12	104.94	104.88	106.91									
19/08/2009	106.68	106.11	104.93	104.87	106.91									
20/08/2009	106.67	106.11	104.92	104.87	106.90									
21/08/2009	106.68	106.10	104.92	104.86	106.90									
22/08/2009	106.66	106.10	104.91	104.85	106.89									
23/08/2009	106.67	106.09	104.90	104.84	106.88									
24/08/2009	106.67	106.09	104.89	104.83	106.88									
25/08/2009	106.64	106.09	104.88	104.83	106.87									
26/08/2009	106.65	106.08	104.88	104.82	106.86									
27/08/2009	106.65	106.08	104.87	104.82	106.86									
28/08/2009	106.65	106.08	104.87	104.82	106.85									
29/08/2009	106.64	106.09	104.87	104.82	106.84									
30/08/2009	106.64	106.10	104.87	104.84	106.83									
31/08/2009	106.64	106.12	104.89	104.86	106.83									
01/09/2009	106.64	106.12	104.89	104.87	106.83									
02/09/2009	106.63	106.11	104.88	104.87	106.82									
03/09/2009	106.63	106.10	104.88	104.87	106.81									
04/09/2009	106.63	106.10	104.87	104.86	106.81									
05/09/2009	106.62	106.09	104.87	104.85	106.80									
06/09/2009	106.62	106.10	104.87	104.86	106.79									
07/09/2009	106.61	106.11	104.88	104.87	106.79									
08/09/2009	106.61	106.12	104.89	104.88	106.79									
09/09/2009	106.61	106.11	104.89	104.88	106.78									
10/09/2009	106.60	106.11	104.88	104.87	106.78									
11/09/2009	106.60	106.10	104.88	104.86	106.77									
12/09/2009	106.59	106.09	104.87	104.85	106.77									
13/09/2009	106.59	106.09	104.86	104.84	106.76									
14/09/2009	106.59	106.09	104.86	104.84	106.76									
15/09/2009	106.58	106.10	104.86	104.85	106.75									
16/09/2009	106.57	106.10	104.85	104.86	106.75									
17/09/2009	106.57	106.11	104.85	104.88	106.75									
18/09/2009	106.57	106.12	104.86	104.89	106.74									
19/09/2009	106.57	106.12	104.86	104.89	106.74									
20/09/2009	106.56	106.10	104.86	104.88	106.73									
21/09/2009	106.55	106.10	104.85	104.88	106.73									
22/09/2009	106.55	106.10	104.84	104.87	106.72									
23/09/2009	106.55	106.10	104.84	104.87	106.72									

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
24/09/2009	106.54	106.09	104.84	104.86	106.71									
25/09/2009	106.54	106.08	104.83	104.86	106.71									
26/09/2009	106.53	106.08	104.83	104.85	106.70									
27/09/2009	106.53	106.08	104.83	104.85	106.70									
28/09/2009	106.52	106.07	104.83	104.84	106.70									
29/09/2009	106.52	106.07	104.82	104.83	106.69									
30/09/2009	106.52	106.06	104.82	104.83	106.69									
01/10/2009	106.51	106.06	104.81	104.82	106.68									
02/10/2009	106.51	106.05	104.81	104.81	106.68									
03/10/2009	106.50	106.05	104.80	104.80	106.68									
04/10/2009	106.50	106.05	104.80	104.79	106.67									
05/10/2009	106.50	106.04	104.79	104.79	106.67									
06/10/2009	106.50	106.04	104.79	104.79	106.67									
07/10/2009	106.49	106.04	104.79	104.79	106.66									
08/10/2009	106.49	106.04	104.79	104.78	106.66									
09/10/2009	106.49	106.04	104.78	104.78	106.65									
10/10/2009	106.48	106.03	104.78	104.78	106.65									
11/10/2009	106.48	106.03	104.77	104.77	106.64									
12/10/2009	106.47	106.03	104.77	104.77	106.64									
13/10/2009	106.47	106.03	104.77	104.76	106.63									
14/10/2009	106.46	106.03	104.77	104.76	106.63									
15/10/2009	106.46	106.02	104.77	104.76	106.63									
16/10/2009	106.45	106.02	104.76	104.76	106.62									
17/10/2009	106.45	106.02	104.76	104.76	106.62									
18/10/2009	106.44	106.02	104.76	104.76	106.61									
19/10/2009	106.44	106.01	104.76	104.75	106.61									
20/10/2009	106.44	106.01	104.75	104.75	106.61									
21/10/2009	106.44	106.01	104.75	104.75	106.61									
22/10/2009	106.43	106.01	104.75	104.74	106.60									
23/10/2009	106.43	106.01	104.74	104.74	106.60									
24/10/2009	106.42	106.00	104.74	104.73	106.59									
25/10/2009	106.42	106.01	104.74	104.73	106.59									
26/10/2009	106.42	106.01	104.74	104.73	106.58									
27/10/2009	106.42	106.01	104.74	104.74	106.58									
28/10/2009	106.41	106.01	104.74	104.75	106.58									
29/10/2009	106.41	106.01	104.74	104.75	106.57									
30/10/2009	106.41	106.01	104.74	104.75	106.57									
31/10/2009	106.40	106.01	104.74	104.74	106.57									

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
01/11/2009	106.40	106.00	104.73	104.74	106.57									
02/11/2009	106.40	106.00	104.73	104.74	106.57									
03/11/2009	106.40	106.00	104.73	104.74	106.56									
04/11/2009	106.40	106.01	104.73	104.75	106.56									
05/11/2009	106.39	106.01	104.73	104.75	106.55									
06/11/2009	106.38	106.01	104.74	104.75	106.55									
07/11/2009	106.38	106.03	104.75	104.77	106.55									
08/11/2009	106.38	106.04	104.76	104.78	106.54									
09/11/2009	106.37	106.06	104.77	104.81	106.54									
10/11/2009	106.37	106.07	104.78	104.83	106.54									
11/11/2009	106.37	106.08	104.79	104.85	106.53									
12/11/2009	106.36	106.08	104.79	104.86	106.53									
13/11/2009	106.36	106.09	104.80	104.88	106.53									
14/11/2009	106.36	106.10	104.81	104.89	106.53									
15/11/2009	106.36	106.10	104.81	104.90	106.52									
16/11/2009	106.35	106.10	104.82	104.90	106.52									
17/11/2009	106.35	106.10	104.82	104.91	106.52									
18/11/2009	106.35	106.11	104.82	104.91	106.52									
19/11/2009	106.34	106.11	104.83	104.92	106.52			108.80						
20/11/2009	106.33	106.10	104.84	104.91	106.52			108.80	104.26	106.30				
21/11/2009	106.33	106.10	104.84	104.91	106.51			108.80	104.26	106.30				
22/11/2009	106.33	106.09	104.83	104.90	106.51			108.80	104.27	106.30				
23/11/2009	106.33	106.08	104.83	104.89	106.51			108.80	104.26	106.30				
24/11/2009	106.33	106.08	104.82	104.89	106.51			108.80	104.27	106.29				
25/11/2009	106.32	106.07	104.82	104.88	106.51			108.80	104.27	106.29				
26/11/2009	106.32	106.07	104.81	104.88	106.50			108.80	104.27	106.29				
27/11/2009	106.32	106.07	104.81	104.88	106.50			108.80	104.27	106.29				
28/11/2009	106.31	106.08	104.82	104.90	106.50			108.80	104.26	106.29				
29/11/2009	106.31	106.09	104.83	104.91	106.50			108.81	104.27	106.29				
30/11/2009	106.31	106.10	104.83	104.92	106.50			108.80	104.27	106.29				
01/12/2009	106.31	106.10	104.84	104.93	106.50			108.80	104.27	106.28				
02/12/2009	106.30	106.10	104.84	104.93	106.49			108.80	104.26	106.28				
03/12/2009	106.30	106.11	104.84	104.94	106.49			108.80	104.27	106.28				
04/12/2009	106.30	106.11	104.85	104.95	106.49			108.80	104.27	106.28				
05/12/2009	106.30	106.12	104.85	104.95	106.49			108.80	104.27	106.27				
06/12/2009	106.30	106.13	104.86	104.97	106.49			108.80	104.27	106.27				
07/12/2009	106.29	106.13	104.87	104.98	106.49			108.81	104.27	106.28				
08/12/2009	106.29	106.14	104.87	105.00	106.48			108.80	104.27	106.27				

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
09/12/2009	106.29	106.15	104.88	105.01	106.48			108.80	104.27	106.27				
10/12/2009	106.29	106.16	104.89	105.03	106.48			108.81	104.28	106.27				
11/12/2009	106.29	106.18	104.90	105.04	106.48			108.81	104.28	106.27				
12/12/2009	106.29	106.20	104.91	105.06	106.47			108.81	104.28	106.27				
13/12/2009	106.28	106.21	104.92	105.08	106.48			108.82	104.28	106.27				
14/12/2009	106.28	106.23	104.93	105.11	106.48			108.82	104.28	106.27				
15/12/2009	106.28	106.23	104.94	105.12	106.47			108.82	104.29	106.27				
16/12/2009	106.28	106.23	104.95	105.12	106.47			108.82	104.29	106.27				
17/12/2009	106.27	106.22	104.94	105.11	106.47			108.82	104.29	106.27				
18/12/2009	106.27	106.21	104.94	105.11	106.47			108.82	104.30	106.27				
19/12/2009	106.27	106.21	104.94	105.10	106.47			108.82	104.30	106.26				
20/12/2009	106.26	106.20	104.93	105.08	106.47			108.81	104.30	106.26				
21/12/2009	106.26	106.20	104.92	105.08	106.47			108.82	104.30	106.26				
22/12/2009	106.26	106.19	104.92	105.07	106.47			108.83	104.31	106.27				
23/12/2009	106.26	106.19	104.92	105.06	106.47			108.83	104.32	106.27				
24/12/2009	106.26	106.19	104.92	105.07	106.47			108.83	104.32	106.27				
25/12/2009	106.26	106.21	104.93	105.10	106.47			108.83	104.32	106.27				
26/12/2009	106.26	106.24	104.95	105.13	106.47			108.83	104.33	106.27				
27/12/2009	106.26	106.29	104.97	105.19	106.47			108.84	104.33	106.27				
28/12/2009	106.26	106.33	105.00	105.27	106.47			108.84	104.33	106.27				
29/12/2009	106.26	106.36	105.03	105.32	106.47			108.85	104.33	106.28				
30/12/2009	106.26	106.37	105.05	105.35	106.48			108.86	104.34	106.28				
31/12/2009	106.26	106.37	105.07	105.36	106.48			108.87	104.35	106.29				
01/01/2010	106.26	106.38	105.08	105.37	106.48			108.87	104.36	106.29				
02/01/2010	106.25	106.41	105.09	105.48	106.48			108.87	104.36	106.29				
03/01/2010	106.26	106.47	105.12	105.67	106.48			108.88	104.37	106.30				
04/01/2010	106.26	106.55	105.17	105.81	106.49			108.89	104.38	106.31				
05/01/2010	106.27	106.60	105.21	105.82	106.49			108.90	104.39	106.32				
06/01/2010	106.26	106.60	105.23	105.77	106.49			108.90	104.40	106.32				
07/01/2010	106.26	106.59	105.24	105.73	106.50			108.90	104.41	106.31				
08/01/2010	106.27	106.58	105.25	105.70	106.50			108.90	104.43	106.32				
09/01/2010	106.27	106.56	105.24	105.67	106.50			108.90	104.44	106.32				
10/01/2010	106.27	106.54	105.23	105.64	106.51			108.90	104.45	106.32				
11/01/2010	106.27	106.52	105.23	105.61	106.51			108.90	104.47	106.32				
12/01/2010	106.28	106.51	105.23	105.58	106.52			108.92	104.49	106.33				
13/01/2010	106.28	106.49	105.22	105.55	106.52			108.91	104.50	106.33				
14/01/2010	106.28	106.47	105.21	105.53	106.53			108.92	104.52	106.33				
15/01/2010	106.28	106.45	105.19	105.50	106.53			108.90	104.53	106.33				

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
16/01/2010	106.29	106.45	105.20	105.48	106.54			108.92	104.53	106.34				
17/01/2010	106.29	106.48	105.21	105.51	106.54			108.91	104.54	106.33				
18/01/2010	106.29	106.51	105.23	105.58	106.54			108.92	104.55	106.34				
19/01/2010	106.30	106.55	105.25	105.67	106.55			108.93	104.56	106.35				
20/01/2010	106.30	106.59	105.28	105.73	106.55			108.94	104.57	106.35				
21/01/2010	106.30	106.61	105.30	105.77	106.56			108.93	104.58	106.35				
22/01/2010	106.30	106.64	105.32	105.79	106.56			108.94	104.58	106.35				
23/01/2010	106.31	106.66	105.33	105.81	106.56			108.94	104.59	106.35				
24/01/2010	106.31	106.67	105.35	105.81	106.56			108.94	104.60	106.35				
25/01/2010	106.31	106.67	105.36	105.78	106.57			108.95	104.61	106.36				
26/01/2010	106.31	106.66	105.36	105.75	106.57			108.95	104.63	106.36				
27/01/2010	106.32	106.65	105.36	105.73	106.57			108.96	104.63	106.37				
28/01/2010	106.32	106.64	105.36	105.71	106.58			108.97	104.64	106.37				
29/01/2010	106.33	106.63	105.37	105.71	106.59			108.98	104.65	106.39				
30/01/2010	106.33	106.61	105.38	105.70	106.60			108.99	104.65	106.39				
31/01/2010	106.33	106.60	105.37	105.68	106.60			108.99	104.65	106.40				
01/02/2010	106.33	106.59	105.36	105.66	106.60			108.99	104.66	106.40				
02/02/2010	106.33	106.59	105.37	105.65	106.60			109.00	104.66	106.41				
03/02/2010	106.34	106.58	105.37	105.65	106.61			109.00	104.67	106.41				
04/02/2010	106.35	106.58	105.37	105.64	106.61			109.02	104.68	106.42				
05/02/2010	106.35	106.56	105.36	105.63	106.62			109.02	104.69	106.42				
06/02/2010	106.35	106.56	105.35	105.61	106.62			109.03	104.69	106.43				
07/02/2010	106.36	106.56	105.35	105.61	106.63			109.04	104.70	106.44				
08/02/2010	106.37	106.58	105.38	105.65	106.63			109.06	104.71	106.46				
09/02/2010	106.37	106.62	105.40	105.76	106.64			109.06	104.71	106.46				
10/02/2010	106.37	106.67	105.42	105.87	106.64			109.06	104.71	106.46				
11/02/2010	106.38	106.71	105.44	105.90	106.64			109.07	104.72	106.47				
12/02/2010	106.38	106.73	105.46	105.89	106.65			109.07	104.73	106.48				
13/02/2010	106.38	106.74	105.47	105.87	106.65			109.08	104.73	106.49				
14/02/2010	106.39	106.73	105.48	105.85	106.66			109.08	104.74	106.50				
15/02/2010	106.39	106.73	105.49	105.82	106.67			109.09	104.76	106.51				
16/02/2010	106.40	106.72	105.50	105.80	106.67			109.10	104.77	106.52				
17/02/2010	106.40	106.71	105.49	105.78	106.68			109.10	104.78	106.52				
18/02/2010	106.41	106.69	105.48	105.76	106.68			109.10	104.79	106.52				
19/02/2010	106.42	106.67	105.47	105.74	106.69			109.10	104.80	106.53				
20/02/2010	106.42	106.68	105.48	105.77	106.70			109.10	104.81	106.53				
21/02/2010	106.43	106.72	105.50	105.88	106.70			109.11	104.82	106.54				
22/02/2010	106.44	106.77	105.53	105.96	106.71			109.12	104.83	106.55				

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
23/02/2010	106.44	106.81	105.55	106.00	106.72			109.12	104.84	106.55				
24/02/2010	106.45	106.82	105.57	105.98	106.72			109.12	104.84	106.55				
25/02/2010	106.45	106.83	105.58	105.98	106.73			109.14	104.88					
26/02/2010	106.45	106.82	105.59	106.03	106.74			109.12	104.88					
27/02/2010	106.46	106.84	105.61	106.12	106.74			109.15	104.89					
28/02/2010	106.47	106.93	105.65	106.48	106.75			109.15	104.90					
01/03/2010	106.46	107.05	105.69	106.72	106.74			109.15	104.90					
02/03/2010	106.47	107.14	105.74	106.70	106.75			109.16	104.91					
03/03/2010	106.48	107.17	105.79	106.59	106.76			109.18	104.93					
04/03/2010	106.48	107.17	105.82	106.50	106.76			109.18	104.94					
05/03/2010	106.48	107.15	105.83	106.42	106.77			109.18	104.95					
06/03/2010	106.49	107.13	105.83	106.36	106.77			109.19	104.97					
07/03/2010	106.50	107.11	105.83	106.30	106.78			109.20	104.99					
08/03/2010	106.50	107.08	105.83	106.23	106.79			109.21	105.01					
09/03/2010	106.51	107.05	105.81	106.16	106.80			109.21	105.03					
10/03/2010	106.52	107.01	105.80	106.10	106.80			109.21	105.04					
11/03/2010	106.52	106.98	105.78	106.04	106.81			109.22	105.06					
12/03/2010	106.52	106.95	105.76	106.00	106.82			109.21	105.07					
13/03/2010	106.53	106.92	105.73	105.95	106.82			109.21	105.08					
14/03/2010	106.54	106.89	105.72	105.92	106.83			109.22	105.08					
15/03/2010	106.55	106.87	105.70	105.90	106.84			109.22	105.09					
16/03/2010	106.55	106.85	105.69	105.87	106.85			109.22	105.10					
17/03/2010	106.56	106.82	105.67	105.85	106.86			109.22	105.10					
18/03/2010	106.57	106.79	105.65	105.82	106.87			109.23	105.11					
19/03/2010	106.58	106.76	105.63	105.79	106.88			109.23	105.11					
20/03/2010	106.59	106.74	105.61	105.76	106.88			109.24	105.11					
21/03/2010	106.60	106.71	105.59	105.73	106.89			109.23	105.11					
22/03/2010	106.60	106.69	105.56	105.71	106.89	106.60	108.28	109.23	105.10			106.44	108.65	108.10
23/03/2010	106.61	106.67	105.55	105.68	106.90	106.60	108.29	109.24	105.10			106.45	108.64	108.12
24/03/2010	106.62	106.66	105.54	105.66	106.90	106.61	108.37	109.26	105.11			106.46	108.68	108.17
25/03/2010	106.63	106.64	105.52	105.64	106.91	106.62	108.38	109.26	105.10			106.46	108.66	108.16
26/03/2010	106.63	106.62	105.50	105.61	106.92	106.63	108.31	109.25	105.10			106.45	108.63	108.12
27/03/2010	106.64	106.60	105.48	105.59	106.92	106.63	108.30	109.25	105.09			106.46	108.63	108.12
28/03/2010	106.64	106.59	105.47	105.58	106.92	106.64	108.25	109.26	105.09			106.46	108.63	108.10
29/03/2010	106.65	106.61	105.48	105.59	106.93	106.64	108.37	109.28	105.09			106.48	108.70	108.20
30/03/2010	106.66	106.64	105.50	105.67	106.93	106.65	108.45	109.29	105.09			106.49	108.71	108.25
31/03/2010	106.66	106.68	105.52	105.81	106.94	106.64	108.41	109.29	105.08			106.48	108.69	108.23
01/04/2010	106.66	106.74	105.55	105.95	106.94	106.64		109.27				106.47		

