



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**NANCY-UNIVERSITE
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE**

**Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy
Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages
Ecole Doctorale RP2E**

THÈSE

Présentée en vue du grade de

**DOCTEUR DE L’I.N.P.L.
en Génie Civil – Hydrosystèmes – Géotechnique**

Par

Maxime CAUVIN

**Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité
dans les études de risques liés au sol et au sous-sol**

Soutenue publiquement le 20 décembre 2007

Devant le jury composé de

Hani MITRI	Rapporteur
Daniel BOISSIER	Rapporteur
Jack-Pierre PIGUET	Examineur
Gérard VOUILLE	Examineur
Romuald SALMON	Examineur
Bruno GOUBET	Invité
Thierry VERDEL	Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

A Prune, à Eloïse

Once upon a time...

Je me prépare, tranquillement assis sur une chaise en bois dans une salle de cours d'un éminent bâtiment universitaire nancéien, à assister à la première session d'un module intitulé « exploitation minière ». C'est à ce moment précis que débute l'histoire que vous allez lire.

Je me souviens avoir été très curieux. « *C'est bizarre* », me disais-je, « *je suis à l'Ecole des Mines depuis quelque temps maintenant et je ne sais toujours pas ce qu'est exactement une mine* ». J'étais également particulièrement dubitatif. « *Bon, je ne sais pas trop ce que je vais pouvoir en faire de ce cours, il ne doit pas en rester beaucoup de mines en activité aujourd'hui* ». Quelques mois plus tard, j'avais la confirmation de cette intuition dans ce même module : j'apprenais que les dernières tonnes de charbon venaient d'être extraites du sous-sol français cette même année 2004. Plus rien. Fini. Nada.

Plus de production minière pour la France, d'accord. Mais moi, dans l'intervalle, j'avais appris plusieurs choses importantes.

D'abord, le fait que l'exploitation minière a constitué un défi gigantesque. Quelque chose d'impressionnant, de démesuré. Environ 40 000 kilomètres de galeries foncées dans le sous-sol lorrain pour y exploiter le seul minerai de fer. Des exploitations à plus de mille mètres de profondeur. De quoi captiver quelqu'un qui, comme moi, se laisse facilement fasciner par tout ce qui peut être grand, très grand.

Ensuite, le fait que l'ingénieur minier a encore du pain sur la planche. Il lui reste pléthore de problèmes auxquels il doit se mesurer, et notamment celui de la gestion des risques liés à l'Après-mine. Ce problème, balayant une large gamme d'activités, qu'elles concernent le technique, le politique, le social, apparaît particulièrement intéressant pour un étudiant qui, comme moi, avait choisi une école d'ingénieur « généraliste » pour pouvoir justement se confronter à des domaines de compétences variés.

Enfin, j'avais appris, par le biais des personnes qui m'ont dispensé ces cours, Jack-Pierre PIGUET et Marwan AL HEIB pour ne pas les nommer, que les gens qui travaillaient dans ce domaine sont tous de grands passionnés. Ce qui, de fait, les rend passionnants. Merci à vous deux de m'avoir jeté, sans finalement m'avoir prévenu avant, dans le grand bain de la mine.

Aujourd'hui

Passionnés et passionnants, les participants au jury de cette thèse le sont également.

Merci d'abord à Daniel BOISSIER et à Hani MITRI de m'avoir fait l'honneur d'être rapporteurs de ce travail et d'avoir accepté de quitter le temps d'une journée de décembre vos lointaines contrées pour le froid relatif de Nancy.

Merci également à Gérard VOUILLE d'avoir accepté de relire cette histoire en profondeur et de s'être investi pleinement dans son rôle d'examineur.

Merci enfin à Bruno GOUBET d'avoir participé à ce jury. Votre présence et l'intérêt que vous avez porté à mon travail sont pour moi marques du lien qui me paraît essentiel le monde universitaire et les pouvoirs institutionnels. Parlant des pouvoirs institutionnels, je ne peux que remercier le Ministère de l'Industrie pour son support financier tout au long de ces trois années de travail.

Le tourbillon

Une fois dans le bain de la mine, plus moyen d'en sortir. Je me suis retrouvé littéralement pris au piège. Peu de temps avant de débiter mon stage de fin d'études, je me vois proposer un contrat de thèse qui m'assure de travailler sur un sujet qui m'enchantait avec des gens qui me passionnent. Merci à Thierry VERDEL pour sa proposition et pour sa confiance à cette époque. Merci Thierry pour ton encadrement pendant ces trois années, pour ta pédagogie de tous les instants et ton ouverture d'esprit. Je te revois, après l'une de nos premières réunions, à t'amuser de mes tentatives désespérées à résoudre avec un crayon et du papier un problème qui n'était pas si simple, même pour Mathematica... C'est toi, par ton côté touche-à-tout et ta passion, qui m'a montré qu'être « généraliste » voulait dire et je t'en remercie grandement.

A cette même période, je me retrouve à participer – en temps que spectateur je précise – à mon premier comité d'expertise sur le bassin ferrifère lorrain. J'y rencontre certains membres de l'INERIS et du LAEGO et je tiens à les remercier chaleureusement pour l'accueil qu'ils m'ont réservé. Plus particulièrement, merci à Romuald SALMON de m'avoir fait découvrir son travail, de m'avoir impliqué dans ses études et de m'avoir encadré pendant trois ans. Merci également Romuald de m'avoir présenté certains sites où je n'aurais peut-être plus l'occasion, la chance ou l'envie d'aller. J'ai pu, avec toi, découvrir le petit village de Trémuson, ses passionnantes mines de plomb-zinc mais aussi son charmant restaurant routier. Je remercie également l'INERIS, au travers de Christophe DIDIER et de Medhi GHOREYCHI, pour son soutien technique, scientifique, financier et pour la liberté qu'il m'a laissée dans mes travaux.

Retour à notre histoire. Arrive le départ pour ce fameux stage de fin d'études. Direction l'Afrique du Sud. Là-bas, deux grandes découvertes, toujours sur la même base du plongeur brutal. D'abord, la première visite de mine. Impressionnant. Du platine, exploité à 1 300 mètres de profondeur, sous 90 centimètres d'ouverture et à une température que le Normand que je suis supporte difficilement. Où est-on allé chercher et imaginer tout ça ? Ensuite, un homme. Nielen VAN DER MERWE. Passionné parmi les passionnés. Finalement, lui aussi est responsable de toute cette histoire. Baie dankie Nielen. Merci pour tes nombreux conseils et pour nos discussions enflammées sur le rugby.

Après ce stage, le travail de thèse peut enfin débiter « officiellement » en Lorraine. Merci à cette région, même si la mer et la pluie manquent un peu, de m'avoir accueilli et financé. Merci à ses habitants de m'avoir supporté, moi et mes polos rayés, même si je n'avais pas leur accent (si si Brigitte, tu as un léger accent).

Un merci à Cécile, parce qu'elle le vaut bien, à Jamil pour m'avoir un soir emmené manger frites au Paradis, à Diego pour avoir ajouté une touche hispanique à notre bureau cosmopolite et à Ali, même si il n'a pas très pris à cœur son rôle d'arroseur de plante, pour m'avoir supporté dans le bureau. Merci à Radwan (je profite de cette page de remerciements pour dire que je l'ai toujours laissé gagner au badminton), à Olivier, Yann, Véronique, Philippe, à Clémence, Arnaud, Cyrille, Alain, Charles et j'en passe et des meilleurs.

Enfin merci à ceux qui me liront.

SOMMAIRE

Remerciements	2
Sommaire	4
Introduction générale	6
Chapitre 1. De l'incertitude dans les analyses de risques liés au sol et au sous-sol	8
1 Présentation des notions d'analyse du risque et d'incertitude.....	9
1.1 L'analyse du risque naturel	9
1.2 La notion de risque est liée à la notion d'incertitude.....	13
2 Typologie de l'incertitude adaptée au contexte de l'analyse de risque.....	16
2.1 Une volonté : traiter l'incertitude de manière opérationnelle	16
2.2 Proposition pour une nouvelle typologie des incertitudes	18
2.3 Quelques remarques à propos de la typologie mise en place.....	23
3 Traitement de l'incertitude : une « Boîte à méthodes » pour l'expert.....	26
3.1 Incertitudes de données.....	26
3.2 A propos de la propagation des incertitudes de données	32
3.3 Incertitudes de modèle.....	37
3.4 Incertitudes d'expertise.....	38
3.5 Incertitudes de ressources	39
3.6 Conclusions.....	41
4 Illustration : la réalisation du Plan de Prévention des Risques Miniers sur le secteur de Trémuson (22).....	42
4.1 Contexte historique, géologique et minier du secteur de Trémuson.....	42
4.2 Les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM).....	46
4.3 Réalisation du Plan de Prévention des Risques Miniers sur le secteur de Trémuson	48
4.4 Bilan sur traitement des incertitudes effectué lors de la réalisation du PPRM sur la concession de Trémuson.....	62
5 Conclusions	63
Chapitre 2. De la notion de probabilité dans l'évaluation du risque	64
1 De la notion de probabilité d'occurrence d'un aléa naturel à celle de prédisposition	65
1.1 Détermination de la probabilité qu'un événement survienne en un endroit donné durant une année donnée	65
1.2 De l'analyse en un endroit précis à l'analyse sur un secteur homogène	68
1.3 De l'approche fréquentiste à la notion de prédisposition	69
2 Les probabilités : un seul outil pour deux notions différentes.....	70
3 Illustration par l'évaluation de la stabilité d'un pilier de mine	73
3.1 Evaluation de la stabilité d'un pilier de mine : une analyse déterministe	73
3.2 Evaluation de la stabilité d'un pilier de mine : quelles incertitudes ?	75
3.3 Méthodologie pour la prise en compte des incertitudes	78
3.4 Avantages de la méthodologie pour l'expert	91

3.5	Problème de l'interprétation pratique du résultat-----	93
4	Prise en compte de l'aspect temporel de l'aléa-----	99
4.1	Intégrer le facteur temps : pourquoi ?-----	99
4.2	Intégrer le facteur temps : comment ?-----	100
4.3	Probabilité d'occurrence temporelle de l'aléa « fontis »-----	103
4.4	Bilan sur l'intégration du facteur temps dans les analyses-----	114
5	Conclusions-----	115
Chapitre 3. Mise en pratique-----		116
1	Evaluation de la stabilité à long terme d'une mine souterraine de charbon en Afrique du Sud 117	
1.1	Le programme PROTEA de coopération en recherche scientifique-----	117
1.2	Présentation de l'exploitation minière et des objectifs de l'étude : entre théorie et pratique-----	117
1.3	Analyse de l'aléa-----	119
1.4	Utilisation concrète des résultats avancés-----	131
2	Analyse de la stabilité des terrains au droit de la carrière de gypse de Grozon-----	133
2.1	Présentation du site-----	133
2.2	Identification des ressources et caractérisation des incertitudes-----	139
2.3	Analyse spatiale de l'aléa-----	149
2.4	Analyse temporelle de l'aléa-----	155
2.5	Principaux résultats et avancées mises en avant par le travail-----	159
3	Principales leçons enseignées par ces exemples-----	160
Conclusions générales et perspectives-----		162
Bibliographie-----		165
Annexe 1. Moyenne et variance d'un ensemble de listes concaténées-----		173

INTRODUCTION GENERALE

Souvent les ingénieurs et les hommes publics sont tenus de résoudre certaines questions alors même que, sur ces questions, la science n'est pas faite. Messieurs, vous devez arriver à des solutions pratiques, même en présence d'une science inachevée.

Louis Pasteur (1888)

Toute société humaine, pendant son développement, essaie de s'intégrer au mieux dans le milieu naturel qui l'environne. Pour cela, elle se retrouve souvent amenée à *transformer* ce milieu, soit pour en extraire des matériaux et minerais destinés au bâtiment ou à l'industrie, soit pour étendre son implantation spatiale et ses transports. Mais elle peut également *subir* ce milieu lorsque celui-ci, pour des raisons techniques ou économiques, se révèle indomptable.

Parmi les divers constituants du « milieu naturel », la catégorie très générale des *objets rocheux*, d'origine naturelle ou anthropique, de surface ou souterrains, constitue l'objet de cette thèse. De manière concrète, font partie de ces *objets rocheux* les falaises, les fronts de taille, les mines à ciel ouvert, les tunnels, les carrières, les mines souterraines, les karts, etc.

Du fait de divers processus internes ou externes dont la gravité est peut-être le principal, tous ces objets rocheux sont amenés à évoluer et leur *stabilité* mécanique peut être mise en jeu. Les phénomènes qui peuvent alors être engendrés sont habituellement regroupés sous l'appellation d'*aléas naturels liés au sol et au sous-sol*. On trouve parmi ceux-ci les affaissements ou effondrements de terrains, les fontis, les écroulements de falaises, les chutes de blocs, etc. Lorsque ces phénomènes menacent des *enjeux* humains, économiques, environnementaux ou culturels, et peuvent porter atteinte à la société ou à son activité, on passe du concept d'*aléa* à celui de *risque*.

Pour limiter les désordres et nuisances que peuvent engendrer ces phénomènes vis-à-vis de l'activité humaine, différentes actions peuvent être entreprises. Celles-ci consistent généralement soit à agir sur la source de danger, i.e. à réduire l'*aléa*, soit à en limiter les conséquences, i.e. à diminuer la vulnérabilité des *enjeux*. Cette thèse concerne principalement l'étude de l'*aléa*. Elle s'inscrit dans le champ de la mécanique des roches en cela qu'elle s'intéresse aux mécanismes d'évolution des *objets rocheux*, c'est-à-dire aux phénomènes, plus qu'à leurs conséquences possibles sur l'activité humaine.

La mécanique des roches peut être définie comme une *science appliquée*, destinée à répondre aux besoins des ingénieurs, mineurs, constructeurs ou pétroliers (CFMR, 2004). Elle a surtout été développée de manière à être pratique. A l'instar d'autres sciences appliquées, elle repose majoritairement sur le géotechnicien, l'« homme de l'art » et sur son expertise. Cette caractéristique n'est alors pas sans soulever certains problèmes. L'expert, de part la nature même de ce qu'il étudie, les *objets rocheux*, naturels, non homogènes, fracturés, etc. et la science inachevée dont il dispose, doit à chaque instant travailler dans un contexte de doute et d'incertitude.

Néanmoins, il s'avère aujourd'hui que les méthodes et outils développés par l'expert géotechnicien souffrent de ne pas pouvoir apporter de réponses suffisamment précises permettant de réellement saisir ce contexte d'incertitude. Seules quelques méthodes indirectes, telle l'ajout de marges ou de coefficients de sécurité, sont utilisées aujourd'hui pour intégrer le doute qui existe sur le résultat d'une analyse, mais elles restent malheureusement insuffisantes.

Les méthodes et outils développés jusqu'à présent souffrent également de ne pas pouvoir permettre une véritable quantification des aléas liés au sol et au sous-sol et de leurs probabilités d'occurrence, comme cela peut être le cas par exemple dans les domaines du risque nucléaire, sismique ou hydraulique. De telles réponses s'intégreraient néanmoins parfaitement dans le paysage réglementaire actuel où les demandes d'une quantification et d'un meilleur affichage du risque sont nombreuses (on

citera par exemple la loi « Bachelot » du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages). Elles s'avèreraient également intéressantes aux yeux du public et des autorités, puisqu'elles permettraient d'aller vers une harmonisation des méthodes d'évaluation des risques naturels, à la fois à une échelle nationale et internationale, et par là même leur lisibilité serait accrue et leur application, facilitée.

Dans un tel contexte, l'enjeu de cette thèse est de répondre aux questions suivantes :

- quelles sont les principales incertitudes auxquelles doit faire face l'ingénieur géotechnicien ? Peut-on en dresser une typologie qui puisse permettre un traitement opérationnel de celles-ci ?
- l'utilisation des méthodes probabilistes peut-elle être envisagée dans le domaine des aléas liés au sol et au sous-sol de la même manière qu'elle l'est pour certains autres aléas naturels (sismique, inondations, avalanches) ? Si oui, quelle serait la véritable signification des probabilités exprimées ?
- enfin, comment fournir aux ingénieurs et experts *du terrain*, des outils pratiques permettant d'améliorer leurs analyses et de mieux répondre à leurs problèmes quotidiens ?

Cette thèse s'adresse principalement à l'ingénieur et l'expert *du terrain*. Pour une meilleure lisibilité, plusieurs exemples, concernant principalement des exploitations souterraines, serviront d'illustrations concrètes aux différentes réponses apportées par le travail de recherche. Il faut noter dès à présent que ce travail ne cherche pas à créer ou développer de nouvelles méthodes d'analyse des aléas liés au sol et au sous-sol. Il s'évertue surtout à compléter les outils déjà existants qui sont utilisés dans la pratique. De ce fait, rien n'aurait empêché que les divers exemples utilisés, théoriques ou concrets, aient concerné des *objets rocheux* de surface plutôt que souterrains.

Le premier chapitre de la thèse s'intéressera à la notion générale de *l'incertitude* dans le contexte de l'analyse des aléas liés au sol et au sous-sol. Il s'agira d'abord de définir cette notion en faisant l'état de la littérature, puis de mettre au point une classification permettant un traitement *opérationnel* de cette notion. Différents outils pouvant s'adapter aux méthodologies actuelles d'évaluation de l'aléa seront alors présentés, dans le but de permettre un traitement et une prise en compte de l'incertitude. Ces différents points seront illustrés par l'exemple de la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur la commune de Trémuson dans les Côtes d'Armor (22).

Après *l'incertitude*, c'est la notion de *probabilité* et son utilisation dans le contexte de la gestion des aléas liés au sol et au sous-sol qui feront l'objet du second chapitre. Les confusions actuelles et les manques en terme de méthodes seront présentés à travers l'exemple de l'évaluation de la stabilité d'un pilier de mine. L'aspect temporel de l'aléa, dont les implications apparaissent prépondérantes aujourd'hui pour une bonne gestion du risque, sera également abordé.

Enfin, le troisième chapitre sera consacré à l'illustration pratique des différents résultats introduits dans le cadre de la thèse. Deux cas d'application concrets provenant de contextes distincts serviront alors de fils conducteurs aux propos. Le premier exemple concerne l'analyse de stabilité à long terme d'une mine souterraine de charbon située en Afrique du Sud, étude qui fait l'objet d'un partenariat entre l'INERIS et l'Université de Pretoria. Le deuxième exemple porte sur l'analyse de l'aléa « fontis » au droit d'une carrière souterraine de gypse située à Grozon dans le Jura (39).

CHAPITRE 1. DE L'INCERTITUDE DANS LES ANALYSES DE RISQUES LIES AU SOL ET AU SOUS-SOL

Face aux conséquences dramatiques que peuvent avoir certains événements engendrés par les objets rocheux, la *gestion des risques* est aujourd'hui devenue une des demandes fortes des populations concernées et constitue une des priorités de travail des gouvernements.

Plusieurs actions ont dès lors été entreprises, dans des contextes parfois différents, pour analyser les *aléas naturels*. Dans chacune d'entre elles, la place de l'expert est prépondérante : celui-ci doit combiner différentes informations, expériences et modèles pour répondre à une question précise. Malgré tout, l'expert doit souvent faire face à de nombreuses incertitudes qui peuvent toucher l'ensemble de ces paramètres.

Ce premier chapitre du mémoire de thèse se concentre sur cette notion de **l'incertitude dans le contexte d'analyse de risque** et se fixe plusieurs objectifs :

- décrire de manière schématique le processus de réalisation d'une analyse telle qu'elle peut être effectuée dans le domaine des risques liés au sol et au sous-sol, et identifier les « paramètres » principaux de ce processus ;
- présenter et définir la notion d'incertitude dans le contexte de ces analyses (partie 1) ;
- mettre au point une classification des incertitudes qui puisse s'adapter à la spécificité des études, permettre une meilleure communication entre les différents acteurs de la gestion des risques et rendre possible un traitement opérationnel des sources d'incertitudes (partie 2) ;
- présenter des outils pratiques pouvant être utilisés par l'expert pour prendre en compte l'incertitude rencontrée dans leurs études, et lorsque ceux-ci n'existent pas, proposer des solutions opérationnelles (partie 3).

Un accent important sera porté dans ce premier chapitre au côté opérationnel des études. De nombreux exemples seront ainsi proposés. Ceux-ci permettront de fournir des points de repères à l'expert à travers, par exemple, la présentation de plusieurs études d'analyses de risque qui ont déjà été réalisées dans des contextes particuliers, à travers l'illustration concrète des différentes catégories d'incertitudes définies, ou encore à travers le détail d'outils pratiques permettant de traiter ces incertitudes. Ces exemples insisteront également sur la faisabilité opérationnelle des solutions présentées et mettront en avant le fait que ces dernières peuvent s'adapter aux outils actuellement utilisés. Enfin, ils permettront de mettre concrètement en lumière les avantages d'un traitement des incertitudes comme outil d'aide à l'expertise et à une meilleure communication.

1 PRESENTATION DES NOTIONS D'ANALYSE DU RISQUE ET D'INCERTITUDE

1.1 L'analyse du risque naturel

Contexte et définition du risque naturel

L'histoire du développement humain a toujours été entachée de catastrophes, dont les media, et ce quelque soit l'époque, se sont largement faits l'écho. Dans le cadre des objets rocheux qui fait l'objet de cette thèse, de nombreux événements ont marqué l'Histoire, que ce soit en France ou à l'étranger, par leurs conséquences qui ont, ou auraient pu, être tragiques. En 1248, l'éboulement du Mont Granier faisait par exemple près de 5000 victimes. En 1906 et 1960, les catastrophes de Courrières ou de Coalbrook (Afrique du Sud) coûtaient la vie à respectivement 1099 et 437 mineurs. En 1961, l'effondrement de Clamart entraînait quant à lui la mort de 21 personnes. Et plus récemment encore, en 1996, plusieurs affaissements miniers survenaient en Lorraine, sans heureusement avoir de conséquences dramatiques.

De tels événements peuvent aujourd'hui encore survenir. Aucun pays n'est en effet à l'abri d'un nouvel accident minier ou d'une catastrophe pouvant être engendrée par des écroulements de versants rocheux, qui, à n'importe quel moment, peuvent avoir des conséquences tragiques. La chute d'un bloc rocheux sur la route d'accès au tunnel du Mont Blanc en 2007, aurait pu par exemple entraîner des événements bien plus dramatiques que la fermeture du tunnel pendant de longues semaines. Dans le même esprit, les éboulements récurrents le long de la RN 1 sur l'île de la Réunion ou le long des côtes normandes n'ont heureusement engendré jusqu'à présent, du fait de mesures préventives efficaces, que des problèmes matériels de voiries ou d'infrastructures.

Tous ces événements sont des manifestations de ce qui, dans le langage commun, est appelé de manière générale *le risque naturel*. Cette notion est aujourd'hui utilisée par de nombreux auteurs sans pour autant qu'une définition unique et faisant l'unanimité n'en ait été donnée. Toutes les définitions qui existent évoquent cependant, d'une manière ou d'une autre, l'importance estimée des pertes qui peuvent résulter de l'occurrence d'un événement indésirable. Elles combinent toutes des facteurs comme la probabilité de survenue de cet événement, son intensité prévisible et le niveau prévisible des dommages engendrés par ce phénomène. Dans cette thèse, on retiendra la définition proposée par Merad (2003) faisant du risque naturel la combinaison d'un *aléa*, de la *vulnérabilité des enjeux* et de l'*efficacité des mesures préventives*.

Quelques exemples d'analyses dans le domaine des risques liés au sol et au sous-sol

Dans le domaine des risques liés au sol et au sous-sol, plusieurs *études d'analyse de risque* ont jusqu'à présent été réalisées. Si toutes ces études possèdent la même dénomination, elles s'appuient néanmoins sur des méthodologies de réalisation très variées. Elles cachent alors souvent des réalités bien différentes en terme de résultats et de conclusions qui les rendent difficilement comparables les unes aux autres. Certaines méthodes d'analyse visent ainsi par exemple uniquement l'identification et l'estimation de l'aléa alors que d'autres vont plus loin en proposant des moyens pour la maîtrise du risque. Dans la suite, plusieurs grands courants d'études portant sur l'analyse des risques liés à des objets rocheux sont présentés de manière synthétique (et sûrement non exhaustive), en essayant pour chacun de renvoyer à des références bibliographiques concrètes.

Certaines études visent à *exprimer l'occurrence possible d'un phénomène redouté sur un site d'étude parfaitement identifié et d'une dimension généralement limitée (quelques hectares au maximum), et le cas échéant, à mettre en place des stratégies de mitigation ou des dispositifs d'alerte*. Ces études se basent sur l'analyse de la stabilité d'un ouvrage (exploitation souterraine, front rocheux, etc.) en s'intéressant aux mécanismes de rupture possibles et en étudiant leurs éventuelles conséquences sur l'homme et l'environnement. Elles permettent d'effectuer un diagnostic de l'ouvrage, à court ou long

terme, basé sur le calcul de facteurs de sécurité, locaux ou globaux (Piguet, 2000). Des études de ce type ont été réalisées, dans le domaine des ouvrages souterrains, aux Pays-Bas (Bekendam, 2004), en Afrique du Sud (van der Merwe, 2004a) ou encore au Royaume Uni (Swift et Reddish, 2002).

D'autres études *cherchent, au sein d'une même zone d'étude de dimension plus importante (plusieurs hectares), à caractériser et cartographier le niveau d'aléa (ou de risque) de différents secteurs homogènes, de manière à définir pour chacun, plusieurs recommandations pratiques en terme de gestion du risque.* Pour parvenir à un tel objectif, le secteur d'étude est généralement découpé en un nombre restreint de zones qui se trouvent exposées de la même manière au phénomène redouté. Une analyse propre à chaque zone est alors menée, le plus souvent de manière experte par combinaison de divers facteurs. En France, cette méthodologie est par exemple utilisée dans le cadre de la mise en place des Plans de Prévention des Risques et a notamment été appliquée aux anciennes exploitations souterraines (méthode des « configurations types » (Didier et al., 1999)) ou aux instabilités de versants rocheux (Didier et Tritsch (1999), Pauly et Payany (2002)). Elle est également utilisée à l'étranger dans le cadre des risques liés à la présence d'anciennes mines par Betournay (2004) et Hutchinson et al. (2002) au Canada ou par Heitfeld et al. (2005) en Allemagne, ou pour l'étude des glissements de terrain par Maquaire et al. (2006).

Certaines études *visent à comparer plusieurs secteurs de grandes dimensions entre eux, dans le but d'identifier les plus sensibles, et de proposer pour ceux-ci des techniques de mise en sécurité particulières.* Aux Etats-Unis, la méthode AUMIRA (Abandoned Underground Mines Inventory and Risk Assessment) développée par le Ministère des Transports et le Ministère des Ressources Naturelles de l'Etat de l'Ohio, a pour principal objectif de *hiérarchiser* le risque lié aux affaissements induits par la présence de mines abandonnées sous des infrastructures routières (ODOH, 1998). C'est une méthode d'aide à la décision publique qui permet, par comparaison entre plusieurs zones et compte tenu des informations disponibles, d'identifier les sites les plus sensibles et de proposer des solutions pour y maîtriser le risque (via une surveillance, une mise en sécurité, etc.). En France, et plus particulièrement dans le bassin ferrifère lorrain, une méthode spécifique de tri utilisant l'outil multicritère a été développée pour identifier les zones à risque et y proposer un système de surveillance adapté. Cette méthode consiste à comparer toutes les zones deux à deux sur la base d'un certain nombre de critères définis par un comité d'expert et à faire ressortir les plus sensibles (Merad, 2003). Ce type d'études vise ainsi essentiellement à identifier les sites les plus problématiques parmi tous, sans aucun autre référentiel qu'une comparaison entre les sites.

Enfin, plusieurs études s'attachent à *estimer et caractériser les conséquences possibles d'un phénomène redouté sur un site d'étude qui peut être assez étendu (plusieurs hectares).* A la différence des études de stabilité présentées précédemment (premier type détaillé), ces études s'intéressent aux conséquences possibles des événements plus qu'aux phénomènes eux-mêmes. Le jugement d'expert ou le retour d'expérience sur des événements du passé sont souvent utilisés pour déterminer les *potentialités* d'apparition des événements redoutés (effondrement, etc.) de manière qualitative ou quantitative. En Nouvelle-Zélande, la méthode « Waihi » (Richards et al., 2002) propose, en plus d'une cartographie de l'aléa, une évaluation quantitative du risque, à la fois pour les personnes et pour les habitations. Une telle évaluation permet de définir des zones dans lesquelles la mise en sécurité apparaît nécessaire. Dans le domaine de la stabilité des fronts rocheux, la méthode SSPC (Slope Stability Probability Classification) développée par Hack et al. (2003) ou la méthode HGP (Historical, Geomechanical and Probabilistic) de Hantz et al. (2003) permettent, elles aussi, après une étude mécanique de stabilité des ouvrages et une analyse d'événements passés, d'estimer les potentialités de ruptures de pentes.

Les grandes différences qui existent entre ces différents courants de méthodes s'expliquent par :

- les *objectifs* réels des études : cherche t'on à savoir si le phénomène est possible et quelles peuvent être ses conséquences, ou veut-on identifier, au sein d'une zone d'étude, les secteurs les plus sensibles pour l'homme et son environnement ? ;
- les *résultats* attendus : évaluation de la potentialité du phénomène ou cartographie ? ;
- les *échelles* géographiques concernées : sites très locaux sur des superficies de quelques hectares, jusqu'à des échelles régionales.

Le processus d'analyse des risques naturels

Les différentes méthodes présentées dans le paragraphe précédent sont autant de réponses possibles à des problématiques diverses qui ont été posées aux experts. Aujourd'hui, pour des raisons humaines, économiques ou environnementales bien évidentes, une gestion du risque naturel efficace est devenue de première importance.

Pour Merad (2003), trois étapes ordonnées sont nécessaires à une bonne gestion du risque (figure 1.1). La première consiste en l'analyse du *contexte* politique, économique, social, etc. de l'étude. Cette étape soulève, entre autre, l'épineux problème de la responsabilité. La seconde phase consiste en l'*analyse* du risque. Elle vise principalement à identifier les différentes composantes du risque (aléa, vulnérabilité des enjeux et mesures préventives), à estimer le risque, à le hiérarchiser et enfin à communiquer avec les différents acteurs. Enfin, la dernière phase consiste à définir un niveau de risque acceptable et à mettre en œuvre des mesures pour le *maîtriser*, voire le réduire. Il est à noter que les méthodes présentées dans le paragraphe précédent trouvent leur place à différents niveaux de ce schéma, en fonction des objectifs qui ont justifié leur mise en œuvre.

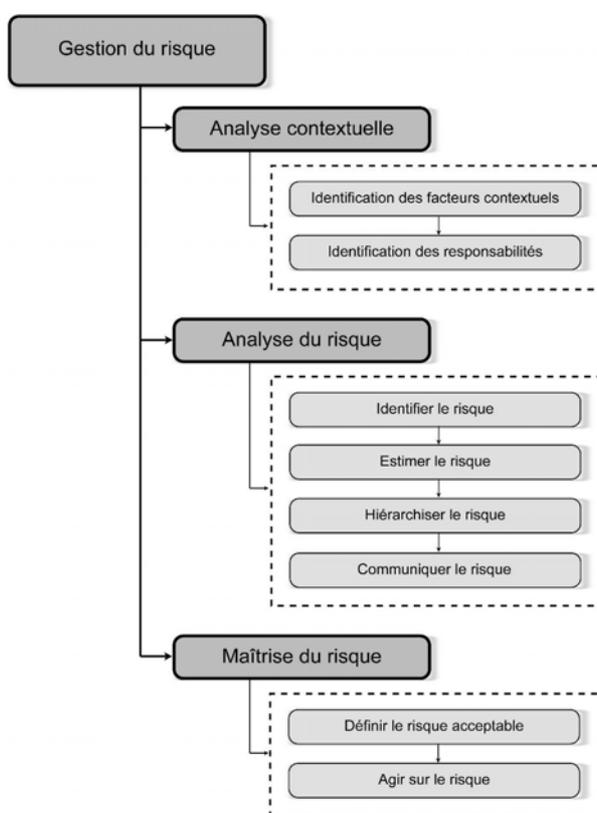


Figure 1.1. Trois étapes pour une « gestion des risques naturels » (d'après Merad, 2003)

Dans cette démarche de gestion des risques, la phase d'*analyse du risque* fait particulièrement l'objet de notre étude puisque la place de l'expert, l'« homme de l'art », y est prépondérante. Le rôle de ce dernier est en effet d'utiliser toutes les informations dont il peut disposer, ainsi que ses connaissances et son expérience, de manière à identifier les principales sources de danger et à estimer leurs conséquences éventuelles vis-à-vis de divers enjeux. Son analyse est un processus structuré qui s'appuie sur différentes techniques telles la modélisation ou les représentations graphiques. La figure 1.2 présente un schéma simplifié permettant de décrire d'une manière globale la logique de réalisation d'une analyse de risque. Celle-ci peut être décomposée en plusieurs phases, figurées par les flèches pointillées et continues :

- **étape 0** : l'expert en charge de l'analyse est amené à devoir répondre à un problème concret. Il travaille dans un certain *contexte* politique, économique, événementiel qui peut être défini ou non. Pour parvenir à répondre à son problème, il doit alors mobiliser des *ressources* scientifiques, techniques, humaines ;

- étape 1 : d'après son expérience, il conceptualise le problème, c'est-à-dire qu'il met au point une stratégie permettant de répondre à la question qui lui est posée ;
- étape 2 : il utilise ensuite des techniques (modèles) permettant de mettre en place sa stratégie et d'en évaluer les paramètres importants ;
- étape 3 : sa méthodologie définie et sachant comment la mettre en place, il l'« adapte » au cas étudié en sélectionnant puis en caractérisant des données de terrain à son analyse ;
- étape 4 : il diffuse ensuite les données au sein des modèles ;
- étape 5 : il analyse le résultat, souvent exprimé sous une forme algébrique, en fonction de son expérience et estime ainsi le risque ou l'aléa. L'expert peut ensuite communiquer ses conclusions et résultats aux autres acteurs impliqués dans la gestion du risque ;
- étape 6 : lorsque l'interprétation du résultat est délicate, il peut être amené à « re-boucler » le système, en cherchant par exemple à ajouter de nouvelles ressources à son étude (collecte de nouvelles données, programmes de recherche, etc.) ou en re-conceptualisant le problème.

L'étape « 0 » s'inscrit logiquement à la suite de l'*analyse contextuelle* qui d'après la figure 1.1, a précédé l'*analyse de risque*. Plus tard dans le mémoire, on reviendra sur l'importance que le contexte de l'étude peut avoir sur la réalisation d'une analyse de risque. L'étape « 5 » quant à elle appelle presque directement la phase de *maîtrise du risque*.

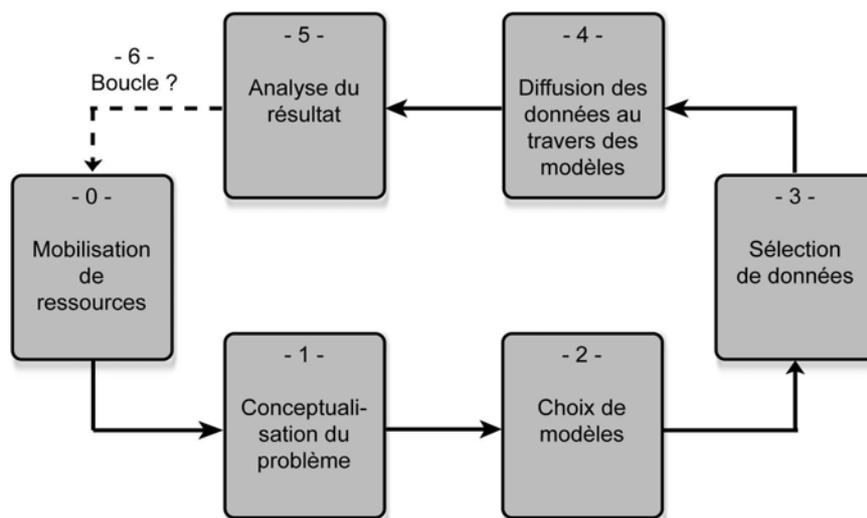


Figure 1.2. Schéma simplifié de la réalisation d'une analyse de risque

Le schéma méthodologique présenté reprend en fait d'une manière logique les différentes questions que peut se poser un expert lorsqu'il réalise une analyse de risque. Sa première interrogation, sus-jacente à la phase d'analyse à proprement parler, concerne le *contexte* dans lequel il évolue :

- à quel problème doit-il répondre ? Quelles sont les contraintes qui lui sont imposées par l'administration (législation, réglementation, problème de responsabilité, etc.) ou par sa société (budget, temps, etc.), et comment vont-elles impacter son étude ?

Une fois le contexte d'étude posé, l'expert s'interroge plus précisément sur l'étude qu'il doit réaliser :

- quelles sont les ressources dont il peut disposer pour répondre au problème, que ce soit en terme de connaissances scientifiques générales sur le sujet ou par rapport à l'objet particulier étudié (accessibilité, disponibilité de données, etc.) ?
- quelle stratégie va-t-il alors mettre en place compte tenu de ces contraintes et de sa propre expérience ?
- comment appliquer cette stratégie ? De quels outils a-t-il besoin ?
- puis, une fois la stratégie générale appliquée et personnalisée au site d'étude, comment interpréter son résultat d'analyse ? A-t-il besoin d'apporter de nouveaux éléments qui lui permettraient de conclure plus facilement ?

Tout au long de ce mémoire, plusieurs exemples pratiques seront repris, permettant d'illustrer concrètement ces différentes questions ainsi que le schéma retenu.

1.2 La notion de risque est liée à la notion d'incertitude

Dit de manière relativement brutale, l'existence d'une situation de risque peut s'expliquer par l'existence d'un contexte d'incertitude. Nous sommes, dans la plupart des cas, conscients de la présence de sources de danger : nous savons par exemple qu'une falaise peut s'écrouler ou qu'une exploitation souterraine peut s'effondrer. Malheureusement, nous ne connaissons jamais, de manière exacte et déterministe, la phénoménologie des événements qui peuvent être engendrés par ces sources de danger. Notre prise de décision en situation d'incertitude devient difficile puisque nous nous retrouvons dans l'incapacité de prédire les lieux, temps et conséquences exactes des événements que nous redoutons. Sans ces prédictions, l'anticipation des phénomènes et leur *contrôle* deviennent illusoires. Nous devons alors faire des paris sur l'avenir et ainsi, *prendre des risques*.

En situation d'incertitude, l'*analyse des risques*, suivant par exemple le processus présenté précédemment, peut alors jouer un rôle essentiel comme support à la prise de décision. Les notions d'*incertitude* et de *risque* apparaissent de fait être étroitement liées. Intégrer efficacement la première dans les études devrait permettre d'améliorer la gestion de la seconde. Malgré tout, avant de pouvoir parvenir à un tel objectif, il convient d'abord de définir, préciser et analyser plus en avant cette notion qu'est l'*incertitude* et qui fait spécifiquement l'objet de cette thèse.

Tentatives de définitions de l'incertitude

Pour le Larousse, l'incertitude est « *le caractère de ce qui est incertain* » (Larousse en trois volumes, 1966). Le Petit Robert va plus loin que cette définition d'usage pour le moins limité, en présentant l'incertitude comme « *une chose incertaine, mal connue, qui prête au doute* » ou comme « *une chose imprévisible* » (Le Petit Robert, 1993). Si cette définition reste très générale, elle a le mérite de remettre en exergue les notions de connaissance imparfaite et d'imprévisibilité qui avaient été sous-entendues précédemment quand il avait été question du lien entre risque et incertitude.

Toujours pour le Petit Robert, est « incertain » ce « *qui n'est pas fixé, déterminé à l'avance* », ce « *qui n'est pas certain, qui peut ou non se produire, n'est pas sûr (dans l'avenir)* », ce « *qui n'est pas connu avec certitude* » ou encore ce « *dont la forme, la nature n'est pas nette, claire* ». A l'opposé, est « certain », ce « *qui est effectif sans laisser aucun doute, perçu directement ou établi par des preuves, des calculs* » ou ce « *qu'on peut prévoir à coup sûr, qui arrivera* » (Le Petit Robert, 1993).

Dans ces définitions s'entremêlent les principaux éléments qui, depuis de nombreux siècles, nourrissent le débat sur la notion d'incertitude. Baecher et Christian (2003) résumaient récemment celui-ci en rappelant que la question fondamentale sur laquelle repose la signification même de l'incertitude est celle qui oppose déterminisme et hasard. Pour certains penseurs, le monde serait entièrement déterminé par les lois de la nature, et « *une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux* » (Laplace, 1825). A l'inverse, il existerait pour d'autres une once de hasard dans le monde, si infime soit-elle, qui le rendrait imprévisible. A un certain niveau, l'état futur du monde serait alors irréductiblement dû à la chance (Peirce, 1998). Cette position fût particulièrement défendue au XX^{ème} siècle par les biologistes (Monod, 1973) et les physiciens (Poincaré, 1908). Lorenz, par exemple, réussit à fournir en introduisant son fameux papillon une des meilleures illustrations rendant compte de cette complexité des phénomènes physiques.