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
02/04/2010	106.65	106.81	105.57	106.05	106.94	106.64	108.41	109.28	105.07	106.75	107.42	106.48	108.70	108.25
03/04/2010	106.65	106.86	105.60	106.11	106.95	106.64	108.44	109.28	105.08	106.76	107.43	106.49	108.70	108.26
04/04/2010	106.65	106.90	105.63	106.14	106.95	106.65	108.40	109.27	105.08	106.75	107.43	106.48	108.67	108.21
05/04/2010	106.65	106.92	105.65	106.14	106.95	106.64	108.33	109.27	105.08	106.76	107.43	106.48	108.67	108.17
06/04/2010	106.66	106.94	105.69	106.18	106.96	106.65	108.45	109.30	105.09	106.78	107.46	106.51	108.75	108.29
07/04/2010	106.66	106.97	105.72	106.23	106.96	106.65	108.49	109.30	105.10	106.78	107.48	106.51	108.74	108.30
08/04/2010	106.67	106.99	105.74	106.20	106.96	106.66	108.41	109.29	105.11	106.78	107.47	106.51	108.70	108.23
09/04/2010	106.67	106.97	105.75	106.13	106.96	106.68	108.39	109.30	105.11	106.79	107.47	106.52	108.71	108.22
10/04/2010	106.68	106.96	105.75	106.09	106.97	106.68	108.42	109.31	105.12	106.81	107.49	106.53	108.72	108.26
11/04/2010	106.69	106.94	105.75	106.05	106.97	106.69	108.48	109.32	105.13	106.82	107.51	106.55	108.73	108.30
12/04/2010	106.69	106.92	105.74	106.01	106.98	106.69	108.50	109.32	105.14	106.82	107.50	106.56	108.71	108.30
13/04/2010	106.69	106.90	105.73	105.97	106.98	106.70	108.49	109.32	105.15	106.83	107.50	106.57	108.71	108.28
14/04/2010	106.69	106.88	105.71	105.94	106.98	106.70	108.47	109.32	105.16	106.83	107.51	106.57	108.70	108.26
15/04/2010	106.70	106.85	105.70	105.91	106.99	106.71	108.45	109.32	105.17	106.84	107.51	106.58	108.69	108.25
16/04/2010	106.71	106.82	105.68	105.88	106.99	106.71	108.39	109.32	105.17	106.84	107.50	106.57	108.66	108.21
17/04/2010	106.71	106.80	105.66	105.85	107.00	106.72	108.39	109.33	105.17	106.85	107.51	106.58	108.66	108.21
18/04/2010	106.72	106.78	105.65	105.83	107.01	106.72	108.42	109.34	105.18	106.86	107.52	106.59	108.68	108.24
19/04/2010	106.72	106.76	105.64	105.81	107.01	106.73	108.38	109.33	105.18	106.86	107.50	106.59	108.66	108.20
20/04/2010	106.73	106.73	105.62	105.78	107.01	106.73	108.34	109.32	105.17	106.86	107.48	106.59	108.65	108.18
21/04/2010	106.73	106.71	105.60	105.75	107.02	106.73	108.32	109.32	105.16	106.86	107.47	106.60	108.64	108.17
22/04/2010	106.74	106.68	105.58	105.72	107.02	106.74	108.34	109.33	105.16	106.87	107.50	106.61	108.65	108.20
23/04/2010	106.74	106.66	105.56	105.69	107.03	106.74	108.32	109.33	105.16	106.87	107.49	106.61	108.63	108.18
24/04/2010	106.75	106.63	105.53	105.65	107.03	106.74	108.24	109.31	105.15	106.87	107.47	106.60	108.60	108.14
25/04/2010	106.75	106.61	105.51	105.62	107.03	106.75	108.16	109.30	105.15	106.86	107.45	106.58	108.60	108.11
26/04/2010	106.75	106.59	105.49	105.59	107.03	106.75	108.11	109.30	105.14	106.86	107.43	106.57	108.59	108.09
27/04/2010	106.76	106.57	105.47	105.57	107.04	106.75	108.10	109.30	105.13	106.86	107.44	106.58	108.60	108.10
28/04/2010	106.76	106.56	105.46	105.55	107.04	106.76	108.12	109.31	105.13	106.86	107.44	106.59	108.62	108.12
29/04/2010	106.77	106.54	105.45	105.53	107.05	106.76	108.11	109.30	105.12	106.86	107.48	106.60	108.63	108.17
30/04/2010	106.77	106.52	105.42	105.50	107.05	106.76	108.05	109.28	105.11	106.85	107.45	106.59	108.61	108.12
01/05/2010	106.77	106.50	105.40	105.47	107.05	106.76	108.05	109.28	105.11	106.86	107.44	106.59	108.62	108.11
02/05/2010	106.77	106.48	105.38	105.45	107.05	106.76	108.06	109.28	105.10	106.85	107.44	106.58	108.60	108.11
03/05/2010	106.77	106.47	105.36	105.43	107.05	106.76	107.99	109.27	105.09	106.84	107.43	106.56	108.56	108.07
04/05/2010	106.77	106.45	105.34	105.41	107.05	106.77	107.96	109.27	105.08	106.83	107.43	106.56	108.55	108.06
05/05/2010	106.77	106.44	105.33	105.39	107.05	106.77	108.00	109.28	105.08	106.84	107.44	106.57	108.55	108.08
06/05/2010	106.78	106.43	105.32	105.38	107.05	106.77	108.04	109.29	105.07	106.85	107.42	106.58	108.57	108.10
07/05/2010	106.78	106.42	105.31	105.37	107.05	106.77	107.89	109.28	105.06	106.83	107.42	106.57	108.55	108.07
08/05/2010	106.78	106.44	105.31	105.38	107.05	106.79	107.73	109.26	105.05	106.82	107.42	106.57	108.51	108.05
09/05/2010	106.78	106.48	105.34	105.47	107.05	106.79	107.73	109.27	105.04	106.82	107.42	106.56	108.57	108.03

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
10/05/2010	106.78	106.54	105.37	105.61	107.05	106.79	107.73	109.26	105.03	106.82	107.42	106.55	108.57	108.00
11/05/2010	106.79	106.59	105.40	105.68	107.05	106.79	107.69	109.26	105.02	106.82	107.42	106.54	108.56	107.98
12/05/2010	106.78	106.62	105.42	105.72	107.04	106.78	107.60	109.25	105.01	106.81	107.40	106.53	108.53	107.96
13/05/2010	106.78	106.65	105.44	105.78	107.04	106.77	107.57	109.25	105.01	106.81	107.38	106.53	108.53	107.96
14/05/2010	106.78	106.70	105.47	105.87	107.04	106.76	107.58	109.25	105.00	106.81	107.38	106.53	108.53	107.97
15/05/2010	106.78	106.75	105.50	105.97	107.03	106.76	107.56	109.24	105.00	106.80	107.38	106.53	108.52	107.96
16/05/2010	106.78	106.80	105.53	106.03	107.03	106.76	107.51	109.23	105.00	106.80	107.34	106.52	108.51	107.94
17/05/2010	106.77	106.83	105.56	106.05	107.03	106.76	107.47	109.22	105.00	106.79	107.30	106.51	108.50	107.92
18/05/2010	106.77	106.85	105.58	106.04	107.03	106.76	107.44	109.21	105.01	106.79	107.30	106.51	108.50	107.92
19/05/2010	106.77	106.85	105.60	106.01	107.03	106.76	107.43	109.20	105.01	106.78	107.31	106.50	108.49	107.91
20/05/2010	106.77	106.84	105.61	105.97	107.04	106.76	107.42	109.18	105.01	106.77	107.29	106.49	108.48	107.91
21/05/2010	106.77	106.82	105.60	105.92	107.04	106.76	107.42	109.17	105.02	106.76	107.27	106.49	108.49	107.91
22/05/2010	106.77	106.80	105.59	105.88	107.04	106.77	107.41	109.17	105.02	106.76	107.26	106.50	108.47	107.90
23/05/2010	106.76	106.77	105.57	105.84	107.05	106.77	107.39	109.16	105.02	106.75	107.27	106.50	108.47	107.89
24/05/2010	106.76	106.74	105.56	105.81	107.05	106.77	107.39	109.17	105.03	106.75	107.28	106.49	108.46	107.89
25/05/2010	106.76	106.72	105.54	105.78	107.05	106.78	107.38	109.16	105.03	106.74	107.31	106.49	108.49	107.89
26/05/2010	106.76	106.69	105.52	105.74	107.06	106.78	107.37	109.16	105.03	106.74	107.30	106.48	108.51	107.89
27/05/2010	106.75	106.66	105.50	105.71	107.05	106.79	107.34	109.15	105.02	106.73	107.28	106.47	108.50	107.87
28/05/2010	106.75	106.63	105.47	105.67	107.05	106.78	107.32	109.14	105.01	106.73	107.27	106.46	108.48	107.86
29/05/2010	106.74	106.60	105.45	105.64	107.04	106.78	107.33	109.14	105.00	106.72	107.26	106.46	108.49	107.86
30/05/2010	106.74	106.59	105.43	105.61	107.04	106.78	107.34	109.14	105.00	106.72	107.24	106.46	108.50	107.86
31/05/2010	106.74	106.57	105.42	105.59	107.04	106.78	107.33	109.13	105.00	106.71	107.25	106.45	108.48	107.85
01/06/2010	106.74	106.55	105.40	105.56	107.04	106.78	107.34	109.13	104.99	106.72	107.26	106.45	108.49	107.86
02/06/2010	106.74	106.53	105.38	105.54	107.04	106.78	107.34	109.12	104.99	106.72	107.27	106.45	108.49	107.85
03/06/2010	106.74	106.52	105.37	105.52	107.04	106.77	107.34	109.12	104.99	106.73	107.27	106.46	108.47	107.83
04/06/2010	106.73	106.51	105.35	105.50	107.04	106.77	107.32	109.11	104.98	106.72	107.25	106.45	108.43	107.82
05/06/2010	106.73	106.50	105.34	105.48	107.04	106.77	107.33	109.11	104.98	106.72	107.26	106.44	108.43	107.82
06/06/2010	106.73	106.50	105.34	105.47	107.04	106.77	107.34	109.10	104.98	106.72	107.28	106.44	108.39	107.82
07/06/2010	106.73	106.48	105.32	105.46	107.03	106.77	107.34	109.10	104.97	106.71	107.28	106.43	108.39	107.82
08/06/2010	106.73	106.48	105.31	105.44	107.04	106.77	107.36	109.10	104.96	106.71	107.26	106.43	108.42	107.84
09/06/2010	106.73	106.46	105.30	105.43	107.03	106.77	107.36	109.10	104.96	106.71	107.25	106.42	108.44	107.84
10/06/2010	106.73	106.46	105.29	105.42	107.03	106.77	107.36	109.10	104.95	106.71	107.27	106.42	108.46	107.85
11/06/2010	106.73	106.46	105.29	105.43	107.02	106.77	107.34	109.09	104.95	106.70	107.26	106.41	108.43	107.82
12/06/2010	106.72	106.50	105.31	105.49	107.02	106.77	107.34	109.10	104.94	106.70	107.26	106.41	108.47	107.81
13/06/2010	106.72	106.54	105.34	105.60	107.02	106.76	107.36	109.11	104.94	106.70	107.27	106.42	108.51	107.82
14/06/2010	106.72	106.58	105.36	105.65	107.01	106.75	107.38	109.11	104.93	106.70	107.27	106.42	108.53	107.83
15/06/2010	106.72	106.59	105.37	105.65	107.01	106.75	107.37	109.11	104.93	106.70	107.26	106.42	108.52	107.81
16/06/2010	106.72	106.58	105.37	105.63	107.01	106.74	107.39	109.11	104.94	106.70	107.26	106.42	108.52	107.82

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
17/06/2010	106.72	106.55	105.36	105.60	107.01	106.75	107.40	109.11	104.94	106.70	107.26	106.42	108.54	107.82
18/06/2010	106.71	106.53	105.35	105.57	107.00	106.74	107.41	109.11	104.93	106.70	107.26	106.42	108.54	107.82
19/06/2010	106.71	106.53	105.35	105.59	107.00	106.74	107.42	109.12	104.94	106.70	107.27	106.42	108.55	107.83
20/06/2010	106.71	106.61	105.38	106.00	106.99	106.73	107.41	109.11	104.93	106.69	107.26	106.41	108.53	107.81
21/06/2010	106.70	106.78	105.43	106.29	106.99	106.73	107.41	109.11	104.93	106.69	107.25	106.41	108.52	107.80
22/06/2010	106.70	106.89	105.49	106.28	106.99	106.73	107.43	109.11	104.93	106.69	107.25	106.41	108.52	107.81
23/06/2010	106.70	106.93	105.54	106.24	106.99	106.73	107.44	109.11	104.94	106.69	107.26	106.41	108.51	107.81
24/06/2010	106.70	106.93	105.58	106.18	106.99	106.73	107.45	109.10	104.95	106.69	107.26	106.41	108.51	107.82
25/06/2010	106.70	106.92	105.60	106.11	107.00	106.73	107.46	109.09	104.96	106.69	107.22	106.40	108.49	107.82
26/06/2010	106.70	106.89	105.60	106.03	107.00	106.73	107.46	109.08	104.97	106.68	107.21	106.40	108.50	107.82
27/06/2010	106.69	106.85	105.59	105.96	107.00	106.73	107.45	109.07	104.98	106.68	107.20	106.39	108.48	107.81
28/06/2010	106.67	106.82	105.58	105.91	107.00	106.73	107.43	109.07	104.99	106.67	107.20	106.39	108.46	107.80
29/06/2010	106.65	106.77	105.56	105.86	107.00	106.73	107.42	109.06	104.99	106.67	107.18	106.38	108.47	107.79
30/06/2010	106.64	106.73	105.54	105.81	107.00	106.73	107.42	109.05	104.99	106.66	107.16	106.38	108.47	107.79
01/07/2010	106.63	106.69	105.52	105.77	107.01	106.73	107.42	109.04	104.99	106.65	107.15	106.37	108.46	107.80
02/07/2010	106.61	106.65	105.49	105.72	107.01	106.73	107.39	109.04	104.98	106.65	107.14	106.37	108.45	107.78
03/07/2010	106.60	106.61	105.46	105.67	107.00	106.74	107.34	109.03	104.97	106.64	107.14	106.36	108.44	107.76
04/07/2010	106.61	106.58	105.43	105.63	107.00	106.74	107.32	109.02	104.97	106.64	107.16	106.36	108.44	107.75
05/07/2010	106.58	106.55	105.41	105.59	107.00	106.73	107.32	109.02	104.96	106.64	107.17	106.35	108.43	107.74
06/07/2010	106.59	106.53	105.38	105.55	106.99	106.72	107.31	109.01	104.96	106.63	107.18	106.35	108.39	107.74
07/07/2010	106.58	106.50	105.36	105.52	106.99	106.72	107.31	109.01	104.95	106.63	107.17	106.36	108.41	107.74
08/07/2010	106.57	106.49	105.34	105.49	106.99	106.73	107.30	109.00	104.95	106.63	107.14	106.36	108.40	107.70
09/07/2010	106.58	106.47	105.32	105.47	106.99	106.73	107.28	108.99	104.94	106.62	107.12	106.35	108.39	107.66
10/07/2010	106.56	106.45	105.30	105.44	106.98	106.73	107.27	108.99	104.93	106.61	107.11	106.35	108.38	107.63
11/07/2010	106.54	106.43	105.28	105.42	106.98	106.73	107.26	108.98	104.92	106.61	107.12	106.35	108.40	107.62
12/07/2010	106.54	106.41	105.26	105.39	106.98	106.74	107.25	108.99	104.92	106.60	107.13	106.35	108.41	107.64
13/07/2010	106.56	106.40	105.24	105.37	106.98	106.73	107.24	108.99	104.90	106.60	107.15	106.35	108.42	107.65
14/07/2010	106.57	106.39	105.22	105.35	106.98	106.73	107.24	108.99	104.90	106.60	107.16	106.35	108.45	107.66
15/07/2010	106.57	106.38	105.20	105.34	106.97	106.72	107.22	108.98	104.88	106.60	107.15	106.34	108.44	107.65
16/07/2010	106.58	106.36	105.19	105.32	106.97	106.72	107.22	108.98	104.88	106.60	107.16	106.34	108.43	107.65
17/07/2010	106.55	106.35	105.17	105.30	106.96	106.71	107.21	108.98	104.87	106.59	107.15	106.33	108.41	107.65
18/07/2010	106.57	106.34	105.16	105.29	106.95	106.70	107.22	108.97	104.86	106.59	107.15	106.33	108.39	107.65
19/07/2010	106.57	106.34	105.15	105.28	106.95	106.70	107.24	108.97	104.86	106.60	107.16	106.33	108.40	107.66
20/07/2010	106.57	106.33	105.14	105.26	106.96	106.70	107.25	108.96	104.85	106.59	107.15	106.34	108.43	107.67
21/07/2010	106.54	106.32	105.13	105.25	106.95	106.71	107.22	108.96	104.85	106.59	107.11	106.33	108.42	107.66
22/07/2010	106.52	106.30	105.11	105.23	106.94	106.70	107.20	108.95	104.84	106.57	107.09	106.33	108.41	107.65
23/07/2010	106.52	106.29	105.09	105.20	106.94	106.70	107.19	108.94	104.83	106.57	107.07	106.32	108.39	107.61
24/07/2010	106.50	106.27	105.08	105.18	106.93	106.69	107.18	108.94	104.83	106.57	107.08	106.32	108.38	107.57

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
25/07/2010	106.51	106.28	105.07	105.18	106.93	106.69	107.18	108.94	104.82	106.57	107.10	106.32	108.39	107.55
26/07/2010	106.49	106.32	105.09	105.23	106.92	106.68	107.17	108.94	104.81	106.56	107.10	106.32	108.39	107.53
27/07/2010	106.50	106.36	105.12	105.28	106.92	106.67	107.17	108.93	104.80	106.55	107.08	106.31	108.37	107.53
28/07/2010	106.48	106.37	105.13	105.32	106.92	106.67	107.16	108.92	104.79	106.55	107.06	106.31	108.38	107.53
29/07/2010	106.47	106.36	105.13	105.32	106.91	106.66	107.15	108.92	104.79	106.54	107.05	106.31	108.37	107.53
30/07/2010	106.49	106.34	105.12	105.30	106.91	106.65	107.15	108.91	104.78	106.53	107.03	106.30	108.36	107.53
31/07/2010	106.47	106.33	105.10	105.28	106.91	106.65	107.14	108.90	104.77	106.53	107.03	106.30	108.35	107.53
01/08/2010	106.46	106.31	105.09	105.25	106.90	106.65	107.13	108.89	104.77	106.53	107.02	106.30	108.34	107.50
02/08/2010	106.47	106.29	105.07	105.23	106.89	106.64	107.12	108.89	104.75	106.52	107.01	106.29	108.30	107.48
03/08/2010	106.46	106.28	105.06	105.21	106.89	106.64	107.11	108.88	104.74	106.51	107.00	106.29	108.28	107.45
04/08/2010	106.45	106.27	105.05	105.19	106.89	106.63	107.11	108.88	104.73	106.51	106.99	106.29	108.28	107.45
05/08/2010	106.44	106.26	105.04	105.17	106.88	106.63	107.10	108.87	104.72	106.50	106.99	106.28	108.27	107.44
06/08/2010	106.45	106.25	105.02	105.16	106.87	106.63	107.08	108.86	104.71	106.49	106.98	106.27	108.26	107.44
07/08/2010	106.43	106.25	105.02	105.15	106.87	106.62	107.06	108.85	104.70	106.48	106.98	106.27	108.26	107.44
08/08/2010	106.44	106.24	105.01	105.14	106.87	106.62	107.05	108.85	104.69	106.48	106.98	106.27	108.25	107.44
09/08/2010	106.42	106.24	105.00	105.13	106.86	106.62	107.04	108.85	104.68	106.47	106.97	106.26	108.25	107.44
10/08/2010	106.40	106.23	105.00	105.12	106.86	106.61	107.02	108.84	104.67	106.47	106.96	106.26	108.24	107.43
11/08/2010	106.39	106.23	104.99	105.11	106.85	106.61	107.01	108.84	104.66	106.46	106.96	106.26	108.25	107.43
12/08/2010	106.41	106.21	104.98	105.10	106.85	106.61	106.99	108.83	104.66	106.45	106.95	106.25	108.24	107.42
13/08/2010	106.42	106.20	104.97	105.09	106.84	106.60	106.98	108.82	104.65	106.45	106.94	106.25	108.24	107.40
14/08/2010	106.40	106.19	104.95	105.07	106.84	106.60	106.97	108.82	104.64	106.45	106.94	106.24	108.23	107.40
15/08/2010	106.42	106.18	104.94	105.06	106.83	106.60	106.96	108.82	104.63	106.44	106.94	106.24	108.23	107.39
16/08/2010	106.43	106.18	104.93	105.05	106.83	106.59	106.96	108.82	104.63	106.45	106.96	106.23	108.31	107.39
17/08/2010	106.43	106.17	104.92	105.04	106.83	106.57	106.96	108.82	104.62	106.45	106.97	106.23	108.33	107.40
18/08/2010	106.44	106.16	104.91	105.03	106.82	106.56	106.95	108.82	104.61	106.44	106.97	106.23	108.32	107.40
19/08/2010	106.44	106.15	104.90	105.01	106.80	106.55	106.94	108.81	104.61	106.44	106.97	106.22	108.31	107.39
20/08/2010	106.44	106.15	104.89	105.00	106.80	106.55	106.94	108.81	104.60	106.44	106.97	106.22	108.28	107.39
21/08/2010	106.44	106.14	104.89	104.99	106.80	106.55	106.95	108.80	104.60	106.44	106.97	106.22	108.27	107.40
22/08/2010	106.44	106.14	104.88	104.98	106.79	106.54	106.96	108.80	104.60	106.44	106.98	106.22	108.29	107.40
23/08/2010	106.45	106.14	104.87	104.97	106.79	106.54	106.96	108.81	104.60	106.44	106.98	106.22	108.30	107.41
24/08/2010	106.44	106.13	104.86	104.96	106.78	106.55	106.95	108.80	104.60	106.44	106.97	106.21	108.28	107.40
25/08/2010	106.44	106.12	104.86	104.95	106.77	106.53	106.95	108.80	104.59	106.43	106.97	106.21	108.29	107.40
26/08/2010	106.44	106.12	104.86	104.95	106.77	106.52	106.97	108.80	104.59	106.44	106.98	106.21	108.31	107.41
27/08/2010	106.44	106.12	104.85	104.95	106.77	106.53	106.97	108.80	104.58	106.44	106.99	106.21	108.30	107.41
28/08/2010	106.44	106.11	104.85	104.94	106.76	106.53	106.96	108.79	104.58	106.43	106.98	106.20	108.29	107.40
29/08/2010	106.44	106.11	104.84	104.93	106.76	106.51	106.97	108.80	104.57	106.43	106.98	106.21	108.31	107.41
30/08/2010	106.43	106.10	104.84	104.92	106.75	106.50	106.97	108.79	104.56	106.43	106.98	106.20	108.29	107.40
31/08/2010	106.43	106.10	104.83	104.92	106.75	106.50	106.98	108.79	104.56	106.43	106.98	106.20	108.29	107.41