Dans le contexte qui nous concerne, celui de l'analyse des risques naturels, c'est la vision Laplacienne qui a été adoptée dans la plupart des études. En situation de risque, les incertitudes les plus problématiques ne sont en effet pas tant dans le fait que la nature est hasardeuse, puisque l'on peut toujours déterminer l'ensemble des événements possibles, mais parce que notre connaissance est limitée et qu'il est difficile d'estimer le résultat réel de manière rationnelle. On rejoint ici les propos

de Bernoulli (Bernoulli, 1713) : « *L'incertitude n'est pas dans les choses mais dans notre tête : l'incertitude est une méconnaissance* ». En théorie, connaissant de manière juste et exacte les propriétés physiques d'une pièce de monnaie, les conditions du milieu ambiant, l'état initial au moment du lancer de cette pièce, il devrait être possible de déterminer le résultat du lancer. En pratique, malheureusement, la pièce n'est jamais rigoureusement homogène, le lancer jamais parfait et le milieu ambiant toujours perturbé. Pour autant, nous savons que le résultat sera soit pile, soit face, selon la combinaison de toutes ces conditions initiales. Sur quoi devons-nous alors parier ? « *La prévision n'est jamais facile* », disait justement Niels Bohr, « *surtout lorsqu'elle concerne l'avenir* ». Mais elle est théoriquement possible.

D'un point de vue pratique, il peut être plus facile pour l'expert en charge d'une étude de risque d'appréhender le monde comme si certaines incertitudes découlaient du caractère hasardeux de la nature, alors qu'elles ne le sont pas. Le résultat d'un lancer de dé est par exemple habituellement décrit comme un phénomène aléatoire. Cela est ainsi, non pas parce que le phénomène est réellement aléatoire, comme on a pu le montrer précédemment pour la pièce de monnaie, mais parce qu'on en sait généralement trop peu pour prédire le résultat de manière déterministe. Utiliser une telle hypothèse, plutôt que d'essayer de caractériser précisément l'incertitude liée à la connaissance, est en fait beaucoup plus avantageux dans la pratique pour réaliser des prédictions. Baecher et Christian (2003) proposent alors, dans un contexte d'analyse de risques, de séparer l'incertitude entre ces deux natures : celle due à un caractère aléatoire présumé, inhérent à l'étude d'éléments naturels et celle due à une connaissance incomplète des relations, modèles ou paramètres.

L'incertitude dans le contexte de l'analyse de risque : l'interaction de divers « paramètres »

D'après la figure 1.2, le résultat d'une analyse de risque peut être décrit comme l'aboutissement d'un processus logique, structuré, dans lequel sont intervenus plusieurs paramètres, de natures parfois très différentes. Ces *paramètres* sont à la fois :

- l' « *individu-expert* » en charge de la réalisation de l'analyse ;
- les *ressources* dont il dispose pour y parvenir ;
- les *modèles* qu'il va utiliser ;
- et les *données*, ici considérées au sens de « valeurs des paramètres physiques », qu'il va y intégrer.

Ces paramètres, très importants par la suite et sur lesquels on reviendra fréquemment, possèdent plusieurs propriétés :

- ils sont fortement dépendants entre eux : les connaissances et l'expérience d'un expert vont, par exemple, fortement influencer le choix des méthodes de résolution du problème. De la même manière, le choix d'un modèle spécifique pour traiter un problème va induire l'utilisation d'un nombre limité de données ;
- chacun d'entre eux peut être impacté par l'aléatoire, le hasard, la variabilité, l'imprécision, le manque de connaissances, et toutes ces facettes qui composent la notion d'*incertitude* telle que présentée dans le paragraphe précédent.

Dans cette thèse, et compte tenu de ces deux propriétés, nous appellerons « *incertitude* », l'ensemble des indéterminations sur les paramètres d'un processus d'analyse de risque, qui conduit à une indétermination sur le résultat de cette analyse. Ces indéterminations pourront concerner directement les objets étudiés, les modèles et méthodes utilisés, ou le processus d'expertise, mais ils pourront également être induits par le contexte plus général de l'étude. Une « *source d'incertitude* » sera alors définie comme une cause, un facteur responsable d'une indétermination existant sur l'une des variables considérées.

Le choix de telles définitions, qui apparaissent peut-être très générales, est ici pleinement assumé. L'objet de la thèse est en effet plus de proposer une définition du *concept* d'incertitude relativement large mais complète, qui puisse permettre à la fois une meilleure communication entre les différents acteurs de l'analyse de risque mais aussi une prise en compte opérationnelle de toutes les indéterminations pouvant être rencontrées dans celle-ci, plutôt que de s'attarder très profondément

sur des terminologies délicates et conflictuelles et « jouer sur les mots », ce qui rendrait probablement très limitée, voire stérile, la définition que l'on pourrait donner. Ce *choix pratique* rejoint en cela celui qui a été fait par le Groupe Radioécologie du Nord Cotentin (GRNC) dans le contexte de l'évaluation du risque radiologique où l'incertitude avait été définie comme « un terme général qui regroupe différents concepts : méconnaissance, imprécision, incomplétude, variabilité, etc. » (Rommens et al., 2002).

La figure 1.3 illustre, en reprenant le schéma présenté précédemment, plusieurs sources d'incertitudes qui peuvent induire une indétermination du résultat de l'analyse (une liste plus exhaustive des différentes incertitudes sera donnée dans les prochains paragraphes). Sont également représentées les relations qui existent entre les différentes étapes du processus de réalisation d'une analyse de risque. Ces relations découlent des liens étroits entre les différents paramètres intervenant dans le processus de l'analyse.

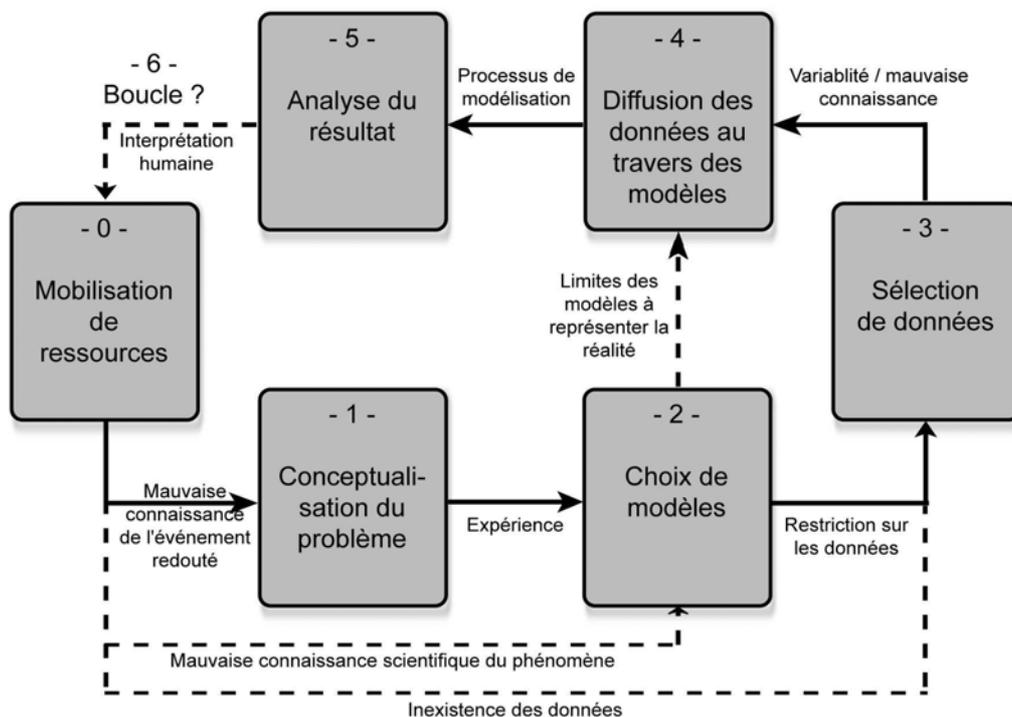


Figure 1.3. Illustration des liens existant entre les paramètres de l'analyse et présentation de plusieurs sources d'incertitudes apparaissant dans le processus d'analyse de risque

2 TYPOLOGIE DE L'INCERTITUDE ADAPTEE AU CONTEXTE DE L'ANALYSE DE RISQUE

2.1 Une volonté : traiter l'incertitude de manière opérationnelle

L'idée que la gestion de l'incertitude existant dans le processus d'une analyse de risque en faciliterait la mise en œuvre a été émise précédemment. Mais, puisque le concept d'incertitude apparaît relativement complexe au sens où il intègre des notions parfois très différentes, il semble intéressant, pour des raisons pratiques, de le détailler et d'en réaliser une typologie. Ainsi classifiées, les différentes composantes de l'incertitude pourraient être plus aisément *visualisées*, puis *analysées* et *intégrées dans le processus d'analyse de risque*. Une telle volonté a d'ores et déjà animé plusieurs auteurs, qui se sont attachés à mettre au point des « classifications » de l'incertitude. Néanmoins, si plusieurs typologies existent aujourd'hui, aucune n'est acceptée universellement.

Revue de plusieurs classifications de l'incertitude

Effet, cause et relation de cause à effet

Rogers (2003), se basant sur une définition qui fait du risque la combinaison d'un danger et d'un dommage, les deux étant liés par une relation de cause à effet, propose de distinguer trois types d'incertitudes :

- *l'incertitude sur l'effet*, qui serait due à la variabilité de la réponse d'un système à l'exposition à un danger. Fumer peut par exemple provoquer un cancer ou peut ne pas en provoquer ;
- *l'incertitude sur la cause*, qui serait relative au fait qu'il peut exister plusieurs causes possibles à un même dommage : on sait qu'un lien existe entre le tabac et le cancer, mais il est impossible de dire avec confiance si le type donné de cancer que telle personne a, a été causé par le tabac ou par une autre cause ;
- *l'incertitude sur la relation liant la cause à l'effet*, qui concernerait la qualité et la quantité de connaissance scientifique dont on dispose lorsqu'on construit cette relation de cause à effet, entre le tabac et le cancer dans l'exemple précédent.

Typologie de l'UK Climate Impacts Programme

Dans un rapport élaboré dans le cadre de l'UK Climate Impacts Programme (UKCIP) traitant des risques climatiques (Willows et Connell, 2003), les incertitudes sont groupées en quatre classes :

- la première concernerait le *monde réel*, c'est-à-dire les éléments qui, malgré une connaissance parfaite, peuvent être uniquement décrits sous une forme probabiliste (la pluviométrie par exemple) ;
- la seconde concernerait les *données*, et serait due à la précision limitée à laquelle on mesure les propriétés physiques des paramètres, ainsi qu'à la quantité de données disponibles ;
- la troisième serait relative à la *connaissance* et plus exactement au manque de connaissances, théoriques ou empiriques, à propos des processus, des interactions entre les différentes parties d'un système, des probabilités des sorties possibles, etc. ;
- enfin, la dernière concernerait les *modèles*, qu'ils soient utilisés pour décrire les données, les processus connus, pour évaluer le risque et les impacts ou encore pour examiner l'influence des décisions sur le futur. Sont-ils bien choisis ? Représentent-ils bien le processus que l'on souhaite ? Quelles sont les influences de l'imprécision des données d'entrée ou des valeurs des paramètres de modèles ?

Matrice d'incertitude

Van der Sluijs *et al.* (2003) proposent d'utiliser et d'enrichir une classification déjà mise au point par Walker *et al.* (2003) et développent une « matrice de l'incertitude », explicitée en cinq dimensions :

- la *localisation* (se manifestent-elles au niveau du contexte général, des données, des modèles, des jugements experts ou encore des sorties ?) ;
- le *niveau* (allant de l'ignorance totale à la connaissance parfaite) ;
- la *nature* (imperfection de la connaissance ou variabilité naturelle ?) ;
- la *qualité de la base de connaissances* (quantité et à la fiabilité des informations disponibles) ;
- la *subjectivité des choix* faits au cours de l'analyse (biais liés à la manière d'aborder le problème, aux méthodes de sélection de l'information, aux explications ou aux conclusions données).

Cette matrice de l'incertitude peut alors être utilisée, dans le cas d'une analyse de risque particulière, pour visualiser et hiérarchiser les sources d'incertitude prépondérantes.

Variabilité, incertitude épistémique et incertitude décisionnelle

Dans un ouvrage consacré à la fiabilité et à la statistique dans le domaine de la géotechnique, Baecher et Christian (2003) proposent de grouper les différents types d'incertitudes en trois catégories (figure 1.4) :

- l'*incertitude aléatoire*, qui serait attribuée à une variabilité naturelle ou temporelle inhérente au monde physique et qui est en principe irréductible ;
- l'*incertitude épistémique*, qui serait relative aux manques de données, de connaissances sur les événements ou les processus, qui limitent notre capacité à modéliser le monde qui nous entoure. Elle se diviserait en deux grandes catégories : l'incertitude de modèle, relative à la capacité d'un modèle mathématique à approcher la réalité et l'incertitude de paramètres, relative à la précision avec laquelle les paramètres du modèle peuvent être estimés ;
- enfin, l'*incertitude décisionnelle*, d'une nature différente des deux premières, qui serait due à notre incapacité à décider, à comprendre les objectifs réels d'une décision, à définir nos valeurs ou nos préférences.

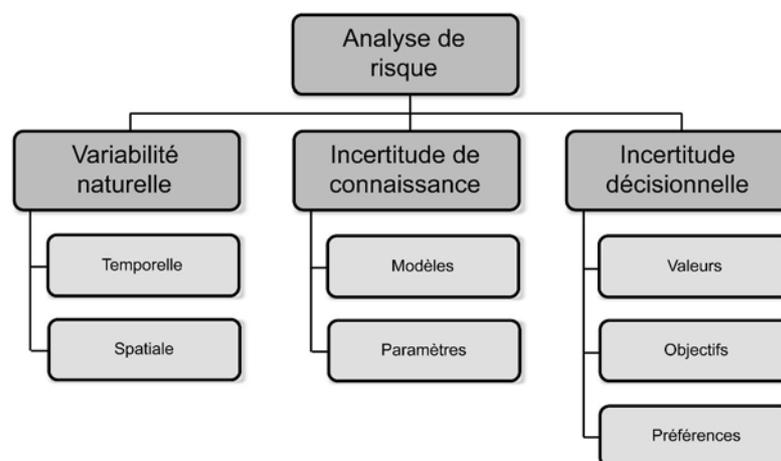


Figure 1.4. Classification des incertitudes, d'après Baecher et Christian (2003)

Principaux problèmes liés à ces classifications

La première remarque qui peut être faite à propos de certaines de ces classifications est liée aux *objectifs* qui ont été à l'origine de leur mise en place. Ces objectifs influencent directement l'*utilisation* qu'on peut faire d'une typologie :

- les travaux de Rogers (2003) concernent le domaine d'application du Principe de Précaution. Une des conclusions est que si le troisième type d'incertitude (concernant la relation liant la cause à l'effet) est trop important, il est préférable de faire appel à ce Principe de Précaution plutôt que de recourir à des analyses de risques classiques. C'est alors clairement sur ce type d'incertitude, et uniquement sur celui-ci, que leur étude se focalise. Rien n'est par contre dit à propos des « *analyses de risques classiques* », et la caractérisation en *incertitude sur la cause*

et *incertitude sur l'effet* apparaît très générale et difficilement exportable à d'autres problématiques ;

- les travaux de Van der Sluijs et al. (2003) sont inscrits dans le cadre d'un travail dont l'objectif est d' « *identifier les sources d'incertitudes prépondérantes dans l'analyse d'un problème donné* » (conversation avec J.P. Van der Sluijs durant le colloque « Incertitudes et environnement », Arles, 23-25 novembre 2005). Le but de leur travail est uniquement de cartographier les incertitudes de manière à permettre une meilleure communication entre acteurs de cultures parfois différentes, et non en vue de les traiter directement (voire les réduire) par la suite. La matrice qu'ils développent semble alors parfaitement apte à répondre au premier objectif. Malgré tout, le mode de représentation choisi (matrice croisée selon cinq dimensions) rend difficile l'identification rapide de méthodes pratiques de traitement et de réduction des incertitudes.

La constatation qui peut alors être faite suite à cette première remarque est qu'*une typologie de l'incertitude n'est réellement opérationnelle et utilisable que pour répondre aux objectifs pour lesquels elle a été développée.*

La seconde remarque qui peut être faite concerne le mode de représentation adopté pour les typologies et notamment la *division de la notion d'incertitude en des classes distinctes*. Un tel choix de présentation, qui a été fait par Rogers (2003), par l'UKCIP (Willows et Connell, 2003) et par Baecher et Christian (2003), laisse à penser que les différentes classes se situent à un même niveau d'importance, ou, tout du moins, qu'aucun lien n'existe entre elles. Ce choix est pourtant très contestable :

- dans la typologie présentée par Rogers (2003), *l'incertitude existant sur la relation entre la cause et l'effet* semble jouer un rôle particulier par rapport aux deux autres, en cela qu'elle constitue un lien entre les deux ;
- dans les travaux réalisés pour l'UKCIP (Willows et Connell, 2003), on peut se demander si l'incertitude de la troisième classe (relative à la *connaissance* vis-à-vis des processus) n'influence pas fortement l'incertitude de la quatrième classe (relative aux *modèles* utilisés pour représenter ces processus) ;
- enfin, on retrouve ce même problème d'influence d'un certain type d'incertitude sur les autres dans les travaux de Baecher et Christian (2003) : l'incertitude *décisionnelle* semble pouvoir impacter directement les incertitudes *aléatoire* et *épistémique* puisque c'est en fonction du « contexte décisionnel » que se fera le choix des modèles et des données qui seront affectées par les deux premiers types d'indétermination.

Le problème soulevé par cette seconde remarque concerne alors d'une part, *la consistance des présentations choisies* et d'autre part, *l'utilisation dans la pratique de ces classifications*. Indiquer dans une typologie de l'incertitude les liens qui peuvent exister entre les différentes classes permettrait ainsi de faire des études plus « raisonnées ». On éviterait des études qui peuvent se révéler insuffisantes ou non pertinentes, lorsque par exemple les incertitudes sur les paramètres sont caractérisées très précisément alors que les modèles ne sont pas réellement maîtrisés.

2.2 Proposition pour une nouvelle typologie des incertitudes

Présentation de la typologie

La première remarque faite précédemment pousse à poser les objectifs qui nous amènent à développer une nouvelle typologie de l'incertitude. L'un des buts de la thèse est d'incorporer, de manière opérationnelle, les incertitudes dans les études de risque. La typologie devra alors :

- permettre de *cartographier* les différentes incertitudes rencontrées dans les analyses de risque. Ce premier objectif vise, en plus d'une énumération des sources d'indéterminations et de leurs caractéristiques, à permettre un dialogue et une *communication facilitée* entre les divers acteurs de la gestion des risques ;

- *s'adapter* au contexte de l'*analyse de risque*, notamment en tenant compte des liens très forts qui existent entre les différents paramètres intervenant dans le processus de sa réalisation, comme présenté sur la figure 1.3 ;
- développer des classes d'incertitude dont un *traitement opérationnel* est possible.

La figure 1.5 présente une typologie possible, permettant de répondre à ces trois objectifs. Celle-ci va maintenant être illustrée concrètement à travers une présentation de diverses incertitudes rencontrées dans la pratique lors de la réalisation d'une analyse de risque. Dans le cadre de la thèse, un accent important a en effet été porté sur l'aspect opérationnel de l'étude de risque : plusieurs travaux concrets réalisés par des experts de l'INERIS ont pu être suivis et une identification des principales incertitudes rencontrées a par là même été rendue possible. On essaiera autant que possible de donner des exemples significatifs des problèmes rencontrés sur le terrain tout en étant conscient que ces exemples ne seront pas exhaustifs, et certains seront même étudiés plus en profondeur dans la suite du mémoire.

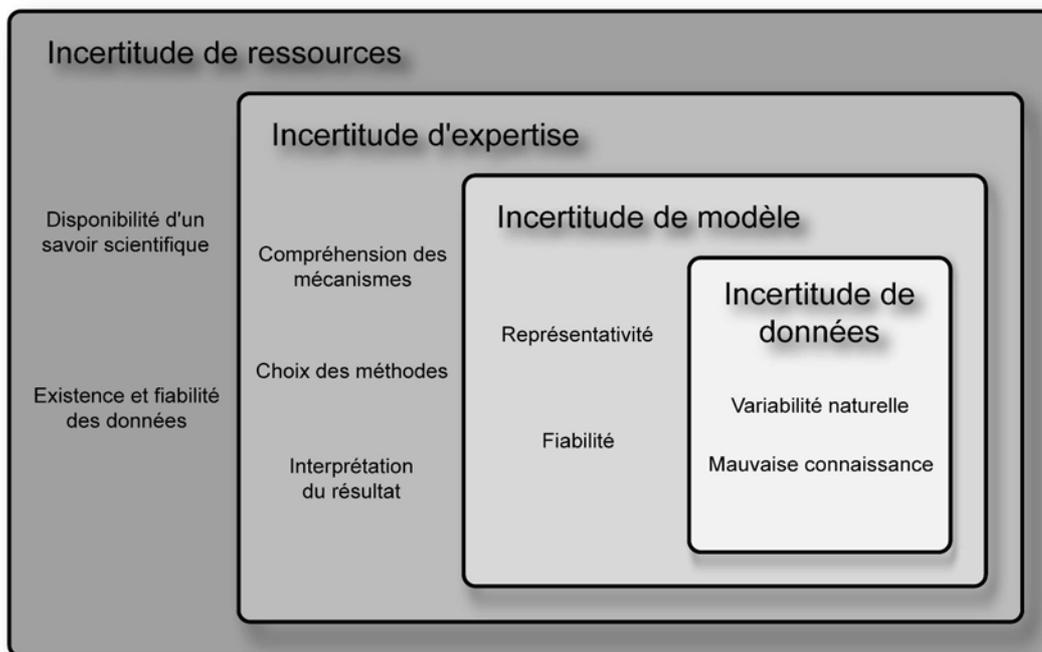


Figure 1.5. Proposition de typologie des incertitudes dans un contexte d'analyse de risque

Même si plusieurs remarques à propos de cette typologie seront faites par la suite, il paraît important de remarquer dès à présent l'*imbrication* qui existe entre les différentes classes d'incertitudes.

Incertitude de ressources

Le degré le plus général de la typologie concerne l'incertitude relative aux ressources. Il faut ici entendre par « ressources », l'ensemble des moyens, outils et informations permettant de réaliser l'analyse de risque sur un site d'étude spécifique. Cette classe d'incertitude est fortement rattachée à la notion d'**existence**. On y distinguera les indéterminations liées à :

- la disponibilité d'un savoir scientifique, c'est-à-dire l'existence de connaissances, de méthodes, etc. disponibles dans la littérature à propos du sujet étudié (est-ce un domaine de recherche nouveau ou non ? le phénomène est-il connu et ses mécanismes identifiés ? existe-t-il des outils pour l'étudier ?, etc.) ;
- l'existence, la nature et la fiabilité des informations relatives au site et aux objets étudiés.

De manière concrète, la participation à plusieurs analyses de risque sur le terrain a permis d'identifier parmi les « *incertitudes de ressources* », les indéterminations liées à :

- l'absence d'informations concernant l'existence de vides souterrains :
 - plans des travaux inexistant, notamment dans le cas des mines très anciennes (on renvoie à l'exemple de la réalisation du Plan de Prévention des Risques Miniers réalisé sur la concession de Trémuson, chapitre 1.4) ;
- l'absence d'informations concernant l'objet rocheux étudié :
 - aucune information relative à la géologie du site disponible (pas de sondages, etc.) ;
 - aucune connaissance sur la fracturation du massif, sur le schéma de circulation hydraulique, etc. ;
 - géométrie inconnue de l'ouvrage ou de l'objet étudié.
- la fiabilité des informations disponibles concernant les objets étudiés :
 - nature informelle des informations utilisées (témoignages oraux de non-spécialistes, coupures de presse, etc.) ;
 - impossibilité de vérification et de validation des informations (inaccessibilité des travaux du fait de l'engorgement, du comblement des vides ou d'une atmosphère viciée au fond) ;
 - plans miniers comportant des informations erronées, comme par exemple dans le bassin ferrifère lorrain : « *En juin 2002, dans le cadre des travaux de reconnaissance pour la détermination des zones à risque, l'Etat a découvert sous la cité de Stock, commune de Thil [Meurthe-et-Moselle, 54], un secteur apparaissant comme défilé sur les plans d'exploitation mais qui, en fait, comportait des vides résiduels* ». (Préfecture de la Région Lorraine, 2005) ;
- la localisation impossible des ouvrages alors que des informations sur leur existence sont disponibles, dans les archives par exemple (on renvoie à la réalisation du Plan de Prévention des Risques Miniers réalisé dans la concession de Trémuson, chapitre 1.4) ;
- le manque de connaissances générales sur les mécanismes physiques étudiés :
 - le déroulement logique des événements redoutés est difficile à détailler, comme dans le cas des effondrements de marnières : « *Malheureusement, dans ce domaine, beaucoup de zones d'ombre restent à lever et entachent la démarche de sécurisation d'une forte incertitude. A l'heure actuelle, on ne connaît pas de façon sûre le schéma d'évolution du phénomène de rupture jusqu'à la surface ni les répercussions géométriques exactes sur les terrains (« zone d'effet »).* » (Tritsch, 2004) ;
 - le rôle exact des paramètres externes (eau, sismicité régionale, conditions climatiques, etc.) ou les processus de dégradation mécanique ou chimique, sont généralement mal connus.
- l'indisponibilité d'outils d'étude, validés par la communauté scientifique, permettant de traiter un problème particulier :
 - il manque aujourd'hui par exemple des modèles pour étudier de manière satisfaisante les problèmes hydrauliques ou environnementaux dans un contexte d'Après mine : impact réel de l'engorgement sur la stabilité des terrains, problèmes de pollution des nappes, émissions de gaz nocifs, etc.

Incertitude d'expertise

Le degré suivant dans la classification fait référence à l'incertitude d'expertise. Elle correspond à tous les choix, décisions ou actions que l'« *individu expert* » aura à faire ou à prendre tout au long de son processus d'analyse. La notion d'**expérience** est ici prépondérante. Ce type d'incertitude concerne :

- l'identification et la compréhension des phénomènes étudiés par un individu : on pense ici aux problèmes de l'interprétation et de l'analyse des événements passés, aux hypothèses faites quant au domaine de l'étude, aux connaissances propres de l'individu en charge de l'expertise, ou encore à sa capacité à se représenter le problème étudié ;
- le choix de la méthode d'analyse : choix du (ou des) scénario(ii), de la méthodologie de résolution, des outils et modèles à mettre en œuvre pour y parvenir ;
- l'interprétation du résultat, problème d'une nature légèrement différente et qui se pose à la fin du processus d'analyse.

De manière concrète, ces incertitudes résultent de :

- la subjectivité propre à l'individu expert :
 - les croyances propres et les préjugés de la personne, une réelle neutralité restant très difficilement atteignable ;
 - la conscience des enjeux : appréhension face à l'éventuelle responsabilité qui échoira à l'avis rendu ;
 - l'influence socioculturelle du pays d'origine : différentes préoccupations peuvent exister en fonction des contextes des pays.
- la difficulté à définir des scénarii permettant de décrire les conséquences qui peuvent être engendrées par l'existence d'une source de danger, un *objet rocheux* :
 - la complexité des phénomènes étudiés induit la nécessité d'une pluridisciplinarité scientifique (connaissances en mécanique, hydraulique, thermique, modélisation numérique, etc.) pour réaliser une analyse de risque que l'expert peut ne pas posséder ;
 - la difficulté à interpréter certains événements anciens et à mener une rétro-analyse permettant de « remonter » aux phénomènes (figure 1.6) ;
- la difficulté à choisir des modèles, parmi ceux qu'il a à sa disposition, pour traiter le problème. Cette difficulté s'explique par le fait que l'expert est généralement conscient des limites des modèles qu'il utilise et des liens très forts qui existent entre les différents « paramètres » de l'analyse de risque :
 - quel modèle choisir par exemple, pour estimer la résistance d'un pilier de mine ? (on renvoie à l'analyse de la stabilité d'un pilier minier présentée partie 3 du chapitre 2).
- l'interprétation des résultats :
 - que penser du résultat lorsque l'on sait que les modèles ont leurs limites et que les données peuvent être fausses ?
 - comment lire un résultat quantitatif, exprimé par exemple sous forme de probabilité ?



Figure 1.6. Désordre en surface situé dans le périmètre d'une ancienne concession minière : conséquence d'un grattage minier, d'un effondrement de la surface au droit d'une ancienne mine ou d'un autre phénomène d'origine naturelle ou anthropique ?

Incertain de modèle

De la phase d'expertise découle le choix de modèles permettant d'évaluer, d'estimer ou de caractériser le risque. On rappelle que dans le cadre de cette thèse, un *modèle* est considéré comme un **outil** : c'est donc une formule mathématique (expression explicite, formulation implicite ou approximation numérique) permettant une modélisation physique, mécanique ou statistique d'un phénomène, une règle de calcul ou de classement (croisement de paramètres, échelle empirique basée sur de l'expertise brute ou un retour d'expérience, etc.), etc.

L'utilisation de tels outils ne permet néanmoins que d'approcher la réalité et induit une certaine indétermination du résultat de l'analyse. Plus concrètement, l'*incertitude de modèle* concerne :

- leur représentativité, c'est-à-dire le problème de la *simplification* de la réalité ;
- leur fiabilité, c'est-à-dire les « biais » qui résultent du modèle lui-même : problèmes de calibrage, problèmes liés à l'utilisation d'outils numériques, etc.

Les indéterminations liées à l'utilisation de modèles, et qui sont fréquemment rencontrées dans la pratique, concernent :

- les « biais » introduits par la simplification de la réalité à des fins de prédiction :
 - modélisation en deux dimensions, en milieu continu, pas de considération des conditions hydrauliques ou de l'anisotropie, etc. ;
 - utilisation de lois rhéologiques simplificatrices pour des matériaux dont le comportement est complexe.
- la difficulté à caractériser les paramètres permettant de « calibrer » les modèles :
 - problème d'estimation des « limites » (seuils) entre deux classes dans une règle de classification qualitative. Le Guide méthodologique pour l'élaboration des PPRM (INERIS, 2004) propose par exemple de qualifier l'intensité de l'aléa « affaissement progressif » en utilisant un modèle simple : l'effet de mise en pente du sol (notée P , en %) après l'affaissement est estimé et comparé aux différents échelons de l'échelle de l'intensité. Pour $0 < P < 1\%$, l'intensité est « très limitée », pour $1 < P < 3\%$, l'intensité est « limitée », pour $3 < P < 6\%$, l'intensité est « modérée » et enfin pour $P > 6\%$, l'intensité est « élevée ». Malgré tout, il est noté que « *les valeurs-seuils [...] sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas* » ;
 - indétermination sur les paramètres des modèles statistiques, développés par exemple après une rétro-analyse d'événements du passé : les coefficients du modèle linéaire de van der Merwe (2003a) permettant d'évaluer la résistance d'un pilier de charbon en Afrique du Sud en fonction de son élancement sont déterminés à partir de l'analyse d'un nombre limité de ruptures de piliers.
- aux approximations inhérentes à l'utilisation de codes numériques :
 - influence du maillage, du type d'éléments, etc. dans les modélisations par différences ou éléments finis, etc.

Incertitude de données

Enfin, le dernier type d'incertitude concerne les *données* que l'on introduit dans ces modèles. A la différence de l'incertitude de ressources qui est fortement attachée à la notion d'*existence*, l'incertitude de données concerne la notion de **valeur** (numérique, discrète, qualitative, quantitative, etc.). Les valeurs données par les systèmes de classification (RMR, Q, etc.) seront ainsi qualifiées de données. De même, la résistance à la compression uniaxiale d'un échantillon, mesurée en laboratoire, est une donnée, alors qu'en revanche, la résistance d'un pilier de mine, déterminée d'après une formule empirique (van der Merwe (2003a), Salamon et Munro (1967), etc.), est le résultat d'un modèle. On se référera dans ce cas au paragraphe précédent.

Une précision peut également être effectuée sur la différence qui sera faite dans l'ensemble du mémoire entre une *donnée* et un *paramètre de modèle*. La première concerne la valeur d'une dimension de l'objet analysé, d'une de ses caractéristiques géologiques, mécaniques, etc. Elle est de ce fait *spécifique du site d'étude*. Le paramètre de modèle, dont la valeur peut être touchée par une incertitude d'ordre épistémique, concerne quant à lui uniquement le calibrage du modèle. Il est par exemple déterminé par retour d'expérience sur des événements du passé et sa valeur est la même *quelque soit le site d'étude* (et dans le domaine de validité du modèle). Le traitement de l'incertitude touchant ce paramètre fait alors l'objet du paragraphe précédent.

L'incertitude qui affecte les données peut être expliquée par :

- la variabilité naturelle, spatiale et temporelle, des données ;
- le manque de connaissance vis-à-vis de leur valeur, qui oblige à procéder à des estimations ;

- la difficulté à exprimer clairement une valeur, du fait de la présence d' « intermédiaires », instrumentaux ou humains, entre le réel et l'expression des connaissances.

Dans la pratique, les problèmes rencontrés lors de la réalisation d'une analyse de risque sont liés à :

- la variabilité naturelle des données :
 - des mesures en un point ne sont pas représentatives de l'ensemble du site ;
 - certains paramètres évoluent en fonction du temps : les données pluviométriques sont par exemple imprévisibles.
- un manque de connaissance sur les paramètres physiques ou géométriques :
 - caractérisation en général d'une donnée globale par une valeur unique.
- l'utilisation de systèmes de données qualitatifs (RMR par exemple) :
 - problème d'appartenance d'un objet à des classes définies à l'avance ;
 - problème du langage, parfois vague, et d'énoncé de la connaissance.
- l'erreur de mesures :
 - erreur humaine : mauvais report des données, arrondis ;
 - biais de mesure : appareillage ;
- la localisation et la représentation imparfaite des objets :
 - mauvais calage entre les travaux souterrains et la surface. La figure 1.7 présente par exemple les différences, en terme de calage et de représentation, entre les indications d'un plan minier et la réalité du terrain levée par un topographe. Une autre illustration sera donnée dans la suite du mémoire à propos de la localisation des puits miniers dans la région Nord – Pas de Calais.

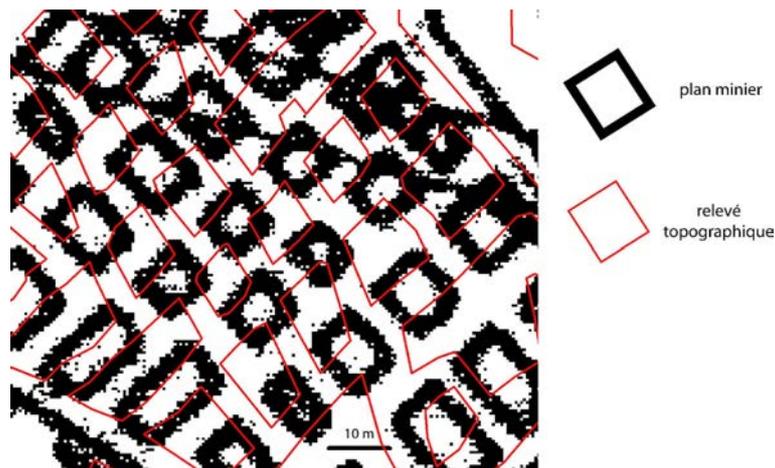


Figure 1.7. Comparaison entre plan minier et relevé topographique réel (données GEODERIS)

2.3 Quelques remarques à propos de la typologie mise en place

Même si on ne peut pas réellement le qualifier de source d'incertitude, le contexte général de l'étude peut avoir un impact important sur le résultat de l'analyse de risque. Le cadre législatif et gouvernemental, la politique d'entreprise (structure privée, publique, etc.), les ressources financières, humaines, en temps, qui sont disponibles pour réaliser l'étude, sont en effet autant de contraintes pouvant influencer la réalisation de l'analyse de risque et donc son issue. Ce contexte s'illustre également dans la formulation même de la question posée par la personne qui sollicite l'expertise, formulation qui peut conditionner la façon dont cette expertise va être menée. Une question trop large, peu claire, non placée dans un contexte précis, pourra induire un avis qui ne répondra pas aux attentes du décideur.

On recommandera alors, même s'il ne fait pas à proprement parler partie du sujet de la thèse, que dans chaque étude, le contexte soit clarifié de manière aussi rigoureuse que possible. Le but de cette clarification et de « mise à plat » du cadre de l'étude est ainsi d'éviter les contestations, définir les responsabilités et justifier du mode de raisonnement qui sera choisi par l'expert.

Après ce premier point, plusieurs remarques importantes peuvent être faites sur la typologie mise en place, avant que des illustrations concrètes et des solutions de prise en compte ne soient présentées dans les prochains paragraphes. Ces remarques concernent principalement le mode de représentation et les objectifs de la classification :

- la typologie présentée sur la figure 1.5 se distingue essentiellement des classifications décrites précédemment par l'imbrication qui existe entre les différentes classes. *Plutôt que d'indiquer une hiérarchie entre les différents types d'incertitudes, cette imbrication veut représenter les liens qui existent entre les différents « paramètres » de l'analyse de risque.* Ces liens, comme on l'a montré précédemment, rendent parfois insuffisant ou non pertinent le traitement poussé d'une certaine classe d'incertitude sans considération des autres classes ;
- cette typologie a pour objectif principal de *cartographier les différentes sources d'incertitude en les replaçant dans le contexte général de l'analyse de risque.* En ce sens, elle doit être regardée en *complément* de la figure 1.3 qui, elle, décrit le cycle de réalisation d'une telle analyse. Elle ne se substitue donc pas à ce schéma 1.3 mais elle permet de caractériser les indéterminations qui existent sur chacun des paramètres intervenant dans la réalisation d'une étude de risque. En tant que cartographie, elle a également une vocation pédagogique importante : elle vise à *illustrer la complexité* des études et à faciliter la communication entre les acteurs de l'analyse des risques, dont le langage et la culture sont parfois différents ;
- par rapport aux autres classifications, la typologie se distingue en définissant les incertitudes de manière différente. Le tableau 1.1 présente les correspondances qui peuvent exister avec ces dernières. On notera encore une fois ici que la matrice d'incertitude présentée par Van der Sluijs et al. (2003) semble assez proche de la typologie développée. Néanmoins cette dernière ne permet pas de tenir compte des liens qui existe entre les différentes classes. De plus, son utilisation pratique est beaucoup plus délicate, son objectif premier n'étant que de visualiser les différentes sources d'incertitudes et d'en identifier les principales afin de mieux pouvoir les traiter par la suite ;
- les quatre types d'incertitudes sont de natures très différentes. On notera notamment que les deux dernières catégories semblent pouvoir être aisément quantifiables et c'est peut-être pour cette raison qu'elles seules sont généralement traitées dans les analyses de risque ;
- les classes définies s'articulent largement autour des quatre « paramètres » de l'analyse de risque présentés dans le paragraphe 1.2. Cette caractéristique, souhaitée lors de la mise en place de la classification, confère la possibilité à la typologie de s'intégrer de manière opérationnelle dans les études, et de permettre ainsi un traitement pratique de l'incertitude dans les analyses de risque.

Tableau 1.1. Correspondances entre la typologie de l'incertitude proposée et certaines classifications existantes

		Typologie de l'incertitude (Figure 1.5)			
		Ressources	Expertise	Modèles	Données
Rogers (2003)	Effet	x		x	
	Cause		x	x	
	Relation de cause à effet	x		x	
UKCIP	Monde réel				x
	Données				x
	Connaissance	x			
	Modèles		x	x	
Matrice d'incertitude	Localisation	x	x	x	x
	Niveau	x	x	x	x
	Nature				x
	Qualité de la base de connaissances	x			
	Subjectivité des choix		x		
Baecher (2003)	Variabilité naturelle				x
	Incertitude épistémique	x		x	x
	Incertitude décisionnelle	x	x		

Ces remarques visent à insister sur le fait que la typologie présentée permet de répondre aux objectifs qu'elle s'était fixée : *cartographier et schématiser* les incertitudes rencontrées dans une analyse de risque, de manière à en indiquer la complexité du traitement et à faciliter la communication entre des acteurs de cultures différentes, *s'adapter au contexte des analyses* en prenant en compte les liens forts qui existent entre les différents « paramètres » de ces dernières, et se présenter sous une forme permettant un *traitement opérationnel direct* des différentes incertitudes. Ce dernier point va être illustré dans la suite.

3 TRAITEMENT DE L'INCERTITUDE : UNE « BOITE A METHODES » POUR L'EXPERT

Des différentes catégories d'incertitudes qui ont pu être présentées sur la figure 1.5, il s'avère aujourd'hui que seules certaines sont réellement prises en compte dans les analyses de risques.

Ce chapitre se donne comme principal objectif de fournir à l'expert en charge de la réalisation d'une étude de risques des méthodes opérationnelles pouvant l'aider à améliorer son diagnostic en intégrant un traitement de chacune des sources d'incertitudes rencontrées.

Lorsque des solutions pratiques ont déjà été proposées dans la littérature, celles-ci seront décrites, replacées dans le contexte du travail de thèse, et leurs avantages et inconvénients seront discutés. Par contre, lorsque la littérature s'avérera insuffisante, des pistes de réflexion et des propositions seront mises en avant.