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
01/09/2010	106.43	106.09	104.83	104.91	106.75	106.49	106.99	108.79	104.56	106.44	106.99	106.21	108.29	107.41
02/09/2010	106.43	106.09	104.82	104.91	106.74	106.49	106.99	108.79	104.55	106.43	106.97	106.21	108.27	107.41
03/09/2010	106.43	106.09	104.82	104.90	106.74	106.49	106.99	108.78	104.55	106.43	106.94	106.20	108.25	107.41
04/09/2010	106.42	106.08	104.82	104.89	106.73	106.48	106.99	108.78	104.54	106.43	106.93	106.20	108.24	107.41
05/09/2010	106.42	106.08	104.81	104.88	106.73	106.48	106.98	108.77	104.54	106.42	106.93	106.20	108.24	107.41
06/09/2010	106.42	106.08	104.81	104.88	106.73	106.47	106.99	108.78	104.53	106.43	106.93	106.21	108.26	107.41
07/09/2010	106.42	106.07	104.80	104.87	106.72	106.48	106.99	108.78	104.53	106.43	106.94	106.20	108.26	107.42
08/09/2010	106.42	106.07	104.80	104.87	106.72	106.51	106.98	108.78	104.52	106.42	106.96	106.20	108.34	107.41
09/09/2010	106.41	106.06	104.79	104.87	106.71	106.49	106.98	108.79	104.51	106.42	106.98	106.20	108.44	107.41
10/09/2010	106.41	106.06	104.79	104.87	106.71	106.47	106.99	108.79	104.51	106.43	106.99	106.21	108.45	107.41
11/09/2010	106.41	106.08	104.80	104.88	106.71	106.46	107.00	108.80	104.50	106.44	107.00	106.22	108.45	107.42
12/09/2010	106.41	106.13	104.83	104.95	106.70	106.46	107.00	108.80	104.50	106.44	107.01	106.21	108.43	107.42
13/09/2010	106.41	106.19	104.86	105.04	106.69	106.45	107.01	108.80	104.49	106.44	107.01	106.21	108.41	107.41
14/09/2010	106.41	106.22	104.90	105.11	106.69	106.45	107.02	108.81	104.49	106.45	107.02	106.22	108.42	107.42
15/09/2010	106.41	106.24	104.92	105.15	106.69	106.45	107.03	108.81	104.50	106.45	107.02	106.22	108.41	107.43
16/09/2010	106.41	106.25	104.94	105.18	106.69	106.45	107.04	108.82	104.50	106.45	107.02	106.22	108.41	107.43
17/09/2010	106.41	106.24	104.95	105.18	106.69	106.44	107.04	108.82	104.50	106.45	107.02	106.22	108.38	107.43
18/09/2010	106.40	106.23	104.95	105.17	106.69	106.44	107.05	108.82	104.51	106.45	107.02	106.21	108.37	107.43
19/09/2010	106.40	106.21	104.94	105.15	106.68	106.44	107.06	108.82	104.51	106.45	107.02	106.21	108.36	107.44
20/09/2010	106.40	106.20	104.93	105.13	106.68	106.43	107.07	108.82	104.51	106.45	107.02	106.21	108.36	107.45
21/09/2010	106.40	106.18	104.93	105.11	106.68	106.43	107.07	108.82	104.52	106.45	107.00	106.20	108.35	107.45
22/09/2010	106.40	106.17	104.92	105.09	106.68	106.43	107.08	108.82	104.52	106.45	107.00	106.20	108.35	107.45
23/09/2010	106.40	106.17	104.91	105.08	106.68	106.43	107.09	108.82	104.52	106.45	107.01	106.21	108.37	107.45
24/09/2010	106.40	106.16	104.91	105.07	106.68	106.45	107.10	108.82	104.52	106.45	107.02	106.21	108.40	107.46
25/09/2010	106.40	106.16	104.90	105.06	106.68	106.44	107.10	108.82	104.52	106.44	107.01	106.20	108.42	107.45
26/09/2010	106.39	106.15	104.90	105.05	106.67	106.43	107.11	108.82	104.52	106.44	107.01	106.20	108.43	107.45
27/09/2010	106.39	106.15	104.90	105.05	106.67	106.43	107.11	108.82	104.51	106.44	107.01	106.20	108.44	107.45
28/09/2010	106.39	106.15	104.89	105.04	106.67	106.42	107.12	108.82	104.51	106.44	107.01	106.19	108.44	107.45
29/09/2010	106.39	106.15	104.90	105.04	106.66	106.42	107.13	108.82	104.51	106.44	107.01	106.20	108.47	107.46
30/09/2010	106.39	106.15	104.90	105.05	106.66	106.42	107.14	108.83	104.51	106.44	107.02	106.20	108.47	107.46
01/10/2010	106.39	106.15	104.89	105.04	106.66	106.41	107.15	108.83	104.51	106.44	107.02	106.21	108.45	107.46
02/10/2010	106.39	106.14	104.89	105.03	106.66	106.41	107.16	108.83	104.51	106.44	107.02	106.21	108.47	107.47
03/10/2010	106.39	106.14	104.89	105.03	106.66	106.41	107.19	108.83	104.51	106.45	107.03	106.22	108.49	107.48
04/10/2010	106.39	106.14	104.89	105.03	106.66	106.42	107.19	108.81	104.52	106.45	107.04	106.22	108.49	107.48
05/10/2010	106.39	106.13	104.88	105.02	106.65	106.42	107.18	108.81	104.51	106.45	107.02	106.21	108.48	107.47
06/10/2010	106.39	106.13	104.88	105.01	106.65	106.41	107.19	108.81	104.51	106.45	107.02	106.21	108.51	107.48
07/10/2010	106.38	106.13	104.87	105.01	106.65	106.41	107.21	108.81	104.50	106.44	107.02	106.21	108.54	107.48
08/10/2010	106.38	106.14	104.88	105.02	106.65	106.40	107.22	108.81	104.50	106.44	107.02	106.21	108.55	107.48

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
09/10/2010	106.38	106.16	104.89	105.04	106.65	106.39	107.24	108.81	104.50	106.45	107.03	106.21	108.55	107.48
10/10/2010	106.38	106.17	104.91	105.07	106.65	106.39	107.25	108.82	104.50	106.45	107.03	106.21	108.56	107.49
11/10/2010	106.38	106.17	104.91	105.07	106.64	106.39	107.25	108.81	104.50	106.45	107.03	106.21	108.51	107.49
12/10/2010	106.37	106.16	104.91	105.06	106.64	106.38	107.25	108.81	104.50	106.44	107.02	106.20	108.50	107.49
13/10/2010	106.37	106.15	104.90	105.05	106.64	106.38	107.26	108.81	104.50	106.44	107.02	106.20	108.48	107.49
14/10/2010	106.37	106.14	104.89	105.04	106.63	106.38	107.27	108.80	104.49	106.43	107.01	106.20	108.45	107.49
15/10/2010	106.37	106.13	104.88	105.02	106.63	106.38	107.28	108.80	104.49	106.43	107.01	106.20	108.46	107.49
16/10/2010	106.36	106.12	104.88	105.01	106.63	106.38	107.28	108.80	104.49	106.43	107.01	106.20	108.47	107.49
17/10/2010	106.36	106.11	104.87	105.00	106.63	106.38	107.28	108.80	104.49	106.43	107.00	106.19	108.43	107.49
18/10/2010	106.36	106.11	104.86	104.99	106.62	106.37	107.29	108.80	104.49	106.42	107.00	106.19	108.42	107.49
19/10/2010	106.36	106.11	104.86	104.98	106.62	106.38	107.31	108.81	104.49	106.43	107.01	106.20	108.45	107.49
20/10/2010	106.36	106.11	104.85	104.98	106.62	106.39	107.30	108.80	104.49	106.43	107.00	106.19	108.42	107.49
21/10/2010	106.35	106.10	104.85	104.97	106.62	106.38	107.29	108.80	104.49	106.42	106.99	106.18	108.38	107.49
22/10/2010	106.35	106.10	104.84	104.96	106.62	106.38	107.32	108.80	104.48	106.42	106.99	106.19	108.41	107.49
23/10/2010	106.35	106.09	104.84	104.95	106.62	106.38	107.34	108.81	104.48	106.42	107.00	106.19	108.43	107.50
24/10/2010	106.35	106.10	104.84	104.95	106.62	106.39	107.33	108.81	104.48	106.42	107.00	106.18	108.42	107.50
25/10/2010	106.35	106.10	104.84	104.96	106.61	106.38	107.30	108.80	104.48	106.41	106.98	106.17	108.39	107.49
26/10/2010	106.34	106.10	104.84	104.95	106.61	106.37	107.31	108.80	104.48	106.41	106.98	106.17	108.39	107.49
27/10/2010	106.34	106.10	104.84	104.95	106.61	106.37	107.34	108.81	104.48	106.41	106.98	106.18	108.43	107.50
28/10/2010	106.34	106.10	104.83	104.95	106.61	106.37	107.34	108.80	104.47	106.40	106.98	106.17	108.44	107.50
29/10/2010	106.35	106.10	104.84	104.96	106.61	106.37	107.38	108.81	104.47	106.41	107.00	106.19	108.48	107.51
30/10/2010	106.35	106.10	104.84	104.96	106.61	106.38	107.38	108.81	104.47	106.41	107.00	106.18	108.48	107.51
31/10/2010	106.35	106.11	104.84	104.97	106.61	106.38	107.39	108.82	104.47	106.41	107.00	106.18	108.52	107.52
01/11/2010	106.34	106.11	104.84	104.97	106.60	106.37	107.34	108.81	104.47	106.40	106.98	106.16	108.48	107.50
02/11/2010	106.34	106.11	104.84	104.97	106.60	106.37	107.35	108.81	104.47	106.40	106.97	106.16	108.49	107.50
03/11/2010	106.33	106.11	104.84	104.97	106.60	106.36	107.36	108.81	104.46	106.39	106.96	106.16	108.50	107.50
04/11/2010	106.33	106.13	104.86	105.01	106.60	106.36	107.35	108.81	104.46	106.39	106.96	106.16	108.49	107.50
05/11/2010	106.34	106.21	104.90	105.30	106.60	106.36	107.38	108.81	104.46	106.39	106.96	106.17	108.51	107.51
06/11/2010	106.34	106.32	104.95	105.53	106.60	106.36	107.42	108.82	104.47	106.40	106.97	106.17	108.53	107.52
07/11/2010	106.34	106.39	105.00	105.58	106.61	106.38	107.46	108.83	104.47	106.40	106.99	106.18	108.62	107.53
08/11/2010	106.34	106.42	105.04	105.59	106.61	106.37	107.56	108.84	104.48	106.41	107.00	106.20	108.72	107.54
09/11/2010	106.34	106.42	105.07	105.57	106.61	106.37	107.58	108.84	104.48	106.41	107.01	106.19	108.73	107.55
10/11/2010	106.34	106.41	105.09	105.55	106.60	106.37	107.49	108.84	104.49	106.40	107.00	106.17	108.64	107.55
11/11/2010	106.33	106.42	105.10	105.55	106.60	106.36	107.53	108.86	104.50	106.41	107.00	106.19	108.65	107.56
12/11/2010	106.34	106.44	105.12	105.56	106.61	106.37	107.62	108.87	104.51	106.42	107.02	106.21	108.72	107.58
13/11/2010	106.34	106.45	105.14	105.58	106.61	106.37	107.72	108.89	104.52	106.43	107.04	106.22	108.76	107.60
14/11/2010	106.35	106.48	105.16	105.61	106.62	106.38	107.78	108.89	104.53	106.44	107.05	106.23	108.75	107.62
15/11/2010	106.35	106.49	105.18	105.66	106.62	106.37	107.73	108.89	104.54	106.44	107.05	106.23	108.70	107.62

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
16/11/2010	106.35	106.52	105.20	105.72	106.62	106.37	107.73	108.90	104.54	106.45	107.06	106.23	108.68	107.63
17/11/2010	106.35	106.55	105.23	105.77	106.62	106.37	107.88	108.91	104.55	106.46	107.07	106.25	108.71	107.66
18/11/2010	106.36	106.61	105.26	106.03	106.63	106.38	107.90	108.91	104.56	106.47	107.08	106.25	108.67	107.67
19/11/2010	106.36	106.77	105.31	106.59	106.63	106.38	107.87	108.91	104.58	106.47	107.09	106.25	108.63	107.68
20/11/2010	106.37	106.97	105.39	106.72	106.64	106.38	107.94	108.92	104.59	106.48	107.10	106.27	108.66	107.70
21/11/2010	106.37	107.04	105.47	106.57	106.65	106.39	107.98	108.93	104.61	106.49	107.10	106.27	108.65	107.71
22/11/2010	106.38	107.03	105.51	106.45	106.65	106.40	107.97	108.93	104.63	106.49	107.11	106.27	108.63	107.72
23/11/2010	106.38	107.00	105.54	106.35	106.65	106.40	107.92	108.92	104.65	106.50	107.11	106.27	108.61	107.73
24/11/2010	106.38	106.98	105.55	106.31	106.66	106.41	107.93	108.93	104.67	106.50	107.11	106.27	108.62	107.74
25/11/2010	106.38	106.98	105.60	106.28	106.67	106.40	108.01	108.95	104.70	106.50	107.13	106.28	108.65	107.77
26/11/2010	106.38	106.97	105.60	106.25	106.68	106.40	108.03	108.96	104.72	106.50	107.13	106.29	108.69	107.79
27/11/2010	106.38	106.96	105.62	106.21	106.69	106.41	108.13	108.97	104.75	106.52	107.15	106.30	108.73	107.83
28/11/2010	106.38	106.95	105.62	106.18	106.69	106.42	108.15	108.98	104.77	106.52	107.16	106.30	108.71	107.85
29/11/2010	106.39	106.94	105.62	106.16	106.70	106.43	108.10	108.98	104.79	106.52	107.16	106.30	108.70	107.86
30/11/2010	106.39	106.93	105.63	106.13	106.71	106.44	108.16	108.99	104.81	106.54	107.17	106.32	108.76	107.91
01/12/2010	106.40	106.92	105.63	106.10	106.72	106.44	108.25	109.00	104.83	106.55	107.19	106.33	108.77	107.95
02/12/2010	106.40	106.90	105.62	106.05	106.72	106.44	108.24	109.01	104.85	106.55	107.20	106.34	108.75	107.97
03/12/2010	106.40	106.87	105.61	106.01	106.73	106.45	108.21	109.00	104.86	106.56	107.20	106.34	108.72	107.98
04/12/2010	106.41	106.85	105.60	105.97	106.74	106.46	108.19	109.02	104.87	106.57	107.21	106.35	108.72	108.00
05/12/2010	106.41	106.82	105.59	105.93	106.75	106.47	108.31	109.03	104.89	106.59	107.23	106.38	108.77	108.08
06/12/2010	106.43	106.80	105.58	105.90	106.76	106.49	108.44	109.08	104.90	106.63	107.28	106.43	108.92	108.27
07/12/2010	106.44	106.77	105.58	105.89	106.76	106.51	108.50	109.13	104.91	106.66	107.34	106.49	109.02	108.51
08/12/2010	106.45	106.79	105.60	106.09	106.78	106.53	108.56	109.20	104.92	106.72	107.45	106.57	109.11	108.68
09/12/2010	106.46	106.96	105.66	107.00	106.79	106.55	108.48	109.26	104.92	106.80	107.56	106.68	109.22	108.75
10/12/2010	106.49	107.27	105.80	107.53	106.82	106.57	108.57	109.29	104.95	106.82	107.65	106.73	109.14	108.84
11/12/2010	106.52	107.51	105.96	107.60	106.86	106.60	108.69	109.32	104.99	106.87	107.72	106.74	109.09	108.87
12/12/2010	106.55	107.62	106.08	107.35	106.89	106.63	108.74	109.33	105.03	106.90	107.77	106.74	109.04	108.83
13/12/2010	106.57	107.64	106.15	107.09	106.92	106.66	108.69	109.33	105.07	106.92	107.78	106.72	108.97	108.74
14/12/2010	106.60	107.59	106.17	106.90	106.93	106.68	108.63	109.34	105.11	106.92	107.77	106.69	108.90	108.67
15/12/2010	106.62	107.53	106.18	106.77	106.95	106.70	108.58	109.35	105.15	106.94	107.77	106.71	108.88	108.64
16/12/2010	106.64	107.48	106.18	106.67	106.97	106.72	108.71	109.40	105.19	106.97	107.83	106.76	108.91	108.74
17/12/2010	106.66	107.43	106.17	106.56	106.99	106.74	108.79	109.41	105.23	106.99	107.87	106.77	108.91	108.78
18/12/2010	106.68	107.36	106.14	106.47	107.01	106.76	108.74	109.41	105.27	107.00	107.87	106.77	108.88	108.74
19/12/2010	106.69	107.31	106.11	106.39	107.03	106.78	108.71	109.43	105.30	107.01	107.87	106.77	108.89	108.74
20/12/2010	106.70	107.26	106.08	106.34	107.04	106.80	108.65	109.46	105.32	107.02	107.88	106.79	108.93	108.77
21/12/2010	106.73	107.22	106.07	106.31	107.06	106.82	108.70	109.55	105.34	107.06	107.99	106.90	109.04	108.94
22/12/2010	106.75	107.20	106.07	106.30	107.08	106.83	108.78	109.60	105.35	107.12	108.10	106.96	109.06	109.02
23/12/2010	106.77	107.19	106.08	106.35	107.09	106.85	108.83	109.69	105.36	107.23	108.22	107.10	109.17	109.12

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
24/12/2010	106.79	107.21	106.11	106.50	107.11	106.86	108.78	109.71	105.37	107.24	108.27	107.12	109.13	109.10
25/12/2010	106.81	107.30	106.15	106.92	107.12	106.87	108.69	109.67	105.37	107.26	108.22	107.02	109.03	108.99
26/12/2010	106.82	107.45	106.22	107.37	107.14	106.89	108.65	109.69	105.39	107.28	108.21	107.01	108.98	108.87
27/12/2010	106.85	107.62	106.33	107.55	107.17	106.91	108.71	109.72	105.41	107.31	108.24	107.05	108.96	108.87
28/12/2010	106.87	107.73	106.41	107.37	107.19	106.92	108.70	109.72	105.43	107.32	108.22	107.02	108.92	108.81
29/12/2010	106.90	107.75	106.45	107.08	107.22	106.95	108.66	109.72	105.46	107.33	108.19	107.01	108.94	108.80
30/12/2010	106.92	107.71	106.46	106.92	107.24	106.97	108.65	109.73	105.50	107.34	108.19	107.02	108.94	108.82
31/12/2010	106.94	107.66	106.45	106.83	107.26	106.99	108.62	109.73	105.53	107.34	108.17	107.01	108.89	108.78
01/01/2011	106.96	107.61	106.44	106.77	107.27	107.01	108.60	109.74	105.57	107.35	108.17	107.02	108.87	108.76
02/01/2011	106.98	107.57	106.42	106.71	107.29	107.02	108.58	109.74	105.59	107.35	108.15	107.02	108.84	108.72
03/01/2011	107.00	107.53	106.40	106.64	107.31	107.04	108.57	109.75	105.62	107.36	108.14	107.03	108.82	108.71
04/01/2011	107.02	107.50	106.38	106.57	107.32	107.05	108.61	109.77	105.64	107.38	108.16	107.05	108.82	108.73
05/01/2011	107.03	107.46	106.37	106.50	107.34	107.07	108.67	109.80	105.66	107.40	108.19	107.09	108.83	108.76
06/01/2011	107.05	107.42	106.34	106.43	107.36	107.09	108.68	109.80	105.68	107.41	108.18	107.08	108.83	108.75
07/01/2011	107.07	107.37	106.31	106.38	107.37	107.11	108.61	109.80	105.69	107.40	108.14	107.06	108.84	108.72
08/01/2011	107.08	107.34	106.28	106.34	107.38	107.12	108.61	109.82	105.70	107.41	108.17	107.08	108.87	108.75
09/01/2011	107.09	107.31	106.25	106.36	107.39	107.14	108.56	109.80	105.70	107.40	108.14	107.06	108.84	108.70
10/01/2011	107.10	107.30	106.24	106.40	107.40	107.14	108.53	109.81	105.70	107.41	108.14	107.08	108.84	108.70
11/01/2011	107.12	107.31	106.26	106.42	107.41	107.16	108.63	109.84	105.70	107.44	108.19	107.13	108.86	108.76
12/01/2011	107.13	107.31	106.24	106.44	107.42	107.17	108.55	109.83	105.70	107.43	108.16	107.09	108.84	108.70
13/01/2011	107.14	107.32	106.26	106.48	107.43	107.18	108.59	109.86	105.70	107.46	108.20	107.13	108.88	108.75
14/01/2011	107.16	107.34	106.28	106.53	107.44	107.19	108.63	109.88	105.71	107.48	108.23	107.16	108.89	108.77
15/01/2011	107.17	107.36	106.29	106.56	107.45	107.20	108.58	109.86	105.71	107.47	108.20	107.13	108.86	108.71
16/01/2011	107.18	107.37	106.31	106.56	107.46	107.20	108.60	109.88	105.72	107.49	108.22	107.15	108.85	108.72
17/01/2011	107.19	107.36	106.31	106.49	107.46	107.21	108.60	109.89	105.72	107.50	108.21	107.15	108.83	108.70
18/01/2011	107.20	107.33	106.29	106.42	107.47	107.22	108.58	109.88	105.73	107.50	108.19	107.14	108.81	108.67
19/01/2011	107.21	107.30	106.26	106.36	107.47	107.22	108.53	109.87	105.73	107.48	108.15	107.12	108.77	108.62
20/01/2011	107.22	107.27	106.24	106.30	107.48	107.23	108.54	109.89	105.74	107.50	108.16	107.14	108.76	108.63
21/01/2011	107.23	107.24	106.22	106.25	107.49	107.23	108.52	109.88	105.74	107.49	108.13	107.12	108.73	108.59
22/01/2011	107.23	107.20	106.20	106.21	107.50	107.24	108.53	109.89	105.74	107.50	108.14	107.14	108.73	108.60
23/01/2011	107.24	107.17	106.18	106.17	107.50	107.25	108.53	109.89	105.74	107.50	108.13	107.13	108.70	108.59
24/01/2011	107.25	107.14	106.16	106.14	107.51	107.25	108.52	109.90	105.74	107.49	108.12	107.13	108.70	108.57
25/01/2011	107.26	107.11	106.14	106.11	107.52	107.26	108.55	109.92	105.74	107.51	108.14	107.15	108.72	108.59
26/01/2011	107.28	107.07	106.12	106.09	107.54	107.28	108.62	109.94	105.75	107.53	108.17	107.18	108.72	108.63
27/01/2011	107.28	107.03	106.09	106.06	107.54	107.28	108.55	109.91	105.74	107.49	108.12	107.12	108.68	108.56
28/01/2011	107.28	106.99	106.06	106.03	107.54	107.28	108.51	109.90	105.73	107.47	108.10	107.10	108.67	108.54
29/01/2011	107.29	106.96	106.03	106.00	107.55	107.29	108.49	109.90	105.72	107.47	108.08	107.09	108.66	108.53
30/01/2011	107.29	106.94	106.01	105.98	107.55	107.29	108.47	109.89	105.72	107.46	108.07	107.08	108.64	108.50