Les méthodes présentées dans cette partie pourront être utilisées dans un double objectif :

- lorsque cela sera possible, elles essaieront de *prendre en compte* les différentes sources d'incertitudes de manière opérationnelle, au travers par exemple d'une intégration qualitative ou quantitative de l'influence de celles-ci dans les études ;
- lorsque qu'une telle intégration opérationnelle ne sera pas possible, elles permettront d'*illustrer* l'existence d'incertitudes dans les études.

Les méthodes les plus communes, utilisées pour l'intégration de l'incertitude de données, seront décrites dans un premier temps avant que des méthodes plus globales, permettant notamment d'illustrer l'existence d'incertitudes de modèle, d'expertise ou de ressources dans les études, ne soient présentées.

3.1 Incertitudes de données

La plupart des analyses de risques qui se targuent d'intégrer un traitement de l'incertitude se concentrent majoritairement sur ce qui a été appelé l' « *incertitude de données* », c'est-à-dire l'indétermination qui existe sur la valeur exacte du paramètre étudié. De manière à prendre en compte cette incertitude, plusieurs stratégies existent. On les détaillera ici en fonction de la nature de l'indétermination.

Incertitude sur la valeur d'un paramètre

Ce type d'incertitude concerne à la fois la variabilité naturelle (spatiale ou temporelle) des données, le manque de connaissances (difficulté de mesure, inaccessibilité de site, etc.) ainsi que la difficulté à exprimer clairement certaines valeurs du fait par exemple des imprécisions du langage. Dans la pratique, quelque soit sa nature exacte, les techniques utilisées pour prendre en compte ce type d'incertitude sont globalement les mêmes : on trouve principalement des méthodes que l'on qualifiera de « sécuritaires » et celles que l'on appellera « statistiques ».

Méthodes « sécuritaires »

La philosophie générale des méthodes « sécuritaires » consiste à modifier la valeur des paramètres étudiés en leur ajoutant une *marge de sécurité* destinée à envisager un cas moins favorable que le cas réel. Ces marges de sécurité sont généralement définies par expertise ou par retour d'expérience.

De telles marges de sécurité peuvent être introduites *en amont du problème*, c'est-à-dire directement au niveau des données. Ainsi, Dejean (1981) propose par exemple pour déterminer la résistance d'un

matériau, d'utiliser la valeur moyenne mesurée après des essais en laboratoire et d'en retenir une « valeur minorée, telle qu'il y ait moins de 1% du matériau qui la présente réellement » (plusieurs essais en laboratoire sont alors nécessaires pour déterminer les caractéristiques de la fonction de distribution de la résistance). Cette manière de procéder permet ainsi de se « placer nettement en sécurité par rapport à la résistance ultime telle qu'elle est mesurée actuellement ».

Mais la correction peut également intervenir *en aval du problème* en utilisant des « coefficients de sécurité » qui, cette fois, sont censés intégrer les incertitudes existant sur les données d'une manière globale. Comme le présentent Favre et al. (1998), « en géotechnique, on utilise toujours des coefficients globaux qui sont le rapport entre ce qui est favorable (les résistances) et ce qui est défavorable (les sollicitations) : pour se protéger des incertitudes du problème dont on a bien conscience mais que l'on ne chiffre pas, on prend un rapport supérieur à 1 ». Ce coefficient peut varier en fonction de la phase des travaux, des coefficients plus faibles pouvant être tolérés pour des travaux à courte durée de vie (phase de travaux par exemple), ou des enjeux du site, avec des valeurs plus importantes à proximité d'habitations ou d'infrastructures routières.

Méthodes « statistiques »

Plutôt que de travailler avec une valeur déterministe majorée ou minorée, les méthodes « statistiques » proposent de caractériser chaque donnée sous forme d'une fonction de distribution, en définissant la nature de la distribution et en déterminant ses différents modes (au sens statistique du terme) : moyenne, variance, etc. Une telle fonction de distribution permet d'estimer la tendance centrale de la donnée étudiée et de caractériser la dispersion autour de cette valeur.

Une méthodologie pouvant être appliquée opérationnellement pour définir de telles fonctions statistiques est présentée dans les travaux de Rommens et al. (2002) dans le contexte des études du Groupe Radio-écologique du Nord-Cotentin (GRNC), qui s'intéresse à étudier les risques sanitaires associés aux rejets radioactifs et chimiques des installations nucléaires du Nord-Cotentin (figure 1.8). Cette méthodologie permet de prendre en compte le fait que l'information n'est pas toujours aisément disponible sur site.

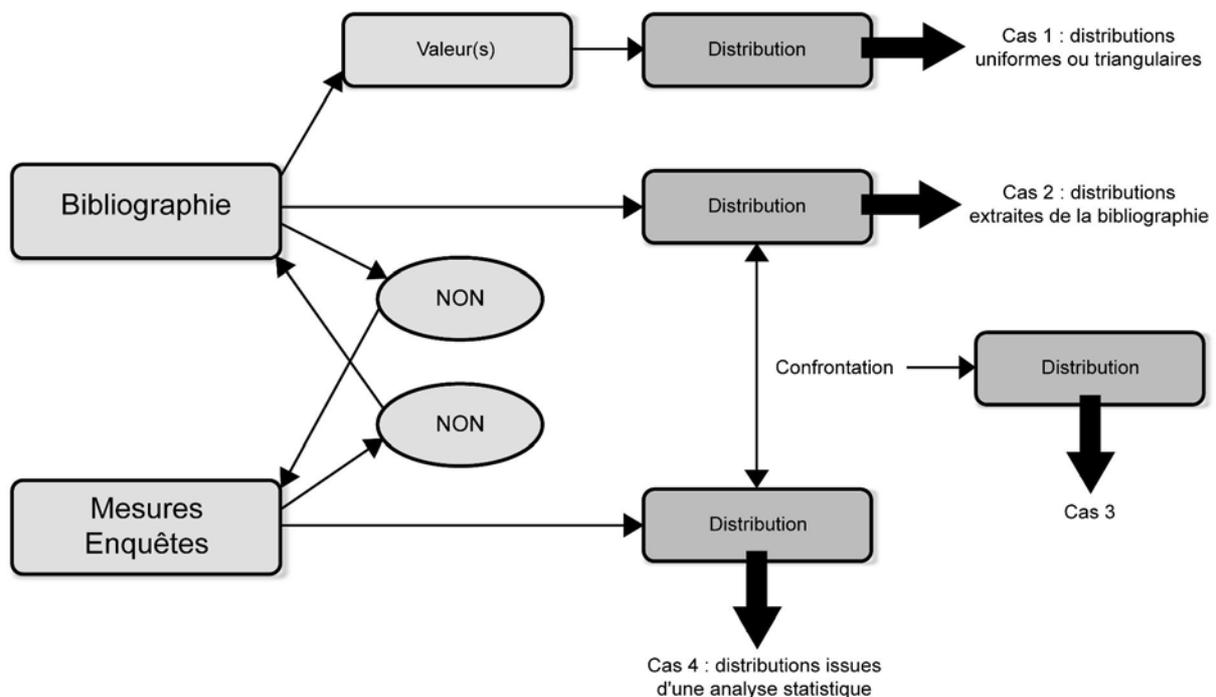


Figure 1.8. Méthode de construction des distributions de valeurs pour les paramètres (in Rommens et al., 2002)

Quatre cas y sont distingués :

- lorsque des mesures spécifiques existent, les valeurs peuvent être traitées statistiquement et des distributions peuvent y être ajustées (figure 1.8 – cas 4). Un tel cas est malheureusement très rare en réalité, puisqu'il nécessite un grand nombre de données issues de tests effectués in situ, caractérisant les conditions du terrain. On peut préciser que pour pallier le problème de l'incertitude systématique pouvant survenir du fait de l'utilisation d'une seule méthode de test, il s'avère important de diversifier ceux-ci. Comme exemple d'étude figurant parmi les plus abouties de ce point de vue, on citera Kim et Gao (1995) qui ont analysé 156 essais laboratoire et in situ de manière à caractériser statistiquement les distributions des modules de Young et de Poisson, ainsi que des résistances à la compression et à la traction d'un basalte aux Etats Unis.

Par contre, lorsque les données de terrain ne sont pas disponibles, comme c'est malheureusement le cas le plus fréquent, il est nécessaire de recourir à du *savoir « générique »*, issu en général de la littérature ou de l'expertise. Différents cas de figure peuvent se présenter :

- des études précises ont été réalisées par le passé et sont présentées dans la littérature (figure 1.8 – cas 2). Dans ce cas, les résultats établis peuvent alors être utilisés directement si leur validité au cas d'étude est avérée. Phoon (2004) présente par exemple quelques résultats (moyenne et coefficient de variation) valables pour des sols, selon leurs caractéristiques, leur origine et la nature du test effectué ;
- la bibliographie est elle-aussi pauvre et il faut alors essayer, par jugement d'expert, d'identifier des valeurs minimales, maximales et vraisemblables et de leur associer des distributions simples, uniformes, triangulaires ou normales (figure 1.8 – cas 1) :
 - Duncan (1999) présente par exemple la « règle des 3 sigma » qui combine valeur moyenne, écart-type et écart maximaux par rapport à la moyenne, et peut être utilisée pour caractériser approximativement la forme de la distribution lorsque quelques données sont disponibles ;
 - Favre (2004), dans une étude probabiliste de cartographie de mouvements de terrain, utilise des valeurs « forfaitaires » pour estimer les coefficients de variation de plusieurs variables : 2,5% pour les paramètres géométriques, respectivement 15, 30 et 7% pour l'angle de frottement, la cohésion et la masse volumique, et des distances de corrélation spatiale valant 2 m verticalement et 15 m horizontalement ;
 - dans un même esprit de mise à disposition de valeurs forfaitaires, l'US Army Corps of Engineers (1999) ou Duncan (1999) établissent un résumé de valeurs typiques des coefficients de variation de plusieurs paramètres utilisés en géotechnique et donnent différentes recommandations pour l'utilisation de ces valeurs.

Enfin, un cas très intéressant dans la pratique (figure 1.8 – cas 3) est celui où il est possible de combiner valeurs spécifiques provenant du site d'étude et données génériques issues de la littérature pour définir des distributions de probabilités pour les paramètres d'entrée.

Une méthode « mixte »

Plutôt que de recourir à ces méthodes relativement « courantes » dans la pratique, Duzgun et al. (2002) présentent une approche différente destinée à pallier les problèmes du manque de données et de la différence entre résultats de laboratoire et réalité in situ. Cette méthode combine en fait implicitement l'approche « sécuritaire » et l'approche « probabiliste » puisque la marge de sécurité est ici caractérisée sous la forme d'une fonction de distribution. Chaque donnée X peut alors être exprimée sous la forme d'un produit :

$$X = N_0 N_x \hat{X} , \quad (\text{Eq. 1.1})$$

où \hat{X} est une variable aléatoire (estimation des propriétés moyennes de la roche compte tenu des variabilités spatiales), N_0 , un facteur de correction de l'incertitude statistique liée au manque de données et N_x un facteur de correction comptant pour les incertitudes systématiques liées aux différences entre résultats obtenus en laboratoire et réalité in situ (dues aux facteurs d'échelle, à l'anisotropie du milieu, aux conditions hydrauliques, etc.). Chaque terme de l'équation peut être

caractérisé par une moyenne et un écart-type. Un travail bibliographique mené par les auteurs indique que les facteurs N_0 et N_x ont des moyennes généralement comprises entre 0,6 et 2 pour un coefficient de variation variant entre 1 et 15%. Les formes de distribution de ces facteurs sont plus difficiles à obtenir du fait du manque de données et les auteurs proposent de recourir à des distributions simples (uniformes, triangulaires, etc.) ou à des jugements d'expert.

Plusieurs remarques à propos de ces méthodes

L'un des problèmes auquel l'expert doit souvent faire face dans la pratique concerne le choix des fonctions de distributions. Cette incertitude pourrait être assimilée à une incertitude d'expertise puisqu'elle repose en grande partie sur « l'individu-expert ». On la considérera malgré tout dans cette thèse comme une incertitude de données : elle apparaît en effet être liée aux valeurs des paramètres et concerne en fait l'incertitude sur la caractérisation de l'incertitude de données. Très peu d'études s'intéressent à cet aspect de manière opérationnelle. On renverra alors au prochain chapitre où une méthode pratique est proposée pour étudier l'influence du choix de différentes fonctions de distributions pour caractériser les données. On renverra également au texte de Durville (2004) dans lequel une comparaison a été effectuée entre quatre lois de distribution « plausibles » caractérisant l'élancement d'un bloc dans un calcul de trajectographie.

La caractérisation des valeurs des paramètres apparaît également, à l'instar de celle de la forme des fonctions de distribution, être une étape délicate de l'analyse (figure 1.8 – cas 1). En plus des méthodes présentées précédemment (règle des 3 sigma, utilisation de valeurs forfaitaires, etc.), le jugement d'expert peut également être utilisé pour définir ces différentes valeurs. L'expérience et le bon sens peuvent ainsi permettre de définir des bornes pour certains paramètres : on peut par exemple souvent considérer que, compte tenu des techniques de l'époque, les galeries des anciennes mines ont été exploitées à hauteur d'homme, et que leur dimension maximale est donc de l'ordre de quelques mètres, etc.

Baecher et Christian (2003) soulignent néanmoins certaines difficultés liées à l'utilisation de l'expertise pour l'estimation de ce qu'ils appellent des « probabilités subjectives ». Ils proposent diverses techniques qui peuvent être mises en œuvre pour une estimation correcte de celles-ci, notamment la constitution d'un groupe d'experts. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe concernant l'incertitude d'expertise, à propos de sujets plus généraux que la caractérisation des indéterminations sur les données, notamment le « processus » de l'expertise. Concernant l'estimation directe par un expert de la valeur prise par une donnée, Raab et Brosch (1996) présentent une étude intéressante dans laquelle est examinée l'influence de l'expérience individuelle et de la subjectivité de la personne réalisant l'analyse sur le résultat final. Pour cela, 43 géologues (18 expérimentés et 25 étudiants) ont estimé plusieurs paramètres sur le terrain (paramètres de discontinuité de fractures, de résistance de roches, de lithologie). Il a pu être montré que quelque soit l'expérience du géologue considéré, les valeurs des paramètres étaient généralement surestimées par rapport à leur valeur vraie. Il a également pu être montré que, même si une réelle distinction entre les deux groupes d'expérience différente ne pouvait pas être obtenue de manière statistique du fait du faible nombre d'individus considérés dans l'étude, la stratégie d'estimation des paramètres n'était malgré tout pas la même pour les deux groupes de géologues.

De manière à préciser certaines connaissances qui auront été estimées de manière générale d'après la littérature ou par jugement d'expert, un traitement bayésien de l'incertitude peut être réalisé. Des données provenant du site d'étude peuvent être intégrées à l'analyse pour réviser les résultats « a priori » et permettre d'obtenir des distributions « a posteriori ». La figure 1.9 présente la méthodologie générale d'un tel traitement bayésien. De nombreux exemples sont présentés dans l'excellent ouvrage de Bernier et al. (2000) à propos de la gestion des risques environnementaux.

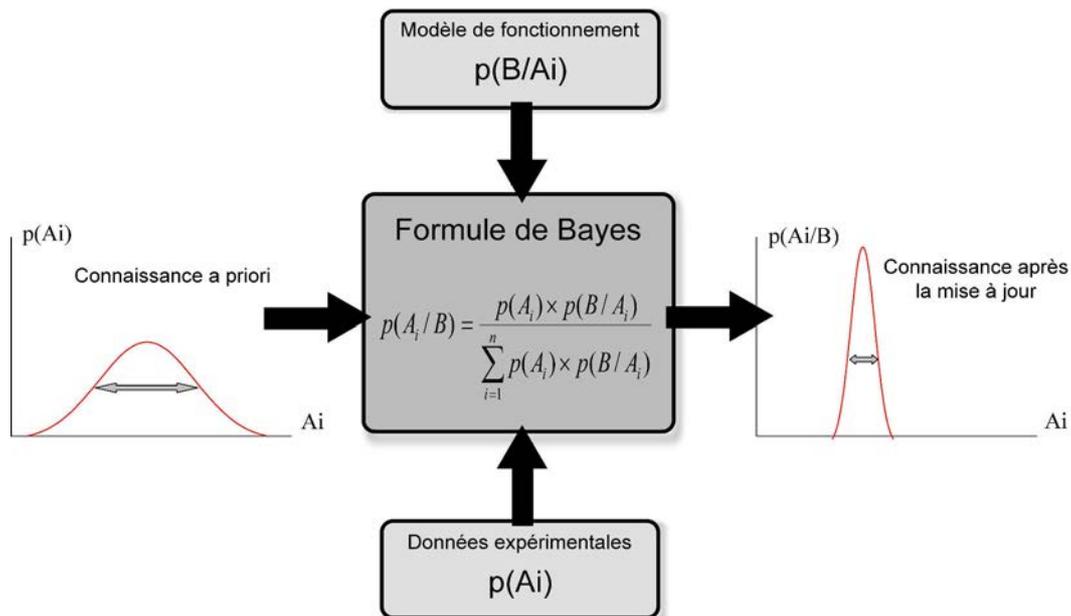


Figure 1.9. Schéma du traitement bayésien de l'incertitude pour une précision des résultats

Incertitude sur la localisation des ouvrages

L'incertitude sur la localisation des ouvrages, que nous considérons comme incertitude de données, peut être prise en compte d'une manière assez similaire à l'incertitude sur la valeur des paramètres.

Lorsque les données sont nombreuses, l'incertitude peut être estimée de manière « statistique ». Dans la région Nord – Pas de Calais par exemple, de nombreux anciens puits miniers existent et peuvent encore engendrer des problèmes d'instabilité. La position exacte de 92 d'entre eux a pu être mesurée sur le terrain par GPS et a été comparée à la position indiquée sur les plans miniers à disposition. Une loi statistique (loi exponentielle) a été mise en place pour caractériser l'écart entre la position réelle et son estimation (figure 1.10). Cette loi a ensuite pu être utilisée pour déterminer de manière probabiliste l'incertitude de positionnement des puits non retrouvés sur le terrain : le puits a par exemple 96 % de chances de se trouver dans un rayon de 20 mètres autour de la position indiquée sur plan.

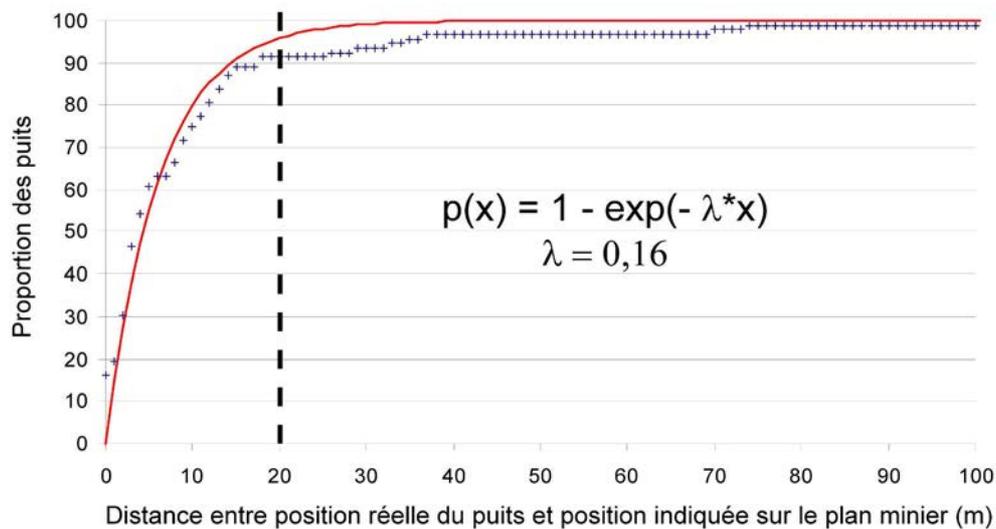


Figure 1.10. Caractérisation de l'incertitude de localisation de puits miniers non visibles sur le terrain dans la région Nord-Pas de Calais (données INERIS)

Lorsque les données sont moins nombreuses, une telle caractérisation statistique n'est plus possible, et plutôt que la littérature, on fait généralement appel dans ce cas à l'expertise et au jugement d'expert, qui permettent, peut-être mieux, de prendre en compte la réalité du terrain. Des « marges de confiance » sont donc utilisées pour intégrer l'incertitude. Cette technique est notamment utilisée dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Miniers dont on reparlera dans le prochain chapitre. Dans la méthode Waihi présentée précédemment, « une zone tampon de + 5 mètres a été utilisée sur chaque site de manière à prendre en compte l'incertitude géographique dans la localisation de l'ouvrage souterrain » (Richards et al., 2002). En France, et plus précisément en Seine Maritime où d'importants problèmes liés aux effondrements de marnières existent, un « périmètre de sécurité appliqué à chaque indice d'origine anthropique est fixé, de façon forfaitaire, en prenant un rayon de 60 mètres » (Tritsch, 2004).

Dans le cas de la stabilité des pentes rocheuses, notamment pour le problème des chutes de blocs, le problème de l'incertitude sur la localisation n'est pas tant lié à la position « initiale » du bloc qui peut tomber, qu'à sa « destination de chute ». Pour estimer celle-ci, des modèles (trajectographie par exemple) doivent être utilisés et c'est alors plus à de l'incertitude de modèle qu'à de l'incertitude de données que l'on a à faire.

A propos de la variabilité spatiale

A coté du problème de la localisation, se pose également le problème de la variabilité spatiale des données. Dans la majeure partie des études de risque, une valeur unique est utilisée pour caractériser chacun des paramètres d'un site d'étude. Ceci s'explique en grande partie par l'ampleur des secteurs étudiés (généralement plusieurs hectares) qui empêche une analyse très « fine » de la zone dans un laps de temps raisonnable. Malgré tout, la réalité (la géologie par exemple) est différente en chaque point de la zone étudiée et caractériser cette variabilité spatiale peut se révéler d'une grande importance pour certains problèmes, notamment l'étude des tassements ou des stabilités de pente.

Cette variabilité spatiale est difficilement appréhendable puisque seules quelques mesures ponctuelles de valeurs de paramètres sont généralement disponibles. Différentes techniques existent pour tenter de la représenter :

- la géostatistique permet de modéliser la variabilité spatiale de diverses données ponctuelles au travers d'un outil appelé *variogramme* et d'estimer la répartition spatiale de ces données sur un secteur de grande taille en utilisant la méthode du *krigeage*. Cette méthode a été originellement développée pour l'estimation des teneurs en minerai de blocs miniers à exploiter et sa théorie a été formulée dans les années 1960 par Matheron (1962) ;
- la théorie des champs aléatoires consiste à définir pour chacune des données variables dans l'espace des « distances d'auto-corrélation spatiale » qui permettent de représenter les liens qui peuvent exister entre les valeurs de certains points locaux proches les uns des autres, puis à intégrer ces distances dans les modèles mécaniques. Cette théorie est notamment utilisée pour les problèmes de tassement (Fenton et Griffiths, 2002 ; Kuo et al., 2004) ou pour l'analyse de la résistance à la compression de piliers miniers (Griffiths et al., 2002).

3.2 A propos de la propagation des incertitudes de données

Nous avons appelé *incertitude de données* l'indétermination sur la valeur d'un paramètre ou sur la localisation d'un ouvrage. Traiter cette incertitude revient à caractériser la valeur de ce paramètre d'une manière qui permet d'intégrer cette indétermination. Ainsi caractérisé, le paramètre sera ensuite intégré dans un modèle (mécanique, géométrique, etc.) permettant d'estimer l'aléa ou le risque. La propagation de l'incertitude de la donnée au sein de ce modèle apparaît généralement délicate. Elle fait l'objet de cette partie.

Le problème de la propagation est difficile à aborder puisque, pour ce faire, cette dernière nécessite le recours à une *technique* particulière. Or, plusieurs moyens peuvent être utilisés, et de la même manière que nous nous étions interrogés sur la nature de l'incertitude liée au choix d'une fonction de distribution pour caractériser une donnée, nous pouvons également nous demander ici comment caractériser l'indétermination liée au moyen utilisé pour propager l'incertitude de données. Nous avons choisi dans cette thèse de considérer sous le terme d'*incertitude de modèle* uniquement l'indétermination sur les moyens d'évaluer l'aléa ou le risque, c'est-à-dire les modèles géométriques, mécaniques, qui font intervenir des paramètres caractérisant le site concerné par l'analyse ou le phénomène étudié, et qui trouvent leur place dans le cycle présenté sur la figure 1.2.

En ce sens, les incertitudes qui existent sur le choix ou la fiabilité des méthodes permettant de propager l'incertitude sur les données ne sont donc pas à proprement parler des *incertitudes de modèle*. Ces méthodes ont en effet uniquement vocation à être couplées à des modèles géométriques, mécaniques, etc. afin d'exprimer le résultat de ceux-ci sous une forme qui reflète l'indétermination des données introduites.

Les tableaux référencés de 1.2 à 1.8 présentent succinctement différentes « techniques » existantes pour propager les incertitudes de données. Leurs points forts et leurs points faibles sont également identifiés et des références sont fournies dans lesquelles le lecteur pourra trouver des exemples d'applications pratiques utilisant ces dernières.

Tableau 1.2. First Order Second Method (FOSM), méthode des seconds moments de premier ordre

Objectif :	Estimer la moyenne et la variance du résultat d'un modèle	
Principe :	Développer la fonction étudiée (facteur de sécurité, etc.) sous forme d'une série de Taylor. La moyenne et la variance peuvent être déterminées à partir des coefficients de ce développement.	
Points forts :	(1) méthode calculatoire simple (2) utilisation facile (3) facilement implémentable dans un code de calcul (4) ne nécessite aucune connaissance sur la loi de distribution des variables d'entrée	Points faibles : (1) valable uniquement si les termes de second ordre (ou plus) sont négligeables (2) ne permet pas de prendre en compte les corrélations spatiales qui peuvent exister entre les paramètres (3) ne fournit aucune indication sur la loi de distribution de la variable de sortie (4) lourde lorsque des corrélations existent entre les variables d'entrée
Exemple d'application :	<i>domaine de la stabilité des versants rocheux</i> : méthode des groupes-clefs probabilistes : Yarahmadi-Bafghi et Verdel (2004), Liu et al. (2004)	

Tableau 1.3. Point Estimate Method (PEM), méthode d'estimation discrète par points

Objectif :	Estimer la moyenne et la variance du résultat d'un modèle	
Principe :	Le résultat est calculé pour plusieurs points d'échantillonnage qui permettent de discrétiser les distributions des variables d'entrée (Rosenblueth, 1975 ; Harr, 1987). Les moments (moyenne, variance) peuvent alors être estimés algébriquement.	
Points forts :	(1) méthode calculatoire simple (2) utilisation facile (3) facilement implémentable dans un code de calcul (4) ne nécessite aucune connaissance sur la loi de distribution des variables d'entrée	Points faibles : (1) valable uniquement si la fonction étudiée consiste en des sommes et/ou produits de variables aléatoires corrélées ou non (2) ne permet pas de prendre en compte les corrélations spatiales qui peuvent exister entre les paramètres (3) ne fournit aucune indication sur la loi de distribution de la variable de sortie
Exemple d'application :	<i>domaine de la stabilité des versants rocheux</i> : Christian et Baecher (2002) <i>domaine minier</i> : exemple présenté dans le chapitre 2	

Tableau 1.4. Simulations de Monte Carlo

Objectif :	Estimer la moyenne, la variance et la forme de la distribution	
Principe :	(1) tirer une valeur aléatoire dans la fonction de distribution de chaque paramètre d'entrée, (2) calculer la valeur de sortie du modèle correspondante, (3) réitérer le procédé.	
Points forts :	(1) utilisable pour n'importe quel type de fonction (2) principe simple à implémenter (3) permet d'obtenir la fonction de distribution de la variable de sortie	Points faibles : (1) peut être lourde en temps de calcul
Exemples d'application :	<i>Domaine des chutes de blocs et de la stabilité de versants rocheux</i> : El-Ramly et al. (2003), Park et West (2001), Wang et al. (2000) <i>Domaine minier</i> : Griffiths et al. (2002) à propos de l'étude de la résistance à la compression d'un pilier minier. Un exemple est également proposé dans le chapitre 2.	

Tableau 1.5. Arbres des causes et arbres des conséquences

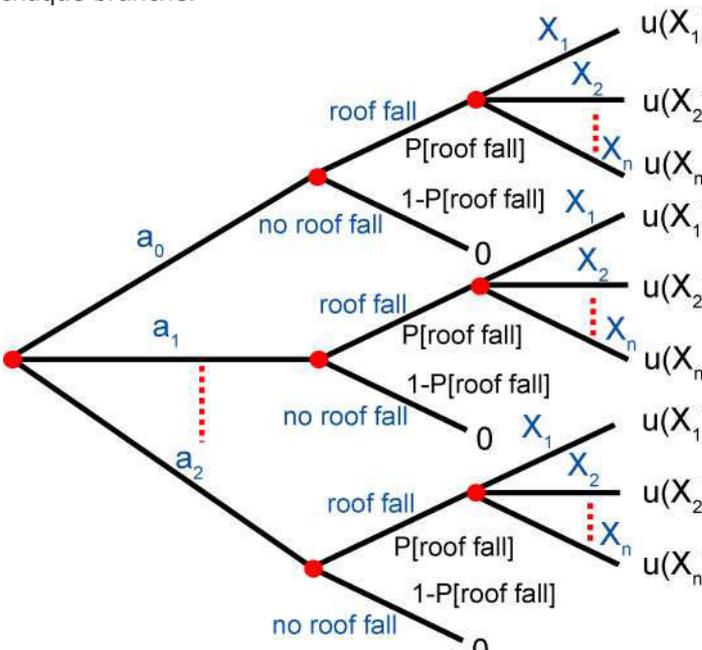
<p><u>Objectifs :</u></p>	<p>Représenter de manière séquentielle et graphique les évènements extérieurs qui peuvent conduire à la défaillance (pour les arbres des causes) ou qui peuvent résulter d'une rupture (pour les arbres des conséquences) d'un des éléments du système Estimer de manière probabiliste la probabilité de l'évènement redouté</p>	
<p><u>Principe :</u></p>	<p>A chaque branche de l'arbre est assignée une valeur de probabilité (par jugement d'expert, analyse statistique, etc.). Le résultat d'un arbre de conséquences est ainsi constitué des probabilités de défaillance pour les différents scénarios choisis, probabilités qui sont en fait égales au produit des différentes valeurs assignées à chaque branche.</p>  <p style="text-align: right;"><i>in Duzgun et Einstein (2004)</i></p>	
<p><u>Points forts :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> (1) représentation graphique qui permet une bonne visualisation des évènements menant à/suivant la rupture et des moyens de leur contrôle (2) représentation graphique qui permet une meilleure communication entre les différents acteurs de l'analyse de risque (3) permet de quantifier une probabilité d'occurrence d'un aléa 	<p><u>Points faibles :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> (1) implique la nécessité de schématiser la succession des phénomènes de manière séquentielle (et donc de parfaitement connaître ceux-ci) (2) difficulté d'assigner des probabilités d'occurrence à chaque évènement 	
<p><u>Exemples d'application :</u></p>	<p><i>Domaine minier :</i> Duzgun et Einstein (2004) <i>Domaine des chutes de blocs :</i> arbres de défaillance (Singh et Vick, 2003)</p>	

Tableau 1.6. Réseaux complexes / réseaux bayésiens et réseaux probabilistes

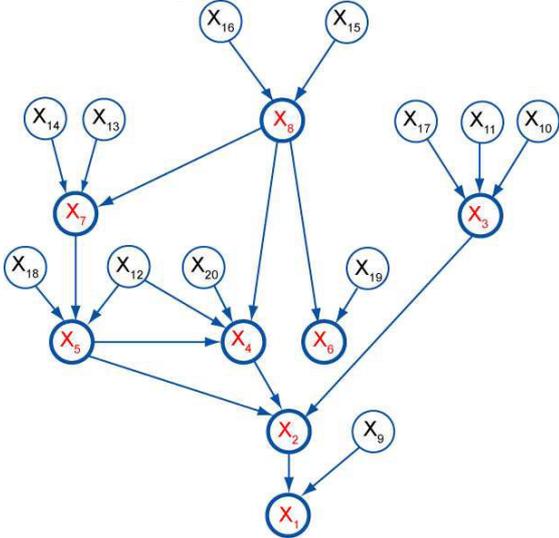
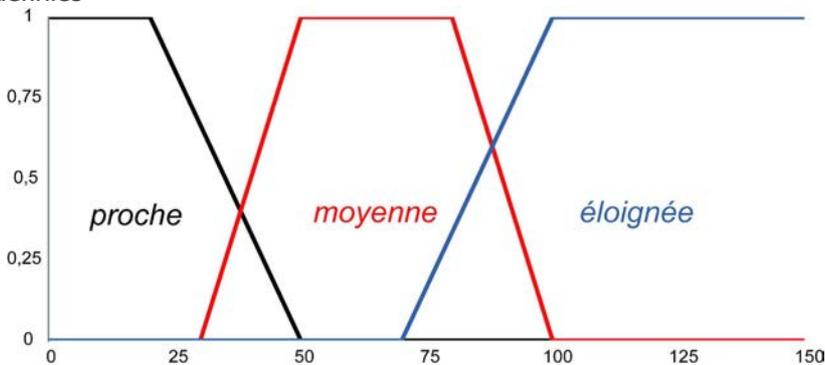
Objectif :	Représenter le système d'étude et les liens qui existent entre ses différents constituants sous forme d'un réseau Estimer de manière probabiliste la probabilité de l'événement redouté, i.e. la défaillance d'élément particulier de ce système	
Principe :	(1) décrire le système sous forme d'un ensemble de variables et d'un ensemble de liens entre ces variables, (2) assigner à chaque variable aléatoire une fonction de distribution, (3) propager l'incertitude au travers du réseau	
	 <p style="text-align: right;"><i>d'après Castillo et al. (1998)</i></p>	
Points forts :	(1) langage graphique intéressant pour communiquer sur le risque et les incertitudes (2) facilité de l'analyse des relations de cause à effet dans les systèmes complexes	Points faibles : (1) nécessité de schématiser les relations entre tous les éléments d'un système (2) difficulté d'assigner des lois de distribution à chacune des variables (3) utilisation encore peu courante dans le domaine des aléas liés aux objets rocheux
Exemple	<i>Domaine des risques sur des structures de génie civil : Castillo et al. (1998)</i>	
d'application :	<i>Domaine du risque sismique : réseau bayésien probabiliste : Buchheister et al. (2006)</i>	

Tableau 1.7. Plans d'expérience et surfaces de réponse

Objectif :	Conduire le plus rapidement possible aux résultats espérés, en essayant d'éviter des expériences inutiles, grâce à la constitution d'un « modèle » du modèle utilisé Permettre la propagation des incertitudes, la réalisation d'analyses de risque sous une forme probabiliste, mais aussi l'optimisation de systèmes ou l'inversion de problèmes plus vastes	
Principe :	un plan d'expérience correspond à une liste des différentes combinaisons des niveaux de facteurs pour lesquels la réponse du modèle doit être observée. une surface de réponse correspond à l'ensemble des réponses correspondant à tous les points du domaine	
Points forts :	(1) réduction importante du temps de calcul ou de mesures sur site (2) permet la prise en compte des corrélations entre paramètres	Points faibles : (1) constitue une « approximation » du modèle (2) peut nécessiter un lourd travail de recherche en amont de la réalisation de l'étude
Exemple	<i>Domaine des risques liés à l'Après mine : Verdell et Abdallah (2007)</i>	
d'application :	<i>Domaine des risques liés aux ouvrages souterrains : Badea et Gipouloux (2005)</i>	

Tableau 1.8. Logique floue

<u>Objectif :</u>	Traiter des connaissances vagues, imprécises, mal décrites et n'appartenant pas à des classes aux frontières bien définies (Zadeh, 1965)	
<u>Principe :</u>	<p>L'utilisation de la logique floue se fait au travers du traitement d'ensembles et sous-ensembles flous. De manière à effectuer des calculs sur les sous-ensembles flous, le moyen le plus utilisé est le découpage en α-coupes pour lesquelles des règles de calcul ont été définies</p> 	
<u>Points forts :</u>	<p>(1) permet de travailler avec des connaissances imparfaites de situations du réel, connaissances qui sont acquises par des intermédiaires instrumentaux ou humains (2) « la logique floue est le seul cadre dans lequel puissent être traitées des incertitudes qui ne peuvent l'être par des modèles ou des méthodes statistiques, imprécisions qui ne peuvent pas être traitées par des modèles statistiques, et qui autorise également le traitement de certaines incomplétudes » (El-Shayeb (1999), citant Bouchon-Meunier, 1995) (3) offre une méthode de représentation des informations qualitatives très naturelle</p>	<p><u>Points faibles :</u> (1) utilisation délicate de données floues dans des ensembles flous (2) defuzzification des ensembles flous nécessaires à certains types de calculs, qui fait perdre la connaissance du caractère incertain (une solution est proposée par El-Shayeb (1999))</p>
<u>Exemple d'application :</u>	Domaine des risques « mouvement de terrain » : El-Shayeb (1999)	

Chacune de ces techniques permet de propager l'incertitude qui touche les données d'un problème au sein d'un modèle. Mais, même si elles permettent d'obtenir des résultats très satisfaisants, elles contiennent en leur sein une part d'indétermination. Ces techniques ne constituent en effet que des « approximations » mathématiques ou numériques.

Néanmoins, très peu d'auteurs se sont interrogés sur cette nature d'incertitude liée au choix de la méthode de propagation à utiliser dans une étude. La comparaison entre les résultats donnés par les diverses méthodes peut être une solution à ce problème. Même si elle ne permet pas une réduction de l'incertitude, elle peut souligner l'importance (ou non) du choix d'une méthode sur le résultat. Husein Malkawi et al. (2000) étudient ainsi l'influence respective du choix des techniques FOSM ou Monte Carlo sur le résultat d'une analyse de stabilité de pente. Un exemple concernant la stabilité d'un pilier minier sera également présenté dans la seconde partie de la thèse.

3.3 Incertitudes de modèle

L'approche la plus efficace pour exprimer l'*incertitude de modèle* serait de pouvoir réaliser une comparaison entre les sorties de modèles et la réalité, grâce par exemple à un retour d'expérience. Azzouz et al. (1983) (cités par Baecher et Christian (2003)) ont par exemple, pour un problème de stabilité de pente, utilisé une base de données de 18 cas de rupture de manière à déterminer les incertitudes liées à la réalisation d'une analyse en deux dimensions (alors que la rupture réelle est en 3D), à la difficulté d'identifier la surface de rupture la plus critique (celle où le facteur de sécurité est le plus faible) et celles liées aux approximations numériques. Chacune de ces incertitudes a ensuite été caractérisée « statistiquement » par une moyenne et un écart-type.

De telles analyses sont néanmoins rarement possibles dans le domaine des risques liés au sol et au sous-sol. Ceci s'explique notamment par la difficulté de collecter suffisamment de données de terrain pour pouvoir les comparer aux résultats de modélisation (Husein Malkawi et al., 2000). Des techniques alternatives doivent alors être mises en œuvre pour tenter de saisir l'incertitude de modèle. Utiliser une « marge de sécurité » en amont d'un calcul destiné à évaluer l'aléa permet par exemple, en plus de prendre en considération l'*incertitude de données* comme nous l'avons présenté précédemment, de traiter également celle liée à l'utilisation d'un *modèle* pour représenter la réalité. Comme le présentent Favre et al. (1998), « on peut dire que l'on y [dans cette marge de sécurité] met la somme des ignorances ». On renverra alors aux commentaires qui ont été faits précédemment.

Les techniques statistiques présentées pour la prise en compte des incertitudes de données peuvent, elles aussi, être mises en œuvre pour faire face au problème de l'indétermination des *paramètres de modèle*. On rappelle que ceux-ci permettent de calibrer les modèles et qu'à la différence des *données*, ils ne sont pas spécifiques du site d'étude. Les paramètres ayant été déterminés par une rétro-analyse menée sur des événements du passé ou par un modèle statistique (régression linéaire, etc.) sont par exemple des paramètres de modèle. Aussi, de manière à intégrer dans l'étude l'indétermination qui résulte du fait qu'ils n'ont été évalués qu'à partir d'un nombre limité de données, ces paramètres peuvent alors être décrits, plutôt que par une valeur unique, sous forme de fonction de distribution.

Dans un de leurs articles sur le calcul de stabilité des pentes rocheuses, Husein Malkawi et al. (2000) proposent d' « évaluer l'*incertitude de modèle* en comparant les performances relatives de plusieurs méthodes simplifiées de calcul de stabilité de pente à celle considérée comme la plus rigoureuse ». Plutôt que de comparer les sorties de modèles (ici méthode ordinaire des tranches, modèle de Bishop ou modèle de Janbu) à la réalité, ils les comparent au résultat du modèle le plus complet (ici la méthode de Spencer) en utilisant deux critères : la moyenne arithmétique des erreurs relatives absolues (RMAE) et la moyenne quadratique des erreurs relatives (RRMSE) (équation 1.2), telles que :

$$RMAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |e_i| \quad \text{et} \quad RRMSE = \left[\sum_{i=1}^M \frac{e_i^2}{M} \right]^{1/2}, \quad (\text{Eq. 1.2})$$

où les e_i représentent les différences relatives entre le $i^{\text{ème}}$ quantile de distribution de probabilité obtenue en utilisant une méthode d'analyse de stabilité et celui obtenu en utilisant la méthode de Spencer, M représentant le nombre de quantiles évalués.

Cette méthode est intéressante par son originalité. Cependant, elle ne semble pas permettre réellement de traiter l'*incertitude de modèle* telle que nous l'avons définie. Elle permet en effet uniquement de comparer les influences que le choix d'un modèle spécifique aura sur le résultat de l'analyse. En cela elle apparaît peut-être plus comme une solution au traitement de l'*incertitude d'expertise*.

Plutôt qu'une simple comparaison entre les résultats proposés par les modèles, l'intégration de ces différents modèles au sein de la même analyse peut permettre de prendre en considération cette incertitude de modèle. L'indétermination sur le résultat de l'étude serait ainsi expliquée par l'utilisation conjuguée de ces divers modèles, et non plus par celle d'une unique technique. Le résultat de l'étude se trouverait alors exempté du problème de l'utilisation d'un unique modèle et de ses indéterminations

et il exprimerait clairement l'incertitude apportée par l'utilisation d'outils pour représenter la réalité, i.e. ce que nous avons appelé *incertitude de modèle*.

Pour réaliser cette intégration conjuguée de divers modèles, ceux-ci (qu'ils soient mécaniques, physiques, géométriques, etc.) pourraient être considérés à la manière des données, c'est-à-dire choisis aléatoirement parmi l'ensemble des possibilités : on utiliserait par exemple soit le modèle 1, soit le modèle 2, etc. pour exprimer tel ou tel paramètre. Des simulations de Monte Carlo permettraient ensuite d'intégrer les différentes influences de chacun d'entre eux au sein de l'analyse. Des exemples concrets d'applications seront présentés dans les chapitres 2 et 3 de cette thèse.

3.4 Incertitudes d'expertise

Il semble relativement difficile de caractériser les *incertitudes d'expertise* de manière quantitative. Les travaux de Husein Malkawi et al. (2000) tels que présentés précédemment, ou plus généralement la comparaison entre plusieurs méthodes, peut être un moyen puissant pour illustrer l'incertitude liée au choix d'un modèle spécifique par un expert. On rappelle bien qu'on parle ici de l'indétermination qu'à l'expert à sélectionner tel ou tel outil dans son analyse, plutôt que des différences entre les sorties du modèle et la réalité.

Concernant la subjectivité propre à l'individu en charge de l'analyse de risque, la mise en place d'une méthodologie de résolution du problème ou l'interprétation des résultats par un expert, plusieurs stratégies peuvent exister même si elles restent dans la pratique rarement utilisées. L'incertitude peut par exemple être limitée par l'intégration d'autres experts dans l'étude. De manière générale, cette intégration peut se faire sous forme de *collégialité* ou de *confrontation* :

- dans le premier cas, le travail en commun permet un enrichissement de l'analyse par les connaissances propres à chacun des membres d'un comité d'experts, limitant ainsi les subjectivités individuelles, les croyances personnelles ou même certains oublis qu'un expert seul aurait pu faire. Un comité international permettra de lisser les influences propres au pays et à la culture d'origine, alors qu'un comité pluridisciplinaire (dans les domaines scientifiques) pourra amener une réflexion plus complète et apte à traiter un problème complexe. Toutefois, la collégialité pose la question de la représentativité des points de vue de ses membres et ne permet pas de totalement supprimer la part de subjectivité d'une expertise. Elle pose aussi le problème des avis minoritaires et des désaccords : le comité d'expert doit-il rechercher un consensus ou dégager des thèses qui s'affrontent ? Ce débat n'est pas du ressort de cette thèse et est fortement conditionné par le *contexte* de l'étude ;
- dans le second cas, les résultats obtenus par un expert peuvent être confrontés au jugement d'autres spécialistes : on est alors dans le cas d'une *tierce-expertise*, ou d'une *contre-expertise*. Ces techniques permettent effectivement de lever les *incertitudes d'expertise* liées à la stratégie de résolution choisie en amont par un expert. Elles permettent aussi de soulever certains points noirs ou qui auraient pu être omis dans la première étude. Néanmoins, l'utilisation de ces techniques peut augmenter l'incertitude liée au résultat en cas de désaccord avec l'analyse initiale. C'est alors au niveau des *ressources* de l'étude qu'il faut agir, en complétant les informations relatives au site d'étude ou en améliorant la connaissance scientifique générale sur le sujet. On soulignera également les dangers de ces *confrontations* en insistant sur la nécessaire impartialité et indépendance des experts.

Plusieurs études intègrent de telles techniques dans le domaine des risques liés au sol et au sous-sol :

- dans le contexte de l'Après mine dans le bassin ferrifère lorrain, une contre-expertise internationale menée « *par trois experts indépendants, sud-africain, américain et français* » et réalisée en 2001, avait « *pour objectif : (1) d'évaluer la méthode d'analyse du risque d'effondrement brutal sur le bassin ferrifère, (2) de proposer, si nécessaire, des modifications ou des méthodes alternatives et (3) d'appliquer la méthodologie retenue sur deux sites dont Nondkeil* » (Préfecture de la Région Lorraine, 2003). Cette étude a amené un collège de spécialistes de nationalités différentes à valider la méthode retenue par le groupe français tout en proposant certains points d'amélioration grâce à leur expertise propre ;

- les travaux de Merad (2003) à propos de l'analyse des risques liés aux mouvements de terrain induits par les ouvrages souterrains décrivent les apports que peuvent fournir les méthodes multicritères en tant qu'outils d'aide à la décision, permettant, entre autre, de formaliser la connaissance d'expert. Elles nécessitent pour cela la constitution d'un comité de spécialistes, et plusieurs stratégies itératives (méthode des cartes, méthode SIMOS) sont utilisées pour converger vers un consensus entre les experts. De telles techniques permettent ainsi de « *formaliser les critères de décision ainsi que la démarche d'évaluation des décisions et [d'] homogénéiser de ce fait la démarche d'expertise* » (Merad et Salmon, 2004) ;
- la subjectivité de l'expert peut être limitée par la mise au point de *guides* ou de documents techniques de référence. Ceux-ci permettent en un sens aux études d'être moins « dépendantes » de l'individu en charge de leur réalisation, et d'éviter que celui-ci ne se retrouve seul à face à certains problèmes délicats. On citera les exemples du Guide technique pour l'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines (Tritsch et al., 2002) ou du Guide collectif pour l'élaboration des PPRM (INERIS, 2004) qui s'enrichit aujourd'hui du travail de la Commission « Après-Mine » de la Société Internationale de Mécanique des Roches (ISRM) pour constituer un document international, et non plus uniquement français. On citera également le travail du Comité International JTC1 à propos de la stabilité des versants rocheux dont le but est d'aboutir à la création d'un guide technique unique pour l'évaluation de l'aléa. Ces développements menés par des groupes internationaux de recherche montrent que ces stratégies sont particulièrement d'actualité. Il faut malgré tout noter qu'à côté de la plus-value que de tels guides peuvent apporter, ceux-ci ne doivent pas tendre vers une « standardisation » des études. Il y a en effet une réelle nécessité à laisser une marge de manœuvre à l'expert, dont l'expérience et les connaissances peuvent lui permettre de s'adapter à des problèmes non figés et chaque fois différents.

3.5 Incertitudes de ressources

Comme nous l'avons signalé précédemment, les *incertitudes de ressources* sont fortement liées à la notion d'*existence* (d'informations, de modèles, de données, etc.). Ce type d'incertitude, peut-être pour des raisons liées à son aspect très conceptuel, n'est généralement pas traité de manière explicite dans les analyses de risque et très peu de méthodes formalisées existent réellement pour les appréhender.

Des actions peuvent néanmoins être entreprises pour tenter de réduire les indéterminations liées à l'existence de ressources scientifiques : on pense notamment à l'initialisation de travaux de recherche peuvent permettre de compléter ou d'améliorer l'état des connaissances.

Concernant les ressources liées au site d'étude, confirmer ou infirmer l'existence de travaux souterrains, lever le doute sur la fiabilité des informations disponibles ou acquérir des données permettrait de réduire cette incertitude. Du problème lié à l'incertitude de ressources, concernant l'existence des objets et des données, on passe alors à un problème lié à l'incertitude de données, relative cette fois aux valeurs des paramètres dont on vient de déterminer l'existence.

Lorsque l'acquisition des données ou la recherche des travaux (par la réalisation de sondages, l'utilisation de techniques non destructives (radar, prospection géophysique, etc.), des investigations sur site, des levés topographiques, etc.) ne peuvent pas être réalisées pour des raisons financières, humaines, etc. liées au *contexte* de l'étude dont il a déjà été question, la stratégie souvent mise en œuvre revient, implicitement, à adopter une approche qualitative, le plus souvent très sécuritaire. Ainsi, le problème de l'existence de travaux souterrains est apparu, au travers du suivi de diverses études sur le terrain, particulièrement délicat à traiter pour l'expert. Ce dernier se retrouve souvent démuné dans un tel cas de figure. La stratégie généralement adoptée dans une grande partie des études consiste à « *faire comme si* » les travaux existaient réellement et ainsi à se placer dans le « *pire cas* ». Une « marge de sécurité » qualitative est donc indirectement utilisée, permettant de passer d'une situation de doute à une certitude.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons développé un indice pour tenter de quantifier, plutôt que qualifier, cette incertitude particulièrement problématique, liée à l'existence d'ouvrages souterrains.

Un « indice d'existence » pour caractériser l'incertitude liée à l'existence d'ouvrages souterrains

Pour déterminer l'existence des ouvrages souterrains, potentielles sources de danger, différentes informations peuvent être utilisées :

- généralement, pour les mines les plus récentes, les Dossiers d'Arrêt Des Travaux (DADT) sont disponibles et, avec eux, les plans d'exploitation. Néanmoins, ceux-ci peuvent être de qualités diverses, incomplets voire erronés. Certains, antérieurs à la fin de l'exploitation, peuvent indiquer des avancées de travaux moindres que dans la réalité. D'autres peuvent, au contraire, mentionner des zones de travaux qui ne sont restées qu'au stade de projet et ne comportent donc aucun vide. D'autres encore peuvent qualifier des zones de « dépilées », pour lesquelles l'exploitation a, a priori, été totale alors que de nombreux vides souterrains subsistent encore aujourd'hui. C'est notamment le cas dans certaines exploitations anciennes du bassin ferrifère de Lorraine (Préfecture de la Région Lorraine, 2005) ;
- pour les mines plus anciennes, la situation est parfois beaucoup plus délicate. Les anciennes exploitations ont souvent été réalisées dans des conditions artisanales et anarchiques et les plans miniers le sont tout autant. Les cartes sont le plus souvent inexploitable pour une analyse de risque (inexactitude, mauvais calage, distorsion, etc.) ou sont même parfois inexistantes ! L'expert doit alors s'appuyer sur des *indices* d'exploitation, comme la géologie, la présence de traces d'anciens désordres visibles depuis la surface, des témoignages locaux, etc. Là où du minerai existe, là où dans le passé se sont développés des mouvements de surface, s'est donc peut-être développée une exploitation minière et il est possible que des sources de danger existent encore aujourd'hui dans les environs.

La confiance que peut avoir un expert vis-à-vis de l'existence réelle d'une source de danger est donc dépendante de la source d'information qui lui a permis d'identifier celle-ci. La qualité de cette dernière influencera directement le niveau de confiance qu'il aura. Il apparaît alors intéressant de caractériser chaque type d'information par un niveau de confiance, un « **indice d'existence** », caractérisant *la probabilité qu'une source de danger existe réellement sur un site donné, compte tenu de l'information qui a permis de l'identifier*. Plus l'indice d'existence est grand, plus l'information est fiable et plus grande sera la crédibilité de la présence d'un ouvrage pouvant générer un accident. Cet indice peut par exemple être déterminé par un comité d'experts familiers des problèmes de réalisation de ces problématiques. Un exemple concret sera donné dans le prochain chapitre et on renverra à Cauvin et al. (2006) pour une illustration appliquée au bassin ferrifère lorrain.

De manière à faciliter la compréhension et l'utilisation de cet indice d'existence dans la pratique, les travaux réalisés se sont inspirés de ceux menés dans le domaine de la prévision météorologique avec l'« indice de confiance » développé par Météo France. Ce dernier « *est un moyen de faire connaître le crédit que l'on peut accorder à la prévision* » et est relatif à « *la dispersion des différents scénarios* » de prévision (Météo France, 2007). Il est alors plus un moyen d'exprimer l'incertitude liée aux données et surtout aux modèles de prévision, que celle liée aux ressources. Néanmoins, l'échelle utilisée, allant de 1 (indice le plus bas) à 5 (indice le plus haut) permet une communication facile qui apparaît relativement compréhensible par le public.

Cette même échelle a été conservée pour l'indice d'existence que nous proposons. Son sens réel doit néanmoins être précisé. Obtenir un indice d'existence de 5 ne signifie pas automatiquement qu'un aléa existe. Cela signifie uniquement que l'expert considère comme le plus crédible la possibilité de présence d'un ouvrage minier pouvant causer des dommages. Il lui faudra ensuite évaluer cet aléa, en utilisant des modèles intégrant des données sur la géométrie de l'exploitation, sur les caractéristiques mécaniques du recouvrement, etc. Ainsi, une galerie située à 150m de profondeur parfaitement connue, accessible, parfaitement calée par rapport à la surface sera par exemple affectée d'un indice de 5. Par contre, compte-tenu de sa profondeur importante, l'aléa à l'aplomb de celle-ci sera évalué comme nul. A l'opposé, dans des zones d'anciens dépilages indiquées sur des cartes peu fiables, plus

aucun vide ne subsiste a priori. Malgré tout, on pourra (et on devra, par précaution) retenir un aléa de type fontis si les anciens travaux se situent à très faible profondeur (20-30m par exemple). Pour ces zones, l'indice d'existence sera par contre plus faible que précédemment et un doute quant à l'existence même de ces vides souterrains subsistera.

3.6 Conclusions

En plus de décrire des méthodes les plus « classiques » utilisées pour la quantification des incertitudes de données et la propagation de celles-ci dans des modèles, cette partie a évoqué des techniques plus « générales », ou conceptuelles, permettant d'illustrer des catégories d'incertitudes différentes.

Lorsque des manques ont été constatés dans la littérature, des propositions pour l'intégration de certaines incertitudes ont été effectuées. Ainsi :

- l'intégration de plusieurs modèles au sein d'une même analyse, puis l'utilisation de simulations de Monte Carlo, permet de s'exempter du problème de l'utilisation d'un modèle d'étude particulier et des conséquences spécifiques qu'il peut induire, et constitue alors une solution au traitement de l'incertitude de modèle ;
- l'outil qu'est l' « *indice d'existence* » permet de caractériser l'incertitude de ressources qui concerne l'indétermination liée à l'existence même des ouvrages souterrains.

Des exemples concrets seront présentés dans le paragraphe ou les chapitres suivants. Ils permettront d'illustrer les avantages que de telles techniques peuvent avoir dans le processus de réalisation de l'analyse de risque.

Un des résultats importants que nous avons obtenu à ce stade est le fait que lorsque l'*intégration* concrète de l'incertitude dans l'analyse (via une quantification par exemple) n'était pas possible, la *confrontation* pouvait être un excellent moyen pour prendre en compte celle-ci. Une *comparaison* entre les résultats induits par tel ou tel choix, par l'utilisation de tel ou tel outil, par tel ou tel expert, peut en effet permettre d'*illustrer* l'influence que certaines incertitudes peuvent avoir dans les analyses.

Ces propos doivent néanmoins être nuancés. Les différents types d'incertitudes et les méthodes permettant de les prendre en compte, les intégrer dans les études ou les illustrer, ont été présentés de manière distincte, les uns à la suite des autres. Dans les analyses de risque cependant, les différentes catégories d'incertitudes sont rencontrées de manière simultanée et, de plus, un lien fort existe entre elles. Le choix des méthodes permettant un traitement *réel* des incertitudes se fera alors surtout en fonction de la caractérisation qui est faite de l'ensemble des indéterminations présentes dans l'étude. Une méthode performante pour traiter un certain type d'incertitude pourra ainsi s'avérer inutile ou inefficace vis-à-vis du résultat final de l'analyse si les autres catégories ne sont pas également prises en compte.

4 ILLUSTRATION : LA REALISATION DU PLAN DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS SUR LE SECTEUR DE TREMUSON (22)

Il a été plusieurs fois indiqué que le lien fort existant entre les différentes catégories d'incertitudes présentées dans la typologie de la figure 1.5 avait une influence sur les solutions à utiliser pour prendre en compte les incertitudes dans une analyse.

Cette partie propose l'exemple concret d'une étude dans laquelle l'ensemble des types d'incertitudes est rencontré. Une identification, utilisant les travaux présentés précédemment, puis un traitement qualitatif de ces derniers sont alors proposés. Le travail proposé constitue alors un premier pas vers une méthode plus complète d'intégration des incertitudes qui sera proposée par la suite.

L'approche proposée complète le Plan de Prévention des Risques communiqué aux autorités en 2005 (Pilch et Salmon, 2005) par des aspects développés spécifiquement dans le cadre de la thèse.

4.1 Contexte historique, géologique et minier du secteur de Trémuson

Histoire et localisation de la concession

La découverte en 1898, dans la région de Trémuson (Côtes d'Armor, 22), de traces d'anciens travaux miniers datant de l'époque gallo-romaine indique que l'existence du minerai de plomb argentifère du secteur est connue depuis de nombreux siècles. Après une longue période d'exploitation artisanale, ce n'est malgré tout que vers la fin du XVII^{ème} siècle que l'extraction de ce minerai s'industrialise réellement. L'exploitation et la production deviennent particulièrement actives à partir de 1766, employant alors entre 500 et 600 mineurs et fondeurs. Mais, quelques années plus tard, la Révolution française provoque la suspension des travaux.

En 1865, une concession minière, dite « de Trémuson », est octroyée et de nombreuses recherches sont engagées. La découverte de nouveaux filons et la reprise d'anciens travaux conduisent à une nouvelle période d'exploitation, active jusqu'en 1931, date à laquelle les travaux sont définitivement abandonnés. La renonciation définitive de la concession est acceptée en 1973, l'Etat en récupérant la responsabilité.

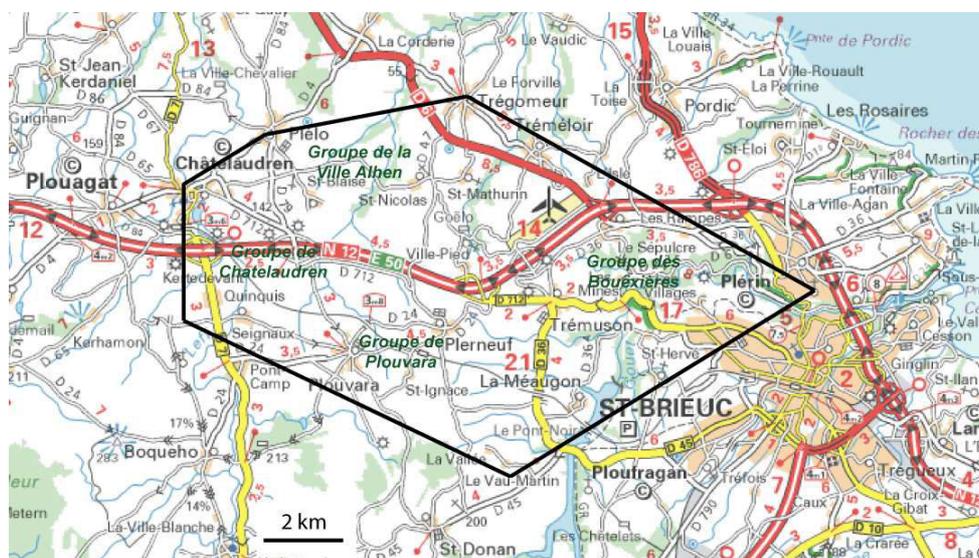


Figure 1.11. Localisation de la concession de Trémuson

La concession de Trémuson s'étend sur douze communes, à quelques kilomètres en périphérie Ouest de Saint Briec. Elle forme un hexagone irrégulier se développant d'Est en Ouest sur 15 km et du Nord au Sud sur environ 9 km, couvrant au total une superficie de plus de 8000 ha (figure 1.11). A ce jour, la grande majorité de la surface est utilisée à des fins agricoles (prairies pour l'élevage et champs cultivés) ou est occupée par des zones boisées. L'habitat se concentre majoritairement autour des principaux villages, même si on note la présence de très nombreux hameaux et fermes dispersés sur l'ensemble du territoire.

Géologie régionale et locale

Les formations géologiques qui couvrent le territoire de la concession de Trémuson sont essentiellement des formations de socle, datant de la fin du Précambrien (Briovérien) et de l'ère Primaire, recouvertes par une épaisseur de terrains altérés plus ou moins grande selon les secteurs (figure 1.12). Le gisement filonien de minerai polymétallique s'intègre dans un vaste champ de fractures affectant ce substratum rocheux. Il compte une quinzaine de filons, contenant d'assez nombreuses colonnes minéralisées au sein desquelles on trouve du plomb, du zinc et de l'argent. L'épaisseur de ces filons varie de quelques décimètres à, très localement, une dizaine de mètres, l'épaisseur moyenne étant voisine de un mètre.

Les directions des cassures tectoniques dans lesquelles se sont injectés les filons sont très variées, mais on peut globalement distinguer deux types principaux : l'une est orientée Nord 160° et l'autre, dans une direction comprise entre Nord 20° et Nord 90°, presque orthogonale à la précédente. Les filons peuvent se subdiviser en plusieurs rameaux par le jeu de failles-relais et croiser le trajet d'autres filons. Au croisement de ces fractures, du fait d'une forte émission de fluides hydrothermaux, se sont développées de puissantes colonnes ou d'importantes lentilles de minerais souvent enrichis. Ainsi le gisement se présente sous la forme de filonnets millimétriques ou de masses compactes (lentilles et colonnes) de quelques mètres d'épaisseur.

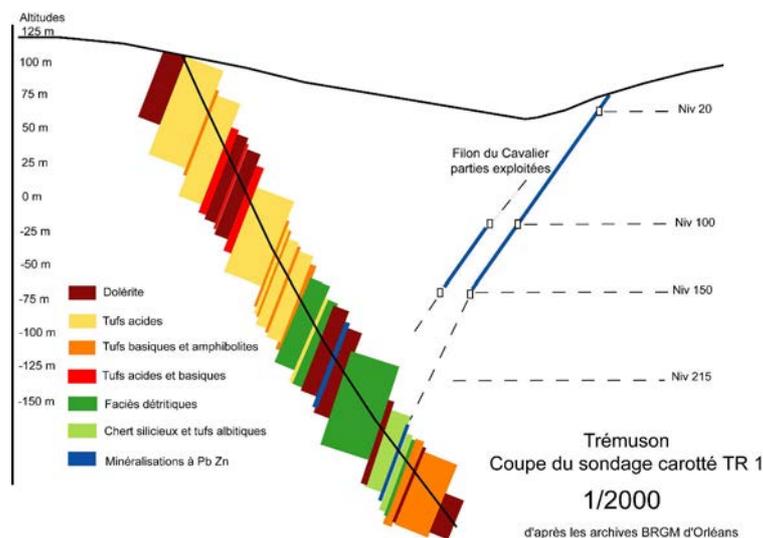


Figure 1.12. Log synthétique de Trémuson (Source : Archives BRGM d'Orléans)

Hydrologie et hydrogéologie

Sur la concession de Trémuson, les terrains altérés proches de la surface, se caractérisent par une forte porosité et une faible perméabilité. Ils forment un réservoir qui alimente par drainance les horizons fissurés sous-jacents dans lesquels, du fait d'une interconnexion fissurale, la circulation des eaux souterraines est favorisée. L'eau souterraine est alors présente uniquement dans des aquifères fracturés et fissurés, dont la recharge est assurée essentiellement par l'infiltration des eaux météoriques.

À cet aquifère naturel, s'est surimposé un aquifère minier se limitant aux terrains situés dans la zone d'influence des travaux souterrains, là où les vides liés à l'exploitation ont généré une fracturation des terrains. Ces fractures qui se développent à l'aplomb des zones exploitées jouent un rôle de drain, conférant au volume d'influence des travaux une perméabilité plus élevée que celle des secteurs vierges. Durant l'exploitation, les eaux s'infiltraient vers les travaux par le biais des fractures, rendant nécessaire leur pompage (exploitations récentes) ou leur évacuation gravitaire par galerie basse (exploitations anciennes) lorsque la topographie le permettait. Le rabattement des nappes aquifères se faisait à l'avancement des travaux.

Les travaux miniers souterrains sont aujourd'hui totalement ou partiellement ennoyés (quelques portions de travaux sont hors d'eau). Le niveau d'eau est stabilisé et en équilibre avec celui des nappes souterraines. Les anciens travaux se situant en altitude, au-dessus du niveau des nappes aquifères, sont exondés (cette configuration est valable si la situation hydrogéologique n'est pas modifiée du fait de l'obstruction partielle des galeries à cause d'éboulements, figure 1.13). Ils sont en revanche sujets aux infiltrations des eaux météoriques, dont une partie est généralement acheminée gravitairement, par les anciennes galeries vers les points bas.



Figure 1.13. Vue d'une galerie exondée située au-dessus du niveau d'une nappe aquifère

Méthodes d'exploitation

Le relief de la concession a permis aux anciens mineurs d'exploiter les filons à leur partie supérieure à l'aide de galeries d'écoulement. Lors des premières phases d'exploitation (du XVI^{ème} au début du XIX^{ème} siècle), les travaux sous la cote des vallées n'ont pas été possibles à cause de l'eau. Plus tard, avec l'avènement des machines à vapeur puis de l'électricité, des pompes ont été utilisées pour assurer l'exhaure des mines et exploiter les étages inférieurs des filons laissés vierges par les anciens.

Au cours de la phase d'exploitation la plus récente, l'exploitation des colonnes riches des principaux filons s'est faite suivant la méthode des tailles chassantes à gradins renversés (figure 1.14). Le massif minéralisé était attaqué à partir de la galerie d'allongement inférieure (galerie servant à l'écoulement des eaux et au transport du minerai). Le mineur abattait le minerai devant lui et sur les côtés, puis continuait horizontalement à abattre le gradin se trouvant devant lui. Les déblais stériles servaient à remblayer la galerie (remblayage partiel). Le soutènement était essentiellement limité aux ouvrages d'infrastructures (puits, descenderies, galeries de roulage, et fronts de taille).

Entre la couronne (toit du chantier) et le jour, un stot de protection, appelé « pilier couronne », était laissé afin d'isoler les chantiers de défilage des aux travaux plus anciens (pour éviter les éboulements de vieux remblais et les venues d'eau). L'épaisseur des piliers couronnes est variable et difficile à

évaluer compte tenu de l'incomplétude des plans des travaux disponibles (quelques mètres à quelques dizaines de mètres).



Figure 1.14. Méthode d'exploitation par gradins renversés et reste de boisage

Détails des désordres liés à une ancienne activité minière, qui peuvent être engendrés sur le site de Trémuson

Même après la période de leur exploitation, les anciens sites miniers peuvent engendrer des désordres et des nuisances susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes, des biens et des écosystèmes situés dans l'emprise des anciens travaux. Dans le cadre des mouvements de terrain (on ne considère pas ici les autres risques miniers tels que les émanations de gaz ou les impacts environnementaux sur les eaux et les sols), la présence d'ouvrages miniers souterrains peut induire plusieurs types de désordres : effondrement généralisé, effondrement localisé, affaissement ou glissement superficiel et profond.

Sur la concession de Trémuson, plusieurs effondrements de type « localisés » se sont manifestés par le passé, ne concernant que des zones d'extension limitée en surface (quelques mètres). Parmi les différents désordres recensés, on peut distinguer :

- des effondrements liés à la rupture d'anciens orifices miniers (puits et cheminées d'aéragé) ;
- des effondrements liés à la rupture des piliers couronnes ou du toit des chantiers miniers situés à faible profondeur et dont l'initialisation se fait généralement au niveau des travaux (figure 1.15.a) ;
- des effondrements liés à l'éboulement des descenderies ou des galeries situées à faible profondeur (figure 1.15.b).

A côté de ces « effondrements localisés », la possibilité de voir survenir d'autres types de désordres sur le secteur de Trémuson peut être considérée comme négligeable. La nature filonienne du gisement, fortement pentée, ainsi que la méthode d'exploitation choisie pour l'exploiter, impliquent en effet que les vides résiduels laissés en profondeur aient des volumes très limités. Leurs dimensions ne sont pas suffisantes pour pouvoir provoquer un effondrement brutal de la surface, ni pour permettre d'envisager, à grande profondeur, un affaissement de celle-ci (à faible profondeur, les phénomènes redoutés sont les ruptures des piliers couronnes et ont déjà été mentionnés). Les risques d'effondrement brutal et d'affaissement peuvent alors être exclus pour l'ensemble de la concession. Le risque de glissement ne concerne quant à lui que deux verses de stériles miniers et, dans cette partie, on ne s'étendra pas plus longuement sur ce phénomène.



Figure 1.15. Blocs tombés en galerie (a), et Effondrement de la descenderie de la Boissière (13/07/2000) (b)

De manière à évaluer et anticiper les risques inhérents aux anciens travaux miniers, les autorités régionales ont demandé en 2005 la réalisation d'un zonage de l'aléa « mouvement de terrain » à l'aplomb des anciennes exploitations recensées au sein de la concession. Compte tenu des remarques précédentes, ce zonage correspond, dans le cas de Trémuson, uniquement au zonage de l'aléa « effondrement localisé ». La démarche qui a été mise en œuvre pour répondre à une telle demande s'appuie sur celle présentée dans le Guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (INERIS, 2004).

4.2 Les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM)

Historique des PPRM

De manière à anticiper les problèmes de l'Après mine et à mieux organiser la reconversion des régions les plus touchées par ces derniers, la France a choisi de mettre en œuvre une politique de prévention systématique des risques en se dotant d'un outil technique et réglementaire particulièrement puissant : les Plans de Prévention des Risques (PPR). Initialement dédiés aux risques naturels (PPRN instaurés par la loi n°95-101 du 2 février 1995), ceux-ci ont rapidement été étendus aux risques miniers (PPRM instaurés par la loi n°99-245 du 30 mars 1999). L'objectif majeur des PPR est d'identifier les risques et nuisances susceptibles d'affecter le territoire et de définir des prescriptions relevant de règles d'urbanisme, d'aménagement du territoire ou d'usage des sols et des eaux (Didier et Leloup, 2005). Comme fixé par les décrets n°95-1089 du 5 octobre 1995 et 2000-547 du 16 juin 2000, un projet de PPRM doit nécessairement comporter les éléments suivants :

1. une note de présentation indiquant le secteur géographique concerné, la nature et l'importance des risques miniers pris en compte ainsi que la probabilité de leur survenance et leurs conséquences possibles compte tenu de l'état des connaissances ;
2. un ou plusieurs documents graphiques délimitant les zones à risques ;
3. un règlement détaillant de manière claire et concise les mesures d'interdiction et les prescriptions applicables aux biens existants ou futurs, ainsi que les mesures de prévention, de protection, de surveillance et de sauvegarde à mettre en œuvre dans les zones à risques.

Réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers

La logique présentée sur la figure 1.2 peut être reprise pour détailler le processus de réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers, et plus spécifiquement l'analyse de l'aléa « mouvement de terrain » qui nous intéresse ici.

Contexte

Les PPRM ont été développés dans le contexte bien particulier d'une politique de prévention systématique des risques. L'un des principaux enjeux de cette politique est de traiter, *dans des délais raisonnables* et *avec des ressources financières et humaines* (capacité d'expertise et de gestion administrative des dossiers) *limitées*, une grande diversité de sites à risques, répartis sur l'ensemble du territoire. Les outils que doit mettre en place l'expert ont alors vocation à être *simples, opérationnels* et destinés à la population et aux services chargés de leur application (i.e. compréhensibles et appropriables).

Mobilisation de ressources

Ces contraintes ont conditionné l'esprit de mise en œuvre des PPR : ce parti pris de simplicité et de rapidité implique à l'expert de baser sa méthodologie sur des approches principalement qualitatives, reposant sur *l'état des connaissances* et laissant une large place à *l'avis d'expert*.

Il faut également noter que les ressources relatives aux sites miniers étudiés sont difficilement mobilisables : les exploitations sont généralement anciennes (à Trémuson par exemple, les premiers travaux souterrains datent de la fin du XVII^{ème} siècle) et les plans ou autres documents relatifs à la mine ont pu être détruits, perdus lors des changements de propriétaires ou après la fermeture. De plus, les travaux sont souvent inaccessibles (ennoyés ou fermés) et les événements qui ont pu survenir en surface peuvent être devenus non visibles.

De plus, une difficulté importante, néanmoins très caractéristique des mines anciennes, est que de nombreux ouvrages ont été retrouvés dans les archives mais leur localisation exacte n'est pas précisée dans les documents et est impossible à retrouver sur le terrain.

Conceptualisation du problème et méthodologie

Dans le but de fournir les éléments demandés par les autorités régionales (note de présentation, cartes d'aléa et règlement), les organismes en charge de l'élaboration des PPRM suivent généralement une méthodologie de travail, présentée dans un Guide Méthodologique préparé par l'INERIS (INERIS, 2004) et qui se décompose en quatre grandes phases, allant de l'identification des sources de danger à la mitigation des risques qu'elles peuvent engendrer (figure 1.16).

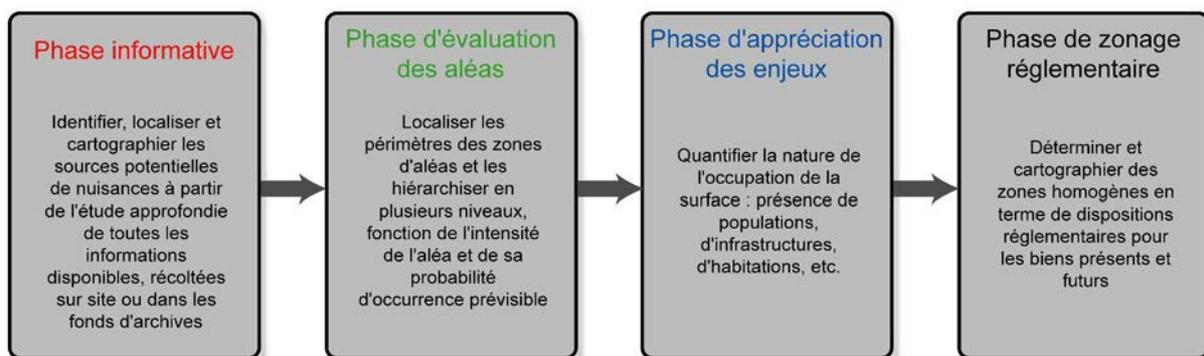


Figure 1.16. Les quatre grandes phases de l'élaboration d'un PPRM

Modèles et données

Dans ce processus, l'aléa puis le risque sont évalués grâce à des modélisations simples qui sont complétées par l'expertise. Des méthodes par croisements de paramètres sont généralement utilisées pour estimer des classes qualitatives d'aléa. Le Guide Méthodologique (INERIS, 2004) propose des modèles et techniques qui peuvent être mis en œuvre.

Les documents relatifs aux exploitations minières étant généralement absents, les données qui sont intégrées dans ces modèles sont souvent estimées d'après la littérature ou par jugement d'expert. Elles sont de fait rarement issues directement du terrain.

Analyse du résultat et compléments

La cartographie de l'aléa correspond à un résultat important des PPR. Dans les zones où cet aléa est estimé important et où des enjeux sont présents (infrastructures, voirie, habitations), l'expert est souvent amené à s'interroger sur la fiabilité du résultat de son analyse. Lorsqu'un doute existe ou que des précisions apparaissent nécessaires, l'expert peut préconiser de compléter l'analyse, soit en *ajoutant des ressources*, c'est-à-dire en demandant la réalisation d'investigations sur site (sondages destructifs permettant de déterminer l'existence ou non d'un ouvrage minier, visites en souterrain lorsque c'est possible pour vérifier la fiabilité des plans, etc.), soit en *précisant* certaines données (sondages non destructifs destinés à préciser la nature des terrains du recouvrement, mesures sur site de la géométrie des exploitations, etc.). Dans le cas contraire, l'expert conclura à l'existence d'un risque fort et des mesures réglementaires seront prises pour le mitiger.

4.3 Réalisation du Plan de Prévention des Risques Miniers sur le secteur de Trémuson

Le secteur de Trémuson n'est concerné, dans le cadre de l'étude des mouvements de terrain, que par l'aléa « effondrement localisé ». Seront donc considérés dans l'analyse les phénomènes de rupture de puits, de rupture de galeries ou descenderies et de rupture de piliers couronne.

Identification des principales incertitudes

Dans le cas de la concession de Trémuson, les informations disponibles permettant de réaliser l'étude proviennent de sources multiples. Les plans d'exploitation, les documents d'archive minière, les rapports, thèses ou comptes-rendus d'études techniques, les cartes géologiques ou la description d'événements passés ont ainsi été recueillis auprès de divers organismes (DRIRE Bretagne, Archives Départementales des Côtes d'Armor, GEODERIS, BRGM, les services techniques des communes, etc.) ou proviennent de sources plus informelles (coupures de presse, témoignages, etc.). Ces informations ont été complétées et vérifiées autant que possible par des visites de terrain.

Plusieurs problèmes liés aux informations nécessaires pour mener à bien une analyse satisfaisante, particulièrement caractéristiques des mines très anciennes, se sont révélés critiques dans le cadre de la réalisation du PPRM de Trémuson :

- l'absence totale de données minières sur la majeure partie du site (incertitudes de ressources) : seuls les plans des travaux du groupe des Bouëxières, et partiellement ceux du groupe de la Ville Alhen, ont été retrouvés. Aucun document cartographique n'est disponible pour le reste de la concession ;
- l'absence de connaissances sur la localisation précise d'ouvrages miniers mentionnés dans les archives mais non retrouvés en surface (incertitudes de ressources) : une trentaine de puits ont été répertoriés autour des filons situés dans le groupe de Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée, mais leur localisation exacte est inconnue ;
- le calage imprécis des ouvrages souterrains par rapport à la surface et la localisation imprécise des ouvrages débouchant en surface (incertitudes de données), qui s'expliquent principalement par l'ancienneté des plans disponibles (1929) et leur qualité (inexactitude, distorsion, etc.) ;
- l'imprécision ou le manque de connaissance sur les valeurs des paramètres miniers (géométrie, propriétés mécaniques, etc.) qui sont intégrés dans les modèles destinés à l'évaluation de l'aléa (*incertitudes de données*).

Une visite au fond en 2006 (figures 1.13, 1.14) a permis de constater que les plans miniers étaient relativement proches de la réalité. Le problème de la fiabilité de ces plans et de leur incomplétude apparaît ainsi dans le cas de Trémuson être un problème moindre.

D'autre part, les méthodes qu'utilise l'expert pour évaluer l'aléa sont principalement des *règles d'expérience* ou sont construites à partir d'hypothèses fortes et reposent sur des modèles simples, le plus souvent géométriques. Dans le cas de la réalisation du PPRM de Trémuson, la méthodologie choisie pour évaluer l'aléa « effondrement localisé » consiste ainsi à :

- 1) estimer, par expertise, l'*intensité* du phénomène redouté de manière qualitative (faible, moyen, fort), le niveau d'intensité étant lié à la dimension attendue du désordre en surface ;
- 2) estimer, à partir de modèles géométriques simples ou par expertise, la *prédisposition* du site à subir le phénomène redouté, également sous forme d'un niveau qualitatif. Les facteurs de prédisposition sont liés à la fois au retour d'expérience et à la profondeur des travaux (i.e. la potentialité que le phénomène puisse atteindre la surface) ;
- 3) croiser ces niveaux d'*intensité* et de *prédisposition* de manière à estimer un niveau qualitatif d'aléa ;
- 4) définir, à partir d'un retour d'expérience ou par expertise, les *limites du zonage* de l'aléa en surface. Ce zonage dépend principalement de la localisation des ouvrages au fond et de la nature des terrains du recouvrement.

En plus des incertitudes mentionnées précédemment :

- les modèles qui sont utilisés au cours de ces quatre étapes peuvent, de part leur simplicité, induire une indétermination sur le résultat de l'analyse. Ainsi l'expert sera confronté à une *incertitude de modèle*.

Le tableau 1.9 fait la synthèse des principales incertitudes rencontrées lors de la réalisation du PPRM sur la concession de Trémuson.

Tableau 1.9. Nature des principales incertitudes rencontrées lors de la réalisation du PPRM de Trémuson

Nature de l'incertitude	« Élément » concerné	Cause / Remarque
Incertitude de ressources	Existence des travaux miniers souterrains	Données inexistantes
	Existence des ouvrages débouchant en surface	Données non localisées en surface
Incertitude d'expertise	(-)	Existence d'un Guide méthodologique
Incertitude de modèle	Modèles d'étude des phénomènes	Difficultés à représenter la réalité
Incertitude de données	Localisation des travaux et ouvrages	Mauvaise connaissance
	Valeurs des données géométriques ou mécaniques du site	Variabilité naturelle / mauvaise connaissance

Présence de travaux miniers et « indice d'existence »

L'ancienneté des plans retrouvés pour le groupe des Bouëxnières, et partiellement pour le groupe de la Ville Alhen, peut poser un problème important à l'expert dans son analyse. Ce problème est d'autant plus important sur le reste du secteur minier que les plans ne sont plus aujourd'hui disponibles.