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
31/01/2011	107.29	106.91	105.98	105.95	107.55	107.30	108.40	109.87	105.71	107.43	108.04	107.05	108.61	108.45
01/02/2011	107.29	106.89	105.95	105.93	107.56	107.30	108.35	109.85	105.70	107.42	108.01	107.03	108.59	108.41
02/02/2011	107.29	106.86	105.92	105.90	107.55	107.30	108.34	109.85	105.68	107.41	108.00	107.03	108.60	108.40
03/02/2011	107.29	106.84	105.90	105.88	107.56	107.30	108.37	109.86	105.67	107.41	108.01	107.05	108.62	108.42
04/02/2011	107.30	106.82	105.88	105.86	107.56	107.31	108.38	109.86	105.67	107.40	108.00	107.04	108.63	108.42
05/02/2011	107.30	106.80	105.86	105.83	107.57	107.31	108.38	109.86	105.66	107.40	107.99	107.03	108.64	108.42
06/02/2011	107.31	106.78	105.84	105.81	107.57	107.31	108.41	109.87	105.65	107.40	108.00	107.05	108.65	108.44
07/02/2011	107.31	106.77	105.83	105.80	107.57	107.32	108.48	109.90	105.65	107.42	108.03	107.07	108.66	108.48
08/02/2011	107.31	106.75	105.81	105.78	107.57	107.32	108.46	109.88	105.64	107.41	108.00	107.05	108.64	108.45
09/02/2011	107.32	106.73	105.79	105.76	107.58	107.32	108.47	109.88	105.63	107.41	108.00	107.05	108.64	108.45
10/02/2011	107.32	106.72	105.77	105.74	107.58	107.32	108.46	109.88	105.62	107.40	107.99	107.04	108.64	108.44
11/02/2011	107.33	106.70	105.76	105.72	107.58	107.33	108.47	109.88	105.61	107.40	107.99	107.05	108.65	108.44
12/02/2011	107.33	106.67	105.73	105.70	107.57	107.32	108.45	109.87	105.60	107.39	107.98	107.03	108.63	108.42
13/02/2011	107.33	106.66	105.72	105.68	107.58	107.33	108.49	109.90	105.59	107.41	108.00	107.07	108.65	108.46
14/02/2011	107.33	106.65	105.70	105.66	107.57	107.33	108.49	109.90	105.58	107.40	108.00	107.05	108.63	108.44
15/02/2011	107.34	106.63	105.69	105.65	107.58	107.33	108.52	109.92	105.58	107.42	108.01	107.07	108.64	108.47
16/02/2011	107.34	106.62	105.67	105.63	107.57	107.33	108.50	109.90	105.57	107.39	107.99	107.05	108.62	108.43
17/02/2011	107.33	106.61	105.65	105.61	107.56	107.32	108.43	109.87	105.55	107.35	107.96	107.00	108.58	108.37
18/02/2011	107.31	106.59	105.63	105.59	107.55	107.31	108.28	109.82	105.54	107.32	107.91	106.96	108.53	108.27
19/02/2011	107.31	106.58	105.61	105.58	107.55	107.31	108.30	109.84	105.52	107.32	107.92	106.98	108.56	108.30
20/02/2011	107.31	106.58	105.60	105.58	107.54	107.30	108.28	109.83	105.51	107.31	107.90	106.96	108.55	108.29
21/02/2011	107.31	106.57	105.59	105.57	107.54	107.30	108.30	109.84	105.50	107.31	107.91	106.98	108.56	108.30
22/02/2011	107.30	106.56	105.58	105.56	107.54	107.31	108.28	109.82	105.49	107.29	107.89	106.95	108.53	108.28
23/02/2011	107.29	106.55	105.57	105.55	107.53	107.30	108.22	109.80	105.48	107.27	107.86	106.93	108.51	108.24
24/02/2011	107.29	106.54	105.56	105.55	107.52	107.29	108.23	109.80	105.47	107.26	107.86	106.93	108.54	108.25
25/02/2011	107.28	106.54	105.55	105.54	107.52	107.29	108.26	109.81	105.46	107.26	107.86	106.94	108.58	108.27
26/02/2011	107.29	106.55	105.55	105.55	107.53	107.29	108.39	109.85	105.45	107.28	107.90	106.98	108.63	108.36
27/02/2011	107.29	106.56	105.55	105.56	107.52	107.28	108.39	109.83	105.44	107.26	107.88	106.95	108.61	108.34
28/02/2011	107.28	106.56	105.55	105.56	107.51	107.28	108.37	109.81	105.43	107.25	107.85	106.92	108.59	108.31
01/03/2011	107.27	106.58	105.56	105.58	107.51	107.27	108.35	109.80	105.42	107.24	107.85	106.92	108.58	108.30
02/03/2011	107.27	106.59	105.57	105.60	107.50	107.26	108.40	109.82	105.41	107.25	107.86	106.93	108.59	108.33
03/03/2011	107.27	106.61	105.58	105.62	107.50	107.26	108.39	109.80	105.40	107.24	107.84	106.92	108.58	108.32
04/03/2011	107.26	106.62	105.59	105.64	107.50	107.26	108.38	109.80	105.39	107.23	107.83	106.91	108.57	108.30
05/03/2011	107.26	106.64	105.60	105.66	107.49	107.25	108.39	109.80	105.39	107.23	107.84	106.92	108.57	108.31
06/03/2011	107.26	106.64	105.60	105.67	107.49	107.25	108.38	109.80	105.38	107.22	107.83	106.91	108.56	108.30
07/03/2011	107.25	106.64	105.60	105.67	107.49	107.25	108.36	109.80	105.38	107.22	107.83	106.90	108.55	108.29
08/03/2011	107.25	106.63	105.60	105.67	107.49	107.25	108.36	109.80	105.37	107.22	107.83	106.90	108.56	108.29
09/03/2011	107.25	106.62	105.60	105.65	107.49	107.25	108.36	109.80	105.37	107.22	107.82	106.90	108.56	108.29

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
10/03/2011	107.25	106.60	105.58	105.63	107.48	107.24	108.34	109.79	105.36	107.21	107.81	106.89	108.55	108.27
11/03/2011	107.25	106.59	105.57	105.61	107.48	107.24	108.35	109.80	105.36	107.21	107.82	106.90	108.56	108.28
12/03/2011	107.26	106.58	105.57	105.60	107.49	107.25	108.44	109.84	105.36	107.24	107.86	106.94	108.59	108.35
13/03/2011	107.26	106.57	105.56	105.59	107.48	107.25	108.42	109.82	105.36	107.22	107.84	106.91	108.56	108.32
14/03/2011	107.24	106.56	105.55	105.58	107.47	107.24	108.32	109.79	105.35	107.20	107.80	106.87	108.53	108.24
15/03/2011	107.24	106.56	105.54	105.57	107.47	107.24	108.32	109.80	105.34	107.20	107.81	106.89	108.56	108.26
16/03/2011	107.24	106.57	105.55	105.59	107.47	107.24	108.34	109.80	105.34	107.20	107.80	106.90	108.57	108.28
17/03/2011	107.23	106.61	105.57	105.67	107.46	107.23	108.24	109.75	105.33	107.18	107.77	106.85	108.52	108.19
18/03/2011	107.22	106.65	105.59	105.74	107.45	107.23	108.14	109.73	105.32	107.16	107.74	106.84	108.50	108.14
19/03/2011	107.22	106.68	105.61	105.77	107.45	107.22	108.11	109.72	105.31	107.15	107.73	106.83	108.50	108.13
20/03/2011	107.21	106.70	105.62	105.80	107.44	107.21	108.11	109.73	105.31	107.15	107.73	106.83	108.49	108.14
21/03/2011	107.21	106.72	105.64	105.83	107.44	107.21	108.13	109.73	105.30	107.14	107.73	106.83	108.50	108.15
22/03/2011	107.21	106.74	105.66	105.84	107.44	107.21	108.13	109.72	105.30	107.14	107.72	106.82	108.49	108.14
23/03/2011	107.20	106.75	105.67	105.84	107.44	107.21	108.13	109.71	105.30	107.12	107.72	106.82	108.50	108.14
24/03/2011	107.21	106.75	105.69	105.87	107.44	107.21	108.18	109.73	105.31	107.08	107.74	106.85	108.52	108.18
25/03/2011	107.22	106.76	105.70	105.86	107.45	107.21	108.26	109.76	105.32	107.10	107.75	106.87	108.55	108.23
26/03/2011	107.22	106.74	105.69	105.85	107.45	107.22	108.28	109.76	105.32	107.10	107.76	106.88	108.54	108.24
27/03/2011	107.21	106.73	105.68	105.83	107.45	107.22	108.28	109.76	105.32	107.10	107.76	106.87	108.55	108.23
28/03/2011	107.21	106.70	105.66	105.80	107.44	107.22	108.22	109.74	105.31	107.08	107.73	106.85	108.51	108.18
29/03/2011	107.20	106.68	105.64	105.77	107.44	107.21	108.19	109.73	105.31	107.07	107.72	106.84	108.50	108.17
30/03/2011	107.20	106.66	105.63	105.75	107.44	107.21	108.15	109.71	105.30	107.06	107.71	106.83	108.48	108.14
31/03/2011	107.19	106.65	105.61	105.73	107.43	107.21	108.10	109.70	105.29	107.05	107.70	106.83	108.47	108.12
01/04/2011	107.19	106.64	105.60	105.72	107.43	107.21	108.09	109.71	105.29	107.05	107.70	106.84	108.47	108.12
02/04/2011	107.20	106.66	105.62	105.73	107.44	107.21	108.18	109.74	105.29	107.07	107.73	106.87	108.50	108.19
03/04/2011	107.19	106.68	105.62	105.75	107.43	107.21	108.15	109.72	105.29	107.05	107.71	106.84	108.49	108.15
04/04/2011	107.18	106.68	105.62	105.76	107.42	107.20	108.05	109.69	105.27	107.03	107.68	106.82	108.45	108.09
05/04/2011	107.17	106.69	105.62	105.77	107.42	107.20	108.03	109.69	105.27	107.03	107.67	106.82	108.45	108.09
06/04/2011	107.17	106.68	105.62	105.76	107.42	107.20	108.05	109.69	105.27	107.03	107.67	106.82	108.46	108.10
07/04/2011	107.17	106.66	105.60	105.74	107.42	107.20	108.06	109.68	105.27	107.03	107.67	106.82	108.46	108.11
08/04/2011	107.17	106.64	105.59	105.72	107.42	107.19	108.08	109.68	105.26	107.03	107.67	106.82	108.48	108.11
09/04/2011	107.17	106.63	105.58	105.70	107.41	107.19	108.10	109.68	105.26	107.03	107.68	106.83	108.48	108.13
10/04/2011	107.16	106.62	105.57	105.69	107.41	107.19	108.08	109.67	105.26	107.02	107.66	106.82	108.47	108.12
11/04/2011	107.16	106.60	105.56	105.67	107.41	107.19	108.04	109.66	105.25	107.01	107.65	106.81	108.45	108.09
12/04/2011	107.15	106.58	105.54	105.64	107.40	107.18	107.99	109.64	105.24	107.00	107.63	106.80	108.44	108.06
13/04/2011	107.15	106.56	105.52	105.62	107.40	107.17	108.02	109.65	105.23	107.00	107.63	106.80	108.44	108.09
14/04/2011	107.15	106.55	105.51	105.60	107.40	107.17	108.07	109.66	105.23	107.00	107.65	106.81	108.45	108.12
15/04/2011	107.14	106.53	105.49	105.58	107.39	107.17	108.04	109.64	105.22	106.99	107.61	106.79	108.42	108.10
16/04/2011	107.14	106.52	105.48	105.55	107.39	107.16	107.99	109.62	105.21	106.98	107.61	106.78	108.41	108.07

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
17/04/2011	107.13	106.50	105.46	105.54	107.39	107.16	107.96	109.59	105.21	106.98	107.60	106.78	108.41	108.07
18/04/2011	107.13	106.50	105.45	105.52	107.39	107.16	108.00	109.58	105.20	106.98	107.57	106.79	108.42	108.10
19/04/2011	107.13	106.49	105.44	105.51	107.39	107.16	108.02	109.56	105.19	106.97	107.56	106.78	108.42	108.10
20/04/2011	107.12	106.48	105.42	105.49	107.39	107.16	107.98	109.53	105.18	106.96	107.54	106.77	108.41	108.08
21/04/2011	107.12	106.47	105.40	105.48	107.38	107.16	107.93	109.51	105.17	106.95	107.52	106.76	108.42	108.07
22/04/2011	107.11	106.46	105.38	105.46	107.38	107.16	107.77	109.50	105.16	106.94	107.51	106.75	108.40	108.08
23/04/2011	107.10	106.44	105.36	105.44	107.38	107.15	107.65	109.48	105.15	106.92	107.50	106.74	108.39	108.05
24/04/2011	107.09	106.43	105.34	105.42	107.37	107.15	107.62	109.47	105.13	106.90	107.49	106.72	108.39	108.03
25/04/2011	107.09	106.42	105.32	105.41	107.36	107.15	107.61	109.47	105.12	106.89	107.48	106.71	108.39	108.02
26/04/2011	107.08	106.41	105.31	105.39	107.36	107.15	107.62	109.47	105.11	106.89	107.50	106.71	108.38	108.02
27/04/2011	107.07	106.40	105.29	105.38	107.36	107.14	107.63	109.47	105.11	106.88	107.51	106.71	108.38	108.02
28/04/2011	107.06	106.39	105.27	105.36	107.35	107.13	107.62	109.46	105.09	106.87	107.50	106.70	108.38	108.03
29/04/2011	107.06	106.38	105.26	105.34	107.35	107.13	107.61	109.47	105.08	106.86	107.47	106.71	108.39	108.05
30/04/2011	107.05	106.37	105.25	105.33	107.35	107.13	107.62	109.46	105.08	106.86	107.47	106.70	108.39	108.05
01/05/2011	107.05	106.36	105.24	105.32	107.34	107.12	107.55	109.44	105.07	106.85	107.47	106.69	108.39	108.03
02/05/2011	107.04	106.35	105.22	105.31	107.34	107.12	107.53	109.42	105.05	106.84	107.44	106.69	108.37	108.01
03/05/2011	107.03	106.34	105.21	105.29	107.33	107.11	107.48	109.39	105.04	106.82	107.41	106.67	108.34	107.98
04/05/2011	107.02	106.33	105.19	105.27	107.32	107.10	107.43	109.36	105.02	106.81	107.39	106.64	108.31	107.96
05/05/2011	107.01	106.32	105.18	105.26	107.31	107.10	107.43	109.35	105.01	106.79	107.38	106.65	108.30	107.96
06/05/2011	107.01	106.32	105.17	105.25	107.31	107.09	107.41	109.34	104.99	106.77	107.36	106.65	108.29	107.97
07/05/2011	107.00	106.31	105.16	105.24	107.31	107.09	107.41	109.34	104.98	106.76	107.35	106.64	108.29	107.97
08/05/2011	106.99	106.30	105.14	105.23	107.30	107.09	107.38	109.32	104.97	106.74	107.36	106.63	108.26	107.94
09/05/2011	106.98	106.29	105.13	105.21	107.29	107.08	107.37	109.30	104.95	106.73	107.36	106.62	108.24	107.93
10/05/2011	106.97	106.28	105.12	105.20	107.28	107.08	107.35	109.30	104.94	106.71	107.33	106.61	108.23	107.92
11/05/2011	106.96	106.28	105.11	105.19	107.28	107.07	107.33	109.29	104.92	106.70	107.32	106.60	108.25	107.92
12/05/2011	106.95	106.27	105.09	105.17	107.27	107.06	107.31	109.28	104.91	106.69	107.30	106.59	108.25	107.92
13/05/2011	106.94	106.26	105.08	105.16	107.26	107.05	107.30	109.28	104.89	106.67	107.28	106.58	108.24	107.91
14/05/2011	106.93	106.25	105.07	105.15	107.26	107.05	107.28	109.25	104.88	106.65	107.29	106.57	108.24	107.90
15/05/2011	106.92	106.24	105.06	105.13	107.25	107.04	107.27	109.24	104.86	106.64	107.29	106.55	108.22	107.88
16/05/2011	106.92	106.23	105.05	105.13	107.24	107.03	107.27	109.23	104.85	106.64	107.28	106.54	108.21	107.88
17/05/2011	106.91	106.23	105.04	105.12	107.24	107.03	107.28	109.23	104.84	106.63	107.26	106.54	108.22	107.89
18/05/2011	106.90	106.23	105.03	105.11	107.23	107.03	107.28	109.22	104.83	106.63	107.25	106.54	108.24	107.90
19/05/2011	106.89	106.23	105.03	105.10	107.23	107.02	107.26	109.20	104.82	106.62	107.24	106.52	108.23	107.88
20/05/2011	106.89	106.22	105.02	105.10	107.22	107.01	107.24	109.20	104.80	106.60	107.23	106.51	108.22	107.87
21/05/2011	106.87	106.21	105.01	105.09	107.20	107.01	107.24	109.19	104.79	106.60	107.22	106.50	108.25	107.86
22/05/2011	106.87	106.21	105.00	105.08	107.17	107.00	107.22	109.18	104.78	106.59	107.22	106.49	108.26	107.85
23/05/2011	106.86	106.20	104.99	105.07	107.16	106.99	107.22	109.17	104.77	106.59	107.22	106.48	108.25	107.84
24/05/2011	106.84	106.19	104.98	105.06	107.15	106.98	107.20	109.16	104.76	106.57	107.20	106.47	108.24	107.83