La stratégie qui a été adoptée pour déterminer l'existence possible de travaux souterrains lors de la réalisation du PPRM consiste à s'appuyer sur les conditions géologiques du site, l'idée sous-jacente étant que si un filon minéralisé existe, il a pu faire l'objet d'une exploitation. Les informations géologiques disponibles, permettant de localiser les filons ou fractures, proviennent des rapports établis par le BRGM (notamment l'analyse de relevés géochimiques), par A. Moisseeff (*Rapport de*

mission, district minier de Trémuson, 1957, archives du BRGM (dossier G 2007)) et par P. Korniyenko (*Gisements métallifères de Chatelaudren, 1961*). Ces informations ont ensuite été confrontées à d'autres indices liés à l'exploitation minière : présence de puits ou de galeries connus, ou manifestation d'un effondrement de terrain à proximité du filon. Trois *familles* de filons ont ainsi été distinguées (Pilch et Salmon, 2005) :

- Famille 1 : les filons qui ont *certainement* fait l'objet de travaux souterrains :
 - parce qu'ils se situent à proximité de puits ou galeries ;
 - parce qu'un effondrement de terrain s'est manifesté à proximité ;
- Famille 2 : les filons qui ont *probablement* fait l'objet de travaux souterrains parce qu'ils ont été identifiés lors de campagnes de géochimie tactique ou d'analyse structurale par le BRGM mais pour lesquels aucun indice supplémentaire d'existence de travaux n'existe ;
- Famille 3 : le relevé de fracturation au 1/25000 dont la fiabilité n'est pas suffisante pour identifier et qualifier un aléa « mouvement de terrain ». La fracturation ne constitue en effet qu'un indice à la présence d'un filon minéralisé, et donc de travaux souterrains.

A ces trois familles, une quatrième a été rajoutée dans le cadre de la thèse :

- Famille 4 : les filons qui ont *vraisemblablement* fait l'objet de travaux souterrains parce qu'ils se situent à proximité de puits ou galeries, non visibles en surface, mais dont l'existence et une localisation imprécise a été attestée dans les archives.

On classera notamment dans cette famille 4 les filons du groupe de Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée, à proximité desquels au moins une trentaine de puits ont été foncés à partir de 1765.

Pour caractériser la confiance que l'on peut avoir vis-à-vis de l'existence réelle des travaux souterrains, l'outil qu'est l'« *indice d'existence* », introduit dans le paragraphe précédent, peut être utilisé. Le tableau 1.10 présente les valeurs prises par cet indice dans le cas des vides souterrains de petites dimensions pouvant engendrer des effondrements localisés en surface, et ce quelque soit le type d'exploitation (les valeurs sont donc valables dans un autre contexte que le site de Trémuson). Les valeurs sont issues d'une concertation entre plusieurs experts géotechniciens de l'INERIS familiers de la réalisation de PPRM. On rappelle que l'indice varie de 0 à 5, 0 étant la valeur la plus faible, synonyme de doute quasi-total.

Tableau 1.10. Exemple de grille de valeurs pour l'indice d'existence des vides souterrains de petites dimensions

Plan à disposition	Exploitation partielle	Chambres et piliers		5	
		Vides de petites dimensions (galeries isolées, exploitation filonienne)		5	
	Exploitation totale	Bien foudroyée (cf. méthode d'exploitation)		1	
		Mal foudroyée (cf. qualité du plan, méthode d'exploitation)		3	
	Type d'exploitation inconnu	Exploitation voisine contemporaine	Exploitation totale		3
			Exploitation partielle		4
		Archives	Informations disponibles	Exploitation totale	3
				Exploitation partielle	5
			Pas d'information disponible		3
Pas de plan à disposition	Géologie favorable + présence visible d'indices miniers (ancien effondrement, ouvrage)			4	
	Géologie favorable + présence mentionnée dans les archives d'indices miniers (ancien effondrement, ouvrage)			3	
	Géologie favorable OU ancien effondrement en surface OU présence mentionnée dans les archives de travaux miniers			2	
	Doute sur la nature du désordre visible OU fiabilité faible de l'information géologique			1	

Le Tableau 1.11 présente plus précisément les valeurs prises par l'indice d'existence dans le secteur de Trémuson en fonction des différentes configurations qui peuvent être rencontrées.

Tableau 1.11. Valeurs de l'indice d'existence pour différentes configurations de la concession de Trémuson

Configuration	Exemple(s) de localisation	Indice d'existence
Plans miniers disponibles	Groupe des Bouëxières Groupe de la Ville Alhen (*)	5
Ouvrages débouchant au jour et localisés	Puits ou galeries cartographiés (*)	5
Famille 1	Groupe de la Ville Alhen (*) Groupe de Chatelaudren (*)	4
Famille 2	Groupe de la Ville Alhen (*) Groupe de Chatelaudren (*)	2
Famille 3	Ensemble de la concession (hors groupes)	1
Famille 4	Groupe de Chatelaudren (*)	3
Désordre de surface à proximité d'un filon	Groupe de Chatelaudren (*)	4
Désordre de surface	Groupe de Chatelaudren (*)	2
Traces d'anciens travaux	Groupe de Chatelaudren (*)	3
Puits non localisés	Groupe de Chatelaudren (*)	2

* Un traitement plus détaillé de ces cas sera présenté dans la suite

Cartographie de l'aléa et utilisation de « marges »

Il a été choisi dans cette analyse d'utiliser des méthodes « sécuritaires » pour caractériser les incertitudes de données et de modèle. Ce choix se justifie en grande partie par la présence dans l'étude d'un fort contexte d'incertitudes de ressources, liées à l'existence même des ouvrages miniers. Un traitement quantitatif des incertitudes pourrait de ce fait apparaître illusoire dans ce cas et n'aurait certainement aucune réelle utilité ni signification pratique. L'exemple du PPRM sur la concession de Trémuson constitue de ce fait une parfaite illustration des remarques qui avaient été émises précédemment sur les implications opérationnelles des interactions entre les différents types d'incertitudes.

Localisation des puits et galeries débouchant en surface, et des effondrements de terrain

Plusieurs campagnes de relevés topographiques ont été effectuées sur le terrain pour estimer l'incertitude liée à la localisation des ouvrages et des désordres en surface. Lorsque les ouvrages (ou effondrements) étaient visibles en surface, des mesures par GPS différentiel (dGPS) ou GPS Magellan ont été prises. Le cas échéant, la mémoire locale a été utilisée pour les localiser. Le tableau 1.12 présente les différentes techniques utilisées et leurs incertitudes associées, permettant de définir des « marges d'erreur » autour des positions mesurées.

Tableau 1.12. Méthodes de localisation des ouvrages de surface

Méthode de localisation	Incertitude de localisation	Nature de l'incertitude	Ouvrages levés	Désordres levés
GPS différentiel	0,5 m	Précision de l'appareil	Bouëxières Ville Alhen Chatelaudren	Bouëxières Chatelaudren
GPS Magellan	10 m	Précision de l'appareil	Plouvara	
Mémoire locale	10 m	Connaissance, fiabilité de la source d'information	Bouëxières Ville Alhen	Chatelaudren Plouvara
Mémoire locale	50 m	Connaissance, fiabilité de la source d'information	Chatelaudren	

Concernant les puits mentionnés dans les archives mais non localisés (Groupe de Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée), leur présence a été cartographiée à proximité des filons référents. Leur position exacte étant inconnue, une marge a été définie de part et d'autre du filon. La largeur de cette marge a été définie par expertise, après une étude statistique sur les distances entre les positions de 20 puits « connus » et les filons les plus proches de ceux-ci. La figure 1.17 présente l'histogramme des répartitions de ces distances. On constate que 90 % des puits se trouvent à une distance inférieure à 150 m du filon le plus proche. C'est alors cette valeur qui a été retenue comme largeur de la marge témoignant de l'incertitude sur leur localisation.

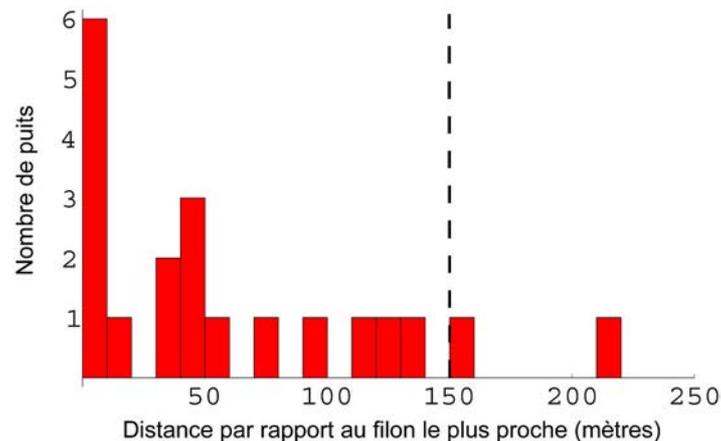


Figure 1.17. Répartition des distances entre les puits « connus » et les filons les plus proches de ceux-ci

Localisation de l'emprise des travaux souterrains

Pour les travaux dont les plans ont pu être récupérés, une marge permettant de prendre en compte l'incertitude sur la localisation a été définie de la même manière que pour les puits et galeries débouchant en surface. Cette marge vaut 0,5 m pour les travaux sur les groupes des Bouëxières, la Ville Alhen et Rue Bourgée ; 10 m pour les travaux des mines de Plouvara ; et 50 m pour la galerie de la porte aux Mineurs.

Pour les travaux dont les plans n'ont pas été retrouvés, leur localisation s'est faite par rapport aux filons dont on suppose qu'ils aient pu être exploités. Une marge a été définie pour prendre en compte l'incertitude liée au positionnement des filons sur la carte. Cette marge dépend de la source d'information et de sa fiabilité :

- une marge de 10 m a été retenue pour les filons ayant été positionnés par l'interprétation des cotes de travaux (étude de A. Moisseff) ;
- une marge de 30 m a été retenue pour les filons ayant été positionnés à partir des relevés géochimiques du BRGM ;
- une marge de 50 m a été retenue pour les fractures ayant été positionnées d'après analyse de photographies aérienne et indices d'anciennes fouilles (étude de P. Korniyenko).

Vis-à-vis des données et modèles

Parmi les différents mécanismes pouvant générer l'apparition en surface d'un « effondrement localisé », on en distingue quatre types principaux :

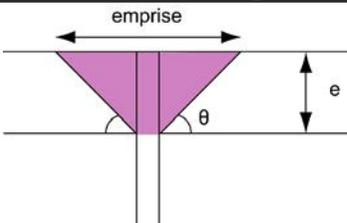
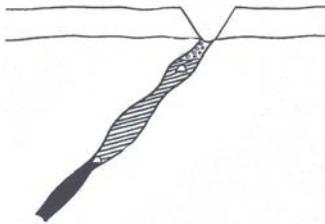
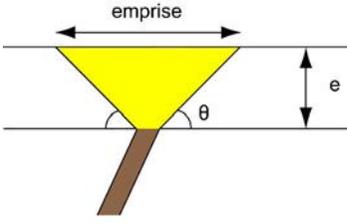
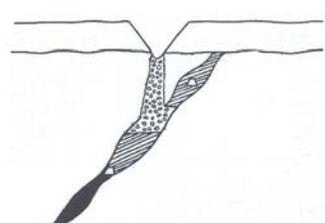
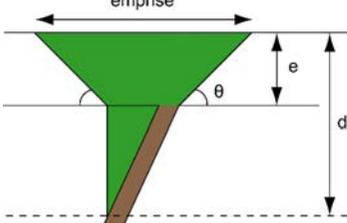
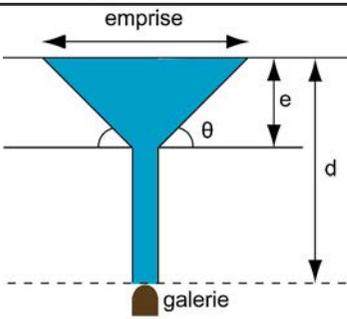
- l'effondrement de la tête d'un orifice minier ;
- l'effondrement de la tête de filon ;
- la rupture du toit de galeries ou de descenderies et la remontée de la cloche d'éboulement jusqu'à la surface (fontis) ;
- la rupture du toit de travaux peu profonds et la remontée de la cloche d'éboulement jusqu'à la surface (fontis).

Le tableau 1.13 présente ces différents mécanismes ainsi que les modèles choisis pour les analyser. Ces modèles intègrent trois paramètres majeurs, appelés e , θ et d . L'incertitude sur ces paramètres a été intégrée de la manière suivante :

- e correspond à l'épaisseur des terrains superficiels, « altérés », considérés sans cohésion. Faut de sondages disponibles, cette épaisseur a été évaluée par expertise « *de manière forfaitaire* » à **10 mètres** pour l'ensemble de la concession, valeur sensée intégrer l'incertitude puisqu'elle a été considérée comme « *sécuritaire* » (Pilch et Salmon, 2005) ;
- θ correspond à l'angle de cône moyen caractéristique des travaux. Une valeur forfaitaire de **45°** a également été retenue par expertise pour ce paramètre ;
- d correspond à la profondeur maximale au-delà de laquelle le fontis, s'il s'initialise au fond, doit pouvoir remonter en surface sans s'auto-combler de lui-même du fait du foisonnement des terrains éboulés. Le modèle géométrique développé par l'INERIS (Didier et Salmon, 2004) a été utilisé pour estimer cette profondeur. Ce modèle analytique permet de comparer les volumes de vides disponibles au volume de terrains foisonnés. Différentes données doivent y être intégrées : des paramètres géométriques liés à l'exploitation (largeur et hauteur des galeries) ainsi que des propriétés liées des terrains (coefficient de foisonnement, angle de talus). Dans le cas des mines de Trémuson, compte tenu des paramètres estimés « *de manière sécuritaire* » par expertise ou recensés dans les archives, d est évalué à une valeur « *comprise entre 15 et 21 mètres selon le rayon de la cheminée au toit de la galerie (respectivement 1 et 0,8 mètre)* ». Mais, il a été remarqué que « *la géométrie des galeries peut, dans certains cas, présenter certaines irrégularités lorsqu'elles suivent le filon (élargissement ou rétrécissement de la section)* », que « *compte tenu du pendage des galeries, les matériaux qui s'éboulent à partir du toit sont susceptibles de se répandre vers le pied de la galerie [et que] ce phénomène est défavorable à un auto-comblement de la galerie* » et qu'une certaine incertitude peut exister du fait de l'utilisation d'un tel modèle. Par conséquent, une marge de sécurité a été placée en aval de l'utilisation de modèle et « *la valeur de **30 mètres** [a été retenue] comme profondeur maximale au-delà de laquelle le risque de fontis peut être exclu au droit d'une galerie souterraine* » (Pilch et Salmon, 2005). Dans le cas des descenderies, dont les dimensions sont plus importantes que celles des galeries isolées ou des travaux d'exploitation, la valeur de d a été retenue à **50 mètres** et non plus à 30 mètres.

Il est à noter que les valeurs de e , θ et d sont largement sécuritaires puisque deux marges de sécurité ont en fait été ajoutées lors de leur évaluation : l'une pour prendre en compte l'incertitude de données, l'autre pour prendre en compte celle liée aux modèles.

Tableau 1.13. Différents mécanismes de rupture engendrant des effondrements localisés et modèles utilisés pour l'étude de ceux-ci.

Mécanisme	Schéma	Modèle de zonage	Paramètres des modèles	Remarques
Effondrement d'une tête de puits			e : épaisseur des terrains déconsolidés θ : angle de cône moyen (angle d'influence)	
Effondrement d'une tête de filon			e : épaisseur des terrains déconsolidés θ : angle de cône moyen (angle d'influence)	
Rupture du toit de travaux peu profonds			e : épaisseur des terrains déconsolidés θ : angle de cône moyen (angle d'influence) d : profondeur limite permettant une remontée du fontis sans auto-comblement	Ce zonage intègre le zonage lié à la rupture de la tête de filon. Un tel mécanisme est surtout valable pour les filons dont le pendage est de l'ordre de 30° à 50°
Rupture du toit de galeries ou descenderies			e : épaisseur des terrains déconsolidés θ : angle de cône moyen (angle d'influence) d : profondeur limite permettant une remontée du fontis sans auto-comblement	

Ces valeurs sécuritaires sont ensuite utilisées de manière à définir l'emprise des effondrements en surface. A ce zonage, est enfin ajoutée la marge de sécurité permettant de traiter l'incertitude liée à la localisation de la tête de puits ou du filon. Dans chacune des zones définies, un niveau qualitatif (négligeable, faible, moyen ou fort) d'aléa a été reporté. Ce niveau est obtenu par combinaison d'un niveau d'intensité avec un niveau de prédisposition du site à subir tel ou tel type de désordre :

- l'intensité, correspondant à l'ampleur du phénomène en surface, a été globalement évaluée dans le cas de Trémuson, à un niveau « moyen » du fait des dimensions pluri-métriques des désordres redoutés (sauf pour les effondrements au droit d'une descenderie d'une ampleur supérieure pour lesquels le niveau est évalué à « fort ») ;
- le niveau de prédisposition a été évalué en fonction du retour d'expérience (occurrence du type d'effondrement dans le passé) et des conditions du site (état et dimensions des travaux). Sur le secteur de Trémuson, ce niveau varie de « négligeable » à « moyen », selon différentes limites estimées par expertise ou par des modèles simples : on retient par exemple un niveau « moyen » pour les puits de plus de 50 mètres de profondeur et un niveau « faible » pour les autres. Le tableau 1.14 résume les différents niveaux d'aléa retenus.

Tableau 1.14. Niveaux d'aléa retenus pour chacun des mécanismes d'effondrement

Mécanisme	Famille	Critère	Niveau d'aléa
Rupture d'une tête de puits	Puits localisés	Profondeur > 50 m	Moyen
		Profondeur < 50 m	Faible
	Puits non localisés (à proximité des filons de la famille 4)		
Effondrement d'une tête de filon ; Rupture du toit de travaux peu profonds	Travaux dont les plans sont disponibles Filon dont l'exploitation est avérée	Profondeur > 30 m	Moyen
		Profondeur < 30 m	Négligeable
	Filon de la famille 1	Profondeur > 30 m	Moyen (*)
		Profondeur < 30 m	Négligeable
	Filon de la famille 2	Profondeur > 30 m	Faible (*)
		Profondeur < 30 m	Négligeable
	Filon de la famille 3	Profondeur > 30 m	Négligeable (*)
		Profondeur < 30 m	Négligeable
Rupture du toit de galeries ou descenderies	Galeries (de l'ordre de 2 m de diamètre)	Profondeur > 30 m	Négligeable
		Profondeur < 30 m	Moyen
	Descenderies (de l'ordre de 6 m de diamètre)	Profondeur > 50 m	Négligeable
		Profondeur < 50 m	Moyen

(*) et (**): ces points seront discutés dans le prochain paragraphe

Evaluation du risque et recommandations

A propos de la cartographie de l'aléa

L'une des difficultés majeures rencontrées lors de la réalisation du PPRM sur le site de Trémuson provient du fait que les informations minières sont absentes sur la quasi-totalité de la zone. L'existence même des travaux est très discutable pour de nombreux secteurs.

Il a été choisi pour cette étude d'utiliser un outil développé dans le cadre de la thèse, l'*indice d'existence*, permettant de caractériser cette source particulière d'incertitude. Néanmoins, durant le développement du PPRM en 2004, cet outil n'était pas encore opérationnel et c'est une autre stratégie qui avait alors été adoptée. Comme il apparaît dans le tableau 1.14, le niveau d'aléa n'est pas le même quelque soit la famille de filon étudiée (ces niveaux sont marqués du symbole **(*)**). Le niveau d'aléa a en effet été « déclassé » si les informations témoignant de l'existence de la mine ne sont pas jugées suffisantes par l'expert. Cette stratégie correspond en fait à diminuer le niveau de la prédisposition du site à subir tel ou tel type d'effondrement, puisque dans certains cas (famille 2), « on suppose l'existence de travaux mais on n'en est pas certain » (Pilch et Salmon, 2005).

Ce déclassement possède plusieurs avantages qui ont motivé son utilisation. Tout d'abord, il permet de ne pas obtenir une carte ne comprenant que des zones d'aléa « moyen », ce qui aurait été le cas si ce choix n'avait pas été adopté. Une telle hiérarchie entre différentes zones permet alors d'identifier les zones les plus critiques (ce qui est finalement le but d'un PPRM) mais aussi de mieux représenter la connaissance de l'expert, qui d'après son expérience d'autres sites miniers, sait qu'un niveau d'aléa moyen sur tout le secteur de Trémuson aurait sûrement été exagéré. Ensuite, ce déclassement permet également de travailler avec une carte d'aléa unique et facilement lisible par un public non spécialisé.

Malgré tout, cette stratégie peut amener une certaine confusion dans l'interprétation de la carte. La figure 1.18 présente un zoom qui a été effectué dans le secteur de Plouvara. Sur cette figure, deux zones d'aléa « faible » sont cartographiées. Pour les deux zones, ce niveau d'aléa possède néanmoins un sens différent : le niveau « faible » de la zone A s'explique par l'intensité du phénomène redouté, celui de la zone B provient du déclassement lié au doute qu'a l'expert sur l'existence de l'ouvrage (ici l'indice d'existence est de 2, alors qu'il était de 5 dans la zone A). L'occurrence d'un effondrement dans la zone A est possible alors que dans la zone B, elle est uniquement conditionnée par la présence réelle de travaux souterrains.

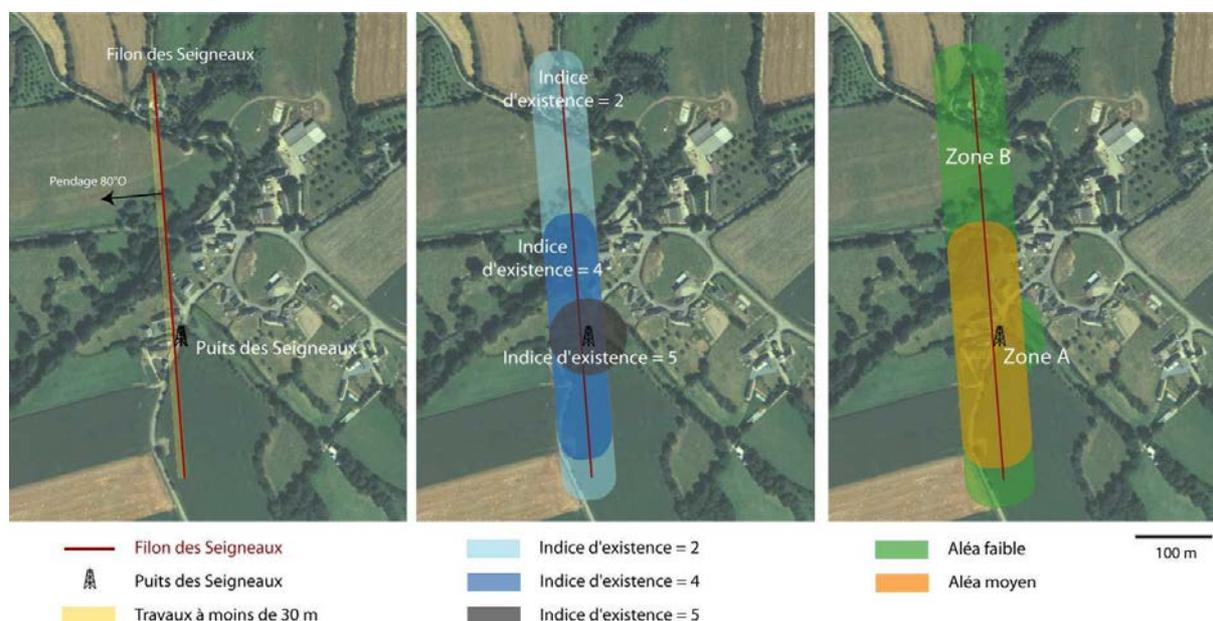


Figure 1.18. Zoom sur le secteur de Plouvara où co-existent deux zones d'aléa faible : le niveau de l'un s'explique par son intensité, celui de l'autre par le doute sur l'existence de l'ouvrage

Cette confusion se retrouve également lorsqu'on évoque les moyens de réduire les différentes incertitudes rencontrées lors de l'évaluation et du zonage de l'aléa dans les zones A et B. Dans la zone A, les principales incertitudes sont liées aux données et aux modèles. Parmi les stratégies qui peuvent être envisagées pour réduire l'incertitude sur l'expression et le zonage de l'aléa, on citera :

- la réalisation de sondages non destructifs permettant de réduire l'incertitude sur la valeur de e (épaisseur des terrains déconsolidés) et ainsi de modifier (étendre ou réduire) le zonage autour du puits ;
- la réalisation de décapages à la pelle mécanique ou d'investigations radar pour rechercher la position exacte du puits et réduire la marge de sécurité liée à la mauvaise localisation ;
- l'amélioration du modèle d'évaluation du niveau d'aléa, par des modélisations numériques par exemple, permettrait de préciser le niveau réel de ce dernier.

Dans la zone B, l'incertitude majeure est liée à l'existence d'un ouvrage souterrain. Attester ou infirmer cette existence engendrait alors l'augmentation du niveau d'aléa (on se retrouverait alors dans le cas des travaux dont les plans sont disponibles) ou l'annulation en bonne et due forme de cet aléa. Une fois l'existence attestée, les mêmes actions que celles présentées pour la zone A auraient les mêmes conséquences sur l'évaluation du niveau et du zonage de l'aléa.

Cartographie de l'indice d'existence dans le cadre des PPRM

Comme il l'a été indiqué plusieurs fois dans ce chapitre, l'outil qu'est l'*indice d'existence* a pu être développé parallèlement à la réalisation du PPRM de Trémuson et a été précisé sur d'autres études (Cauvin et al., 2006). Cet outil apparaît parfaitement adéquat pour lever les difficultés qui ont pu être présentées au travers de l'analyse de la figure 1.18. L'utilisation d'un tel outil permet également de faire ressortir dans l'étude les problèmes liés à l'existence de ces nombreux puits non localisés, qui ne sont finalement pas représentés sur la carte d'aléa (cas (**)) du tableau 1.14) et dont la mention est uniquement faite dans le rapport d'analyse du PPRM, leur localisation ayant été jugée trop imprécise pour être cartographiée.

La cartographie de l'*indice d'existence* apparaît ainsi être un excellent complément à la cartographie de l'aléa demandée dans le cadre du PPRM. Deux stratégies peuvent alors être envisagées pour fournir un rendu opérationnel intégrant cet outil comme nous allons l'illustrer sur deux exemples concrets.

Ces exemples sont issus des secteurs de la Ville Alhen et de Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée. La figure 1.19 présente les cartes informatives de ces deux zones. Le premier secteur se caractérise par l'existence (très rare dans le cas de Trémuson) des plans des travaux miniers. Le second s'illustre par la présence d'une trentaine de puits, répertoriés dans les archives mais non cartographiés, situés « à proximité » des filons. On rappelle qu'une marge de 150 m a été choisie pour exprimer cette incertitude sur leur localisation.

La première stratégie qui peut être adoptée consiste à accompagner la carte de l'indice d'existence, d'une carte d'aléa dite « *maximale* », sur laquelle la stratégie de *déclassement* ne serait pas appliquée. La seconde stratégie consiste quant à elle à compléter la carte de l'indice d'existence par une carte d'aléa dite « *la plus vraisemblable* », représentant le niveau d'aléa estimé par l'expert.

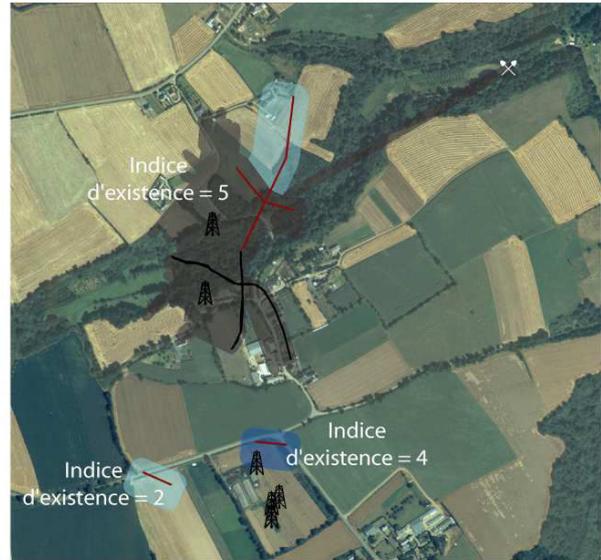
Les figures 1.20 et 1.21 montrent les résultats des différentes analyses sur les secteurs de Ville Alhen et Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée, suivant ces deux stratégies. Toutes deux possèdent certains avantages et inconvénients.



Figure 1.19. Cartes informatives du secteur de Ville Alhen (haut) et Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée (bas)



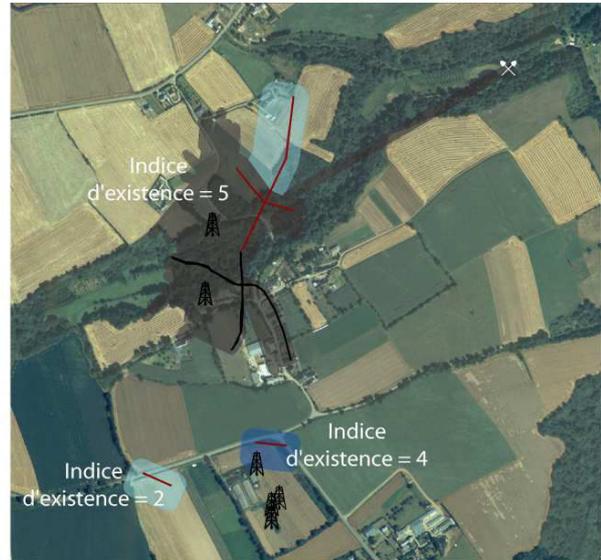
Aléa faible
Aléa moyen



Indice d'existence = 2
Indice d'existence = 4
Indice d'existence = 5
100 m



Aléa faible
Aléa moyen



Indice d'existence = 2
Indice d'existence = 4
Indice d'existence = 5
100 m

Figure 1.20. Secteur de Ville Alhen : cartes de l'aléa « maximal » et de l'indice d'existence (haut) VS cartes de l'aléa « le plus vraisemblable » et de l'indice d'existence (bas)

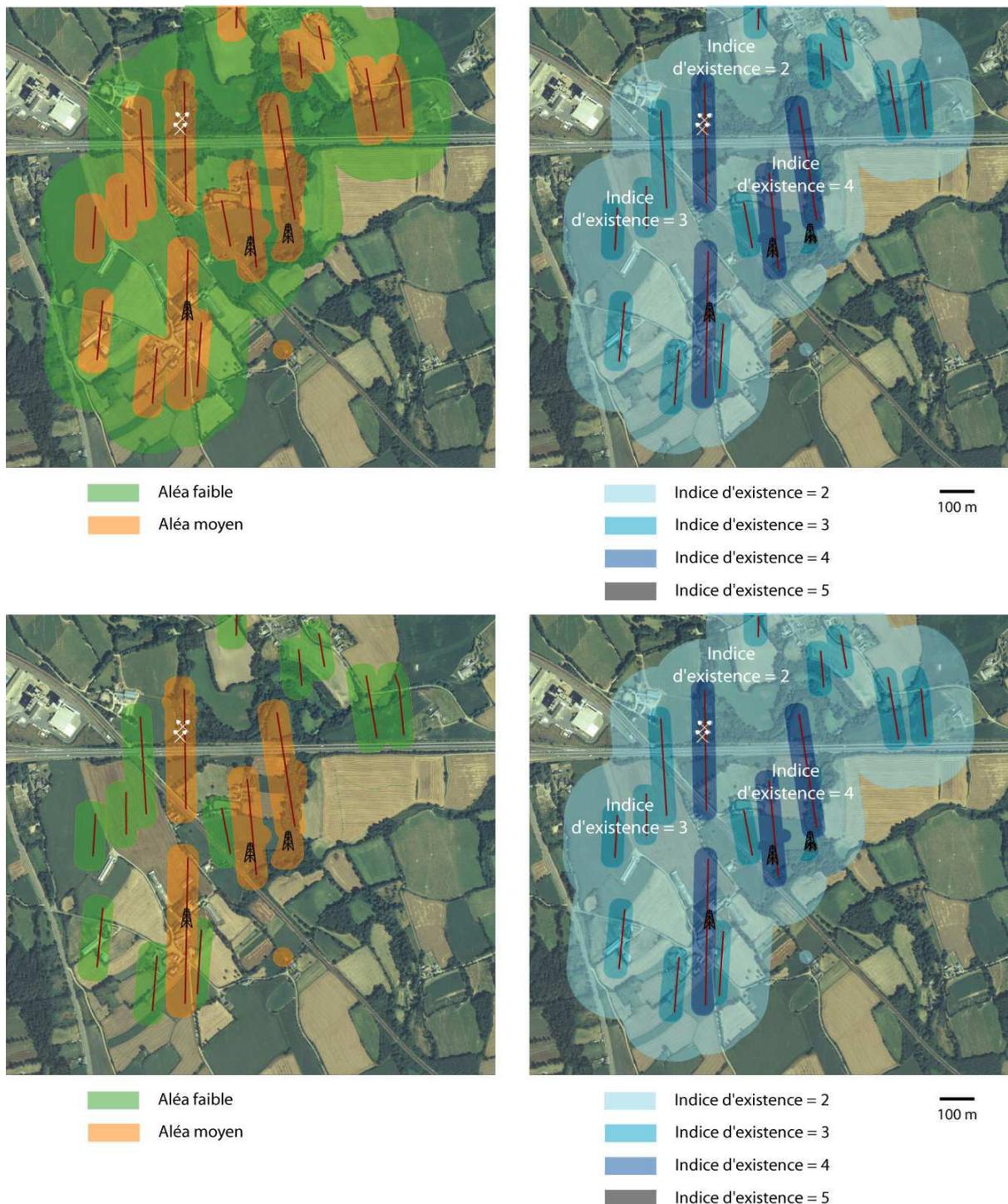


Figure 1.21. Secteur de Chatelaudren, quartier de la rue Bourgée : cartes de l'aléa « maximal » et de l'indice d'existence (haut) VS cartes de l'aléa « le plus vraisemblable » et de l'indice d'existence (bas)

La première possibilité, celle de la cartographie de l'aléa « maximal » et de l'indice d'existence, permet d'obtenir des cartes d'aléa qui correspondent au « pire cas ». Celles-ci doivent être comprises comme les cartes d'aléa qui seraient mises au point si les ouvrages miniers souterrains existaient vraiment et si des puits se trouvaient localisés sur la zone. Dans ce cas, l'ajout de connaissances supplémentaires dans l'étude pourrait permettre de diminuer à la fois le niveau d'aléa, mais aussi, dans certains cas, de le supprimer totalement. Cette stratégie possède également l'avantage, au travers de l'importance des zones d'aléas concernées et des niveaux souvent forts de ces derniers, d'insister sur l'état des connaissances qui a permis à l'expert de réaliser son étude et de motiver des recherches

supplémentaires. L'interprétation et la valeur de l'indice d'existence prennent ici tout leur sens. Par contre, cette stratégie possède le désavantage de « faire peur » aux autorités et décideurs locaux, au sens où elle majore le niveau d'aléa réel et ne permet pas de faire de réelle distinction entre les différents types d'aléas.

La seconde possibilité traduit peut-être mieux la démarche d'expertise, au sens où elle représente l'état qui est jugé « le plus vraisemblable » par l'expert. La carte d'aléa est la même que celle qui est fournie actuellement dans le cadre des PPRM. La carte de l'indice d'existence complète celle-ci en indiquant les zones où des investigations supplémentaires peuvent être nécessaires du fait d'un doute important sur l'existence réelle de travaux. En un sens, ce couple de cartes peut être vu tel un couple moyenne/variance en statistique : le premier terme témoigne de l'état le plus probable, le second illustre les variations qui peuvent exister autour de cet état. Néanmoins, le danger de fournir de telles cartes est lié au fait que l'ajout de certaines informations à l'étude (comme la confirmation de l'existence d'une galerie minière en profondeur) peut faire augmenter le niveau de l'aléa. Ceci est alors peut-être difficilement acceptable par les autorités publiques.

Tableau 1.15. Avantages et inconvénients des deux stratégies de cartographie proposées

	Stratégie 1 Aléa « maximal » / indice d'existence	Stratégie 2 Aléa « le plus vraisemblable » / indice d'existence
Avantages	1) le niveau d'aléa peut uniquement être réduit 2) la nécessité d'investigations complémentaires est parfaitement mise en avant par l'illustration du « pire cas »	1) la carte d'aléa fournie est la même que celle qui est acceptée et comprise aujourd'hui par les pouvoirs publics 2) l'idée du couple « état le plus vraisemblable » / « doute sur cet état » permet de faciliter la communication
Inconvénients	1) le niveau majoré et l'ampleur des zones concernées peuvent « faire peur » aux décideurs 2) le niveau majoré et l'ampleur des zones concernées ne sont pas représentatives de l'état réel	1) le niveau d'aléa affiché originellement peut être revu à la hausse

A propos de la gestion du risque

Une fois la « première version » de la carte d'aléa établie, celle-ci est généralement poussée plus en avant lorsque des enjeux de surface existent. On recherche notamment à améliorer l'évaluation de l'aléa dans certains secteurs plus vulnérables. La notion de « risque » est en fait implicitement présente dans l'esprit de l'expert dès la réalisation de l'étude de l'aléa.

Cette phase correspond en fait à la phase 6 présentée sur la figure 1.2, pendant laquelle l'expert est amené à « re-boucler » son étude en incorporant de nouvelles ressources à l'analyse. Des méthodes comme celles présentées précédemment pour les zones A et B du secteur de Plouvara (figure 1.18) peuvent par exemple être utilisées pour améliorer la connaissance sur l'existence ou la localisation des anciens ouvrages miniers : sondages de recherche, décapages à la pelle mécanique, radar, etc. La figure 1.22 illustre un sondage destructif mené sur la concession de Trémuson à proximité d'une habitation qui « pourrait » être localisée au droit d'une ancienne galerie.



Figure 1.22. Réalisation d'un sondage destructif à proximité d'une habitation

Durant cette phase de « re-bouclage », l'intérêt pratique de l'indice d'existence présenté ressort clairement puisqu'il permet d'identifier les incertitudes majeures rencontrées lors de l'analyse. Il met ainsi le doigt sur les ressources qui manquent et qui permettrait de préciser le résultat de l'étude de risque.

4.4 Bilan sur traitement des incertitudes effectué lors de la réalisation du PPRM sur la concession de Trémuson

L'exemple du Plan de Prévention des Risques Miniers sur la concession de Trémuson a permis de montrer que :

- la typologie présentée sur la figure 1.5 peut être efficacement utilisée pour identifier et cartographier les différentes incertitudes rencontrées dans la pratique et elle peut s'adapter à des problèmes et études concrètes ;
- un traitement *qualitatif* de l'incertitude est adapté à des études où les incertitudes de ressources jouent un rôle important et que des résultats quantitatifs auraient été délicats à interpréter ;
- l'indice d'existence peut aider à l'amélioration des Plans de Prévention des Risques Miniers au sens où il apporte un complément aux résultats fournis aujourd'hui, mais peut également aider à la communication avec les pouvoirs publics. Cet outil s'avère de plus parfaitement adapté aux études et peut être mis en œuvre très facilement.

Cette étude a également souligné l'importance de la communication entre l'expert qui réalise son analyse et les destinataires de celle-ci. L'expert doit en effet garder à l'esprit que son étude sera diffusée et qu'un accent doit être mis sur des outils permettant un meilleur échange entre les acteurs de la gestion du risque. Les notions d' « indice de confiance », de couple « moyenne / variance » ou la cartographie de l'indice d'existence évoquées dans cette étude vont dans ce sens.

5 CONCLUSIONS

Cette première partie du mémoire s'est articulée autour de la notion de l'incertitude dans le contexte des analyses de risques. Plusieurs résultats importants ont pu être avancés :

1. la démarche d'analyse de risque a été décrite comme une interaction de quatre « paramètres » : ressources, expert, modèles et données. Ceux-ci possèdent la particularité d'être fortement dépendants les uns des autres et de tous être soumis à des indéterminations dont la nature peut être très différente ;
2. l'incertitude a été définie dans le cadre de l'analyse de risque comme « *l'ensemble des indéterminations sur les paramètres d'un processus d'analyse de risque, qui conduit à une indétermination sur le résultat de cette analyse* ». En étant relativement large mais complète, cette définition s'adapte parfaitement à un des objectifs principaux de la thèse. Elle permet en effet d'intégrer de nombreuses notions, importantes pour les acteurs de la gestion du risque, et ainsi permet une meilleure communication entre ces derniers. Elle permet également de pouvoir être utilisée opérationnellement dans la pratique ;
3. une typologie de l'incertitude a été développée pour répondre à trois objectifs : 1) cartographier et schématiser les incertitudes rencontrées dans la pratique (des exemples précis ont été donnés), 2) s'adapter au contexte des études, et notamment aux quatre paramètres de la démarche d'analyse, et 3) permettre un traitement opérationnel ;
4. concernant le traitement opérationnel des incertitudes, des outils ont été présentés pour chacune des catégories décrites dans la typologie. Lorsque ceux-ci n'existaient pas dans la littérature, des propositions ont été faites. Il apparaît au travers d'un exemple concret que *l'indice d'existence* peut être un outil puissant pour maîtriser le problème de l'incertitude liée à l'existence des ouvrages souterrains ;
5. lorsque *l'intégration* concrète de l'incertitude dans l'analyse (via une quantification par exemple) n'est pas possible, la *confrontation* peut être un excellent moyen de prendre en compte celle-ci. Une *comparaison* entre les résultats induits par tel ou tel choix, par l'utilisation de tel ou tel outil, peut ainsi permettre d'*illustrer* l'influence que certaines incertitudes peuvent avoir dans les analyses ;
6. dans la pratique, le choix réel des méthodes de traitement des incertitudes se fait surtout en fonction de la caractérisation de l'ensemble des indéterminations présentes dans l'étude. Les liens forts entre les différentes catégories de la typologie induisent des choix méthodologiques importants : une méthode performante pour traiter un certain type d'incertitude peut par exemple s'avérer peu intéressante vis-à-vis du résultat final de l'analyse si les autres types ne sont pas également pris en compte. Un traitement qualitatif de l'incertitude semble ainsi particulièrement adapté à des études où les incertitudes de ressources jouent un rôle important.

L'accent a été fortement mis dans cette première partie sur le côté opérationnel des études de risque et sur les difficultés que peut rencontrer l'expert lors de ses analyses. De nombreux exemples ont ainsi été proposés pour illustrer les propos et les outils introduits. Ces outils ont, de plus, tous une vocation pratique forte :

- ils constituent des *outils d'aide à l'expertise* en cela qu'ils accompagnent l'expert dans son analyse et permettent d'illustrer l'influence que peuvent avoir certaines indéterminations. Ils peuvent parfois également fournir des solutions pour intégrer concrètement ces dernières dans les études ;
- ils s'adaptent aux outils actuellement utilisés (dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Miniers notamment) ;
- ils permettent de *faciliter la communication* entre les différents acteurs de la gestion du risque en cela qu'ils utilisent des concepts facilement compréhensibles par des personnes de cultures différentes. Cette communication est d'autant plus importante pour l'expert que ses résultats d'analyse sont amenés à être diffusés plus largement.

CHAPITRE 2. DE LA NOTION DE PROBABILITE DANS L'EVALUATION DU RISQUE

Certains aléas naturels, qu'ils soient particulièrement fréquents ou dramatiques comme les inondations ou les séismes, sont aujourd'hui relativement bien connus du grand public. Les approches développées pour leur gestion reposent sur des propriétés spécifiques intrinsèques aux phénomènes étudiés et permettent de fournir différentes données probabilistes, chiffrées, renseignant sur les conséquences possibles des événements redoutés et qui sont particulièrement bien accueillies par les destinataires des analyses de risque (autorités, grand public, compagnies d'assurances, etc.).

Les aléas liés au sol et au sous-sol reposent pour leur part sur des mécanismes différents. Pour ceux-ci, les hypothèses physiques ou la connaissance scientifique générale ne sont plus les mêmes que pour les crues ou les séismes et des approches différentes ont alors dû être développées.

Ce second chapitre du mémoire de thèse s'articule autour de *l'utilisation et de la signification de l'outil probabiliste dans les études de risque*. Il se fixe comme objectifs :

- de faire un Etat de l'art sur les approches utilisées dans le cadre de la gestion des risques naturels en insistant sur les hypothèses de base qui rendent possible l'utilisation des probabilités (partie 1) ;
- de faire un bilan conceptuel sur la réelle signification des probabilités, de manière à éviter certaines confusions que l'on peut rencontrer dans la pratique (partie 2) ;
- de présenter les vertus de l'outil probabiliste comme solution pour la prise en compte de certaines catégories d'incertitudes (partie 3) ;
- d'évaluer la possibilité d'exprimer réellement les probabilités d'occurrence temporelle et spatiale d'un aléa pouvant être engendré par un objet rocheux (partie 3) ;
- d'apporter des solutions à certains manques conceptuels et méthodologiques qui existent aujourd'hui, notamment à propos de la composante temporelle des analyses (partie 4).

De la même manière que dans le premier chapitre, un accent important sera porté sur le caractère opérationnel des travaux. L'exemple simple de l'analyse de stabilité d'un pilier minier (partie 2) ou du phénomène de fontis (partie 4) serviront alors de fils conducteurs à ce chapitre et permettront :

- d'insister sur les avantages, pour l'expert et les destinataires des études de risque, des outils et méthodologies introduits ;
- de montrer que la mise en application de ceux-ci est réellement possible dans la pratique ;
- de présenter certaines interprétations pratiques qui peuvent être faites des probabilités estimées ;
- d'illustrer concrètement les propos parfois conceptuels qui pourront être donnés.

1 DE LA NOTION DE PROBABILITE D'OCCURRENCE D'UN ALEA NATUREL A CELLE DE PREDISPOSITION

Le « risque naturel » a été défini dans la première partie de la thèse comme la combinaison d'un aléa naturel, de la vulnérabilité des enjeux et de l'efficacité des mesures préventives (Merad, 2003). Si on s'intéresse plus précisément au terme d' « aléa naturel », en trouver une définition unique dans la littérature n'est pas chose facile. Ce peut être :

- « *la manifestation d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données* » (prim.net (2007), site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable dédié à la prévention des risques majeurs) ;
- un « *événement qui a pour origine un phénomène « naturel », par opposition à un événement provoqué par une action humaine. C'est donc un événement à probabilité non nulle qui a sa source et se développe initialement dans un milieu naturel (air, sol, eau)...* » (Commission interministérielle de l'évaluation des politiques publiques, 1997) ;
- « *un événement naturel susceptible de se produire et dont on s'efforce d'évaluer la probabilité* » (Bourrelier et al., 2000).

La caractérisation d'un aléa consisterait ainsi en l'évaluation de la probabilité d'un événement d'une intensité donnée. Maintenant, reste sous-jacente à cette caractérisation la question de la signification du terme de « probabilité ».

Ce chapitre se propose d'examiner, à travers plusieurs exemples, l'état des connaissances sur l'utilisation et la signification des probabilités dans diverses analyses de risques naturels. Le projecteur se focalisera dans un premier temps sur le phénomène d'inondation relativement fréquent en France, puis se tournera vers les aléas liés aux objets rocheux et leurs spécificités.

1.1 Détermination de la probabilité qu'un événement survienne en un endroit donné durant une année donnée

Exemple 1 : le phénomène d'inondation

Comme le présente le site Internet du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, le « *risque « inondation » est le premier risque naturel en France, tant par l'importance des dommages qu'il provoque que par le nombre de communes concernées (8000), l'étendu des zones inondables (plus de 20000 km²) et les populations résidant dans ces zones (4,5 millions de français)* ». (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2007). A l'instar de certains autres phénomènes climatiques rares comme les pluies extrêmes ou les avalanches, les inondations sont en ceci spéciales qu'elles peuvent se reproduire quasiment à l'identique plusieurs fois au même endroit. De tels phénomènes sont généralement caractérisés par leur intensité et par la *période de retour* associée à cette intensité. Cette dernière correspond à l'intervalle de temps moyen entre deux occurrences d'un événement de même intensité en un même endroit. Notons bien que la période de retour correspond à une moyenne statistique : durant une période T , il est tout à fait possible qu'aucune inondation de niveau Q_T n'apparaisse ou qu'il en apparaisse plusieurs...

Pour ces phénomènes climatiques, on peut faire l'hypothèse que les différents événements successifs d'une série d'événements de même intensité sont indépendants entre eux et que le phénomène est stationnaire, ou *sans mémoire*, c'est-à-dire que ces caractéristiques ne dépendent pas de l'origine du temps d'observation, i.e. le temps moyen entre deux événements est constant dans le temps. On parle généralement dans ce cas de *processus de Poisson*. Utilisant cette hypothèse, il est possible de rattacher la notion de période de retour à celle de probabilité p d'un événement dommageable :

$$p = 1/T \quad (\text{Eq. 2.1})$$

p est définie comme la probabilité que l'événement se réalise au cours d'une année donnée. Concrètement, p mesure la vraisemblance de cette réalisation : elle vaut 0 lorsque l'événement est impossible et 1 lorsqu'il est certain. Dans la pratique, du fait de l'hypothèse de stationnarité, on peut évaluer la probabilité qu'il y ait au moins un phénomène de période de retour T pendant la période t par l'expression suivante :

$$p(\text{au moins 1}) = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

En un endroit donné, la crue centennale a ainsi par définition 1 chance sur 100 de se produire dans l'année. Par contre, la probabilité d'avoir une crue centennale est de 18% dans les vingt ans, de 63% dans le prochain siècle et de 95% dans les trois siècles à venir. Cette crue centennale est généralement retenue comme « événement de référence » et, à partir du retour d'expérience et de l'analyse de données historiques, certains paramètres permettant de la caractériser peuvent être estimés : hauteur et durée de submersion, vitesse du courant, etc.

Disposer de tels chiffres peut s'avérer particulièrement important pour de nombreux acteurs intervenant dans les analyses et la gestion du risque. Ainsi, connaissant un ordre de grandeur de la probabilité d'occurrence, en un endroit précis, d'un événement possédant certaines caractéristiques (une hauteur de submersion donnée par exemple) :

- les décideurs publics peuvent juger du niveau acceptable ou non des conséquences vis-à-vis de la population ou des infrastructures, et mettre en place une législation ou des recommandations en terme d'aménagement du territoire pour y faire face ;
- les compagnies d'assurance peuvent définir leur taux de cotisations et de dédommagements ;
- le public peut avoir à sa disposition des données quantifiées beaucoup plus « parlantes » que de simples niveaux qualitatifs d'aléa (même si certaines notions, comme la période de retour, sont souvent mal interprétées, le terme « en moyenne » étant généralement oublié).

Exemple 2 : le phénomène de chute de blocs depuis un versant naturel

Dit de manière peut-être un peu rapide, le phénomène d'éboulement rocheux (figure 2.1) peut être décrit comme la conclusion d'un processus d'initiation et de développement d'une rupture provoquant le détachement d'un bloc depuis un versant rocheux.



Figure 2.1. Eboulement rocheux dans la vallée de la Tinée

D'une certaine manière, ce phénomène peut être considéré comme cyclique *en un point précis d'un versant naturel* : un bloc se détache, mettant à nu une nouvelle surface. Celle-ci sera ensuite progressivement dégradée du fait de plusieurs facteurs d'« érosion », internes ou externes, jusqu'à ce qu'une nouvelle rupture s'initialise, se développe et qu'un bloc se détache, et ainsi de suite. Un tel processus peut s'étaler, selon la nature et les caractéristiques des versants et de leur environnement, sur plusieurs décennies, siècles, voire millénaires. Comme pour les phénomènes d'inondations précédemment décrits, l'inventaire, sur une durée suffisamment longue, des événements survenant en un même site permettrait de déterminer l'intervalle de temps moyen entre deux événements, intervalle qui correspond à la période de retour d'une chute de bloc d'un volume donné.

Mais, à la différence des crues, il est difficile pour les éboulements rocheux de soutenir que le processus est sans mémoire : le temps d'attente moyen entre deux événements *en un point donné* n'est plus constant, mais il décroît au fur et à mesure que le temps passe depuis la dernière chute de blocs. Le processus est ici un processus de dégradation progressive qui ne peut pas être assimilé à un processus de Poisson. La notion de « probabilité annuelle » de rupture devient dépendante du niveau de « dégradation » du point considéré.

La figure 2.2, tirée de Durville (2004), présente plusieurs types d'évolution de la probabilité $p(n)$ qu'un événement dommageable (crue, chute de blocs, etc.) survienne *en un point donné*, au cours de l'année n , sachant qu'il ne s'est pas déroulé avant le 1^{er} janvier de cette année n :

- la courbe 1 représente un *processus de Poisson* : l'occurrence d'un événement (une crue par exemple) ne dépend en rien de ce qui a pu se passer les années précédentes, i.e. la probabilité que l'événement survienne durant l'année n est la même que durant l'année $n-1$ ou l'année $n+1$;
- la courbe 2 représente un *processus de dégradation progressive* : plus on avance dans le temps, plus la probabilité qu'un bloc chute depuis un point précis d'une falaise augmente, du fait notamment du mécanisme d'érosion. Une fois la rupture survenue, le cycle sera « réamorcé » ;
- la courbe 3 peut être interprétée de deux manières : soit comme un *processus de « mortalité infantile »*, soit comme un *processus de « consolidation »* naturelle ou anthropique. Le premier est relatif à des défaillances qui surviennent dès le début de vie d'un objet rocheux, du fait par exemple d'une certaine fragilité résultant d'une génération de fractures lors d'un abattage à l'explosif. Le second s'explique par l'amélioration de la stabilité par des confortements naturels (développement d'un couvert végétal dans le cas des glissements de terrains, etc.) ou anthropiques (création d'un mur de soutènement, etc.).

La gestion du risque sera très différente en fonction du type de l'évolution. Dans le cas d'une évolution de type 3, le problème principal est un problème « à court terme » et des moyens de prévention provisoires peuvent s'avérer efficaces. Dans le cas d'une évolution de type 2 au contraire, les mesures à prendre doivent être différentes puisque celles-ci ne peuvent être mises en œuvre que à moyen ou à plus long terme. On pourrait par exemple tolérer dans ce cas une occupation provisoire du site. Enfin, une évolution de type 1 nécessite une action constante qui peut être lourde, puisque le phénomène « ne prévient pas ». Dans ce cas, une surveillance permanente de l'ouvrage pourrait constituer une solution adéquate.

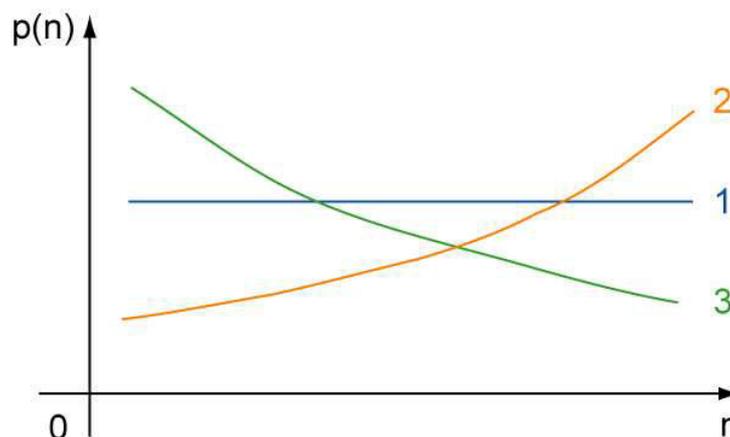


Figure 2.2. Evolutions de la probabilité d'un événement dommageable durant l'année n , conditionnellement à la non-occurrence de cet événement jusqu'à la fin de l'année $n-1$ (d'après Durville, 2004)

Avant de pouvoir envisager une réelle gestion du risque, il convient malgré tout dans la pratique de pouvoir déterminer le comportement réel des objets étudiés et de tracer de telles courbes. Dans le cas de l'analyse des aléas liés aux objets rocheux, du fait de la complexité des mécanismes d'évolution de ces derniers, l'estimation de la probabilité qu'un événement survienne *en un point précis* et dans un laps de temps donné, ne peut se faire que si l'on connaît le stade de développement actuel de la

rupture. Cette connaissance n'est malheureusement accessible que très difficilement, grâce par exemple à une surveillance constante de l'objet, ce qui dans la pratique n'apparaît pas être une solution adéquate pour traiter de très nombreux sites.

1.2 De l'analyse en un endroit précis à l'analyse sur un secteur homogène

Comme le montre bien Durville (2004), « *la situation est [malgré tout] différente si l'on considère non plus l'occurrence d'événements en un point donné mais sur un secteur homogène en entier. [...] La série temporelle des événements survenant dans un tel secteur peut souvent être assimilée à un processus de Poisson. En effet, dans la mesure où le secteur considéré comprend un grand nombre de sites potentiels et où ces différents sites sont à des stades d'évolution très variables, l'occurrence des événements devient stationnaire et l'on peut parler alors de la période de retour T de l'événement « chute de bloc provenant d'un point quelconque de la falaise » par exemple. En moyenne, il tombe donc $1/T$ bloc(s) par an, si T est exprimé en années, mais on ne peut dire à quel point précis.* »

Plusieurs hypothèses permettent de justifier l'utilisation du processus de Poisson dans ce cadre :

- pour les échelles de temps considérées (de l'ordre du siècle dans le cadre de perspectives d'aménagement du territoire ou de durées de vie des ouvrages), l'extrapolation des conditions du passé au futur est possible. Les influences des principaux paramètres jouant un rôle dans le processus de chute de blocs (activité humaine ou conditions climatiques), même s'ils ont évolué depuis un siècle, peuvent en effet être négligées à de telles échelles. *L'état est donc stationnaire d'une manière temporelle.* Ce ne sera malgré tout pas le cas pour des échelles de temps plus grandes ;
- pour des secteurs homogènes de grande ampleur, dans lesquels différents sites sont à des états de dégradation très variables, l'occurrence de chutes de blocs ne modifie pas de manière significative les conditions relatives à la géologie, à la géomorphologie ou à l'état d'évolution des sites. *L'état peut donc être considéré stationnaire d'une manière spatiale.*

Dans la pratique, c'est de l'événement « survenue de l'événement dommageable en un point quelconque du secteur homogène dans un délai t » dont il est maintenant question. Hantz et al. (2002) estiment par exemple qu'il tombera en moyenne 65 blocs dont le volume est compris entre 10^2 et 10^3 m³, par siècle, depuis les falaises calcaires bordant les massifs de la Chartreuse et du Vercors. Connaissant la longueur linéaire des falaises (120 km) et leur hauteur moyenne (200 m), on peut estimer à 24 000 000 m² la surface de la paroi considérée. Un site d'éboulement typique d'un volume compris entre 10^2 et 10^3 m³ représentant environ 50 m², si on suppose que la paroi est globalement homogène du point de vue géologique et morphologique (il y a donc à peu près 480 000 sites de départ potentiels), l'ordre de grandeur de la période de retour d'une chute de bloc en *un site ponctuel* est alors de 740 000 ans.

De telles informations ne permettent de caractériser le secteur homogène étudié qu'à l'échelle « régionale » et *en moyenne*. Elles peuvent s'avérer efficaces pour, par exemple, comparer la dangerosité de deux versants distincts (deux vallées distinctes). Néanmoins, elles ne sauraient permettre de réaliser une analyse « locale » fiable, pour laquelle il est nécessaire, comme on l'a présenté précédemment, de connaître le stade de développement de la rupture.

Exemple 3 : stabilité d'une pente « artificielle »

Les versants rocheux dont il a été question dans l'exemple précédent peuvent être qualifiés de « naturels » eu sens où ils résultent d'un processus d'érosion et de vieillissement d'origine climatique, hydrologique, etc. Du fait de ce caractère naturel, il était possible de considérer, à l'échelle d'un secteur homogène, que chacun des sites potentiels de rupture est à un état d'avancement différent et que la répartition spatiale de ces états d'avancement sur le secteur étudié est aléatoire. Le phénomène est ainsi stationnaire « à grande échelle ».

Mais il semble dans le cas des pentes « artificielles » (remblai, excavation en flanc de falaise, etc.) que cette hypothèse de stationnarité spatiale ne soit plus valable. D'un côté, les sites de rupture potentiels ne sont plus à des stades d'évolutions variables puisque tous ont été « mis à nu » en même temps. La probabilité d'un événement « chute de bloc provenant d'un point quelconque de la pente » augmente alors avec le temps écoulé depuis la réalisation de l'ouvrage. D'un autre côté, l'excavation fraîche aura sans doute affaibli certaines zones de la pente. Plusieurs chutes de blocs pourront alors arriver assez rapidement lors des premiers mois, impliquant une diminution de l'angle de pente et une augmentation de la stabilité (courbe 3 de la figure 2.2).

Dans le cas des pentes « artificielles », l'évolution de la probabilité d'un événement « chute de bloc » apparaît plus délicate à traiter, même lorsqu'on considère une zone à grande échelle. Ceci s'explique principalement par l'état de la pente, qui ne suit plus un régime d'évolution stationnaire mais plutôt un régime transitoire.

1.3 De l'approche fréquentiste à la notion de prédisposition

Comme les paragraphes précédents ont pu le montrer, l'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un aléa lié à un objet rocheux apparaît bien délicate. A grande échelle, la notion de « période de retour » telle qu'elle est exprimée pour d'autres aléas naturels, peut malgré tout permettre de caractériser un site en moyenne. Néanmoins, une telle caractérisation nécessite d'une part des hypothèses fortes et d'autre part un inventaire de données historiques qui devra être analysé de manière statistique.

Devant ces problèmes liés au manque de retour d'expérience, à l'insuffisance des informations disponibles sur le site, à l'invalidité des approches utilisées pour d'autres aléas naturels comme les crues du fait d'une évolution dans le temps non permanente et à la complexité des phénomènes étudiés, l'approche utilisée dans le cadre de l'analyse des risques liés aux objets rocheux, notamment pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques, consiste, plutôt que d'estimer des probabilités annuelles ou centennales, à déterminer la potentialité du site à engendrer un événement dommageable.

On parle dans ce cas de **prédisposition** du site, ou susceptibilité, vis-à-vis de tel ou tel type de désordres. Cette prédisposition est ensuite le plus souvent estimée de manière *qualitative*. Son niveau est généralement évalué à partir de la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables ou défavorables à l'initialisation et au développement des mécanismes pressentis.

La prédisposition est estimée pour une « *durée conventionnelle de l'ordre de la durée de vie des constructions et ouvrages, soit une cinquantaine ou une centaine d'années en général* ». On peut alors considérer qu'on fait « *abstraction des facteurs variables dans le temps, supposés agir de façon similaire dans toute la région étudiée, on s'intéresse aux facteurs permanents du site, et l'on cherche à évaluer en fonction de ceux-ci un « degré d'instabilité » du site* » (Antoine et al., 2000). De part ces limitations concernant en grande partie l'aspect temporel de l'aléa, la notion de prédisposition peut apparaître insuffisante à une gestion totale du risque. On reviendra plus précisément sur cet aspect dans un prochain chapitre. Mais il faut noter que l'utilisation de la prédisposition apparaît être aujourd'hui une réponse particulièrement adaptée au contexte des études :

- les analyses que doit mener l'expert sont, comme on a pu le présenter dans la première partie, fortement ancrées dans un contexte d'incertitudes, qu'elles touchent les ressources, l'expertise, les modèles ou les données. L'ensemble des catégories d'incertitude étant concerné, un travail *qualitatif* semble particulièrement adapté et pertinent ;
- la notion de prédisposition apparaît être « *la seule voie actuellement opérationnelle* » pour permettre une évaluation de l'aléa (Antoine et al., 2000), des travaux plus « complets » étant aujourd'hui particulièrement rares et encore non validés. Cet aspect pratique est d'autant plus important que les études sont destinées à répondre à des problèmes concrets où des enjeux sanitaires, environnementaux et financiers sont concernés.

2 LES PROBABILITES : UN SEUL OUTIL POUR DEUX NOTIONS DIFFERENTES

Le passage de la notion de « probabilité d'occurrence » à celle de « prédisposition » a engendré un changement dans la signification que prend le résultat d'une analyse de risque. Ainsi, plutôt que d'essayer de caractériser la *fréquence* d'apparition d'un événement dommageable, on s'évertue maintenant dans le domaine des risques pouvant être engendrés par les objets rocheux, à évaluer la *susceptibilité* d'un site à voir se développer tel ou tel type de désordre.

Comme nous le présenterons concrètement dans la prochaine partie ou dans le dernier chapitre du mémoire, l'outil probabiliste peut être utilisé aussi bien pour exprimer des fréquences que pour caractériser la prédisposition. Mais avant d'entrer dans les détails, il convient de faire un retour plus conceptuel sur l'utilisation et la signification réelle des probabilités qui peuvent être exprimées.

Dans un excellent article illustratif, Hofer (1996) propose un exemple simple qui peut être réutilisé ici pour éclairer le propos. Cet exemple consiste à considérer deux dés dont l'un (A) va être lancé tandis que l'autre (B) a été posé sur une table par une tierce personne et est maintenant caché. Pour ces deux dés, le numéro indiqué est inconnu et l'indétermination relative à ce numéro, qui correspond à une *incertitude de données*, peut être quantifiée grâce à la notion de probabilité :

- dans le cas du dé (A), l'**interprétation « fréquentiste »**, définissant la probabilité comme limite d'une fréquence relative, prend tout son sens. Si le dé n'est pas pipé et si l'on procède à un nombre suffisamment important de lancers, on pourra considérer que la fréquence relative de sortie de chaque numéro est égale à $1/6$, chacune des faces du dé ayant autant de chances de sortir. Le numéro indiqué par le dé (A) ne peut alors être défini que sous la forme d'une fonction de distribution probabiliste, uniforme dans notre exemple ;
- dans le cas du dé (B), la situation est différente : le numéro est fixé et a uniquement une seule valeur vraie qui malheureusement n'est pas connue. Parler de limite de fréquence relative n'a plus de sens ici. Ce que la notion de probabilité peut quantifier, c'est « l'état de la connaissance relative à l'état actuel » du dé. On parlera dans ce cas d'une **interprétation « épistémique »** de la probabilité. Une loi de distribution uniforme pourra également être choisie pour définir le numéro indiqué par le dé (B). En un sens, celle-ci permettra d'exprimer un degré de croyance sur le fait que l'une des six faces ait été choisie. Sans connaissance sur le choix qui a été fait lors de la dépose du dé, le joueur n'aura alors aucun élément pour choisir un numéro plutôt qu'un autre : il pourra parier que le numéro indiqué par le dé (B) est le 1 tout en sachant qu'il n'a qu'une chance sur six d'avoir raison.

Dans ces deux cas, la même loi de distribution uniforme discrète a été choisie pour caractériser le numéro indiqué sur le dé. La réelle signification de cette loi de distribution est néanmoins très différente. Une distinction majeure entre les deux situations ressort clairement quand on examine l'impact sur la caractérisation de la loi de probabilité, d'un ajout de nouvelles ressources à l'étude :

- dans le cas du dé (A), la valeur de $1/6$ correspond à la limite de la fréquence de sortie d'un numéro (le 1 par exemple) lors d'un grand nombre de lancers. Cette fréquence n'est cependant obtenue que lorsque les ressources de l'étude sont suffisamment importantes. La figure 2.3 présente par exemple des estimations possibles qui peuvent être faites après 10, 100, 1000 et 10000 lancers de dé. On constate que plus ce nombre est grand, plus les fréquences estimées pour chacune des faces du dé tendent vers $1/6$. L'ajout de nouvelles données a permis de réduire l'intervalle de confiance sur les paramètres de la loi de distribution étudiée, et ainsi de *préciser* l'estimation de celle-ci. Dans cet exemple à vocation illustrative, l'intérêt d'une telle précision semble mince du fait de la simplicité de la loi utilisée (distribution uniforme discrète). Dans d'autres problèmes plus complexes, des relevés de mesures plus importants peuvent par contre permettre de réellement préciser les paramètres (forme, modes, etc.) de la fonction de distribution statistique considérée ;

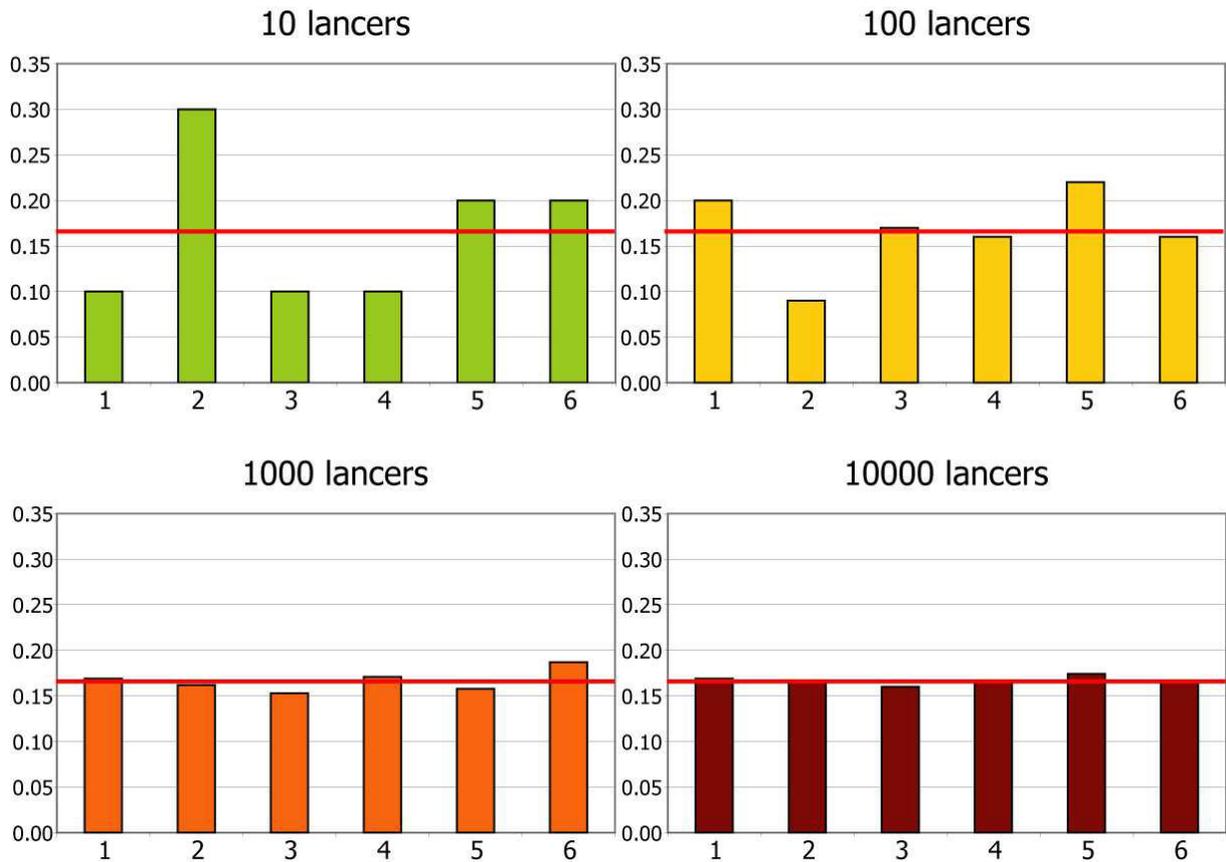


Figure 2.3. Précision, par l'ajout de connaissance, de la loi de probabilité de la variable

- dans le cas du dé (B), la valeur de $1/6$ correspond au pari fait par le joueur qui cherche à minimiser ses chances de perdre. Sans aucune connaissance sur la manière dont a été déposé le dé, il pouvait considérer que tous les numéros ont la même chance d'avoir été choisis. Ajouter des connaissances au problème va dans ce cas lui permettre d'augmenter ses chances de gagner. Ainsi, s'il connaît les préférences de la personne qui a posé le dé pour par exemple les numéros impairs, les chances qu'il ait raison d'avoir choisi le numéro 1 augmentent.

Pour chacune des deux situations, l'ajout de ressources supplémentaires à l'étude prend une forme différente. Dans le cas d'une interprétation « fréquentiste », il consiste en l'augmentation du nombre de données permettant de caractériser la loi de distribution décrivant les valeurs possibles de la variable étudiée. Un nombre plus important de lancers du dé (A) permettra ainsi de réduire la largeur de l'intervalle de confiance des estimations de la fréquence de sortie de chaque face et de tendre plus précisément vers la « vraie » loi de distribution. Dans le cas d'une interprétation « épistémique », l'ajout de nouvelles ressources prend cette fois la forme d'une augmentation de la connaissance sur le système étudié, et peut notamment consister en une amélioration des modèles de représentation de l'objet analysé. Une meilleure connaissance ne modifiera alors pas le numéro indiqué sur le dé (B) mais elle pourra, dans certains cas, permettre de faire évoluer notre estimation et, dans tous les cas, d'améliorer la croyance en cette dernière.

Dans la pratique, la situation apparaît néanmoins beaucoup plus complexe. Une analyse de risque intègre en effet diverses données et, comme on a pu le présenter dans la partie précédente, pour chacune d'entre elles existe une certaine indétermination pouvant être quantifiée par des probabilités.

Comme pour le dé (A) ou pour le dé (B), chacune des probabilités exprimées correspondra malgré tout soit à une limite de fréquence temporelle ou spatiale, soit fera référence à une mauvaise connaissance. Baecher et Christian (2003) montrent plus précisément que la signification du résultat de l'analyse dépend « *de la manière dont les hypothèses de modélisations sont faites ; particulièrement de la manière dont l'incertitude totale est séparée en variabilité naturelle d'une part et connaissance limitée d'autre part.* ». Si toutes les indéterminations présentes dans le problème sont considérées comme dues à une variabilité naturelle, le résultat probabiliste pourra lui aussi être interprété comme faisant référence à une fraction spatiale ou temporelle. Par contre, si toutes les indéterminations du problème s'expliquent par un manque de connaissances sur les valeurs exactes des paramètres, le résultat probabiliste de l'analyse fera lui aussi référence à un manque de connaissance et devra être interprété comme un degré de confiance sur le résultat, pouvant aider à parier sur l'état le plus probable.

Baecher et Christian (2003) indiquent également que les indéterminations présentes dans un problème ne concernent jamais uniquement une variabilité naturelle ou uniquement une connaissance limitée, mais qu'elles intègrent généralement ces deux notions *simultanément*. Ainsi le résultat d'une analyse, exprimé sous une forme probabiliste, devra être interprété comme un mélange entre ces deux natures. Une implication pratique importante de ceci est que l'ajout de ressources supplémentaires à l'étude pourra permettre une meilleure estimation de la loi de probabilité étudiée (part épistémique de l'interprétation), ainsi qu'une réduction de la largeur de l'intervalle de confiance des paramètres de cette dernière (part fréquentiste de l'interprétation).

Dans le cadre de la gestion des risques, l'approche « fréquentiste » apparaît peut-être la plus pertinente pour répondre aux demandes des décideurs. L'objectif souhaité dans les études est en effet d'estimer au mieux la possibilité qu'un événement redouté apparaisse dans un certain périmètre et dans un laps de temps donné, de manière à pouvoir mettre en œuvre des mesures adéquates à sa maîtrise. Le décideur cherchera ainsi à obtenir des résultats basés sur une approche spatio-temporelle de la probabilité, comme cela est possible dans le cas de risques d'origine hydraulique.

Dans le domaine des risques liés aux objets rocheux, du fait du contexte très incertain des études, l'approche « fréquentiste » devient néanmoins délicate à utiliser. Par contre, l'outil probabiliste peut quant à lui être utilisé. Compte tenu des remarques qui viennent d'être effectuées à propos de la notion de probabilité, les résultats qui seront alors donnés pourront avoir une toute autre signification et celle-ci devra être interprétée avec la plus grande attention.

Un exemple concret, simple, sera donné dans la suite pour mieux illustrer ces propos et présenter une méthode pour aider à l'interprétation d'un résultat d'analyse. Des exemples pratiques seront présentés ensuite dans la partie suivante.

3 ILLUSTRATION PAR L'ÉVALUATION DE LA STABILITÉ D'UN PILIER DE MINE

Un exemple d'analyse relativement simple, dont la vocation est principalement illustrative, va être utilisé dans cette partie dans un double but :

- montrer que l'outil probabiliste peut aider au traitement des incertitudes. On restera ainsi dans la continuité des travaux menés dans la première partie. Les incertitudes rencontrées dans l'analyse seront d'abord décrites puis caractérisées de manière quantitative en utilisant les outils introduits précédemment et les résultats de l'étude seront exprimés sous forme de probabilités. Une méthode originale pour la prise en compte des incertitudes de modèle sera également proposée ;
- mettre en application les propos théoriques énoncés dans cette partie à propos de l'outil probabiliste. L'utilisation des théories et méthodologies présentées, notamment à propos de la signification des probabilités, va alors pouvoir être discutée en profondeur. Leurs avantages et limites seront également décrits.

Cette étude constitue une adaptation en français de l'article (Cauvin et al, 2007) réalisé dans le cadre de cette thèse et accepté dans la revue *Risk Analysis*.

3.1 Evaluation de la stabilité d'un pilier de mine : une analyse déterministe

A des profondeurs faibles et pour des gisements sédimentaires en plateaux, l'une des techniques les plus communes d'extraction minière est la méthode d'exploitation par chambres et piliers abandonnés (figure 2.4). Cette méthode consiste à creuser puis à agrandir des galeries souterraines, en laissant en place des piliers destinés à assurer la stabilité du toit proche et de l'ensemble du recouvrement. Le dimensionnement de tels travaux par chambres et piliers s'est toujours évertué à trouver le plus juste équilibre entre l'intérêt économique qui pousse à rechercher l'extraction la plus importante, et la sécurité des ouvriers travaillant au fond et de la population vivant à l'aplomb des travaux. On trouve ainsi habituellement au droit des surfaces habitées des piliers dont les dimensions sont bien plus importantes que dans les zones vierges.

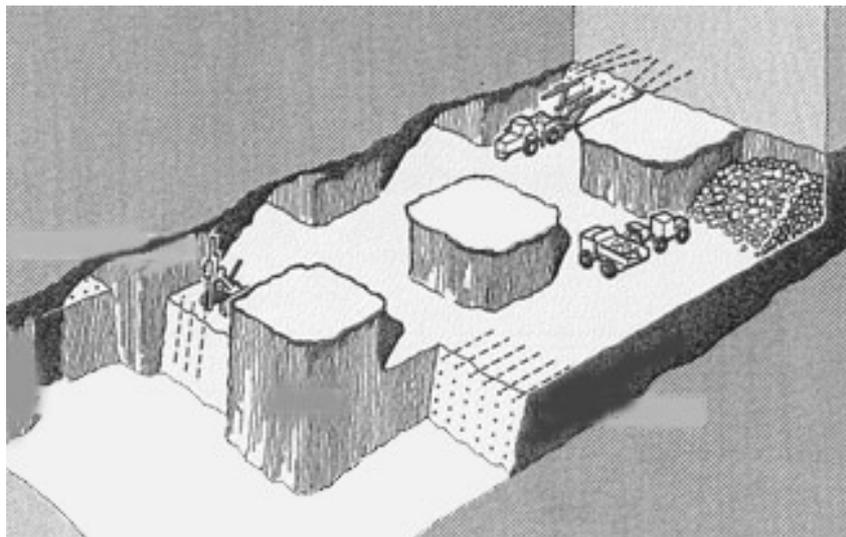


Figure 2.4. Exploitation partielle par chambres et piliers abandonnés (source : Stassen, 1982)

Au droit de ces exploitations par chambres et piliers peuvent être engendrés des problèmes de stabilité des terrains de surface. On distingue par exemple les effondrements généralisés (figure 2.5.a) dont la gestion apparaît particulièrement difficile du fait du caractère soudain de la rupture, des affaissements, caractérisés par des cuvettes de déformations plus progressives (figure 2.5.b).

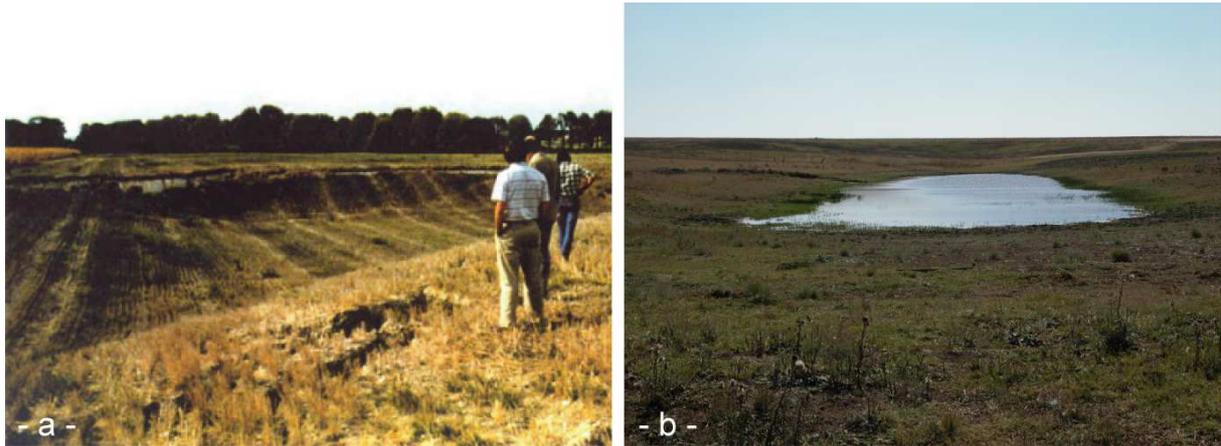


Figure 2.5. Effondrement (a, source INERIS) et affaissement (b, source Université de Pretoria) de terrains à l'aplomb d'une exploitation par chambres et piliers

L'un des précurseurs à de tels mécanismes d'effondrement de la surface est la rupture d'un pilier minier, rupture qui peut être localisée et ne concerner qu'un seul pilier (on parle dans ce cas d'effondrement localisé), ou qui peut amener la rupture des piliers alentour (phénomène de rupture en domino par exemple) et alors toucher des zones de plus grande ampleur. Dans la prochaine partie, des exemples concrets de ces deux mécanismes seront présentés, on en restera dans cette partie à l'étude de la stabilité du « premier » pilier.