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
25/05/2011	106.84	106.19	104.97	105.05	107.15	106.97	107.21	109.16	104.75	106.55	107.19	106.46	108.27	107.84
26/05/2011	106.83	106.18	104.96	105.05	107.15	106.97	107.20	109.15	104.74	106.54	107.18	106.45	108.28	107.84
27/05/2011	106.81	106.17	104.95	105.04	107.14	106.96	107.18	109.13	104.72	106.53	107.16	106.44	108.27	107.81
28/05/2011	106.78	106.17	104.94	105.03	107.12	106.95	107.18	109.12	104.71	106.52	107.15	106.43	108.27	107.81
29/05/2011	106.75	106.16	104.93	105.02	107.11	106.95	107.18	109.11	104.70	106.52	107.15	106.43	108.26	107.81
30/05/2011	106.73	106.16	104.92	105.02	107.10	106.95	107.19	109.11	104.69	106.52	107.18	106.43	108.26	107.81
31/05/2011	106.74	106.15	104.90	105.01	107.09	106.95	107.17	109.09	104.68	106.51	107.17	106.41	108.24	107.79
01/06/2011	106.73	106.14	104.90	105.00	107.09	106.93	107.17	109.09	104.67	106.50	107.17	106.40	108.23	107.78
02/06/2011	106.73	106.14	104.89	105.00	107.09	106.92	107.17	109.09	104.66	106.50	107.18	106.40	108.20	107.78
03/06/2011	106.72	106.13	104.88	104.99	107.08	106.91	107.18	109.09	104.65	106.50	107.17	106.40	108.18	107.78
04/06/2011	106.72	106.13	104.88	104.98	107.08	106.90	107.20	109.09	104.65	106.50	107.16	106.40	108.18	107.79
05/06/2011	106.72	106.13	104.87	104.98	107.08	106.89	107.20	109.09	104.64	106.50	107.18	106.40	108.19	107.78
06/06/2011	106.70	106.12	104.87	104.97	107.07	106.89	107.20	109.08	104.64	106.49	107.15	106.39	108.19	107.77
07/06/2011	106.70	106.12	104.86	104.97	107.06	106.90	107.19	109.07	104.63	106.49	107.14	106.38	108.18	107.77
08/06/2011	106.69	106.12	104.85	104.96	107.04	106.89	107.17	109.06	104.62	106.48	107.14	106.37	108.17	107.75
09/06/2011	106.66	106.12	104.85	104.96	107.02	106.88	107.17	109.05	104.60	106.47	107.14	106.36	108.16	107.74
10/06/2011	106.65	106.12	104.85	104.96	107.02	106.87	107.18	109.05	104.59	106.47	107.13	106.35	108.15	107.73
11/06/2011	106.64	106.11	104.84	104.96	107.01	106.86	107.17	109.04	104.58	106.46	107.12	106.34	108.15	107.72
12/06/2011	106.65	106.11	104.84	104.95	107.01	106.85	107.17	109.04	104.57	106.46	107.13	106.34	108.16	107.70
13/06/2011	106.65	106.11	104.84	104.95	107.00	106.84	107.17	109.04	104.57	106.45	107.13	106.34	108.16	107.70
14/06/2011	106.62	106.11	104.84	104.95	107.00	106.84	107.16	109.03	104.56	106.45	107.10	106.33	108.13	107.68
15/06/2011	106.61	106.11	104.83	104.95	106.99	106.83	107.15	109.02	104.55	106.45	107.08	106.32	108.13	107.67
16/06/2011	106.60	106.11	104.83	104.95	106.99	106.82	107.14	109.02	104.54	106.45	107.07	106.31	108.10	107.67
17/06/2011	106.59	106.10	104.82	104.94	106.98	106.81	107.14	109.01	104.53	106.44	107.07	106.30	108.10	107.67
18/06/2011	106.60	106.09	104.82	104.93	106.97	106.81	107.12	108.99	104.52	106.43	107.05	106.29	108.08	107.66
19/06/2011	106.60	106.09	104.81	104.93	106.96	106.80	107.11	108.99	104.51	106.42	107.06	106.28	108.07	107.65
20/06/2011	106.57	106.08	104.81	104.92	106.96	106.79	107.11	108.99	104.50	106.42	107.06	106.28	108.07	107.65
21/06/2011	106.55	106.08	104.80	104.92	106.95	106.79	107.11	108.98	104.49	106.42	107.04	106.28	108.07	107.65
22/06/2011	106.55	106.08	104.80	104.92	106.95	106.79	107.10	108.98	104.49	106.41	107.04	106.27	108.07	107.65
23/06/2011	106.55	106.07	104.79	104.91	106.94	106.78		108.97	104.48	106.40	107.05	106.26	108.09	107.64
24/06/2011	106.53	106.07	104.79	104.91	106.93	106.77		108.96	104.47	106.40	107.04	106.25	108.09	107.63
25/06/2011	106.54	106.07	104.78	104.90	106.92	106.76		108.96	104.47	106.39	107.02	106.25	108.06	107.63
26/06/2011	106.51	106.07	104.78	104.90	106.92	106.76		108.96	104.46	106.39	107.03	106.26	108.07	107.63
27/06/2011	106.51	106.07	104.78	104.90	106.90	106.75		108.95	104.45	106.39	107.02	106.26	108.07	107.63
28/06/2011	106.52	106.07	104.77	104.90	106.89	106.75		108.93	104.45	106.39	107.01	106.25	108.06	107.62
29/06/2011	106.51	106.06	104.76	104.89	106.88	106.73		108.92	104.43	106.37	106.99	106.24	108.03	107.60
30/06/2011	106.48	106.05	104.75	104.88	106.86	106.72		108.91	104.42	106.37	106.98	106.23	108.03	107.59
01/07/2011	106.48	106.04	104.75	104.88	106.85	106.71		108.89	104.41	106.36	106.96	106.23	108.01	107.58

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
02/07/2011	106.45	106.04	104.74	104.87	106.82	106.69		108.88	104.40	106.35	106.96	106.22	108.00	107.58
03/07/2011	106.43	106.04	104.73	104.86	106.80	106.67		108.87	104.39	106.35	106.96	106.22	107.99	107.57
04/07/2011	106.42	106.03	104.73	104.86	106.81	106.67		108.86	104.38	106.34	106.95	106.21	108.01	107.56
05/07/2011	106.41	106.03	104.72	104.85	106.81	106.66		108.86	104.37	106.34	106.94	106.21	108.01	107.56
06/07/2011	106.40	106.02	104.72	104.85	106.81	106.66		108.85	104.36	106.33	106.93	106.20	108.01	107.55
07/07/2011	106.39	106.02	104.71	104.84	106.80	106.65		108.84	104.35	106.32	106.92	106.19	108.03	107.54
08/07/2011	106.37	106.01	104.70	104.83	106.80	106.64		108.82	104.35	106.31	106.91	106.18	108.00	107.53
09/07/2011	106.36	106.01	104.70	104.83	106.79	106.63		108.81	104.34	106.30	106.90	106.18	107.98	107.52
10/07/2011	106.36	106.01	104.69	104.82	106.79	106.62		108.81	104.33	106.29	106.89	106.17	107.98	107.52
11/07/2011	106.34	106.01	104.69	104.82	106.78	106.62		108.80	104.32	106.28	106.88	106.17	107.98	107.51
12/07/2011	106.34	106.01	104.69	104.82	106.76	106.62		108.80	104.31	106.26	106.88	106.16	107.99	107.51
13/07/2011	106.35	106.01	104.68	104.82	106.76	106.61		108.79	104.30	106.25	106.88	106.15	107.98	107.50
14/07/2011	106.35	106.01	104.68	104.82	106.75	106.60		108.79	104.29	106.24	106.87	106.15	107.97	107.49
15/07/2011	106.32	106.01	104.68	104.82	106.73	106.59		108.78	104.28	106.24	106.87	106.14	107.96	107.48
16/07/2011	106.33	106.01	104.68	104.82	106.73	106.59		108.78	104.27	106.23	106.87	106.14	107.97	107.48
17/07/2011	106.34	106.02	104.68	104.83	106.73	106.59	106.85	108.78	104.27	106.22	106.87	106.13	107.98	107.48
18/07/2011	106.34	106.03	104.68	104.85	106.72	106.59	106.85	108.78	104.26	106.21	106.88	106.12	107.99	107.47
19/07/2011	106.34	106.04	104.69	104.86	106.72	106.60	106.85	108.78	104.26	106.21	106.88	106.12	108.00	107.47
20/07/2011	106.34	106.04	104.69	104.87	106.71	106.58	106.85	108.79	104.26	106.21	106.89	106.12	108.03	107.47
21/07/2011	106.34	106.04	104.70	104.88	106.71	106.58	106.86	108.79	104.26	106.21	106.89	106.11	108.06	107.48
22/07/2011	106.34	106.04	104.70	104.89	106.71	106.59	106.86	108.79	104.26	106.21	106.90	106.11	108.09	107.48
23/07/2011	106.34	106.04	104.70	104.90	106.70	106.58	106.87	108.80	104.26	106.21	106.92	106.11	108.15	107.49
24/07/2011	106.34	106.04	104.71	104.91	106.69	106.55	106.87	108.81	104.26	106.21	106.93	106.11	108.15	107.49
25/07/2011	106.34	106.05	104.71	104.91	106.69	106.54	106.88	108.81	104.27	106.22	106.94	106.11	108.15	107.50
26/07/2011	106.34	106.06	104.72	104.92	106.69	106.54	106.89	108.81	104.28	106.22	106.94	106.11	108.12	107.50
27/07/2011	106.34	106.06	104.72	104.92	106.68	106.53	106.90	108.81	104.29	106.22	106.94	106.11	108.10	107.50
28/07/2011	106.34	106.06	104.72	104.93	106.68	106.53	106.90	108.81	104.29	106.22	106.94	106.11	108.09	107.49
29/07/2011	106.34	106.06	104.73	104.93	106.67	106.56	106.91	108.82	104.29	106.22	106.94	106.10	108.08	107.48
30/07/2011	106.34	106.06	104.73	104.93	106.67	106.55	106.92	108.81	104.29	106.21	106.94	106.10	108.11	107.48
31/07/2011	106.34	106.06	104.73	104.93	106.67	106.55	106.93	108.81	104.29	106.21	106.92	106.10	108.09	107.48
01/08/2011	106.32	106.06	104.74	104.93	106.67	106.55	106.94	108.81	104.29	106.21	106.92	106.10	108.09	107.48
02/08/2011	106.29	106.05	104.73	104.92	106.66	106.56	106.94	108.81	104.29	106.21	106.90	106.10	108.09	107.48
03/08/2011	106.31	106.04	104.73	104.91	106.66	106.58	106.95	108.80	104.28	106.20	106.90	106.09	108.09	107.47
04/08/2011	106.31	106.03	104.72	104.91	106.66	106.55	106.96	108.80	104.28	106.20	106.91	106.09	108.08	107.47
05/08/2011	106.32	106.03	104.72	104.90	106.65	106.54	106.97	108.80	104.28	106.20	106.91	106.09	108.09	107.47
06/08/2011	106.32	106.02	104.72	104.90	106.65	106.55	106.98	108.81	104.28	106.20	106.91	106.09	108.11	107.47
07/08/2011	106.32	106.02	104.71	104.89	106.64	106.54	106.98	108.80	104.28	106.20	106.91	106.08	108.10	107.47
08/08/2011	106.31	106.02	104.71	104.88	106.64	106.53	106.98	108.80	104.28	106.19	106.90	106.08	108.08	107.46

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
09/08/2011	106.31	106.02	104.71	104.88	106.63		106.98	108.79	104.28	106.19		106.08	108.07	107.46
10/08/2011	106.31	106.02	104.70	104.87	106.63		106.99	108.80	104.27	106.19		106.08	108.06	107.46
11/08/2011	106.31	106.02	104.70	104.87	106.63		107.00	108.80	104.27	106.19		106.08	108.05	107.46
12/08/2011	106.30	106.01	104.70	104.87	106.63		107.01	108.80	104.27	106.19		106.08	108.05	107.46
13/08/2011	106.30	106.01	104.69	104.87	106.62		107.01	108.80	104.27	106.19		106.07	108.06	107.46
14/08/2011	106.30	106.01	104.69	104.86	106.62		107.02	108.80	104.27	106.19		106.07	108.08	107.46
15/08/2011	106.30	106.00	104.69	104.86	106.62		107.02	108.80	104.27	106.18		106.07	108.08	107.45
16/08/2011	106.30	106.00	104.69	104.86	106.61		107.03	108.81	104.26	106.18		106.07	108.06	107.45
17/08/2011	106.30	106.00	104.68	104.85	106.61		107.04	108.81	104.26	106.18		106.07	108.08	107.45
18/08/2011	106.29	106.00	104.68	104.85	106.61		107.05	108.81	104.26	106.19		106.07	108.08	107.45
19/08/2011	106.29	106.00	104.68	104.85	106.60		107.04	108.80	104.26	106.18		106.06	108.04	107.44
20/08/2011	106.29	106.00	104.68	104.85	106.60		107.06	108.80	104.26	106.18		106.06	108.02	107.45
21/08/2011	106.28	106.00	104.68	104.85	106.60		107.06	108.80	104.25	106.18		106.06	108.03	107.45
22/08/2011	106.28	106.00	104.68	104.85	106.60		107.06	108.81	104.25	106.18		106.06	108.03	107.45
23/08/2011	106.28	105.99	104.67	104.85	106.59		107.07	108.80	104.24	106.18		106.06	108.02	107.44
24/08/2011	106.28	105.99	104.67	104.84	106.59		107.07	108.79	104.24	106.17		106.05	108.02	107.44
25/08/2011	106.28	105.99	104.67	104.84	106.58		107.08	108.79	104.23	106.17		106.05	108.03	107.44
26/08/2011	106.27	105.98	104.66	104.83	106.58		107.08	108.79	104.23	106.17		106.05	108.02	107.44
27/08/2011	106.26	105.98	104.66	104.83	106.57		107.07	108.79	104.22	106.16		106.04	108.05	107.43
28/08/2011	106.25	105.98	104.66	104.83	106.57		107.07	108.79	104.22	106.16		106.05	108.06	107.42
29/08/2011	106.25	105.99	104.66	104.83	106.57		107.08	108.80	104.22	106.16		106.05	108.06	107.43
30/08/2011	106.26	106.00	104.67	104.84	106.56		107.09	108.80	104.22	106.16		106.05	108.07	107.43
31/08/2011	106.25	106.02	104.68	104.85	106.56		107.09	108.80	104.21	106.16		106.05	108.06	107.43
01/09/2011	106.25	106.03	104.68	104.87	106.56		107.10	108.80	104.21	106.16		106.05	108.05	107.43
02/09/2011	106.25	106.02	104.69	104.88	106.56		107.10	108.80	104.22	106.17		106.05	108.04	107.43
03/09/2011	106.25	106.02	104.69	104.88	106.56		107.11	108.80	104.22	106.17		106.05	108.06	107.43
04/09/2011	106.24	106.01	104.68	104.87	106.55		107.10	108.80	104.21	106.16		106.05	108.06	107.43
05/09/2011	106.23	106.01	104.68	104.86	106.54		107.10	108.79	104.21	106.15		106.04	108.04	107.42
06/09/2011	106.24	106.02	104.68	104.87	106.54		107.10	108.79	104.21	106.15		106.04	108.05	107.42
07/09/2011	106.23	106.02	104.69	104.88	106.54		107.11	108.79	104.21	106.15		106.04	108.05	107.42
08/09/2011	106.23	106.01	104.69	104.88	106.53		107.11	108.78	104.21	106.15		106.03	108.05	107.41
09/09/2011	106.23	106.01	104.69	104.88	106.53		107.12	108.78	104.21	106.15		106.03	108.04	107.41
10/09/2011	106.23	106.01	104.68	104.88	106.53		107.13	108.78	104.21	106.15		106.03	108.01	107.42
11/09/2011	106.22	106.00	104.68	104.87	106.53		107.12	108.78	104.21	106.15		106.03	108.01	107.41
12/09/2011	106.22	105.99	104.67	104.86	106.53		107.12	108.78	104.20	106.14		106.03	108.02	107.41
13/09/2011	106.22	105.99	104.67	104.86	106.52		107.12	108.78	104.20	106.14		106.03	108.02	107.41
14/09/2011	106.21	106.00	104.67	104.86	106.52		107.12	108.77	104.20	106.14		106.02	108.02	107.40
15/09/2011	106.21	106.02	104.68	104.87	106.51		107.12	108.77	104.20	106.13		106.02	108.01	107.40

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
16/09/2011	106.21	106.03	104.69	104.89	106.51		107.13	108.77	104.20	106.13		106.02	108.00	107.40
17/09/2011	106.21	106.04	104.70	104.91	106.51		107.13	108.77	104.20	106.14		106.02	107.99	107.40
18/09/2011	106.20	106.05	104.71	104.92	106.51		107.13	108.77	104.20	106.13		106.02	107.98	107.40
19/09/2011	106.20	106.04	104.71	104.93	106.50		107.12	108.76	104.20	106.13		105.99	107.96	107.39
20/09/2011	106.20	106.02	104.71	104.93	106.50		107.12	108.76	104.20	106.13		105.94	107.96	107.39
21/09/2011	106.20	106.01	104.71	104.92	106.50		107.13	108.76	104.20	106.13		105.95	107.96	107.39
22/09/2011	106.20	106.00	104.70	104.90	106.50		107.13	108.76	104.20	106.13		105.95	107.95	107.39
23/09/2011	106.19	105.99	104.68	104.89	106.49		107.14	108.75	104.19	106.12		105.95	107.96	107.39
24/09/2011	106.19	105.99	104.68	104.88	106.49		107.14	108.75	104.19	106.12		105.95	107.95	107.39
25/09/2011	106.19	105.99	104.67	104.87	106.49		107.13	108.75	104.19	106.12		105.96	107.95	107.39
26/09/2011	106.19	105.99	104.67	104.86	106.50		107.12	108.74	104.19	106.12		105.96	107.95	107.38
27/09/2011	106.19	105.98	104.67	104.86	106.49		107.12	108.74	104.19	106.12		105.96	107.95	107.38
28/09/2011	106.18	105.98	104.66	104.85	106.49		107.13	108.74	104.19	106.11		105.96	107.96	107.38
29/09/2011	106.18	105.98	104.66	104.84	106.49		107.13	108.74	104.19	106.11		105.96	107.95	107.37
30/09/2011	106.18	105.98	104.66	104.84	106.49		107.12	108.73	104.18	106.11		105.97	107.95	107.36
01/10/2011	106.18	105.97	104.65	104.83	106.49		107.12	108.73	104.18	106.11		105.97	107.94	107.35
02/10/2011	106.18	105.97	104.65	104.82	106.49		107.12	108.73	104.18	106.11		105.99	107.93	107.34
03/10/2011	106.17	105.97	104.64	104.81	106.48		107.11	108.73	104.18	106.10		105.99	107.93	107.34
04/10/2011	106.17	105.96	104.64	104.81	106.48		107.11	108.72	104.17	106.10		105.99	107.93	107.33
05/10/2011	106.17	105.96	104.64	104.80	106.48		107.11	108.72	104.17	106.10		105.98	107.93	107.33
06/10/2011	106.16	105.96	104.63	104.80	106.47		107.12	108.72	104.17	106.10		105.98	107.94	107.34
07/10/2011	106.16	105.96	104.63	104.79	106.47		107.11	108.71	104.16	106.09		105.98	107.92	107.33
08/10/2011	106.16	105.95	104.63	104.79	106.47		107.10	108.71	104.16	106.09		105.98	107.92	107.33
09/10/2011	106.16	105.95	104.62	104.79	106.46		107.10	108.71	104.16	106.09		105.97	107.92	107.33
10/10/2011	106.16	105.95	104.62	104.79	106.46		107.10	108.71	104.16	106.09		105.98	107.93	107.33
11/10/2011	106.15	105.95	104.62	104.79	106.46		107.11	108.71	104.16	106.08		105.98	107.92	107.33
12/10/2011	106.15	105.95	104.62	104.79	106.46		107.10	108.71	104.16	106.08		105.97	107.92	107.33
13/10/2011	106.15	105.96	104.62	104.79	106.45		107.09	108.71	104.16	106.08		105.97	107.92	107.33
14/10/2011	106.15	105.97	104.63	104.80	106.45		107.09	108.71	104.15	106.08		105.97	107.92	107.33
15/10/2011	106.14	105.97	104.63	104.80	106.45		107.08	108.70	104.15	106.08		105.97	107.91	107.33
16/10/2011	106.14	105.96	104.63	104.81	106.44		107.08	108.70	104.15	106.07		105.96	107.91	107.33
17/10/2011	106.13	105.96	104.63	104.81	106.44		107.08	108.70	104.15	106.07		105.96	107.91	107.32
18/10/2011	106.13	105.95	104.62	104.80	106.44		107.08	108.70	104.15	106.07		105.96	107.91	107.32
19/10/2011	106.13	105.95	104.62	104.80	106.44		107.07	108.70	104.15	106.07		105.96	107.90	107.32
20/10/2011	106.12	105.94	104.62	104.80	106.43		107.07	108.69	104.15	106.06		105.95	107.89	107.32
21/10/2011	106.12	105.94	104.61	104.79	106.43		107.07	108.69	104.14	106.06		105.95	107.89	107.31
22/10/2011	106.12	105.94	104.61	104.79	106.42		107.09	108.70	104.14	106.06		105.94	107.89	107.32
23/10/2011	106.12	105.95	104.61	104.79	106.43		107.10	108.70	104.14	106.06		105.95	107.90	107.32

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
24/10/2011	106.12	105.95	104.61	104.79	106.42		107.11	108.70	104.14	106.06		105.96	107.91	107.33
25/10/2011	106.12	105.94	104.61	104.79	106.42		107.10	108.70	104.14	106.06		105.96	107.90	107.32
26/10/2011	106.12	105.95	104.61	104.79	106.42		107.09	108.70	104.14	106.06		105.95	107.89	107.31
27/10/2011	106.11	105.94	104.61	104.79	106.42		107.09	108.70	104.14	106.06		105.95	107.90	107.31
28/10/2011	106.11	105.94	104.61	104.79	106.42		107.08	108.69	104.14	106.05		105.95	107.89	107.31
29/10/2011	106.11	105.95	104.61	104.79	106.42		107.08	108.69	104.14	106.05		105.94	107.90	107.31
30/10/2011	106.11	105.95	104.61	104.79	106.41		107.09	108.69	104.14	106.05		105.95	107.90	107.31
31/10/2011	106.11	105.96	104.62	104.80	106.41		107.10	108.70	104.14	106.05		105.94	107.89	107.31
01/11/2011	106.11	105.95	104.62	104.80	106.41		107.10	108.70	104.14	106.05		105.93	107.89	107.31
02/11/2011	106.11	105.95	104.61	104.80	106.41		107.11	108.70	104.14	106.05		105.93	107.90	107.31
03/11/2011	106.11	105.95	104.61	104.80	106.41		107.12	108.70	104.14	106.05		105.94	107.91	107.32
04/11/2011	106.11	105.95	104.61	104.80	106.40		107.12	108.70	104.14	106.05		105.94	107.89	107.31
05/11/2011	106.10	105.95	104.61	104.81	106.40		107.11	108.70	104.13	106.05		105.94	107.87	107.31
06/11/2011	106.10	105.96	104.62	104.81	106.40		107.10	108.69	104.13	106.05		105.94	107.86	107.31
07/11/2011	106.10	105.97	104.63	104.83	106.40		107.10	108.70	104.13	106.04		105.91	107.85	107.30
08/11/2011	106.09	106.01	104.64	104.85	106.39		107.11	108.70	104.13	106.04		105.91	107.84	107.30
09/11/2011	106.10	106.11	104.68	105.03	106.39		107.11	108.70	104.13	106.04		105.90	107.84	107.30
10/11/2011	106.10	106.20	104.73	105.31	106.39		107.11	108.70	104.14	106.04		105.91	107.84	107.30
11/11/2011	106.09	106.24	104.78	105.43	106.39		107.11	108.69	104.14	106.04		105.90	107.83	107.30
12/11/2011	106.09	106.25	104.82	105.45	106.39		107.10	108.69	104.15	106.04		105.90	107.82	107.30
13/11/2011	106.09	106.25	104.84	105.43	106.39		107.11	108.69	104.16	106.03		105.90	107.82	107.30
14/11/2011	106.09	106.24	104.85	105.40	106.39		107.12	108.70	104.17	106.03		105.89	107.82	107.30
15/11/2011	106.08	106.23	104.86	105.37	106.38		107.12	108.69	104.17	106.03		105.87	107.81	107.30
16/11/2011	106.08	106.22	104.86	105.34	106.38		107.11	108.69	104.18	106.03		105.87	107.80	107.29
17/11/2011	106.08	106.21	104.86	105.32	106.38		107.11	108.69	104.19	106.02		105.88	107.79	107.29
18/11/2011	106.08	106.20	104.86	105.29	106.39		107.12	108.69	104.20	106.03		105.88	107.80	107.30
19/11/2011	106.08	106.19	104.85	105.27	106.39		107.12	108.69	104.21	106.02		105.87	107.79	107.30
20/11/2011	106.08	106.18	104.85	105.25	106.39		107.12	108.69	104.22	106.02		105.87	107.79	107.29
21/11/2011	106.07	106.17	104.84	105.23	106.39		107.13	108.69	104.22	106.03		105.88	107.79	107.30
22/11/2011	106.07	106.15	104.83	105.21	106.39		107.12	108.69	104.23	106.02		105.87	107.78	107.29
23/11/2011	106.07	106.14	104.82	105.18	106.39		107.11	108.68	104.23	106.02		105.87	107.77	107.29
24/11/2011	106.06	106.13	104.81	105.16	106.39		107.10	108.68	104.24	106.02		105.87	107.77	107.28
25/11/2011	106.06	106.11	104.80	105.14	106.39		107.10	108.68	104.24	106.02		105.86	107.75	107.28
26/11/2011	106.06	106.11	104.79	105.12	106.39		107.10	108.68	104.25	106.02		105.85	107.76	107.28
27/11/2011	106.06	106.10	104.78	105.11	106.39		107.11	108.68	104.25	106.02		105.86	107.76	107.29
28/11/2011	106.06	106.10	104.78	105.10	106.39		107.12	108.68	104.26	106.02		105.87	107.76	107.29
29/11/2011	106.06	106.08	104.77	105.08	106.39		107.12	108.68	104.26	106.02		105.85	107.75	107.29
30/11/2011	106.06	106.08	104.76	105.07	106.38		107.11	108.68	104.26	106.01		105.86	107.75	107.29