L'exemple qui va être utilisé dans cette partie concerne l'évaluation de la stabilité d'un pilier d'une mine de fer de Lorraine. Le système minier étudié considère un ensemble de neuf piliers permettant d'intégrer dans l'analyse l'influence du voisinage proche du pilier central (figure 2.6.a). Les dimensions utilisées dans cette étude proviennent d'une large base de données minières sur la Lorraine. Le panneau exploité a ici une profondeur comprise entre 130 et 150 mètres et s'étend sur 500 mètres en largeur. Les piliers ont une forme rectangulaire de 8 mètres par 12, pour une hauteur de 4 mètres, les galeries étant larges de 4 mètres.

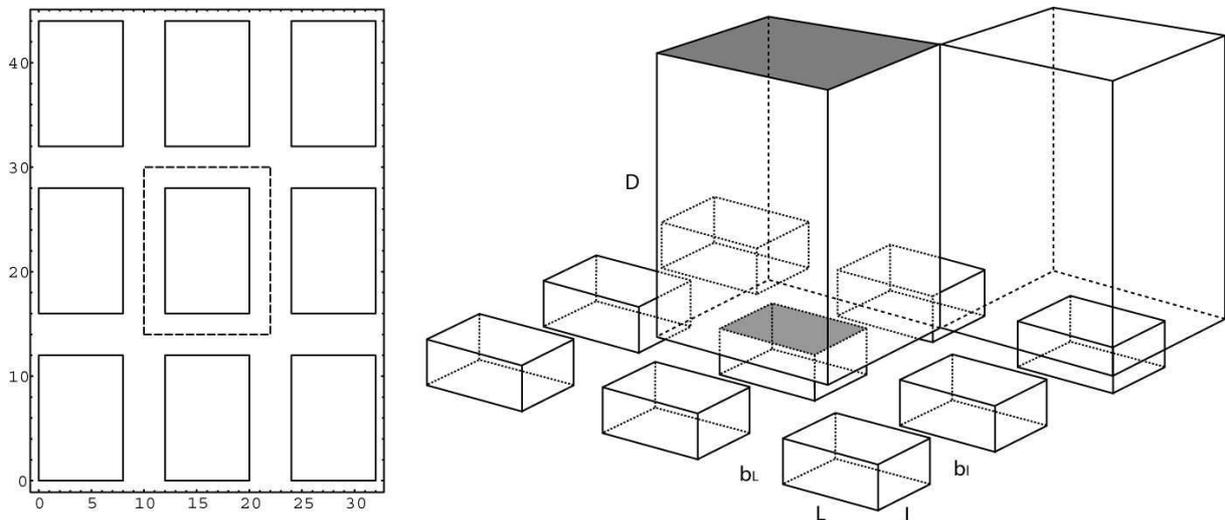


Figure 2.6. Système de neuf piliers utilisé pour l'étude (a) et Modèle de l'aire tributaire (b)

Les approches classiquement utilisées pour étudier la stabilité des piliers sont pour la plupart des méthodes déterministes (empiriques ou analytiques), simples, qui permettent de mener à bien, de manière satisfaisante, des études à grande échelle (une exploitation minière s'étend en général sur plusieurs dizaines d'hectares) et où les incertitudes sont nombreuses. Dans le cadre des études de risque menées en Lorraine, le *concept du facteur de sécurité*, noté ici SF , est utilisé comme *indicateur de la stabilité* du pilier. Ce facteur est le rapport de la résistance du pilier à la contrainte verticale qu'il subit. En théorie, une valeur de SF supérieure à 1 implique que le pilier est stable, une valeur

inférieure à 1 impliquant un état instable. En pratique, comme il l'a été présenté dans la partie précédente, une valeur plus grande, une « marge de sécurité », globale, est ajoutée pour intégrer l'incertitude inhérente au modèle et aux données.

La contrainte (S_1) s'exerçant sur le pilier peut être déterminée par le modèle de l'*aire tributaire* qui postule que la charge qui appliquée au pilier est égale au poids des terrains situés au droit de celui-ci et de ceux qui surplombent la moitié de la surface de la chambre qui l'entoure (figure 2.6.b) :

$$S_1 = \gamma D \frac{(l + b_l)(L + b_L)}{l \times L}, \quad (\text{Eq. 2.3})$$

avec L et l les longueur et largeur respectives du pilier, b_l et b_L les longueur et largeur respectives des galeries, D la profondeur de l'exploitation et γ le poids volumique des terrains du recouvrement.

La résistance du pilier minier, plus précisément sa résistance à long terme (R_1), peut quant à elle être déterminée à l'aide d'un modèle simple qui suppose que la résistance à long terme des piliers est constante dans l'ensemble du bassin ferrifère lorrain. Ce modèle sera qualifié par la suite de « modèle de résistance constante ». Cette valeur de résistance peut ainsi s'exprimer sous la forme :

$$R_1 = k_1, \quad (\text{Eq. 2.4})$$

où k_1 a été déterminé « grâce à la rétro-analyse de l'effondrement de Moutiers de février 1940 et aux essais de laboratoire du Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-Sol (CGES) et de l'Ecole des Mines de Paris ». Ainsi « la valeur de 7,5 MPa a été choisie par le comité d'experts comme valeur de résistance » (Poulard et Salmon, 2002).

Dans notre exemple, les valeurs moyennes de chacun des paramètres conduisent à estimer une contrainte S s'appliquant sur le pilier de 7 MPa et un **facteur de sécurité pour le pilier de 1,07**. Cette valeur de SF apparaît particulièrement délicate à interpréter pour l'expert : à proprement parler, elle est proche de 1, valeur limite entre l'état stable et l'état instable, et semble pencher du côté de la stabilité. Mais l'expert est généralement conscient de travailler dans un contexte d'incertitude fort et d'utiliser des données variables et imprécises et des modèles peut-être très simples.

Face à ce problème, l'expert peut être tenté, comme c'est souvent le cas, d'utiliser des marges de sécurité pour intégrer de manière qualitative toutes les incertitudes qui peuvent être rencontrées dans l'analyse. Utilisant de telles marges, le pilier pourrait alors être jugé instable. La suite de l'étude va consister à présenter une méthode quantitative permettant de mieux intégrer ce problème d'incertitude.

3.2 Evaluation de la stabilité d'un pilier de mine : quelles incertitudes ?

La typologie mise en place dans le premier chapitre (figure 1.5) peut être utilisée pour identifier les différentes incertitudes présentes dans ce problème.

Incertitudes de ressources

Dans le contexte des études de risque menées dans le bassin ferrifère lorrain, les ressources dont dispose l'expert pour mener à bien son étude sont relativement nombreuses. Ceci s'explique en grande partie par la présence d'organismes comme l'INERIS, GEODERIS, le LAEGO ou le GISOS qui, depuis plus d'une dizaine d'années, développent de nombreux travaux de recherche destinés à améliorer la connaissance générale sur le passé minier de la Lorraine, le comportement du minerai de fer (Grigc, 2001), le rôle des terrains du recouvrement sur la stabilité de surface (Fougeron, 2005),

l'impact de l'envoyage sur les travaux (GISOS, 2005), etc. Les ressources disponibles pour déterminer la stabilité d'un pilier minier apparaissent ainsi conséquentes en terme de quantité mais aussi de qualité scientifique :

- concernant les outils d'étude, les modèles existant pour déterminer la résistance d'un pilier et la sollicitation qu'il subit (notamment la théorie de l'aire tributaire) ont été validés de longue date et font l'accord de nombreux chercheurs en France et à l'étranger (van der Merwe, 2006b) ;
- concernant les informations relatives au site d'étude, le comportement du minerai de fer est connu, une base de données physiques et géométriques a pu être constituée et des plans miniers ont pu être regroupés, puis validés, par GEODERIS.

Les incertitudes de ressources seront considérées dans cet exemple comme négligeables.

Incertitudes d'expertise

La méthodologie choisie par l'expert dans cette étude pour étudier la rupture d'un pilier consiste à utiliser le concept du facteur de sécurité comme indicateur de la stabilité du pilier. Ce concept nécessite l'estimation de la sollicitation qui s'exerce sur le pilier ainsi que de la résistance de celui-ci. Plusieurs travaux scientifiques se sont attachés depuis plusieurs dizaines d'années à développer des modèles permettant de répondre à ces deux objectifs, et l'expert peut alors se retrouver confronté à une incertitude d'expertise, liée au problème du choix des modèles qu'il va utiliser parmi ceux qui ont été mis en place et validés. Il aura ainsi peut-être tendance à en privilégier certains à d'autres, voire à ne pas considérer du tout que d'autres modèles peuvent exister et que le résultat de son analyse pourrait être fortement influencé par les modèles qu'il a choisis. Sur la démarche d'expertise à plus proprement parler, la méthode utilisée dans le bassin ferrifère lorrain a fait l'objet d'une expertise internationale et a ainsi été validée (Préfecture de la Région Lorraine, 2003).

Incertitudes de modèle

Une certaine incertitude de modèle peut être induite dans l'analyse du fait de l'utilisation de différentes formulations permettant de déterminer la contrainte s'exerçant sur le pilier et sa résistance. On notera que le modèle de l'aire tributaire est souvent considéré comme sécuritaire au sens où la contrainte estimée est généralement plus grande que la contrainte réelle. Par rapport à la réalité, ce modèle intègre alors implicitement une marge de sécurité. On notera également que pour s'adapter au cas spécifique de l'étude et intégrer (même implicitement) des paramètres relatifs au contexte spécifique du site, les modèles de résistance du pilier sont généralement déterminés à partir d'une rétro-analyse d'effondrements survenus dans le passé. Le problème de l'incertitude de modèle concerne de fait aussi bien l'estimation des paramètres de modèle (k_f par exemple) que les difficultés des modèles à représenter la réalité.

Incertitudes de données

Enfin, les données intégrées dans l'analyse comportent également certaines indéterminations :

- pour des raisons d'inaccessibilité des travaux souterrains ou de coût des investigations et des mesures vraiment précises, les dimensions des piliers et des galeries sont généralement déterminées à partir de la lecture des plans de mine (figure 2.7) et une indétermination sur la valeur exacte des paramètres résulte alors de la qualité de ces documents ;
- par rapport à leurs valeurs « initiales » avant l'exploitation ou juste après l'excavation, les propriétés mécaniques ou géométriques des matériaux ont pu évoluer avec le temps (vieillesse interne, érosion, phénomène d'écaillage, etc.) et ne sont plus les mêmes que celles qui figuraient sur les documents d'origine (plans, rapports géotechniques, etc.) ;
- de part l'ampleur des surfaces concernées par un sous-minage en Lorraine (on estime à plus de 40000 km la longueur des galeries creusées en l'espace d'un siècle d'exploitation

industrielle), un découpage du territoire en « zones homogènes » (du point de vue de l'exploitation) a dû être effectué de manière à traiter pratiquement et rapidement l'ensemble des problèmes qui peuvent être engendrés par les anciennes mines. Ainsi, bon nombre de paramètres relatifs aux exploitations sont définis en « moyenne » sur cette zone homogène, et non en un point précis : on sait par exemple que la profondeur D de l'exploitation est comprise entre 130 et 150 mètres sur notre zone, mais la valeur exacte au niveau du pilier étudié n'est pas connue ;

- certaines valeurs ne peuvent pas être mesurées directement sur le terrain et doivent être estimées par expertise ou à partir de la bibliographie. Ainsi, le poids volumique des terrains du recouvrement γ est par exemple considéré comme homogène pour tous les bancs du recouvrement et sa valeur est estimée par expertise à partir de bases de données issues de la littérature permettant de caractériser certaines propriétés des terrains sédimentaires.

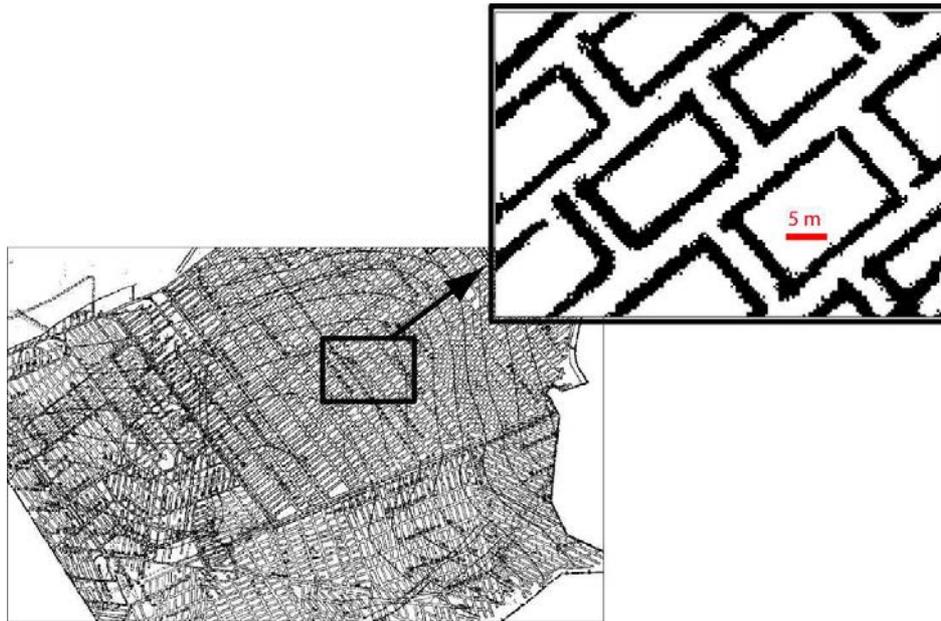


Figure 2.7. Extrait d'un plan minier et illustration de l'incertitude liée à la lecture des plans de mine

Le tableau 2.1 résume les différentes incertitudes rencontrées dans ce problème d'analyse de stabilité d'un pilier de mine.

Tableau 2.1. Nature des incertitudes rencontrées dans le problème de l'analyse de la stabilité d'un pilier minier

Nature de l'incertitude	« Élément » concerné	Cause
Incertitude de ressources	(-)	
Incertitude d'expertise	Modèle d'estimation de la contrainte	Problème du choix du modèle
	Modèle de résistance	
Incertitude de modèle	Modèle d'estimation de la contrainte	Difficultés à représenter la réalité
	Modèle de résistance	
	Paramètre de modèle (k_I)	Problème de l'estimation
Incertitude de données	Dimensions de l'exploitation (L, l, b_L)	Variabilité naturelle / mauvaise connaissance
	Poids volumique des terrains (γ)	
	Profondeur de l'exploitation (D)	Mauvaise connaissance

3.3 Méthodologie pour la prise en compte des incertitudes

Compte tenu des différentes natures d'incertitudes explicitées dans le tableau 2.1, une prise en compte de celles-ci doit être mise en place pour tenter au mieux de résoudre le problème qui se pose à l'expert concernant l'interprétation de la valeur estimée du facteur de sécurité de 1,07.

Prise en compte de l'incertitude de données

La stratégie adoptée pour traiter l'incertitude existant sur la valeur exacte des données du problème consiste à utiliser une *méthode « statistique »*, dont l'objectif est de caractériser chacune de données sous forme d'une fonction de distribution probabiliste. Ces fonctions sont définies par une forme, une valeur moyenne (μ) correspondant à la valeur la plus vraisemblable, et une valeur témoignant de la dispersion autour de cette moyenne : on utilisera au choix l'écart type (σ), la variance (σ^2), l'écart maximal par rapport à la moyenne (ε) ou le coefficient de variation (cov) défini comme le rapport entre σ et μ . Ces paramètres σ , ε et cov sont liés entre eux selon les relations :

- pour une loi uniforme, $\sigma = \frac{\varepsilon}{\sqrt{3}}$ et $cov = \frac{\varepsilon}{\mu\sqrt{3}}$; (Eq. 2.5)

- pour une loi triangulaire, $\sigma = \frac{\varepsilon}{\sqrt{6}}$ et $cov = \frac{\varepsilon}{\mu\sqrt{6}}$; (Eq. 2.6)

- pour une loi normale (tronquée à 95%), $\sigma = \frac{\varepsilon}{1,96}$ et $cov = \frac{\varepsilon}{1,96\mu}$. (Eq. 2.7)

La profondeur D étant définie sur la zone, considérée comme homogène du point de vue de l'exploitation, par une valeur minimale et une valeur maximale, une loi de distribution uniforme entre 130 et 150 m a été choisie pour la caractériser. Une telle loi uniforme permet de tenir compte de la variabilité aléatoire du relief en surface, sans donner de préférence à telle ou telle valeur dans l'intervalle des valeurs possibles.

Une loi normale a été choisie pour caractériser la variabilité du poids volumique des terrains du recouvrement. L'hypothèse de normalité ainsi que le coefficient de variation (rapport entre écart-type et moyenne) de 7% choisi, permettant de refléter les différences qui peuvent exister dans ce recouvrement sédimentaire constitué d'alternances de bancs de marnes et de calcaire, ont été retenus d'après la bibliographie (Favre, 2004).

Enfin, de manière à prendre en compte l'incertitude sur les dimensions des piliers et galeries, un programme spécifique de génération de plans de mine (le programme génère ici des mailles de neuf piliers) a été développé à l'aide du logiciel Mathematica™ par Thierry Verdel dans le cadre des travaux du GISOS. L'objectif de celui-ci est d'étudier l'influence que peuvent avoir les indéterminations sur les dimensions des piliers, non pas uniquement sur le pilier central, mais également sur les piliers alentour dont le rôle est important pour la détermination de la surface tributaire. Le principe général du programme consiste à tracer aléatoirement autour de points fixes (le centre de chacun des piliers) des contours dont les dimensions ont été tirées dans des lois de distribution préalablement définies. La figure 2.8 illustre, au travers du calcul du taux de défrètement de la zone et du facteur de sécurité du pilier central, les implications que peut avoir la génération de différents plans de mine.

La caractérisation des indéterminations sur les dimensions des piliers a été faite en supposant une forme de distribution uniforme avec une erreur de 1 mètre de part et d'autre de la valeur moyenne mesurée sur le plan de mine, erreur correspondant à l'épaisseur du trait sur le tracé (figure 2.7).

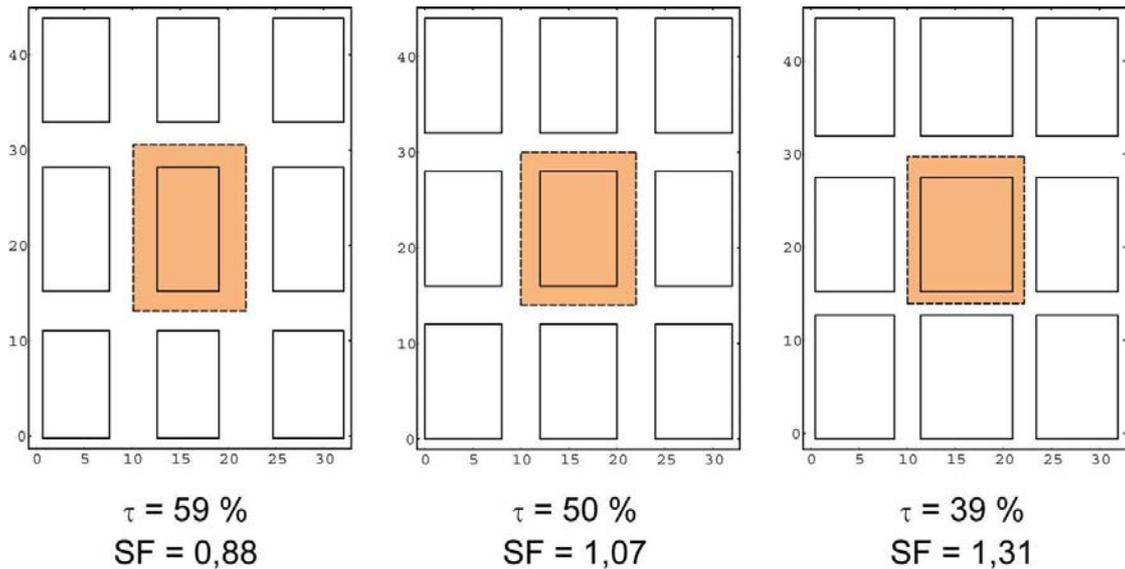


Figure 2.8. Différents plans de mine générés

Utilisant les différentes caractérisations des données, des simulations de Monte Carlo peuvent être réalisées de manière à propager les incertitudes sur le résultat final de l'étude (tableau 1.5). Le facteur de sécurité SF du pilier prend alors la forme d'une fonction de distribution et peut être caractérisé par une valeur moyenne et un écart type. La probabilité que le facteur de sécurité soit inférieur à 1 peut alors également être évaluée comme le rapport entre le nombre de simulations ayant donné une valeur de SF inférieure à l'unité et le nombre de simulations total réalisées. Cette probabilité, notée p_f , est souvent définie dans la littérature comme la « *probabilité de rupture* » du pilier (Hoek, 2000). Nous verrons par la suite que son interprétation est délicate et souvent abusive, et nous privilégierons celle proposée par l'US Corps of Engineers (1999) de « *probability of unsatisfactory performance* » ou « *probabilité de performance défavorable* ».

Tableau 2.2. Caractérisation de SF : prise en compte des incertitudes de données (30000 tirages aléatoires)

		Caractérisation des paramètres				Facteur de sécurité		
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Dimensions (m)	L, l, b_L, b_l	Uniforme	12/8/4	1	$\sim 6\%$	1,08	0,13	29%
Profondeur (m)	D	Uniforme	140	10	4%			
Densité (kN.m^{-3})	γ	Normale	25	3,43	7%			

μ : moyenne, ε : écart maximal à la moyenne, cov : coefficient de variation

Dans la simulation présentée dans le tableau 2.2, en tenant compte quantitativement de l'incertitude de données, le facteur de sécurité moyen peut être estimé à 1,08 avec un écart type de 0,13, et 29% des simulations ont donné un facteur de sécurité inférieur à 1.

Prise en compte de l'incertitude concernant les paramètres de modèle

La résistance à long terme k_I du pilier est un *paramètre de modèle* au sens où sa valeur est valable non pas uniquement pour la mine étudiée, mais pour l'ensemble des piliers des mines de fer de Lorraine. Sa valeur a été déterminée par une expertise, basée sur la rétro-analyse d'un cas d'effondrement complétée par des essais en laboratoire. De manière à estimer l'incertitude sur la valeur de k_I , qui dépend principalement de l'échantillonnage retenu pour mener la rétro-analyse et les essais mécaniques, une approche par expertise a également été utilisée. Avec une stratégie similaire à celle proposée pour caractériser les incertitudes de données, c'est-à-dire en utilisant une méthode « statistique », une loi de distribution normale a été choisie et un coefficient de variation estimé arbitrairement à 10% a été retenu pour représenter la variabilité de k_I autour de sa valeur moyenne. Le tableau 2.3 présente alors la fonction de distribution du facteur de sécurité du pilier, obtenue après prise en compte de l'incertitude sur les paramètres de modèle. Le facteur de sécurité moyen peut être estimé à 1,07 avec un écart type de 0,11 et 25% des simulations ont donné un facteur de sécurité inférieur à 1.

Tableau 2.3. Caractérisation de SF : prise en compte des incertitudes sur les paramètres de modèle (30000 tirages)

		Caractérisation des paramètres				Facteur de sécurité		
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Résistance (MPa)	k_1	Normale	7,5	1,47	10%	1,07	0,11	25%

μ : moyenne, ε : écart maximal à la moyenne, cov : coefficient de variation

Prise en compte de l'incertitude concernant les données et les paramètres de modèle

La stratégie utilisée pour traiter les incertitudes liées aux données et aux paramètres de modèle étant similaire, l'influence de ces deux sources d'indétermination peut être examinée de manière conjointe. Le tableau 2.4 présente les résultats obtenus après réalisation des simulations de Monte Carlo : le facteur de sécurité moyen est estimé à 1,08 avec un écart type de 0,17 et 35% des simulations ont donné un facteur de sécurité inférieur à 1.

Ces résultats appellent un premier commentaire : la considération de paramètres indéterminés de plus en plus nombreux induit une indétermination plus importante sur le facteur de sécurité, sans pourtant en changer l'estimation de la valeur moyenne.

Tableau 2.4. Caractérisation de SF : prise en compte des incertitudes sur les données et les paramètres de modèle (30000 tirages)

		Caractérisation des paramètres				Facteur de sécurité		
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Dimensions (m)	L, l, b_l, b_l	Uniforme	12/8/4	1	$\sim 6\%$	1,08	0,17	35%
Profondeur (m)	D	Uniforme	140	10	4%			
Densité (kN.m^{-3})	γ	Normale	25	3,43	7%			
Résistance (MPa)	k_1	Normale	7,5	1,47	10%			

μ : moyenne, ε : écart maximal à la moyenne, cov : coefficient de variation

A propos du choix des fonctions de distributions

Un problème important se pose lors du choix des fonctions de distributions permettant de caractériser les valeurs des paramètres. Dans la pratique, la forme exacte de ces fonctions est rarement accessible du fait d'un nombre très limité de données. Comme il l'a été indiqué dans le précédent chapitre, des fonctions simples, « classiques », sont alors généralement utilisées. On citera :

- la fonction de distribution uniforme, ne donnant aucune préférence aux valeurs situées dans l'intervalle de variation ;
- la fonction de distribution triangulaire, permettant de représenter à la fois les plages de variation des valeurs et la préférence de l'expert pour la valeur qu'il estime la plus vraisemblable ;
- la loi normale, fréquemment rencontrée et utilisée dans l'étude des phénomènes naturels (Baecher et Christian, 2003).

Le tableau 2.5 présente les résultats obtenus pour différents choix de fonctions de distribution. A la différence de ce qui a été présenté précédemment, la même loi a été utilisée ici pour caractériser les dimensions des piliers, la profondeur d'exploitation, le poids volumique des terrains ainsi que la résistance ultime des piliers (k_1). Les paramètres (moyenne μ , écart-type σ , écart maximal par rapport à la moyenne ε) des lois ont été choisis à partir d'hypothèses identiques à celles présentées précédemment :

- compte tenu de la lecture des plans miniers et de l'interprétation de la base de données, les écarts maximaux ε sur les dimensions des piliers et sur la profondeur de la zone exploitée sont estimés respectivement à 1 mètre et à 10 mètres ;
- par l'utilisation de la bibliographie et d'un jugement d'expert, les coefficients de variation du poids volumique des terrains et de la résistance des piliers valent respectivement 7% et 10%.

Ces différentes hypothèses sur la valeur de ε induisent des valeurs particulières de cov (respectivement de cov sur ε) comme présenté par les relations (2.5), (2.6) et (2.7).

Tableau 2.5. Influence de la forme des fonctions de distribution sur l'évaluation du facteur de sécurité du pilier

		Caractérisation des paramètres				Facteur de sécurité		
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Dimensions (m)	L, l, b_t, b_l	Uniforme	12/8/4	1	<i>$\sim 6\%$</i>	1,08	0,17	35%
Profondeur (m)	D		140	10	4%			
Densité (kN.m^{-3})	γ		25	<i>3,03</i>	7%			
Résistance (MPa)	k_1		7,5	<i>1,30</i>	10%			
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Dimensions (m)	L, l, b_t, b_l	Triangulaire	12/8/4	1	<i>$\sim 4\%$</i>	1,08	0,15	32%
Profondeur (m)	D		140	10	3%			
Densité (kN.m^{-3})	γ		25	<i>4,29</i>	7%			
Résistance (MPa)	k_1		7,5	<i>1,84</i>	10%			
		Distribution	μ	ε	cov	μ	σ	p_f (%)
Dimensions (m)	L, l, b_t, b_l	Normale	12/8/4	1	<i>$\sim 5\%$</i>	1,08	0,16	34%
Profondeur (m)	D		140	10	4%			
Densité (kN.m^{-3})	γ		25	<i>3,43</i>	7%			
Résistance (MPa)	k_1		7,5	<i>1,47</i>	10%			

μ : moyenne, ε : écart maximal à la moyenne, cov : coefficient de variation

les valeurs en italique ont été déterminées en fonction des hypothèses de caractérisation des variables

A la lecture de ce tableau, il apparaît que *dans notre cas d'étude* l'influence du choix de la fonction de distribution est minime sur le résultat : l'écart-type du facteur de sécurité calculé varie entre 0,15 et 0,17 et la « *probabilité de performance défavorable* » entre 32 et 35%.

Ces résultats ne sont valables que dans notre cas d'étude. Une approche similaire peut néanmoins être mise en œuvre dans d'autres problèmes pour étudier l'influence relative de chaque forme de fonction de distribution. Si les résultats apparaissent très différents, il deviendra important de préciser les formes des fonctions par des relevés complémentaires permettant de définir de manière statistique (et non plus experte) les distributions des paramètres.

A propos de la technique de Monte Carlo

Nous avons choisi de ne pas considérer le choix de la technique utilisée pour propager l'incertitude comme une réelle source d'incertitude dans l'analyse de risque. L'implication du choix des simulations de Monte Carlo pour propager l'incertitude sur les données et sur les paramètres de modèle est néanmoins étudiée dans ce paragraphe.

Les simulations de Monte Carlo ont été choisies à la fois du fait de leur simplicité de mise en œuvre (dans le cas présent) et la fiabilité de leurs résultats, et du fait de la relative simplicité des modèles utilisés. Des techniques comme la Point Estimate Method (PEM) (tableau 1.4) auraient néanmoins pu être également utilisées. Dans la technique PEM, chacune des variables est définie par deux nombres : $\mu - \sigma$ et $\mu + \sigma$, où μ et σ représentent respectivement la moyenne et l'écart-type de cette variable. Après plusieurs séries de calculs, la moyenne et l'écart-type du facteur de sécurité peuvent être obtenues, mais malheureusement, à la différence des simulations de Monte Carlo, la forme de la fonction de distribution reste inconnue. Pour déterminer la valeur de la « *probabilité de performance défavorable* », on fait généralement l'hypothèse (fondée sur la loi des grands nombres) que le facteur de sécurité est distribué selon une loi normale dont la moyenne et l'écart-type ont pu être estimées.

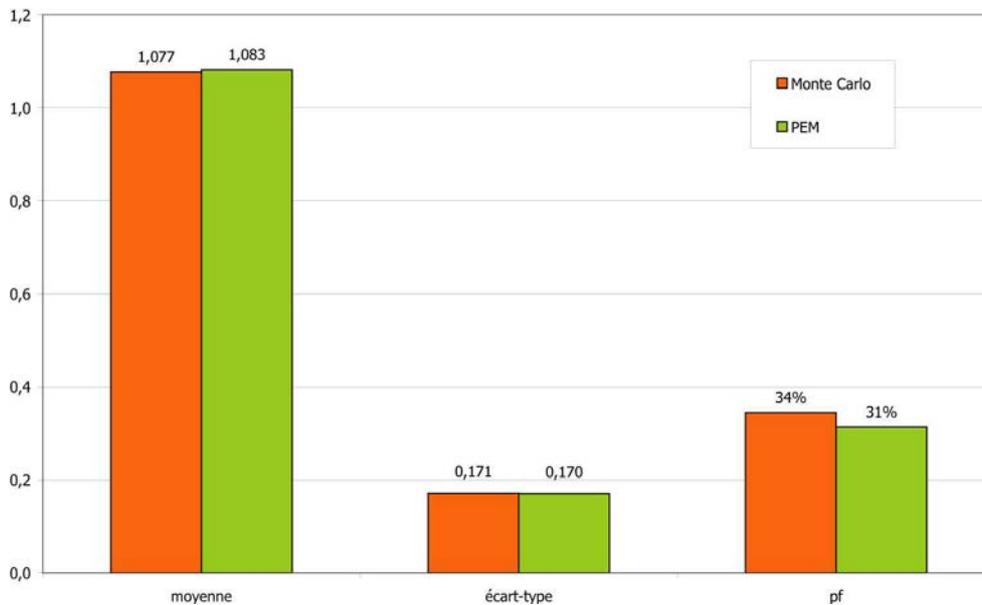


Figure 2.9. Influence des méthodes utilisées pour propager l'incertitude (simulations de Monte Carlo VS Point Estimate Method) sur la caractérisation du facteur de sécurité du pilier de mine

La figure 2.9 compare les résultats obtenus par l'utilisation des simulations de Monte Carlo (après 10000 simulations) et par la technique de la Point Estimate Method. Des différences faibles existent entre ces deux méthodes, de l'ordre de 0,5% pour la valeur moyenne du facteur de sécurité et pour son écart-type, et de 9% pour p_f . Ce dernier écart, légèrement plus important que les autres, s'explique par l'hypothèse de normalité de SF qui a dû être posée dans la technique PEM, alors qu'on constate, dans le tableau 2.2 notamment, que la forme de la fonction de distribution n'est pas tout à fait celle d'une courbe de Gauss.

Dans l'utilisation des simulations de Monte Carlo, le nombre de simulations effectuées est un paramètre intrinsèque à la méthode qui pilote la qualité des résultats. On peut aisément comprendre que plus ce nombre est important, plus la fiabilité de l'estimation du résultat l'est également. Néanmoins, plus ce nombre est important, plus le temps de calcul augmente. Un compromis doit alors être choisi entre fiabilité du résultat et temps de calcul.

La stratégie qui a été adoptée pour aboutir à ce compromis consiste à étudier, pour différentes quantités de simulations (au nombre de n), à la fois le temps de calcul (en unités CPU) et l'écart maximal sur l'estimation de la valeur moyenne du facteur de sécurité. Cette dernière valeur a été obtenue de la manière suivante :

1. n simulations sont effectuées (de manière classique) afin d'estimer une valeur moyenne du facteur de sécurité, notée $SF(n,1)$ (dans le cas précédent par exemple, 10000 simulations avaient permis d'obtenir un SF de 1,08) ;
2. ce processus est réitéré k fois. On dispose ainsi d'une liste de valeurs $SF(n,i)$, pour i de 1 à k ;
3. l'écart $\varepsilon_{max-min}(n,k)$ entre les valeurs maximale et minimale de cette liste est calculé.

La figure 2.10 présente le tracé des temps de calculs et de ces écarts $\varepsilon_{max-min}(n,k)$ pour différentes valeurs de n , représentées sur une échelle logarithmique. La valeur de 10000 a été retenue pour k .

Pour déterminer le nombre n des simulations qui vont être effectuées dans cette étude, un « critère de précision » a été retenu plutôt qu'un « critère de temps » puisque la durée des calculs reste raisonnable. Une précision de 10^{-2} sur la valeur moyenne estimée pour le facteur de sécurité a été recherchée, ce qui signifie que ses deux premières décimales seront exactes. Pour répondre à un tel critère, la condition est que $\varepsilon_{max-min}(n,k)$ soit inférieur à $5 \cdot 10^{-3}$ en valeur absolue. Au vu de la figure 2.10, une telle condition est remplie pour une valeur de n supérieure à 30000. C'est donc cette valeur qui a été retenue, impliquant un temps de calcul de 35 secondes CPU.

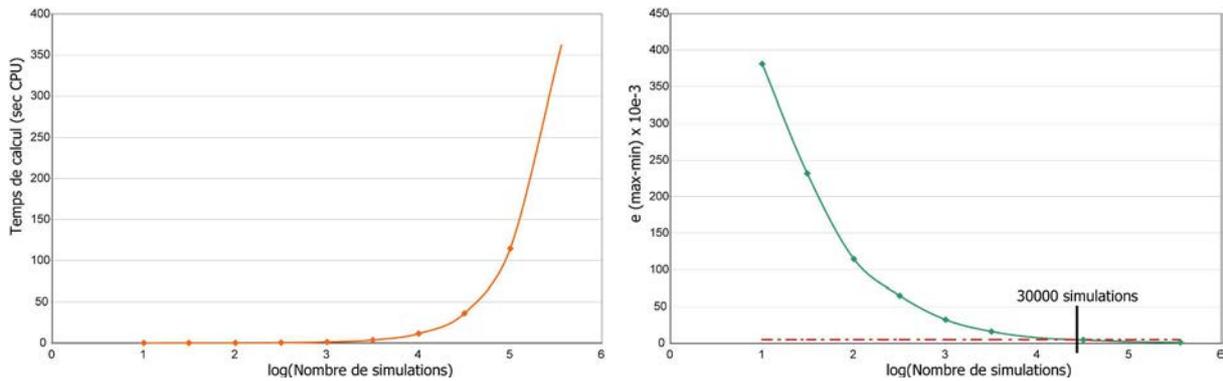


Figure 2.10. Compromis entre temps de calcul et fiabilité des résultats

Illustration de l'incertitude d'expertise, liée au choix des modèles

L'expert a choisi dans son analyse d'utiliser des modèles spécifiques pour estimer la valeur de la résistance ultime du pilier ainsi que la sollicitation qui s'exerce sur celui-ci. Plusieurs modèles existent dans la littérature pour déterminer cette résistance et cette contrainte. Les travaux de Bell et de Bruyn (1999) présentent par exemple plusieurs modèles valables pour les piliers des mines de charbon d'Afrique du Sud. Néanmoins, pour pouvoir être utilisés dans le bassin ferrifère lorrain, ces modèles nécessiteraient d'être adaptés au contexte local par un calage de leurs paramètres. Des modèles valides dans le contexte des mines de Lorraine seront ici présentés, ainsi que les hypothèses sur lesquels ils reposent et leur domaine de validité.

Expression de la charge qui s'exerce sur le pilier

Même si l'utilisation du modèle de l'aire tributaire est fréquente dans la pratique, elle soulève néanmoins quelques problèmes dont l'expert peut être conscient (Coates, 1970) :

- le modèle suppose que le pilier est chargé de manière uniforme par l'ensemble des terrains qui le surplombe, ce qui n'apparaît valide que pour les piliers situés au centre d'un secteur minier de grande dimension et pour des recouvrements stratifiés horizontaux ;
- la nature du recouvrement et l'influence de celui-ci sur le comportement du pilier ne sont pas prises en compte.

Ces problèmes induisent le fait que le modèle de l'aire tributaire est généralement considéré comme relativement sécuritaire. Coates (1970) propose de le modifier en intégrant des considérations liées à l'étude de la convergence du toit de l'excavation. Une telle approche permet de prendre en compte, toujours sous une forme algébrique, l'étendue de la zone minière, la contrainte horizontale qui peut s'exercer, les propriétés mécaniques du pilier, du toit et du mur de la galerie, ainsi que de la position des piliers dans la zone. L'expression de la contrainte qui s'exerce sur le pilier (S_2) devient alors :

$$S_2 = \gamma D \left(1 + \frac{2\tau - K_0 \frac{h}{A} \frac{(1-2\nu_w)}{(1-\nu_w)} - \frac{\nu_p}{(1-\nu_p)} K_0 \frac{h}{A} \frac{E_w}{E_p}}{\frac{h}{A} \frac{E_w}{E_p} + 2(1-\tau) \left(1 + \frac{1}{N} \right) + 2 \frac{l \times \tau}{A} \frac{(1-2\nu_w)}{(1-\nu_w)}} \right) \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Cette formule repose sur plusieurs hypothèses :

- les piliers sont supposés longs (hypothèse de déformation plane) ;
- la zone exploitée est profonde ;
- le recouvrement est composé de strates sub-horizontales ;
- le comportement des matériaux est élastique.

Le tableau 2.6 présente la signification des différents paramètres de l'équation 2.8, les valeurs moyennes, les formes des fonctions de distribution ainsi que les erreurs maximales retenues pour chacun d'entre eux. Ces valeurs proviennent de divers travaux menés dans le bassin ferrifère lorrain.

Tableau 2.6. Caractérisation des paramètres intervenants dans la formule (2.8)

Sigle	Paramètre	Distribution	Moyenne	Ecart maximal
γ	Densité des terrains (kN.m ⁻³)	Normale	25	3,43
D	Profondeur d'exploitation (m)	Uniforme	140	10
τ	Taux de défrètement	Calculé en fonction des dimensions des piliers et galeries		
l	Largeur de pilier (m)	Uniforme	8	1
h	Hauteur de pilier (m)	Uniforme	4	0,5
E_p	Module élastique du pilier (GPa)	Uniforme	13	4
ν_p	Coefficient de Poisson du pilier	Uniforme	0,3	0,1
E_w	Module élastique des épontes (GPa)	Uniforme	7	4
ν_w	Coefficient de Poisson des épontes	Uniforme	0,3	0,1
K_0	Coefficient de contrainte géostatique	Uniforme	1	0,5
A	Largeur de la zone exploitée (m)	-	500	-
N	Nombre de piliers	-	30	-

Dans notre étude, avec des piliers de 12 x 8 m² et des galeries de 4 m, le taux de défrètement (τ) est de 50%. A 140 m de profondeur, la formule de Coates, avec les valeurs présentées dans le tableau 2.6, évalue la contrainte s'exerçant sur le pilier à 6,8 MPa, valeur très proche de celle donnée par le modèle de l'aire tributaire (7 MPa). Coates attribue cette « *différence substantielle* » au fait que le chargement réel, si toutes les conditions supposées prédominent, est ainsi mieux représenté, et que les effets de la contrainte horizontale naturelle et de la compressibilité de la roche des parois et des piliers sont maintenant pris en compte (Coates, 1970).

Expression de la résistance du pilier

Plutôt qu'utiliser un modèle supposant une résistance constante pour l'ensemble des piliers des mines de Lorraine, l'expert aurait pu opter pour un autre choix : il est par exemple communément admis que la résistance à long terme d'un pilier dépend à la fois de la résistance intrinsèque du matériau mais aussi de l'élancement de ce pilier (Salamon et Munro, 1967).