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
01/12/2011	106.06	106.07	104.75	105.05	106.38		107.13	108.68	104.26	106.01		105.86	107.75	107.29
02/12/2011	106.06	106.06	104.75	105.05	106.38		107.13	108.68	104.26	106.02		105.86	107.75	107.30
03/12/2011	106.05	106.05	104.74	105.03	106.38		107.13	108.68	104.26	106.01		105.85	107.75	107.29
04/12/2011	106.06	106.05	104.73	105.02	106.38		107.13	108.69	104.26	106.01		105.86	107.76	107.30
05/12/2011	106.06	106.05	104.73	105.02	106.38		107.12	108.69	104.26	106.01		105.86	107.75	107.29
06/12/2011	106.05	106.04	104.72	105.01	106.38		107.12	108.69	104.26	106.01		105.84	107.74	107.29
07/12/2011	106.05	106.05	104.72	105.01	106.38		107.12	108.68	104.26	106.01		105.84	107.75	107.29
08/12/2011	106.05	106.07	104.73	105.02	106.37		107.12	108.68	104.25	106.01		105.85	107.75	107.29
09/12/2011	106.05	106.09	104.75	105.05	106.37		107.13	108.69	104.26	106.01		105.85	107.77	107.29
10/12/2011	106.05	106.10	104.76	105.07	106.37		107.13	108.69	104.26	106.01		105.86	107.78	107.30
11/12/2011	106.05	106.11	104.77	105.08	106.37		107.14	108.70	104.25	106.01		105.84	107.80	107.30
12/12/2011	106.05	106.13	104.78	105.10	106.37		107.14	108.70	104.26	106.01		105.83	107.82	107.30
13/12/2011	106.05	106.14	104.79	105.12	106.37		107.15	108.72	104.26	106.01		105.78	107.84	107.31
14/12/2011	106.05	106.14	104.79	105.13	106.37		107.15	108.72	104.26	106.01		105.79	107.85	107.31
15/12/2011	106.04	106.14	104.80	105.14	106.37		107.16	108.72	104.26	106.01		105.77	107.85	107.32
16/12/2011	106.06	106.16	104.81	105.16	106.38		107.19	108.77	104.27	106.05		105.81	107.98	107.34
17/12/2011	106.05	106.18	104.82	105.19	106.38		107.18	108.80	104.27	106.08		105.83	108.15	107.37
18/12/2011	106.06	106.22	104.84	105.24	106.38		107.21	108.81	104.27	106.07		105.85	108.17	107.39
19/12/2011	106.06	106.28	104.87	105.36	106.38		107.23	108.82	104.27	106.08		105.86	108.18	107.41
20/12/2011	106.07	106.39	104.91	105.64	106.39		107.26	108.83	104.28	106.08		105.87	108.22	107.43
21/12/2011	106.07	106.48	104.97	105.85	106.39		107.28	108.85	104.29	106.09		105.90	108.29	107.46
22/12/2011	106.08	106.54	105.02	105.90	106.40		107.30	108.87	104.30	106.10		105.92	108.35	107.50
23/12/2011	106.09	106.58	105.07	105.95	106.41		107.39	108.89	104.32	106.11		105.94	108.42	107.56
24/12/2011	106.08	106.65	105.11	106.06	106.41		107.36	108.88	104.34	106.11		105.92	108.37	107.54
25/12/2011		106.77	105.16	106.29	106.42		107.40	108.89	104.35	106.11		105.93	108.39	107.57
26/12/2011		106.87	105.22	106.41	106.43		107.44	108.90	104.38	106.13		105.94	108.40	107.59
27/12/2011		106.89	105.27	106.37	106.43		107.49	108.91	104.39	106.13		105.93	108.40	107.61
28/12/2011		106.88	105.31	106.30	106.43		107.56	108.92	104.42	106.14		105.93	108.42	107.63
29/12/2011		106.86	105.34	106.23	106.44		107.57	108.92	104.45	106.14		105.93	108.40	107.63
30/12/2011		106.84	105.36	106.17	106.45		107.64	108.93	104.48	106.15		105.96	108.41	107.66
31/12/2011		106.82	105.37	106.11	106.46		107.71	108.96	104.51	106.16		105.97	108.54	107.74
01/01/2012		106.82	105.37	106.10	106.47		107.81	108.98	104.54	106.17		106.00	108.63	107.85
02/01/2012		106.88	105.40	106.26	106.49		107.89	108.99	104.57	106.18		106.01	108.65	107.89
03/01/2012		107.03	105.43	106.74	106.49		107.92	109.01	104.58	106.19		106.00	108.68	107.93
04/01/2012		107.19	105.50	107.09	106.51		107.99	109.04	104.61	106.20		106.03	108.73	108.01
05/01/2012		107.30	105.60	107.22	106.52		108.20	109.08	104.63	106.23		106.06	108.84	108.19
06/01/2012		107.37	105.68	107.22	106.53		108.13	109.06	104.65	106.23		106.05	108.76	108.07
07/01/2012		107.43	105.75	107.26	106.53		108.17	109.08	104.67	106.25		106.06	108.77	108.09

Date	Pu 1	Pu Canes 1	Pu 12	Pu 16	Pu 17	Trou Robert	Prieurée	Colmier	Mesnil	Oussy	Ménivelle	Caillotière	Aubépin	Malette
08/01/2012		107.51	105.82	107.37	106.55		108.20	109.09	104.70	106.26		106.08	108.74	108.08
09/01/2012		107.54	105.89	107.45	106.57	106.49	108.18	109.09	104.74	106.27		106.09	108.71	108.06
10/01/2012			105.96	107.33	106.58	106.50	108.19	109.10	104.78	106.29		106.11	108.72	108.07
11/01/2012			106.00	107.12	106.60	106.52	108.22	109.11	104.82	106.30		106.12	108.71	108.09
12/01/2012			106.01	106.94	106.62	106.54	108.26	109.12	104.87	106.31		106.11	108.71	108.12
13/01/2012			106.00	106.82	106.63	106.56	108.27	109.12	104.91	106.32		106.11	108.69	108.13
14/01/2012			105.99	106.71	106.65	106.57	108.29	109.13	104.95	106.34		106.12	108.68	108.16
15/01/2012			105.97	106.62	106.67	106.58	108.33	109.14	104.99	106.35		106.11	108.66	108.19
16/01/2012			105.94	106.52	106.69	106.59	108.30	109.13	105.03	106.35		106.10	108.61	108.16
17/01/2012			105.91	106.42	106.70	106.61	108.21	109.13	105.06	106.36		106.10	108.56	108.10
18/01/2012			105.88	106.34	106.72	106.62	108.17	109.13	105.08	106.37		106.11	108.54	108.10
19/01/2012			105.85	106.27	106.73	106.64	108.20	109.14	105.10	106.38		106.14	108.57	108.14
20/01/2012			105.83	106.23	106.76	106.66	108.23	109.15	105.12	106.39		106.16	108.57	108.16
21/01/2012			105.80	106.19	106.77	106.68	108.25	109.15	105.13	106.40		106.18	108.58	108.19
22/01/2012			105.77	106.16	106.79	106.70	108.26	109.15	105.14	106.41		106.20	108.57	108.18
23/01/2012			105.74	106.13	106.80	106.71	108.24	109.15	105.15	106.42		106.19	108.56	108.18
24/01/2012			105.72	106.13	106.81	106.73	108.22	109.15	105.15	106.42		106.20	108.55	108.17
25/01/2012			105.72	106.15	106.82	106.75	108.25	109.16	105.16	106.43		106.22	108.58	108.20
26/01/2012			105.72	106.14	106.84	106.77	108.29	109.17	105.16	106.44		106.22	108.59	108.22
27/01/2012			105.70	106.12	106.84	106.77	108.22	109.16	105.16	106.44		106.20	108.55	108.17
28/01/2012			105.70	106.14	106.85	106.78	108.21	109.16	105.16	106.44		106.20	108.56	108.18
29/01/2012			105.70	106.14	106.86	106.79	108.23	109.17	105.16	106.45		106.19	108.57	108.21
30/01/2012			105.70	106.12	106.87	106.79	108.27			106.46		106.18		108.25

Date	Pu 12	Oussy
31/01/2012	105.69	106.54
01/02/2012	105.68	106.54
02/02/2012	105.66	106.55
03/02/2012	105.64	106.55
04/02/2012	105.63	106.55
05/02/2012	105.62	106.56
06/02/2012	105.60	106.57
07/02/2012	105.58	106.57
08/02/2012	105.56	106.58
09/02/2012	105.54	106.58
10/02/2012	105.51	106.59
11/02/2012	105.49	106.59
12/02/2012	105.47	106.59
13/02/2012	105.45	106.60
14/02/2012	105.43	106.60
15/02/2012	105.42	106.61
16/02/2012	105.40	106.61
17/02/2012	105.38	106.61
18/02/2012	105.37	106.62
19/02/2012	105.36	106.61
20/02/2012	105.35	106.61
21/02/2012	105.35	106.61
22/02/2012	105.34	106.62
23/02/2012	105.34	106.62
24/02/2012	105.33	106.62
25/02/2012	105.33	106.63
26/02/2012	105.32	106.63
27/02/2012	105.31	106.63
28/02/2012	105.31	106.63
29/02/2012	105.31	106.64
01/03/2012	105.31	106.64
02/03/2012	105.31	106.64
03/03/2012	105.31	106.64
04/03/2012	105.31	106.64
05/03/2012	105.30	106.63
06/03/2012	105.29	106.63
07/03/2012	105.28	106.63
08/03/2012	105.28	106.62
09/03/2012	105.27	106.62
10/03/2012	105.27	106.63
11/03/2012	105.27	106.64
12/03/2012	105.27	106.64
13/03/2012	105.27	106.64
14/03/2012	105.27	106.64
15/03/2012	105.26	106.65
16/03/2012	105.26	106.65
17/03/2012	105.24	106.65
18/03/2012	105.23	106.64
19/03/2012	105.22	106.63
20/03/2012	105.21	106.63
21/03/2012	105.21	106.64
22/03/2012	105.21	106.65
23/03/2012	105.22	106.65
24/03/2012	105.22	106.65

Date	Pu 12	Oussy
25/03/2012	105.22	106.64
26/03/2012	105.22	106.64
27/03/2012	105.21	106.64
28/03/2012	105.21	106.64
29/03/2012	105.20	106.65
30/03/2012	105.19	106.65
31/03/2012	105.18	106.65
01/04/2012	105.17	106.64
02/04/2012	105.17	106.65
03/04/2012	105.16	106.65
04/04/2012	105.15	106.64
05/04/2012	105.14	106.63
06/04/2012	105.13	106.62
07/04/2012	105.12	106.62
08/04/2012	105.11	106.60
09/04/2012	105.10	106.61
10/04/2012	105.10	106.61
11/04/2012	105.09	106.60
12/04/2012	105.08	106.59
13/04/2012	105.08	106.59
14/04/2012	105.07	106.58
15/04/2012	105.07	106.57
16/04/2012	105.07	106.56
17/04/2012	105.08	106.57
18/04/2012	105.09	106.58
19/04/2012	105.10	106.57
20/04/2012	105.12	106.56
21/04/2012	105.15	106.55
22/04/2012	105.17	106.55
23/04/2012	105.19	106.56
24/04/2012	105.22	106.56
25/04/2012	105.23	106.56
26/04/2012	105.25	106.56
27/04/2012	105.27	106.56
28/04/2012	105.30	106.58
29/04/2012	105.34	106.58
30/04/2012	105.39	106.58
01/05/2012	105.43	106.59
02/05/2012	105.46	106.59
03/05/2012	105.49	106.60
04/05/2012	105.52	106.61
05/05/2012	105.54	106.61
06/05/2012	105.56	106.61
07/05/2012	105.57	106.62
08/05/2012	105.59	106.62
09/05/2012	105.60	106.63
10/05/2012	105.62	106.64
11/05/2012	105.62	106.64
12/05/2012	105.61	106.64
13/05/2012	105.60	106.64
14/05/2012	105.60	106.65
15/05/2012	105.58	106.65
16/05/2012	105.56	106.65
17/05/2012	105.55	106.66

Date	Pu 12	Oussy
18/05/2012	105.53	106.66
19/05/2012	105.51	106.67
20/05/2012	105.49	106.67
21/05/2012	105.47	106.67
22/05/2012	105.45	106.67
23/05/2012	105.43	106.67
24/05/2012	105.44	106.68
25/05/2012	105.49	106.69
26/05/2012	105.56	106.69
27/05/2012	105.65	106.68
28/05/2012	105.73	106.68
29/05/2012	105.79	106.69
30/05/2012	105.81	106.68
31/05/2012	105.82	106.67
01/06/2012	105.82	106.67
02/06/2012	105.83	106.67
03/06/2012	105.81	106.67
04/06/2012	105.78	106.66
05/06/2012	105.75	106.66
06/06/2012	105.73	106.68
07/06/2012	105.72	106.68
08/06/2012	105.70	106.67
09/06/2012	105.67	106.67
10/06/2012	105.66	106.68
11/06/2012	105.64	106.68
12/06/2012	105.63	106.68
13/06/2012	105.62	106.67
14/06/2012	105.62	106.68
15/06/2012	105.63	106.68
16/06/2012	105.63	106.68
17/06/2012	105.63	106.68
18/06/2012	105.62	106.69
19/06/2012	105.61	106.69
20/06/2012	105.60	106.70
21/06/2012	105.59	106.71
22/06/2012	105.56	106.71
23/06/2012	105.54	106.71
24/06/2012	105.52	106.72
25/06/2012	105.50	106.73
26/06/2012	105.48	106.73
27/06/2012	105.47	106.74
28/06/2012	105.46	106.75
29/06/2012	105.43	106.75
30/06/2012	105.40	106.75
01/07/2012	105.38	106.75
02/07/2012	105.36	106.75
03/07/2012	105.35	106.76
04/07/2012	105.34	106.76
05/07/2012	105.32	106.76
06/07/2012	105.32	106.75
07/07/2012	105.32	106.75
08/07/2012	105.32	106.75
09/07/2012	105.32	106.75
10/07/2012	105.33	106.75

Date	Pu 12	Oussy
11/07/2012	105.34	106.74
12/07/2012	105.33	106.74
13/07/2012	105.33	106.75
14/07/2012	105.32	106.75
15/07/2012	105.30	106.75
16/07/2012	105.29	106.74
17/07/2012	105.28	106.75
18/07/2012	105.28	106.76
19/07/2012	105.26	106.76
20/07/2012	105.25	106.76
21/07/2012	105.23	106.76
22/07/2012	105.22	106.75
23/07/2012	105.20	106.76
24/07/2012	105.19	106.77
25/07/2012	105.18	106.77
26/07/2012	105.17	106.76
27/07/2012	105.15	106.75
28/07/2012	105.13	106.74
29/07/2012	105.11	106.72
30/07/2012	105.09	106.71
31/07/2012	105.08	106.71
01/08/2012	105.07	106.70
02/08/2012	105.06	106.69
03/08/2012	105.04	106.69
04/08/2012	105.04	106.68
05/08/2012	105.02	106.68
06/08/2012	105.01	106.66
07/08/2012	105.00	106.65
08/08/2012	104.98	106.65
09/08/2012	104.97	106.64
10/08/2012	104.97	106.64
11/08/2012	104.96	106.63
12/08/2012	104.96	106.62
13/08/2012	104.95	106.62
14/08/2012	104.94	106.61
15/08/2012	104.93	106.60
16/08/2012	104.92	106.59
17/08/2012	104.91	106.59
18/08/2012	104.90	106.59
19/08/2012	104.89	106.58
20/08/2012	104.88	106.56
21/08/2012	104.87	106.56
22/08/2012	104.85	106.54
23/08/2012	104.84	106.54
24/08/2012	104.83	106.53
25/08/2012	104.82	106.52
26/08/2012	104.81	106.51
27/08/2012	104.81	106.51
28/08/2012	104.80	106.50
29/08/2012	104.80	106.49
30/08/2012	104.80	106.48
31/08/2012	104.79	106.47
01/09/2012	104.78	106.46
02/09/2012	104.77	106.45

Date	Pu 12	Oussy
03/09/2012	104.77	106.44
04/09/2012	104.77	106.44
05/09/2012	104.78	106.43
06/09/2012	104.77	106.42
07/09/2012	104.77	106.42
08/09/2012	104.78	106.41
09/09/2012	104.77	106.41
10/09/2012	104.77	106.41
11/09/2012	104.77	106.40
12/09/2012	104.76	106.39
13/09/2012	104.75	106.39
14/09/2012	104.75	106.38
15/09/2012	104.77	106.38
16/09/2012	104.79	106.38
17/09/2012	104.80	106.37
18/09/2012	104.81	106.37
19/09/2012	104.81	106.36
20/09/2012	104.80	106.36
21/09/2012	104.80	106.36
22/09/2012	104.79	106.35
23/09/2012	104.78	106.36
24/09/2012	104.79	106.36
25/09/2012	104.78	106.35
26/09/2012	104.77	106.35
27/09/2012	104.77	106.34
28/09/2012	104.76	106.34
29/09/2012	104.76	106.33
30/09/2012	104.76	106.33
01/10/2012	104.76	106.33
02/10/2012	104.77	106.33
03/10/2012	104.77	106.33
04/10/2012	104.77	106.33
05/10/2012	104.76	106.32
06/10/2012	104.76	106.32
07/10/2012	104.75	106.32
08/10/2012	104.75	106.32
09/10/2012	104.75	106.32
10/10/2012	104.75	106.32
11/10/2012	104.75	106.32
12/10/2012	104.75	106.31
13/10/2012	104.75	106.31
14/10/2012	104.76	106.31
15/10/2012	104.77	106.31
16/10/2012	104.79	106.33
17/10/2012	104.81	106.33
18/10/2012	104.82	106.34
19/10/2012	104.83	106.34
20/10/2012	104.83	106.35
21/10/2012	104.83	106.35
22/10/2012	104.83	106.35
23/10/2012	104.82	106.35
24/10/2012	104.81	106.36
25/10/2012	104.80	106.36
26/10/2012	104.80	106.36

Date	Pu 12	Oussy
27/10/2012	104.79	106.35
28/10/2012	104.78	106.35
29/10/2012	104.77	106.35
30/10/2012	104.77	106.36
31/10/2012	104.78	106.36
01/11/2012	104.80	106.36
02/11/2012	104.80	106.36
03/11/2012	104.81	106.36
04/11/2012	104.81	106.37
05/11/2012	104.82	106.37
06/11/2012	104.82	106.37
07/11/2012	104.82	106.38
08/11/2012	104.83	106.39
09/11/2012	104.84	106.40
10/11/2012	104.85	106.41
11/11/2012	104.87	106.40
12/11/2012	104.87	106.41
13/11/2012	104.88	106.41
14/11/2012	104.89	106.42
15/11/2012	104.91	106.42
16/11/2012	104.92	106.42
17/11/2012	104.94	106.43
18/11/2012	104.95	106.43
19/11/2012	104.95	106.43
20/11/2012	104.95	106.44
21/11/2012	104.95	106.44
22/11/2012	104.94	106.44
23/11/2012	104.93	106.44
24/11/2012	104.93	106.44
25/11/2012	104.92	106.45
26/11/2012	104.92	106.45
27/11/2012	104.91	106.45
28/11/2012	104.91	106.45
29/11/2012	104.90	106.45
30/11/2012	104.90	106.44
01/12/2012	104.92	106.43
02/12/2012	104.95	106.43
03/12/2012	104.97	106.44
04/12/2012	105.00	106.44
05/12/2012	105.01	106.44
06/12/2012	105.03	106.44
07/12/2012	105.06	106.45
08/12/2012	105.10	106.43
09/12/2012	105.15	106.44
10/12/2012	105.20	106.43
11/12/2012	105.24	106.41
12/12/2012	105.26	106.42
13/12/2012	105.28	106.42
14/12/2012	105.30	106.43
15/12/2012	105.30	106.44
16/12/2012	105.29	106.44
17/12/2012	105.31	106.45
18/12/2012	105.33	106.46
19/12/2012	105.37	106.47

Date	Pu 12	Oussy
20/12/2012	105.42	106.50
21/12/2012	105.48	106.50
22/12/2012	105.53	106.52
23/12/2012	105.58	106.55
24/12/2012	105.63	106.58
25/12/2012	105.68	106.60
26/12/2012	105.73	106.61
27/12/2012	105.77	106.64
28/12/2012	105.79	106.66
29/12/2012	105.83	106.71
30/12/2012	105.85	106.72
31/12/2012	105.88	106.76
01/01/2013	105.90	106.78
02/01/2013	105.89	106.78
03/01/2013	105.88	106.79
04/01/2013	105.87	106.80
05/01/2013	105.87	106.82
06/01/2013	105.87	106.84
07/01/2013	105.87	106.86
08/01/2013	105.86	106.87
09/01/2013	105.84	106.88
10/01/2013	105.83	106.90
11/01/2013	105.81	106.91
12/01/2013	105.81	106.93
13/01/2013	105.82	106.95
14/01/2013	105.85	106.97
15/01/2013	105.88	106.99
16/01/2013	105.90	107.00
17/01/2013	105.89	107.00
18/01/2013	105.90	107.03
19/01/2013	105.90	107.05
20/01/2013	105.88	107.04
21/01/2013	105.87	107.04
22/01/2013	105.88	107.04
23/01/2013	105.92	107.05
24/01/2013	105.96	107.06
25/01/2013	106.00	107.08
26/01/2013	106.02	107.10
27/01/2013	106.02	107.12
28/01/2013	106.01	107.12
29/01/2013	106.00	107.14
30/01/2013	105.99	107.15
31/01/2013	105.99	107.16
01/02/2013	106.02	107.23
02/02/2013	106.04	107.32
03/02/2013	106.06	107.32
04/02/2013	106.12	107.38
05/02/2013	106.20	107.44
06/02/2013	106.27	107.46
07/02/2013	106.30	107.43
08/02/2013	106.34	107.45
09/02/2013	106.38	107.46
10/02/2013	106.44	107.53
11/02/2013	106.47	107.54

Date	Pu 12	Oussy
12/02/2013	106.46	107.49
13/02/2013	106.46	107.48
14/02/2013	106.48	107.53
15/02/2013	106.49	107.52
16/02/2013	106.48	107.52
17/02/2013	106.48	107.54
18/02/2013	106.47	107.54
19/02/2013	106.46	107.54
20/02/2013	106.45	107.53
21/02/2013	106.42	107.53
22/02/2013	106.40	107.54
23/02/2013	106.37	107.51
24/02/2013	106.34	107.49
25/02/2013	106.32	107.47
26/02/2013	106.29	107.45
27/02/2013	106.26	107.45
28/02/2013	106.23	107.46
01/03/2013	106.20	107.45
02/03/2013	106.18	107.45
03/03/2013	106.15	107.46
04/03/2013	106.14	107.48
05/03/2013	106.12	107.49
06/03/2013	106.10	107.49
07/03/2013	106.08	107.48
08/03/2013	106.05	107.46
09/03/2013	106.03	107.44
10/03/2013	106.02	107.44
11/03/2013	106.03	107.44
12/03/2013	106.04	107.44
13/03/2013	106.03	107.43
14/03/2013	106.04	107.44
15/03/2013	106.04	107.46
16/03/2013	106.06	107.51
17/03/2013	106.06	107.54
18/03/2013	106.05	107.54
19/03/2013	106.03	107.50
20/03/2013	106.04	107.48
21/03/2013	106.05	107.47
22/03/2013	106.09	107.53
23/03/2013	106.11	107.53
24/03/2013	106.12	107.54
25/03/2013	106.11	107.52
26/03/2013	106.09	107.52
27/03/2013	106.08	107.52
28/03/2013	106.06	107.50
29/03/2013	106.05	107.50
30/03/2013	106.04	107.50
31/03/2013	106.02	107.47
01/04/2013	106.02	107.50
02/04/2013	106.01	107.47
03/04/2013	106.01	107.45
04/04/2013	106.03	107.46
05/04/2013	106.02	107.44
06/04/2013	106.00	107.40

Date	Pu 12	Oussy
07/04/2013	106.01	107.41
08/04/2013	106.03	107.45
09/04/2013	106.02	107.45
10/04/2013	106.01	107.45
11/04/2013	106.02	107.57
12/04/2013	106.04	107.72
13/04/2013	106.06	107.73
14/04/2013	106.12	107.78
15/04/2013	106.16	107.77
16/04/2013	106.21	107.75
17/04/2013	106.25	107.76
18/04/2013	106.26	107.73
19/04/2013	106.25	107.68
20/04/2013	106.24	107.68
21/04/2013	106.23	107.69
22/04/2013	106.20	107.67
23/04/2013	106.17	107.64
24/04/2013	106.16	107.63
25/04/2013	106.14	107.63
26/04/2013	106.13	107.65
27/04/2013	106.10	107.62
28/04/2013	106.08	107.58
29/04/2013	106.07	107.57
30/04/2013	106.08	107.56
01/05/2013	106.12	107.55
02/05/2013	106.16	107.57
03/05/2013	106.22	107.58
04/05/2013	106.30	107.57
05/05/2013	106.42	107.48
06/05/2013	106.55	107.60
07/05/2013	106.69	107.61
08/05/2013	106.81	107.62
09/05/2013	106.87	107.60
10/05/2013	106.85	107.58
11/05/2013	106.83	107.59
12/05/2013	106.80	107.58
13/05/2013	106.77	107.58
14/05/2013	106.75	107.62
15/05/2013	106.72	107.63
16/05/2013	106.68	107.62
17/05/2013	106.64	107.59
18/05/2013	106.60	107.57
19/05/2013	106.58	107.54
20/05/2013	106.58	107.54
21/05/2013	106.60	107.54
22/05/2013	106.63	107.55
23/05/2013	106.70	107.58
24/05/2013	106.76	107.58
25/05/2013	106.81	107.56
26/05/2013	106.84	107.56
27/05/2013	106.86	107.60
28/05/2013	106.87	107.62
29/05/2013	106.84	107.59
30/05/2013	106.81	107.58

Date	Pu 12	Oussy
31/05/2013	106.78	107.57
01/06/2013	106.76	107.58
02/06/2013	106.73	107.57
03/06/2013	106.72	107.58
04/06/2013	106.72	107.61
05/06/2013	106.72	107.62
06/06/2013	106.71	107.61
07/06/2013	106.68	107.59
08/06/2013	106.65	107.61
09/06/2013	106.63	107.66
10/06/2013	106.59	107.68
11/06/2013	106.55	107.69
12/06/2013	106.51	107.69
13/06/2013	106.48	107.69
14/06/2013	106.44	107.70
15/06/2013	106.42	107.72
16/06/2013	106.39	107.73
17/06/2013	106.37	107.73
18/06/2013	106.34	107.69
19/06/2013	106.31	107.68
20/06/2013	106.28	107.66
21/06/2013	106.24	107.64
22/06/2013	106.21	107.63
23/06/2013	106.17	107.61
24/06/2013	106.13	107.59
25/06/2013	106.10	107.57
26/06/2013	106.06	107.55
27/06/2013	106.04	107.55
28/06/2013	106.01	107.55
29/06/2013	105.98	107.54
30/06/2013	105.96	107.53
01/07/2013	105.94	107.54
02/07/2013	105.92	107.53
03/07/2013	105.89	107.51
04/07/2013	105.86	107.48
05/07/2013	105.84	107.46
06/07/2013	105.82	107.45
07/07/2013	105.81	107.44
08/07/2013	105.80	107.43
09/07/2013	105.77	107.42
10/07/2013	105.76	107.40
11/07/2013	105.73	107.36
12/07/2013	105.71	107.34
13/07/2013	105.68	107.32
14/07/2013	105.66	107.31
15/07/2013	105.64	107.30
16/07/2013	105.62	107.18
17/07/2013	105.60	106.85
18/07/2013	105.58	106.87
19/07/2013	105.56	106.96
20/07/2013	105.54	107.13
21/07/2013	105.52	107.13
22/07/2013	105.50	107.11
23/07/2013	105.48	107.02

Date	Pu 12	Oussy
24/07/2013	105.46	106.81
25/07/2013	105.44	106.64
26/07/2013	105.42	107.00
27/07/2013	105.41	107.01
28/07/2013	105.39	107.00
29/07/2013	105.37	106.99
30/07/2013	105.36	107.00
31/07/2013	105.36	107.01
01/08/2013	105.39	106.95
02/08/2013	105.42	106.87
03/08/2013	105.43	106.92
04/08/2013	105.42	106.82
05/08/2013	105.42	106.99
06/08/2013	105.39	106.75
07/08/2013	105.38	106.95
08/08/2013	105.36	106.94
09/08/2013	105.34	106.94
10/08/2013	105.34	106.94
11/08/2013	105.36	106.93
12/08/2013	105.40	106.94
13/08/2013	105.43	106.92
14/08/2013	105.45	106.83
15/08/2013	105.46	106.67
16/08/2013	105.46	106.65
17/08/2013	105.44	106.73
18/08/2013	105.42	106.86
19/08/2013	105.40	106.86
20/08/2013	105.37	106.84
21/08/2013	105.35	106.83
22/08/2013	105.34	106.83
23/08/2013	105.32	106.82
24/08/2013	105.30	106.81
25/08/2013	105.27	106.80
26/08/2013	105.25	106.71
27/08/2013	105.24	106.62
28/08/2013	105.22	106.57
29/08/2013	105.20	106.68
30/08/2013	105.18	106.61
31/08/2013	105.17	106.75
01/09/2013	105.16	106.75
02/09/2013	105.14	106.75
03/09/2013	105.14	106.75
04/09/2013	105.13	106.76
05/09/2013	105.13	106.76
06/09/2013	105.11	106.75
07/09/2013	105.09	106.74
08/09/2013	105.08	106.73
09/09/2013	105.07	106.73
10/09/2013	105.06	106.72
11/09/2013	105.06	106.72
12/09/2013	105.07	106.74
13/09/2013	105.07	106.79
14/09/2013	105.09	106.80
15/09/2013	105.10	106.80

Date	Pu 12	Oussy
16/09/2013	105.12	106.80
17/09/2013	105.12	106.79
18/09/2013	105.12	106.78
19/09/2013	105.11	106.77
20/09/2013	105.11	106.77
21/09/2013	105.10	106.76
22/09/2013	105.10	106.76
23/09/2013	105.11	106.76
24/09/2013	105.11	106.77
25/09/2013	105.10	106.77
26/09/2013	105.10	106.77
27/09/2013	105.09	106.76
28/09/2013	105.08	106.77
29/09/2013	105.07	106.76
30/09/2013	105.06	106.75
01/10/2013	105.05	106.75
02/10/2013	105.04	106.75
03/10/2013	105.03	106.75
04/10/2013	105.03	106.74
05/10/2013	105.01	106.73
06/10/2013	105.00	106.73
07/10/2013	105.00	106.72
08/10/2013	105.00	106.72
09/10/2013	105.01	106.72
10/10/2013	105.02	106.72
11/10/2013	105.02	106.71
12/10/2013	105.02	106.70
13/10/2013	105.01	106.70
14/10/2013	105.01	106.70
15/10/2013	105.01	106.71
16/10/2013	105.02	106.71
17/10/2013	105.02	106.71
18/10/2013	105.03	106.72
19/10/2013	105.04	106.73
20/10/2013	105.05	106.73
21/10/2013	105.06	106.73
22/10/2013	105.08	106.75
23/10/2013	105.09	106.74
24/10/2013	105.09	106.73
25/10/2013	105.10	106.74
26/10/2013	105.10	106.74
27/10/2013	105.10	106.75
28/10/2013	105.11	106.77
29/10/2013	105.11	106.76
30/10/2013	105.11	106.77
31/10/2013	105.12	106.78
01/11/2013	105.13	106.80
02/11/2013	105.14	106.81
03/11/2013	105.14	106.82
04/11/2013	105.15	106.84
05/11/2013	105.15	106.85
06/11/2013	105.16	106.87
07/11/2013	105.18	106.89
08/11/2013	105.21	106.91

Date	Pu 12	Oussy
09/11/2013	105.25	106.93
10/11/2013	105.30	106.97
11/11/2013	105.34	106.99
12/11/2013	105.40	107.04
13/11/2013	105.46	107.06
14/11/2013	105.52	107.07
15/11/2013	105.57	107.09
16/11/2013	105.61	107.09
17/11/2013	105.63	107.11
18/11/2013	105.65	107.12
19/11/2013	105.66	107.12
20/11/2013	105.67	107.12
21/11/2013	105.67	107.13
22/11/2013	105.66	107.11
23/11/2013	105.68	107.11
24/11/2013	105.72	107.11
25/11/2013	105.75	107.10
26/11/2013	105.79	107.11
27/11/2013	105.82	107.12
28/11/2013	105.83	107.11
29/11/2013	105.85	107.13
30/11/2013	105.85	107.14
01/12/2013	105.84	107.12
02/12/2013	105.83	107.13
03/12/2013	105.81	107.12
04/12/2013	105.79	107.11
05/12/2013	105.78	107.12
06/12/2013	105.77	107.12
07/12/2013	105.75	107.11
08/12/2013	105.73	107.11
09/12/2013	105.71	107.11
10/12/2013	105.69	107.10
11/12/2013	105.67	107.10
12/12/2013	105.65	107.10
13/12/2013	105.63	107.11
14/12/2013	105.61	107.09
15/12/2013	105.60	107.10
16/12/2013	105.58	107.10
17/12/2013	105.56	107.10
18/12/2013	105.55	107.11
19/12/2013	105.54	107.11
20/12/2013	105.50	107.07
21/12/2013	105.48	107.07
22/12/2013	105.48	107.08
23/12/2013	105.48	107.09
24/12/2013	105.50	107.12
25/12/2013	105.50	107.13
26/12/2013	105.50	107.13
27/12/2013	105.52	107.16
28/12/2013	105.55	107.22
29/12/2013	105.57	107.24
30/12/2013	105.60	107.28
31/12/2013	105.65	107.34
01/01/2014	105.70	107.38

Date	Pu 12	Oussy
02/01/2014	105.74	107.40
03/01/2014	105.78	107.41
04/01/2014	105.81	107.45
05/01/2014	105.82	107.41
06/01/2014	105.86	107.44
07/01/2014	105.89	107.43
08/01/2014	105.92	107.43
09/01/2014	105.95	107.45
10/01/2014	105.97	107.44
11/01/2014	105.97	107.44
12/01/2014	105.98	107.45
13/01/2014	105.98	107.47
14/01/2014	105.97	107.46
15/01/2014	105.95	107.45
16/01/2014	105.95	107.48
17/01/2014	105.94	107.47
18/01/2014	105.94	107.49
19/01/2014	105.93	107.47
20/01/2014	105.91	107.42
21/01/2014	105.89	107.41
22/01/2014	105.92	107.43
23/01/2014	105.97	107.41
24/01/2014	106.06	107.42
25/01/2014	106.14	107.41
26/01/2014	106.21	107.45
27/01/2014	106.26	107.49
28/01/2014	106.29	107.51
29/01/2014	106.32	107.52
30/01/2014	106.33	107.49
31/01/2014	106.35	107.50
01/02/2014	106.37	107.53
02/02/2014	106.35	107.50
03/02/2014	106.35	107.56
04/02/2014	106.36	107.57
05/02/2014	106.38	107.60
06/02/2014	106.37	107.59
07/02/2014	106.37	107.58
08/02/2014	106.38	107.61
09/02/2014	106.36	107.58
10/02/2014	106.36	107.60
11/02/2014	106.34	107.55
12/02/2014	106.35	107.55
13/02/2014	106.39	107.64
14/02/2014	106.42	107.72
15/02/2014	106.46	107.77
16/02/2014	106.47	107.76
17/02/2014	106.49	107.79
18/02/2014	106.51	107.79
19/02/2014	106.53	107.77
20/02/2014	106.55	107.80
21/02/2014	106.54	107.78
22/02/2014	106.52	107.76
23/02/2014	106.52	107.84
24/02/2014	106.53	107.93

Date	Pu 12	Oussy
25/02/2014	106.52	107.95
26/02/2014	106.48	107.88
27/02/2014	106.46	107.89
28/02/2014	106.48	108.01
01/03/2014	106.47	108.05
02/03/2014	106.47	108.08
03/03/2014	106.51	108.14
04/03/2014	106.51	108.01
05/03/2014	106.49	107.93
06/03/2014	106.48	107.91
07/03/2014	106.48	107.93
08/03/2014	106.47	107.92
09/03/2014	106.46	107.92
10/03/2014	106.44	107.91
11/03/2014	106.41	107.88
12/03/2014	106.38	107.85
13/03/2014	106.35	107.83
14/03/2014	106.32	107.82
15/03/2014	106.28	107.80
16/03/2014	106.26	107.80
17/03/2014	106.22	107.79
18/03/2014	106.19	107.77
19/03/2014	106.17	107.75
20/03/2014	106.15	107.79
21/03/2014	106.12	107.77
22/03/2014	106.09	107.76
23/03/2014	106.06	107.71
24/03/2014	106.04	107.69
25/03/2014	106.02	107.70
26/03/2014	106.01	107.66
27/03/2014	105.99	107.66
28/03/2014	105.98	107.64
29/03/2014	105.97	107.64
30/03/2014	105.95	107.62
31/03/2014	105.94	107.61
01/04/2014	105.93	107.62
02/04/2014	105.91	107.63
03/04/2014	105.89	107.61
04/04/2014	105.86	107.57
05/04/2014	105.83	107.55
06/04/2014	105.82	107.54
07/04/2014	105.81	107.56
08/04/2014	105.78	107.51
09/04/2014	105.76	107.50
10/04/2014	105.75	107.52
11/04/2014	105.73	107.51
12/04/2014	105.71	107.49
13/04/2014	105.69	107.47
14/04/2014	105.67	107.46
15/04/2014	105.65	107.44
16/04/2014	105.63	107.41
17/04/2014	105.62	107.39
18/04/2014	105.60	107.37
19/04/2014	105.58	107.36

Date	Pu 12	Oussy
20/04/2014	105.57	107.35
21/04/2014	105.55	107.35
22/04/2014	105.53	107.33
23/04/2014	105.51	107.32
24/04/2014	105.50	107.33
25/04/2014	105.48	107.32
26/04/2014	105.46	107.30
27/04/2014	105.44	107.30
28/04/2014	105.43	107.29
29/04/2014	105.42	107.28
30/04/2014	105.42	107.32
01/05/2014	105.42	107.36
02/05/2014	105.42	107.38
03/05/2014	105.41	107.39
04/05/2014	105.42	107.41
05/05/2014	105.43	107.44
06/05/2014	105.44	107.45
07/05/2014	105.44	107.43
08/05/2014	105.43	107.42
09/05/2014	105.43	107.42
10/05/2014	105.43	107.42
11/05/2014	105.42	107.41
12/05/2014	105.41	107.39
13/05/2014	105.40	107.37
14/05/2014	105.39	107.35
15/05/2014	105.38	107.34
16/05/2014	105.38	107.35
17/05/2014	105.37	107.36
18/05/2014	105.37	107.37
19/05/2014	105.36	107.38
20/05/2014	105.35	107.34
21/05/2014	105.35	107.35
22/05/2014	105.33	107.34
23/05/2014	105.32	107.34
24/05/2014	105.31	107.32
25/05/2014	105.30	107.32
26/05/2014	105.29	107.35
27/05/2014	105.30	107.39
28/05/2014	105.30	107.42
29/05/2014	105.30	107.43
30/05/2014	105.30	107.44
31/05/2014	105.31	107.44
01/06/2014	105.32	107.43
02/06/2014	105.33	107.43
03/06/2014	105.33	107.43
04/06/2014	105.32	107.43
05/06/2014	105.30	107.40
06/06/2014	105.31	107.41
07/06/2014	105.30	107.40
08/06/2014	105.29	107.38
09/06/2014	105.29	107.38
10/06/2014	105.27	107.36
11/06/2014	105.26	107.35
12/06/2014	105.25	107.34

Date	Pu 12	Oussy
13/06/2014	105.24	107.34
14/06/2014	105.23	107.33
15/06/2014	105.21	107.32
16/06/2014	105.20	107.31
17/06/2014	105.19	107.29
18/06/2014	105.18	107.29
19/06/2014	105.17	107.28
20/06/2014	105.16	107.26
21/06/2014	105.15	107.25
22/06/2014	105.15	107.23
23/06/2014	105.13	107.21
24/06/2014	105.12	107.20
25/06/2014	105.11	107.19
26/06/2014	105.10	107.17
27/06/2014	105.09	107.15
28/06/2014	105.08	107.14
29/06/2014	105.06	107.12
30/06/2014	105.06	107.11
01/07/2014	105.05	107.11
02/07/2014	105.05	107.11
03/07/2014	105.05	107.11
04/07/2014	105.04	107.11
05/07/2014	105.03	107.10
06/07/2014	105.03	107.09
07/07/2014	105.02	107.08
08/07/2014	105.03	107.07
09/07/2014	105.02	107.06
10/07/2014	105.03	107.06
11/07/2014	105.04	107.06
12/07/2014	105.07	107.07
13/07/2014	105.10	107.07
14/07/2014	105.13	107.06
15/07/2014	105.18	107.06
16/07/2014	105.22	107.07
17/07/2014	105.25	107.08
18/07/2014	105.28	107.09
19/07/2014	105.29	107.09
20/07/2014	105.28	107.07
21/07/2014	105.27	107.06
22/07/2014	105.26	107.05
23/07/2014	105.26	107.06
24/07/2014	105.27	107.06
25/07/2014	105.28	107.05
26/07/2014	105.29	107.04
27/07/2014	105.30	107.03
28/07/2014	105.30	107.03
29/07/2014	105.30	107.03
30/07/2014	105.31	107.03
31/07/2014	105.32	107.03
01/08/2014	105.33	107.04
02/08/2014	105.33	107.03
03/08/2014	105.34	107.02
04/08/2014	105.36	107.02
05/08/2014	105.37	107.01

Date	Pu 12	Oussy
06/08/2014	105.39	107.00
07/08/2014	105.40	106.99
08/08/2014	105.42	106.99
09/08/2014	105.42	106.98
10/08/2014	105.43	106.98
11/08/2014	105.40	106.97
12/08/2014	105.40	106.97
13/08/2014	105.41	106.98
14/08/2014	105.43	107.00
15/08/2014	105.44	107.01
16/08/2014	105.44	107.03
17/08/2014	105.45	107.05
18/08/2014	105.45	107.06
19/08/2014	105.44	107.06
20/08/2014	105.43	107.06
21/08/2014	105.41	107.06
22/08/2014	105.41	107.06
23/08/2014	105.39	107.06
24/08/2014	105.37	107.05
25/08/2014	105.36	107.06
26/08/2014	105.35	107.06
27/08/2014	105.34	107.05
28/08/2014	105.32	107.05
29/08/2014	105.30	107.04
30/08/2014	105.29	107.03
31/08/2014	105.28	107.03
01/09/2014	105.26	107.02
02/09/2014	105.25	107.01
03/09/2014	105.24	107.01
04/09/2014	105.23	107.00
05/09/2014	105.22	107.00
06/09/2014	105.21	107.00
07/09/2014	105.19	107.00
08/09/2014	105.18	106.99
09/09/2014	105.16	106.98
10/09/2014	105.14	106.97
11/09/2014	105.13	106.96
12/09/2014	105.12	106.95
13/09/2014	105.12	106.95
14/09/2014	105.14	106.95
15/09/2014	105.16	106.95
16/09/2014	105.16	106.95
17/09/2014	105.15	106.94
18/09/2014	105.14	106.94
19/09/2014	105.12	106.93
20/09/2014	105.11	106.92
21/09/2014	105.10	106.92
22/09/2014	105.08	106.90
23/09/2014	105.10	106.90
24/09/2014	105.11	106.89
25/09/2014	105.12	106.88
26/09/2014	105.12	106.88
27/09/2014	105.12	106.88
28/09/2014	105.12	106.88

Date	Pu 12	Oussy
29/09/2014	105.10	106.88
30/09/2014	105.09	106.87
01/10/2014	105.08	106.86
02/10/2014	105.07	106.86
03/10/2014	105.06	106.86
04/10/2014	105.06	106.86
05/10/2014	105.04	106.85
06/10/2014	105.03	106.84
07/10/2014	105.02	106.84
08/10/2014	105.03	106.85
09/10/2014	105.03	106.84
10/10/2014	105.02	106.83
11/10/2014	105.03	106.83
12/10/2014	105.03	106.83
13/10/2014	105.04	106.83
14/10/2014	105.05	106.82
15/10/2014	105.07	106.82
16/10/2014	105.10	106.83
17/10/2014	105.14	106.82
18/10/2014	105.19	106.83
19/10/2014	105.22	106.82
20/10/2014	105.25	106.82
21/10/2014	105.27	106.82
22/10/2014	105.26	106.80
23/10/2014	105.25	106.80
24/10/2014	105.24	106.81
25/10/2014	105.24	106.81
26/10/2014	105.23	106.81
27/10/2014	105.22	106.80
28/10/2014	105.21	106.80
29/10/2014	105.20	106.80
30/10/2014	105.20	106.80
31/10/2014	105.19	106.80
01/11/2014	105.18	106.80
02/11/2014	105.18	106.81
03/11/2014	105.17	106.82
04/11/2014	105.15	106.81
05/11/2014	105.13	106.78
06/11/2014	105.12	106.78
07/11/2014	105.14	106.79
08/11/2014	105.19	106.79
09/11/2014	105.26	106.79
10/11/2014	105.32	106.78
11/11/2014	105.38	106.79
12/11/2014	105.42	106.79
13/11/2014	105.43	106.78
14/11/2014	105.45	106.78
15/11/2014	105.47	106.79
16/11/2014	105.48	106.80
17/11/2014	105.49	106.80
18/11/2014	105.53	106.81
19/11/2014	105.60	106.80
20/11/2014	105.68	106.81
21/11/2014	105.74	106.83

Date	Pu 12	Oussy
22/11/2014	105.79	106.85
23/11/2014	105.81	106.86
24/11/2014	105.81	106.86
25/11/2014	105.80	106.87
26/11/2014	105.80	106.88
27/11/2014	105.78	106.89
28/11/2014	105.77	106.89
29/11/2014	105.74	106.89
30/11/2014	105.71	106.89
01/12/2014	105.70	106.89
02/12/2014	105.69	106.89
03/12/2014	105.69	106.89
04/12/2014	105.69	106.90
05/12/2014	105.68	106.90
06/12/2014	105.67	106.90
07/12/2014	105.65	106.90
08/12/2014	105.64	106.90
09/12/2014	105.62	106.89
10/12/2014	105.61	106.91
11/12/2014	105.61	106.92
12/12/2014	105.60	106.93
13/12/2014	105.59	106.93
14/12/2014	105.57	106.91
15/12/2014	105.56	106.91
16/12/2014	105.56	106.92
17/12/2014	105.55	106.93
18/12/2014	105.56	106.94
19/12/2014	105.57	106.96
20/12/2014	105.59	106.96
21/12/2014	105.65	106.98
22/12/2014	105.75	107.00
23/12/2014	105.84	107.01
24/12/2014	105.90	107.02
25/12/2014	105.93	107.03
26/12/2014	105.93	107.03
27/12/2014	105.96	107.07
28/12/2014	105.93	107.04
29/12/2014	105.91	107.02
30/12/2014	105.94	107.04
31/12/2014	105.97	107.06
01/01/2015	105.97	107.06
02/01/2015	105.96	107.07
03/01/2015	105.96	107.10
04/01/2015	105.94	107.09
05/01/2015	105.91	107.09
06/01/2015	105.90	107.10
07/01/2015	105.89	107.10
08/01/2015	105.89	107.11
09/01/2015	105.89	107.12
10/01/2015	105.89	107.14
11/01/2015	105.87	107.13
12/01/2015	105.86	107.15
13/01/2015	105.86	107.18
14/01/2015	105.85	107.19

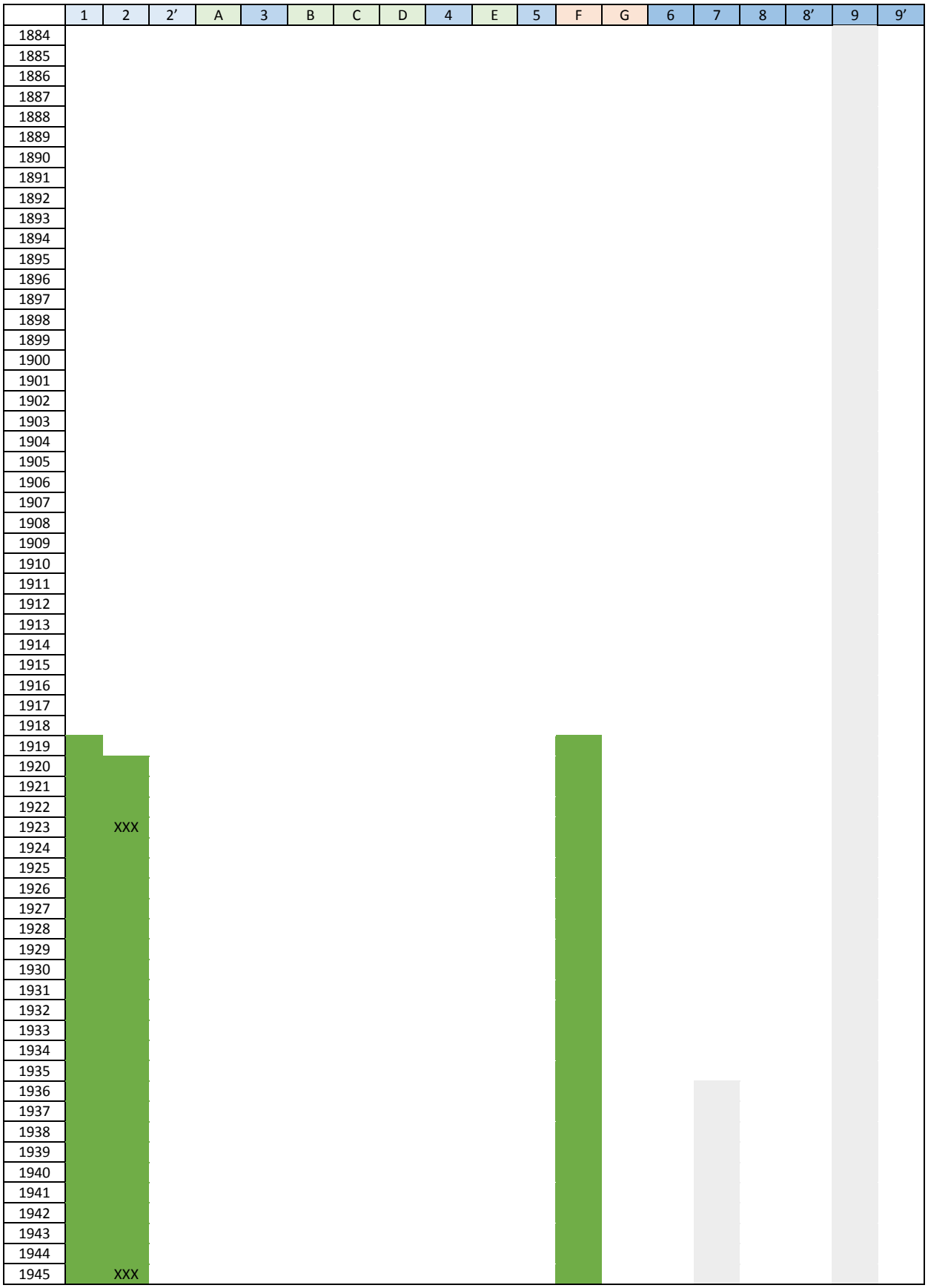
Date	Pu 12	Oussy
15/01/2015	105.86	107.22
16/01/2015	105.84	107.21
17/01/2015	105.82	107.20
18/01/2015	105.84	107.23
19/01/2015	105.84	107.23
20/01/2015	105.85	107.24
21/01/2015	105.87	107.25
22/01/2015	105.85	107.23
23/01/2015	105.83	107.22
24/01/2015	105.83	107.23
25/01/2015	105.82	107.22
26/01/2015	105.82	107.24
27/01/2015	105.82	107.25
28/01/2015	105.82	107.27
29/01/2015	105.83	107.31

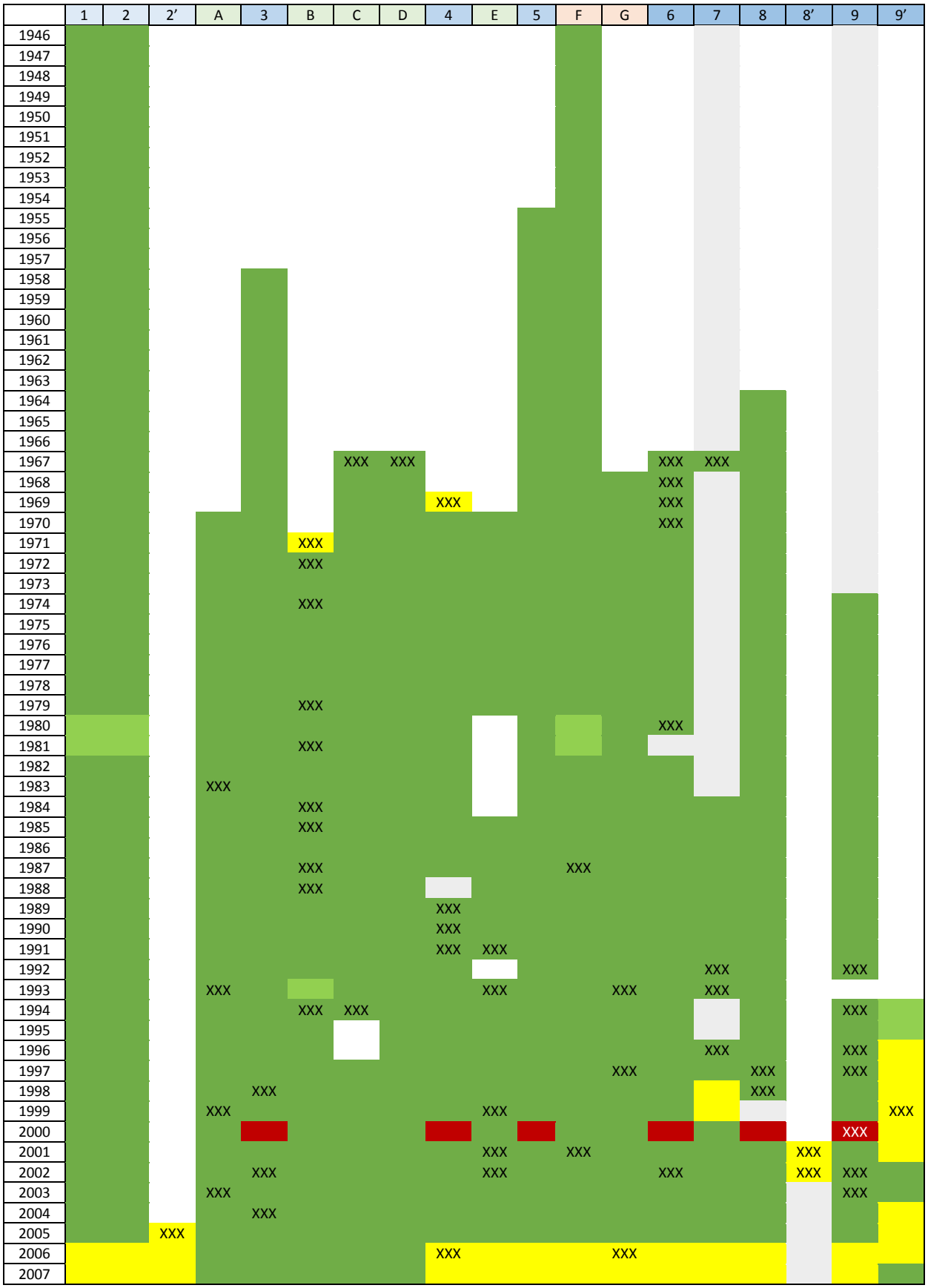
I_ Validité des débits mesurés : informations disponibles dans la Banque Hydro

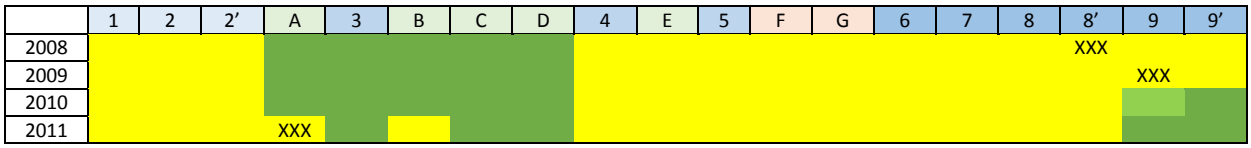
	Nom	Cours d'eau
1	Bas-en-Basset	Haute Loire
2	Villerest	Haute Loire
2'	Villerest [Pont de Villerest]	Haute Loire
A	Montceaux-l'Etoile	Arconce
3	Digoin	Loire bourbonnaise
B	Etang-sur-Arroux	Arroux
C	Rigny-sur-Arroux	Arroux
D	Vitry-en-Charolais	Bourbince
4	Gilly	Loire bourbonnaise
E	Verneuil	Aron
5	Nevers	Loire bourbonnaise
F	Vieille-Brioude	Allier
G	Moulins	Allier
6	Givry	Loire moyenne
7	Gien	Loire moyenne
8	Orléans [Pont royal]	Loire moyenne
8'	Orléans [Quai du Roi]	Loire moyenne
9	Blois	Loire moyenne
9'	Onzain	Loire moyenne

Légende	
	Données de débits absentes
	Informations sur la validité des débits absentes
	Données de débit provisoires
	Données de débit invalidées
	Données de débit validées douteuses
	Données de débit validées bonnes
XXX	Données incomplètes

	1	2	2'	A	3	B	C	D	4	E	5	F	G	6	7	8	8'	9	9'
1863																			
1864																			
1865																			
1866																			
1867																			
1868																			
1869																			
1870																			
1871																			
1872																			
1873																			
1874																			
1875																			
1876																			
1877																			
1878																			
1879																			
1880																			
1881																			
1882																			
1883																			


1 2 2' A 3 B C D 4 E 5 F G 6 7 8 8' 9 9'
1884 1885 1886 1887 1888 1889 1890 1891 1892 1893 1894 1895 1896 1897 1898 1899 1900 1901 1902 1903 1904 1905 1906 1907 1908 1909 1910 1911 1912 1913 1914 1915 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945
XXX
XXX


1 2 2' A 3 B C D 4 E 5 F G 6 7 8 8' 9 9'
1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007
XXX


1
2
2’
A
3
B
C
D
4
E
5
F
G
6
7
8
8’
9
9’
2008
2009
2010
2011
XXX
XXX
XXX

L'objectif de cette thèse est d'analyser, à différentes échelles de temps et d'espace, les transferts d'eau depuis la Loire amont jusqu'au Bassin Parisien, et entre la Loire moyenne et sa nappe alluviale. Les méthodes mises en œuvre sont l'étude statistique des débits journaliers en Loire moyenne (148 années de données) et le suivi géochimique (éléments majeurs, ^{18}O et ^{2}H) de la Loire et de ses affluents des bassins amont. Le suivi piézométrique et géochimique d'un site-atelier (méandre de Guilly, Val d'Orléans) a permis d'étudier finement les relations saisonnières entre la Loire et sa nappe alluviale, entre 2010 et 2012.

Les débits annuels à Blois présentent une stabilité temporelle, au-delà de leur variabilité interannuelle. Des évolutions sont, néanmoins, notables dans l'occurrence des saisons hydrologiques et des débits à pleins bords, ou encore les plus faibles débits d'étiage.

Si le suivi géochimique n'a pu préciser les apports, hydrologiquement complexes, de l'Allier à la Loire moyenne, l'importance des affluents de la Loire bourbonnaise, en période de hautes eaux, a été mise en évidence, et notamment les apports des affluents drainant le Morvan.

En Loire moyenne, le fleuve est connecté à l'ensemble de sa plaine alluviale, à travers ses échanges avec sa nappe d'accompagnement. La nappe alluviale est rechargée par les eaux de la Loire en période de hautes eaux et se décharge lorsque les lignes d'eau s'abaissent. Les forts débits annuels de la Loire sont donc indispensables pour conserver un fonctionnement hydrologique dynamique et abondant.

Cette approche globale a permis de démontrer des fonctionnements hydrologiques de la Loire, seulement ressentis jusqu'alors.

The aim of the PhD thesis is to analyze water transfer at several temporal and spatial scales, from upper Loire River basin to the Parisian Basin, and between the middle Loire River basin and its alluvial aquifer. The main approaches are (1) statistical analysis of hydrological series of the Middle Loire River (148 years) and (2) geochemistry (major elements,^{18}O et ^{2}H) of the Loire River and its tributaries. At a meander scale belonging to the Middle Loire River, the alluvial aquifer is studied by monitoring the groundwater and the river at hourly time step (2010-2012).

The annual discharge data of the Loire River at Blois show an important stability, despite its interannual variability. However, evolutions are observed: changes of occurrence of hydrological seasons and of full-bank discharge, as well as smaller low-water flows.

Water discharge inputs from the Allier River in the Loire River could not be shown by geochemical tracers because of the hydrological complexity. Nevertheless, during the high flow periods, the importance of tributary supply is highlighted in the Bourbonnais part of the Loire River, between Roanne and Nevers, in particular the tributaries flowing from the Morvan.

The Middle Loire River is connected to the alluvial plain where exchanges occur between the river water and groundwater from the alluvial aquifer. During peak flow events, the aquifer may be recharged by the Loire River, while the aquifer supplies the river water during low-water periods, regardless of the hydrological season. Such higher discharges of the Loire River are necessary to preserve a dynamic and abundant hydrological functioning of the fluvial system.