Se basant sur cette constatation, Van der Merwe (2003a) a développé une formule utilisable dans les mines de charbon sud-africaines à partir d'une base de données de piliers 'stables' et 'effondrés'. Le principe de son travail consiste à *ajuster* les paramètres du modèle retenu de manière à minimiser le recouvrement entre la courbe de distribution des facteurs de sécurité des piliers 'stables' et celle des piliers 'effondrés' (figure 2.11.a).

Des travaux ont été menés dans le bassin ferrifère lorrain en utilisant cette stratégie. Une base de données comportant 31 piliers 'effondrés' et plus de 1000 piliers 'stables' a été constituée et étudiée. Une formule permettant d'estimer la résistance à long terme des piliers des mines de fer de Lorraine (R_2) en fonction du rapport de la largeur équivalente du pilier w (équation 2.9) sur sa hauteur h a été proposée (Cauvin, 2004 ; Lacourt, 2005) :

$$R_2 = k_2 \sqrt{\frac{w}{h}}, \quad (\text{Eq. 2.9})$$

$$\text{avec } w = 2 \frac{L \times l}{L + l}. \quad (\text{Eq. 2.10})$$

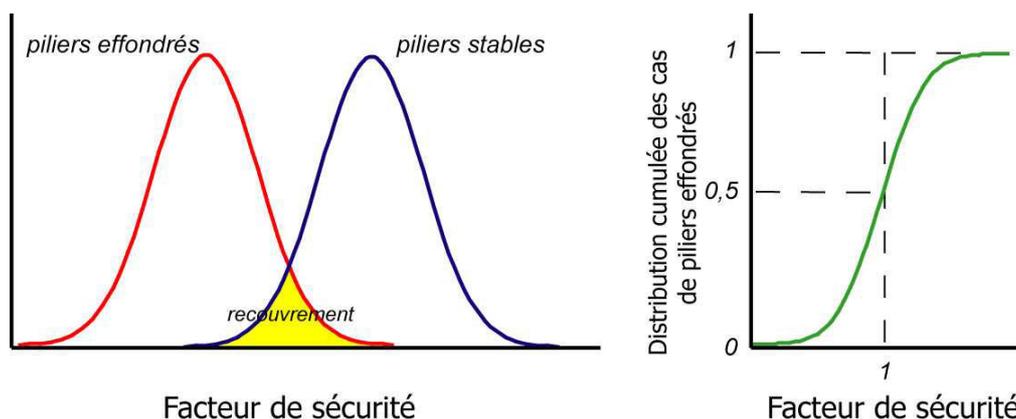


Figure 2.11. Minimisation de l'aire de recouvrement entre distributions des facteurs de sécurité des piliers 'effondrés' et des piliers 'stables' (a), et Détermination du coefficient k_2 (b)

Dans cette formule, le coefficient k_2 est déterminé d'après l'hypothèse forte que, dans le cas des piliers 'effondrés', 50% des ruptures sont survenues pour des facteurs de sécurité inférieurs à 1 (les autres 50% étant donc survenues pour des valeurs de SF supérieures à 1) : c'est donc la médiane des valeurs des 31 facteurs de sécurité des piliers 'effondrés' qui doit être calée pour répondre à cette hypothèse (figure 2.11.b).

Pour estimer la valeur de cette médiane ainsi que sa dispersion, la technique du « bootstrap » a été utilisée (Buvat, 2000). Cette technique, totalement adaptée à un tel objectif, consiste à générer aléatoirement, à partir d'un échantillon initial représentatif de la population étudiée, plusieurs échantillons d'une même taille et dont la médiane sera estimée. Un nombre important de générations d'échantillons permettra une estimation de la valeur moyenne de la médiane et de sa variance. Dans notre cas, une valeur moyenne de 5,5 et une erreur maximale de 1,09 (on a supposé une distribution normale de k_2) ont pu être retenues pour caractériser le paramètre k_2 .

L'utilisation de l'équation 2.9 permet d'estimer la résistance ultime du pilier étudié à 8,5 MPa, valeur supérieure de 13% à celle obtenue en utilisant un modèle de résistance constante ($k_1 = 7,5$ MPa).

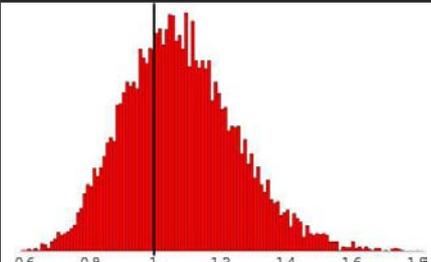
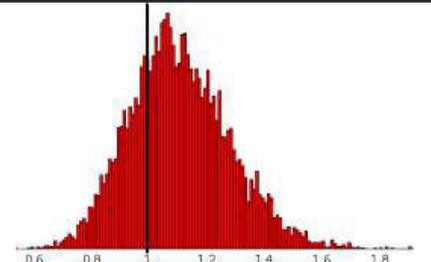
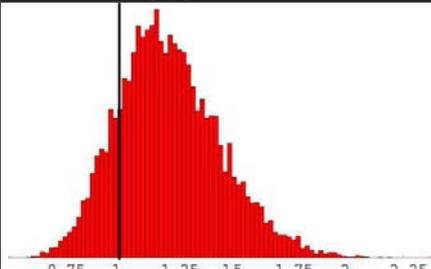
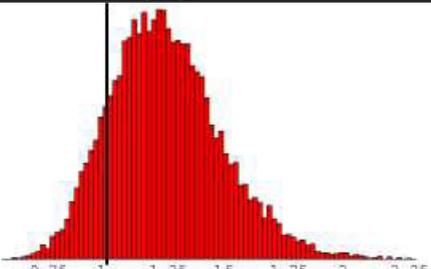
Utilisation de ces divers modèles

La disponibilité de ces modèles et le fait qu'ils aient été validés par plusieurs auteurs ou qu'ils soient construits et ajustés sur des données de site, peuvent conduire l'expert à s'interroger sur la *combinaison* {modèle de résistance R_i , modèle de charge S_j } qu'il utilisera pour estimer le facteur de sécurité du pilier. De ce choix découlera une estimation différente de la valeur de cet indicateur de stabilité du pilier.

Le tableau 2.7 présente les résultats obtenus pour les quatre combinaisons de modèles possibles. La méthodologie utilisée pour chacun de ces cas est identique à celle présentée précédemment pour la combinaison {modèle de résistance constante R_1 , modèle de l'aire tributaire S_1 }. Les tableaux 2.4 et 2.6 ont été utilisés pour caractériser les données et paramètres de modèle présents dans le problème.

Les quatre combinaisons conduisent à des estimations de facteurs de sécurité moyens compris entre 1,08 et 1,26, ainsi qu'à des « *probabilités de performance défavorable* » assez éloignées les unes des autres, variant entre 12 et 35%.

Tableau 2.7. Caractérisation de SF en fonction de la combinaison de modèles utilisée

		Charge s'exerçant sur le pilier	
		Modèle de l'aire tributaire	Modèle de Coates
		$S_1 = \gamma D \frac{(l + b_l)(L + b_L)}{l \times L}$	$S_2 = \gamma D \left(1 + \frac{2\tau - K_0 \frac{h(1-2v_w)}{A(1-v_w)} - \frac{v_p}{(1-v_p)} K_0 \frac{h E_w}{A E_p}}{\frac{h E_w}{A E_p} + 2(1-\tau) \left(1 + \frac{1}{N} \right) + 2 \frac{l \times \tau (1-2v_w)}{A(1-v_w)}} \right)$
Résistance du pilier	Résistance constante $R_1 = k_1$		
		$\mu(SF_{1,1}) = 1,08$	$\mu(SF_{1,2}) = 1,11$
		$\sigma(SF_{1,1}) = 0,17$	$\sigma(SF_{1,2}) = 0,17$
	Résistance dépendante de l'élanement $R_2 = k_2 \sqrt{\frac{w}{h}}$		
		$\mu(SF_{2,1}) = 1,23$	$\mu(SF_{2,2}) = 1,26$
		$\sigma(SF_{2,1}) = 0,22$	$\sigma(SF_{2,2}) = 0,23$
		$p_{f,1,1} = 35\%$	$p_{f,1,2} = 28\%$
		$p_{f,2,1} = 16\%$	$p_{f,2,2} = 12\%$

Comme le présente le tableau 2.7, le choix de modèles implique des évaluations du facteur de sécurité des piliers qui peuvent être différentes les uns des autres. **Cette comparaison entre les résultats possibles permet alors d'illustrer l'influence de l'incertitude d'expertise** liée à la difficulté de choisir telle ou telle combinaison de modèles. Une telle comparaison semble de plus être la meilleure solution à l'intégration de l'incertitude d'expertise dans les études : en première approche, si tous les résultats sont proches les uns des autres, on pourra dire que l'incertitude d'expertise est faible, alors que des résultats éloignés tendront à montrer que cette incertitude joue un rôle important. Le prochain paragraphe reprendra ce point en insistant plus précisément sur les conditions qui permettent une telle interprétation.

Démarche permettant la prise en compte de l'incertitude liée au choix et à l'utilisation de modèles spécifiques

La comparaison des modèles entre eux a permis d'illustrer et de mettre en avant l'existence d'une incertitude d'expertise liée au choix des modèles. Ce paragraphe présente maintenant une démarche permettant d'aider l'expert à intégrer et à faire face à ce problème dans son travail. Celle-ci sera dans un premier temps illustrée dans le cadre de l'exemple de l'évaluation de la stabilité du pilier minier, puis elle sera schématisée de manière plus générale.

La démarche proposée va permettre à la fois d'insister sur l'incertitude d'expertise et de prendre en compte l'incertitude de modèle. On rappelle que la première concerne la difficulté que l'expert a à

choisir les outils qu'il va utiliser, alors que la seconde concerne la difficulté qu'ont de tels outils à représenter la réalité.

La première étape consiste à intégrer l'ensemble des modèles dans l'analyse sans en privilégier aucun. L'étude se retrouve ainsi exemptée du problème de l'utilisation d'un unique modèle et des préférences (peut-être involontaires) ou de la subjectivité propres à l'individu-expert. Alors que la comparaison des résultats obtenus pour chacune des quatre combinaisons illustre l'incertitude d'expertise, le résultat obtenu après ce « mélange » des modèles prendra cette fois en compte l'incertitude de modèle. En effet, puisque chaque modèle « approche » la réalité d'une manière différente, l'intégration au sein de la même analyse de plusieurs modèles peut permettre de tendre plus justement vers la réalité.

De manière à réaliser une telle intégration, les modèles seront choisis de manière aléatoire dans le processus d'estimation du facteur de sécurité du pilier, c'est-à-dire tel que le sont les données. La stratégie utilisée comprend plusieurs étapes :

1. une valeur est tirée aléatoirement pour chaque paramètre dans la fonction de distribution associée, et ce aussi bien pour les données de l'étude (dimensions de l'exploitation, propriétés des matériaux, etc.) que pour les paramètres des quatre modèles ;
2. un modèle est choisi aléatoirement entre R_1 et R_2 pour estimer la résistance du pilier ;
3. un modèle est choisi aléatoirement entre S_1 et S_2 pour évaluer la sollicitation qui s'exerce sur le pilier ;
4. le facteur de sécurité est calculé en utilisant, dans les modèles choisis, les valeurs des paramètres tirées aléatoirement ;
5. le processus est réitéré 30000 fois depuis l'étape n°1 ;
6. une fonction de distribution du facteur de sécurité, noté SF_{TOTAL} , est obtenue, et sa moyenne, son écart-type ainsi que la « probabilité de performance défavorable » du pilier sont estimées.

La fonction de distribution obtenue après l'étape 6 permet alors d'intégrer dans le problème à la fois :

- l'existence de plusieurs modèles ;
- le fait que chaque modèle combine d'une certaine manière les données et qu'il ne permet d'approcher la réalité que de façon approximative ;
- l'indétermination des paramètres de modèle ;
- l'indétermination de chaque donnée du problème.

La figure 2.12 présente la fonction de distribution obtenue après ce processus. Le facteur de sécurité calculé pour le pilier possède une moyenne $\mu(SF_{TOTAL})$ de 1,16 et un écart-type $\sigma(SF_{TOTAL})$ de 0,22. La « probabilité de performance défavorable » p_f est quant à elle estimée à 23%.

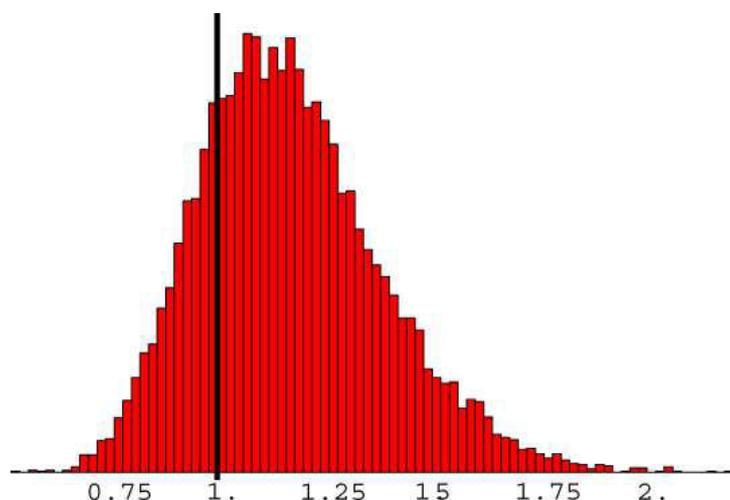


Figure 2.12. Distribution du facteur de sécurité obtenue lorsque les 4 combinaisons de modèle sont intégrées au problème

La distribution du facteur de sécurité du pilier que présente la figure 2.12 apparaît monomodale. Cette constatation peut être discutée à la lumière des propos tenus précédemment concernant l'utilisation de plusieurs modèles pour évaluer résistance et sollicitation qui s'exerce sur le pilier :

- malgré le fait que quatre combinaisons de modèles impliquant des valeurs moyennes du facteur de sécurité différentes les unes des autres aient été utilisées pour traiter le problème, les écarts entre ces combinaisons n'apparaissent pas de manière visible sur la figure 2.12. La dispersion des résultats autour des valeurs les plus vraisemblables, qui s'explique par l'incertitude liée aux données et aux paramètres de modèles, a alors permis de « masquer ces écarts » et d'obtenir cette fonction de distribution monomodale ;
- on peut très bien imaginer que si l'incertitude liée aux données et aux paramètres de modèles eut été plus faible, la dispersion des résultats autour des 4 valeurs centrales aurait été réduite et la distribution présentée sur la figure 2.12 aurait été multi-modale. L'existence d'une incertitude d'expertise serait alors apparue de manière visuelle et aurait permis d'illustrer les conséquences que peuvent avoir le choix de modèles différents.

L'existence d'incertitudes fortes d'un type particulier peut alors de cacher l'existence et l'influence d'autres types d'incertitudes dans l'analyse. En ce sens, nous ne pouvons pas dans une étude regarder l'influence d'une unique source d'incertitude sur le résultat final, mais c'est l'ensemble des classes (au sens de la typologie présentée dans la partie précédente) qui doit être examiné de manière concomitante.

On notera que dans le cas où il obtient une distribution multi-modale du facteur de sécurité du pilier, l'expert se doit de tenter d'écarter le problème de l'incertitude d'expertise liée à l'existence de plusieurs modèles. La mise en évidence de la présence d'une incertitude d'expertise doit le pousser à s'interroger de manière précise sur le choix des modèles qu'il a fait et qui a induit une « divergence » dans le résultat. D'un problème d'incertitude d'expertise, il doit tenter de passer à un problème d'incertitude de modèle et d'incertitude de données. Pour ce faire, plusieurs stratégies sont possibles, et la meilleure consisterait sans doute à comparer chacun des modèles à la réalité et à choisir celui qui donne les résultats les plus proches. Cela nécessiterait pratiquement des mesures de contraintes sur le terrain, à l'aide par exemple d'un réseau d'extensomètres installés au fond. Une seconde méthode, plus aisée à mettre en œuvre dans la pratique, consisterait à retenir « par expertise » un unique modèle, en fonction de plusieurs critères, notamment les hypothèses qui ont permis la construction de ceux-ci et qui déterminent leur domaine de validité.

La deuxième étape de la démarche consiste (une fois le problème de l'incertitude d'expertise écarté) à réaliser un premier tri entre contribution des modèles et contribution des données à l'indétermination du résultat. Pour ce faire, les paramètres de la fonction de distribution du facteur de sécurité SF_{TOTAL} (figure 2.12) peuvent, plutôt que par des simulations de Monte Carlo, être exprimés de manière analytique à partir des résultats du tableau 2.7.

Chacune des valeurs de la liste SF_{TOTAL} a été obtenue après la sélection aléatoire d'une certaine combinaison de modèles. Ainsi, la liste « globale » correspond à la concaténation des listes (notées SF_i) des valeurs obtenues par chacune des combinaisons (i) de modèles. Utilisant cette propriété, la moyenne de SF_{TOTAL} peut être estimée en calculant la moyenne des quatre facteurs de sécurité obtenus par les combinaisons $\{R_1 ; S_1\}$, $\{R_1 ; S_2\}$, $\{R_2 ; S_1\}$ et $\{R_2 ; S_2\}$ (Annexe 1) :

$$\mu(SF_{TOTAL}) = \mu(SF_i), \quad \text{avec } i = \{\{R_1 ; S_1\}, \{R_1 ; S_2\}, \{R_2 ; S_1\} \text{ ou } \{R_2 ; S_2\}\} \quad (\text{Eq. 2.11})$$

Une analyse de la dispersion des valeurs de SF_{TOTAL} peut également être menée. Celle-ci résulte de deux causes distinctes :

- une dispersion « *intergroupe* », entre les résultats donnés par chacune des combinaisons de modèles, et qui est représentative de l'incertitude liée à l'utilisation de modèles. L'intégration de plusieurs modèles au sein d'une même analyse permet en effet de s'exempter du problème de l'approche particulière de chacun d'entre eux. Bien évidemment, plus il y aura de modèles adaptés au cas d'étude dans l'analyse, mieux cette incertitude sera exprimée ;

- une dispersion « *intragroupe* » qui est induite par la variabilité des données et des paramètres intégrés dans chacun des modèles. Le paragraphe précédent présentait par exemple la variabilité induite sur le facteur de sécurité dans le cas d'un calcul utilisant la combinaison {*modèle de résistance constante* R_1 ; *modèle de l'aire tributaire* S_1 }.

Chacune de ces deux dispersions peut alors être estimée analytiquement :

- la variance « *intergroupe* » due à l'utilisation de plusieurs modèles traduit la variation de la moyenne de SF_{TOTAL} induite par l'utilisation de combinaisons de modèles donnant des résultats moyens différents. Elle peut être estimée en calculant la variance des moyennes estimées par les quatre combinaisons { R_1 ; S_1 }, { R_1 ; S_2 }, { R_2 ; S_1 } et { R_2 ; S_2 } ;
- la variance « *intragroupe* » due à l'utilisation de données et de paramètres incertains traduit la variation de SF_{TOTAL} autour de sa moyenne, pour une combinaison de modèles donnée. Elle peut être estimée en calculant la moyenne des variances obtenues pour chacune des quatre combinaisons.

Ainsi, d'une manière plus formelle, la variance de SF_{TOTAL} peut être exprimée par le théorème de Huygens (la démonstration est proposée dans l'Annexe 1) :

$$\sigma^2(SF_{TOTAL}) = \sigma^2(\mu(SF_i)) + \mu(\sigma^2(SF_i)) \quad \text{avec } i = \{\{R_1 ; S_1\}, \{R_1 ; S_2\}, \{R_2 ; S_1\} \text{ ou } \{R_2 ; S_2\}\}$$

(Eq. 2.12)

En calculant séparément chacun des membres du terme de droite de l'équation (2.12), on peut déduire que :

- la variance attachée à l'utilisation de différents modèles, ou variance intergroupe (*influence de l'incertitude de modèle sur le résultat final*) vaut 0,006, soit 13% de la variance totale ;
- la variance attachée aux données et à l'estimation de paramètres, ou variance intragroupe (*influence de l'incertitude de données et de modèle*) vaut 0,041 et représente 87% de la variance totale.

La troisième et dernière étape de la démarche vise à aller plus loin de que la seule prise en compte des différentes incertitudes : elle se donne comme objectifs de présenter clairement les parts respectives de l'incertitude de données et de celle de modèle, et d'identifier les sources principales d'incertitudes. La prise en compte de l'incertitude ne constitue en effet généralement qu'une première étape et appelle une tentative de réduction de celle-ci.

Dans un contexte de travail souvent assez strict et où les données sont généralement limitées et difficilement accessibles, il s'avère important pour l'expert en charge d'une étude de disposer d'outils lui permettant de choisir la stratégie qui s'avèrera la plus payante pour préciser le résultat de son analyse de la manière la plus efficace. Ces outils devront l'aider à répondre à diverses questions : quelles sont les sources d'incertitudes prépondérantes sur le résultat de l'étude ? Doit-il chercher à préciser les incertitudes de ressources, d'expertise, de modèles ou de données ? Pour chacune de ces classes, quel paramètre paraît le plus influent ?

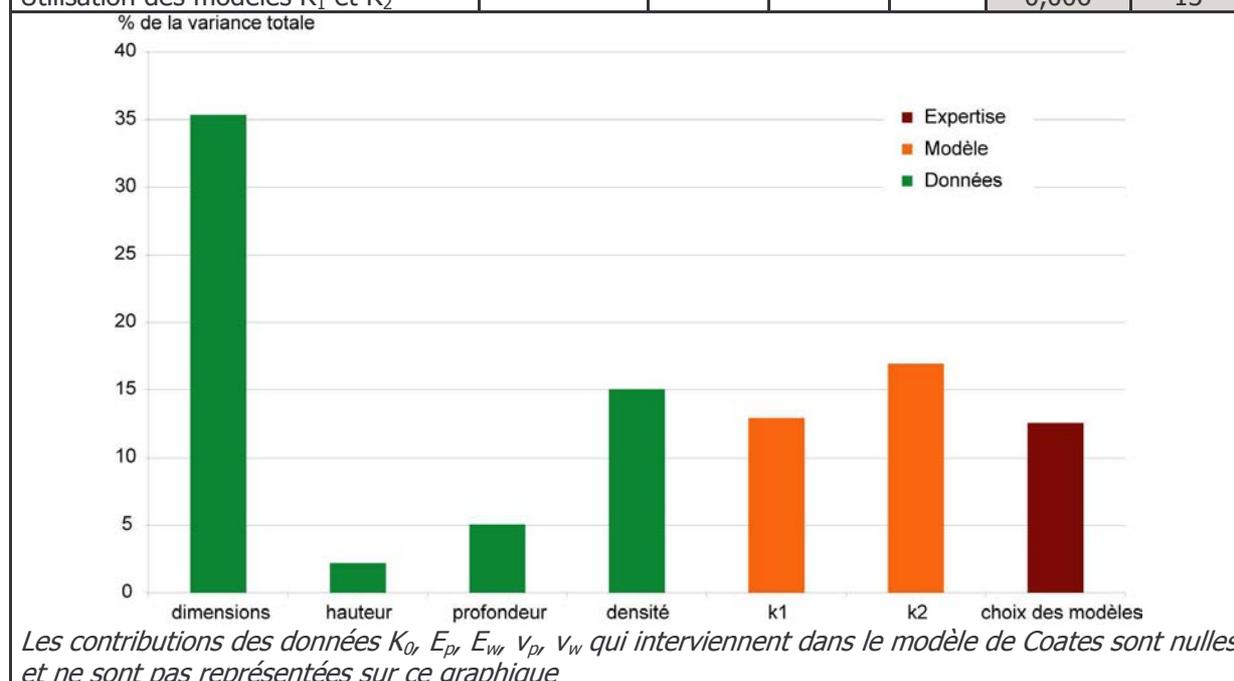
Pour répondre à ces questions, des techniques simples comme les études paramétriques ou l'analyse de la variance peuvent être utilisées. Les résultats présentés sur la figure 2.12 peuvent ainsi être parfaitement complétés par l'étude de l'influence respective de chaque paramètre. Chacun des paramètres a été fait varier successivement (les autres étant constants, fixés à leur valeur moyenne) et la variance du facteur de sécurité obtenu a été comparée à la variance totale, obtenue lorsque tous les facteurs étaient variables (tableau 2.8).

Au total, 57% de la variance du facteur de sécurité est portée par la variabilité et la mauvaise connaissance des données du problème et 43% de celle-ci est expliquée par l'utilisation de modèles qui ne permettent que d'approcher la réalité. La source principale d'indétermination dans ce problème est liée aux dimensions géométriques des piliers (responsable de plus du tiers de la variance totale).

Nous pouvons enfin noter que la variance *intergroupe* estimée précédemment a exclusivement trait à l'utilisation de différents modèles permettant d'évaluer le facteur de sécurité. Elle ne fait donc référence qu'à de l'incertitude de modèle. La variance *intragroupe* regroupe quant à elle les contributions des indéterminations concernant les données et les paramètres de modèle. En ce sens, elle intègre aussi bien l'incertitude de données (et ce, de manière intégrale) que l'incertitude de modèle (de manière partielle).

Tableau 2.8. Contribution des différences sources d'incertitude sur l'indétermination de *SF*

Nature de l'incertitude		Caractérisation des paramètres				Facteur de sécurité	
Données		Distribution	μ	σ^2	cov	σ^2	%
Dimensions (m)	L, l, b _L , b _l	Uniforme	12/8/4	0,33	6%	0,016	35
Hauteur (m)	h	Uniforme	4	0,08	7%	0,001	2
Profondeur (m)	D	Uniforme	140	33,33	4%	0,002	5
Densité (kN.m ⁻³)	γ	Normale	25	3,06	7%	0,007	15
Contrainte géostatistique	K ₀	Uniforme	1	0,08	30%	5,7e ⁻⁷	0
Module élastique (GPa)	E _D , E _w	Uniforme	13/7	5,33	23%	1,3e ⁻⁶	0
Coefficient de Poisson	ν_D , ν_w	Uniforme	0,3	0,003	19%	9,1e ⁻⁷	0
Modèle		Distribution	μ	σ^2	cov	σ^2	%
Paramètres de modèle							
Résistance (MPa)	k ₁	Normale	7,5	0,56	10%	0,006	13
Résistance	k ₂	Normale	5,5	0,31	10%	0,008	17
Difficulté des modèles à représenter la réalité (variance intergroupe)							
Utilisation des modèles R ₁ et R ₂						0,006	13



μ : moyenne, σ^2 : variance, cov : coefficient de variation (σ/μ)

3.4 Avantages de la méthodologie pour l'expert

La méthode qui a été présentée au travers de l'évaluation de la stabilité d'un pilier minier apparaît être une méthode pratique et opérationnelle, relativement simple à mettre en œuvre, pouvant être utilisée pour quantifier les différentes sources d'incertitudes rencontrées lors de la réalisation d'une analyse de risque. Une tentative originale pour prendre en compte l'incertitude de modèle a également pu être proposée au travers de cette démarche. L'ensemble de la méthodologie est résumé sur la figure 2.13.

Les variances $\sigma^2(\text{intragroupe})$ et $\sigma^2(\text{intergroupe})$ qui apparaissent sur ce schéma peuvent être déterminées à partir de l'équation 2.13 (voir aussi en Annexe 1).

$$\sigma^2(SF_{\text{TOTAL}}) = \sigma^2(\text{intragroupe}) + \sigma^2(\text{intergroupe}) = \frac{1}{n \times m} \left(\sum_{i,j} \sigma^2(SF_{i,j}) \right) + \sigma^2(\mu(SF_{i,j})) \quad (\text{Eq. 2.13})$$

avec i , de 1 à n = nombre de modèles permettant d'évaluer la résistance du pilier, et j de 1 à m , nombre de modèles permettant d'estimer la contrainte qui s'exerce sur le pilier.

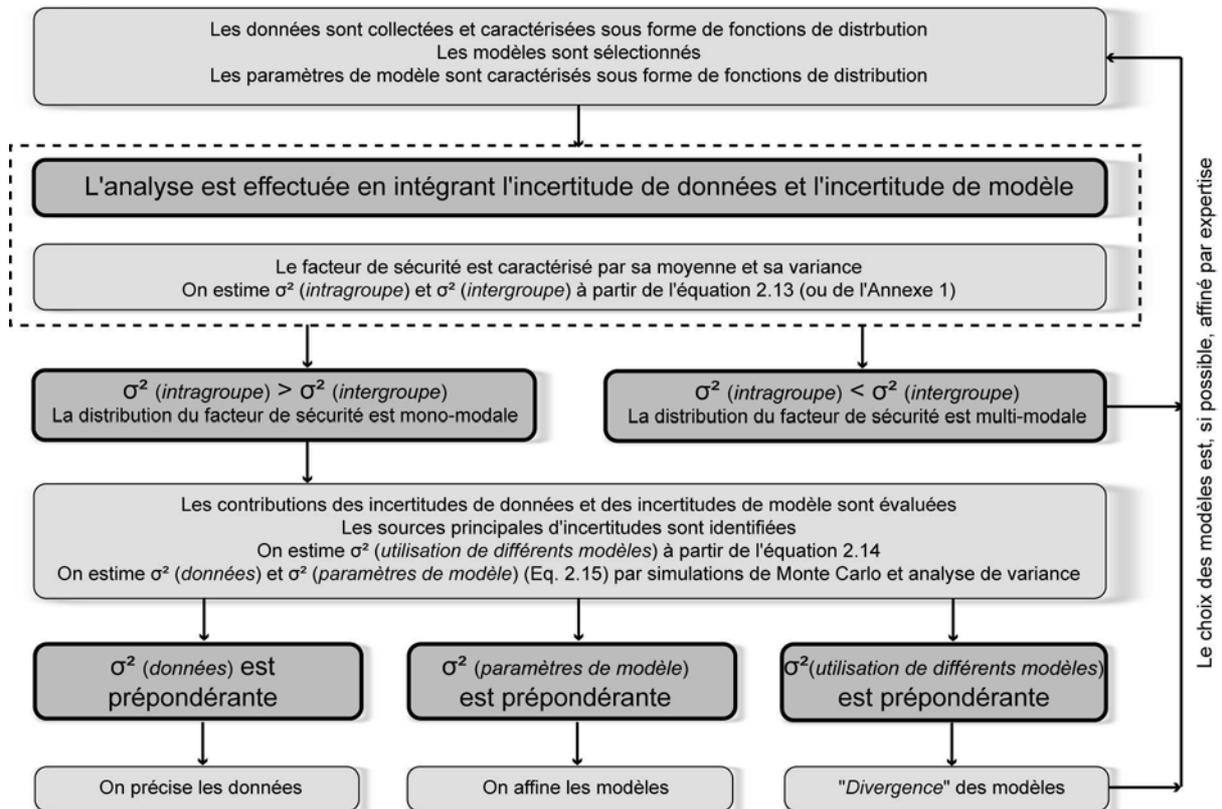


Figure 2.13. Méthodologie pour la prise en compte et le traitement des diverses sources d'incertitudes rencontrées dans une analyse

La variance *intergroupe* peut également être interprétée comme la variance due à l'utilisation de différents modèles. Ainsi, on peut déterminer analytiquement :

$$\sigma^2(\text{utilisation de différents modèles}) = \sigma^2(\text{intergroupe}) = \sigma^2(\mu(SF_{i,j})) \quad (\text{Eq. 2.14})$$

La variance *intragroupe*, par contre, est due à l'utilisation de données et de paramètres de modèles incertains. Elle se décompose alors en :

$$\sigma^2(\text{intragroupe}) = \sigma^2(\text{données}) + \sigma^2(\text{paramètres de modèle}) = \frac{1}{n \times m} \left(\sum_{i,j} \sigma^2(SF_{i,j}) \right) \quad (\text{Eq. 2.15})$$

L'évaluation distincte de $\sigma^2(\text{données})$ et $\sigma^2(\text{paramètres de modèle})$ présentées dans l'équation (2.15) ne peut malgré tout pas se faire analytiquement. Elle nécessite l'utilisation des simulations de Monte Carlo et la réalisation d'une analyse de variance (telle celle présentée dans le tableau 2.8).

Cette méthodologie peut fournir une aide très efficace à l'expert lors de la réalisation de son analyse de risque. Ainsi présentés, les résultats obtenus lui permettent de répondre de manière concrète à plusieurs questions auxquelles il se trouve confronté :

- est-ce que le résultat de l'analyse peut être précisé ?
- si oui, sur quel paramètre doit-on agir ? i.e. doit-on préciser les données ou travailler sur les modèles ?
- et, lorsque les ressources sont limitées, sur quel paramètre exact doit-on concentrer nos efforts pour améliorer le résultat de l'analyse ?

De telles réponses apparaissent nécessaires à une bonne gestion des risques et s'intègrent parfaitement dans le contexte des incertitudes présentes dans les analyses : la typologie de l'incertitude présentée dans le chapitre précédent avait en effet mis en avant que *les différentes incertitudes étaient liées entre elles* et que *le traitement de l'une ne pouvait avoir une réelle signification pratique que si les autres étaient également maîtrisées*. La méthodologie présentée ici permet de montrer que la réduction de l'incertitude de données pour préciser le résultat de l'étude peut parfois s'avérer complètement inutile si l'incertitude sur les modèles est prépondérante dans l'analyse. En cela, cet outil opérationnel peut aider l'expert à faire la part des choses, de manière quantitative, entre les différents types d'incertitudes qu'il rencontre.

3.5 Problème de l'interprétation pratique du résultat

L'utilisation des méthodes probabilistes (comme l'analyse de variance ou les simulations de Monte Carlo) a permis, dans ce problème de l'analyse de la stabilité d'un pilier de mine, d'aider l'expert à répondre à un certain nombre de questions qu'il pouvait se poser lors de la réalisation de son analyse.

En complément de cette aide à l'analyse, un des résultats obtenus semble particulièrement important pour les analyses de risque au sens où il permet une *quantification* du résultat de celle-ci. Ce résultat est l'évaluation qui a pu être faite de la « *probabilité de performance défavorable* ». La question qui se pose maintenant est celle de l'interprétation concrète de ces 23% obtenus lors de l'analyse ayant mené à l'obtention de la figure 2.12, et surtout de l'utilisation de ce résultat dans la pratique pour la gestion du risque. La notion de « *probabilité de performance défavorable* » pourrait dès lors peut-être constituer une avancée qui permettrait de passer de la notion de prédisposition, notion qualitative, à celle de « probabilité d'occurrence », notion cette fois fréquentiste, similaire à celle utilisée dans la gestion des risques liés aux inondations par exemple.

Hoek (2000) propose pour une étude de stabilité d'un versant rocheux de traduire de plusieurs manières les 6,4% obtenus pour la « *probabilité de performance défavorable* » d'une pente en utilisant une stratégie tout à fait similaire à celle présentée précédemment. Ce chiffre signifierait que :

- pour 1000 pentes identiques, on peut s'attendre à ce que, pour une même combinaison des paramètres d'entrée du modèle, 64 subissent une rupture au cours de leur durée de vie ;
- on peut s'attendre à ce qu'une longueur de 64 mètres se rompe tous les 1000 mètres linéaires de pente.

L'interprétation de Hoek de la « *probabilité de performance défavorable* » est donc très pragmatique et est directement transcrite en terme de fréquences temporelles ou spatiales. Mais l'étude conceptuelle présentée dans le chapitre 2.2 à propos du dé (A) et du dé (B) a permis d'illustrer le débat entre interprétation fréquentiste et interprétation épistémique des probabilités. Ce paragraphe se propose d'appliquer les différents résultats de ce débat théorique au problème de l'évaluation de la stabilité du pilier minier.

Cas d'un pilier minier particulier

Ce premier cas d'étude concerne l'analyse de la stabilité d'un pilier de mine particulier, le pilier (P), analyse qui est faite *de manière indirecte*, c'est-à-dire sans avoir eu accès au site pour mesurer précisément les paramètres caractéristiques de ce pilier (ici ses dimensions géométriques, sa résistance moyenne, la profondeur de l'exploitation et le poids volumique des terrains du recouvrement).

Pour un tel cas, on peut aisément considérer que les dimensions géométriques du pilier (P) et la hauteur des terrains du recouvrement au droit de celui-ci ont des valeurs précises, mais qui ne peuvent être connues exactement faute de pouvoir accéder à l'exploitation ou d'avoir des mesures exactes. On ne peut alors procéder qu'à des estimations de ces paramètres grâce aux informations dont on dispose, notamment le fait que le pilier (P) appartienne à la population des piliers de la zone. De la même manière, on peut considérer que la résistance moyenne du pilier (P) et le poids volumique moyen γ des terrains formant la colonne du recouvrement au-dessus du pilier ont eux-aussi des valeurs précises puisque ce sont des valeurs *moyennes*. Il est vrai qu'il peut exister une variabilité spatiale importante de γ en fonction de la profondeur mais ce qui nous intéresse bien plus ici, c'est la variabilité « horizontale » des paramètres dans les différentes couches présentes dans la colonne tributaire du pilier (P). Dans le cas de recouvrements sédimentaires, on peut considérer que cette dernière est très faible.

Toutes les données de ce problème sont alors exactes, mais inconnues par l'expert. Leurs valeurs les plus vraisemblables, ainsi que les indéterminations sur ces dernières, peuvent être représentées au travers de fonctions de distribution : nous allons faire le pari que les valeurs moyennes des caractéristiques du pilier (P) sont les mêmes que celles pour l'ensemble des piliers et nous représenterons notre mauvaise connaissance au travers de la variance des distributions.

Ce cas d'étude semble de ce fait très proche du cas du dé (B) : l'état du pilier (P) est inconnu et on ne sait pas s'il est stable ou s'il a déjà rompu. Le but du jeu est alors de parier sur lequel des deux états est le plus vraisemblable. Pour essayer de gagner à ce jeu, l'utilisation de modèles pour évaluer la stabilité du pilier de mine peut permettre de privilégier la croyance en la stabilité du pilier plutôt qu'en la rupture, ou inversement. Dans l'exemple du pilier (P), compte tenu des informations disponibles et des modèles utilisés, 23% des simulations ont donné un facteur de sécurité inférieur à 1. Ainsi, puisque « *toute l'incertitude est considérée comme due à une connaissance limitée* » au sens présenté par Baecher et Christian (2003), ce résultat probabiliste doit s'interpréter sous sa forme *épistémique* et fait donc référence à la vraisemblance d'une rupture complète du pilier. On peut alors dire que la croyance en un état rompu est dans notre exemple trois fois plus faible que la croyance en un état stable, et c'est donc sur cet état que nous allons parier.

Puisque les caractéristiques du pilier (P) ont des valeurs précises, la réduction de l'incertitude sur les données au travers par exemple de mesures sur site, ou de celle sur les modèles par un calage plus fin de ses paramètres, permettrait de réduire les dispersions des estimations et ainsi d'augmenter notre degré de croyance sur tel ou tel état. L'analyse de variance permet de montrer que si, pour des raisons pratiques ou économiques, il n'est possible de ne préciser qu'une seule valeur, c'est sur les dimensions du pilier (P) dont l'indétermination entraîne plus de un tiers de la variance du facteur de sécurité, que l'on doit se concentrer pour préciser le résultat.

Cas d'une exploitation composée de plusieurs piliers

Les études menées par l'expert concernent généralement, plus que la stabilité d'un unique pilier, celle d'un secteur minier de plus grande envergure. Nous allons considérer dans ce paragraphe un secteur minier de 100 piliers, exploité de manière homogène, duquel est issu le pilier (P) venant d'être étudié.

Il pourrait être très tentant de dire que dans cette zone, 23 piliers ont rompu. Cela reviendrait à transcrire le résultat probabiliste *directement* sous sa forme fréquentiste, ici d'un point de vue spatial, comme Hoek (2000) a pu le faire dans le cadre d'une étude de stabilité de pente.

L'une des raisons pouvant expliquer ce passage direct peut être un problème terminologique lié à l'appellation de « probabilité de rupture » (*probability of failure* en anglais) déterminée par le nombre de simulations ayant donné une valeur du facteur de sécurité inférieure à 1. D'une fréquence « numérique » liée à un nombre de calculs effectués, l'interprétation en fréquence spatiale ou temporelle est facile. Mais l'utilisation du terme « rupture » apparaît très dangereuse dans la pratique, d'une façon assez similaire au terme de « période de retour » dont on oublie souvent qu'il désigne une limite de fréquence. Cette raison explique le choix précédent d'utiliser la dénomination de « *probabilité de performance défavorable* » qui incite moins à la confusion.

Pour pallier ce problème qui est principalement d'ordre étymologique, diverses recommandations peuvent être faites :

- les indicateurs que sont la variance, l'écart-type, l'écart maximal par rapport à la moyenne ou le coefficient de variation, seront utilisés pour refléter l'indétermination d'une valeur, qu'elle soit liée à un manque de connaissance ou à une variabilité naturelle ;
- dans un propos de caractérisation des incertitudes, les probabilités ne seront utilisées que comme *complément* à la valeur moyenne *et* à l'indicateur de dispersion, pour illustrer la possibilité ou non d'une valeur inférieure à un certain seuil critique. En fait, plus que le chiffre exact, c'est son ordre de grandeur qui, *dans un premier temps*, apparaît important.

La figure 2.14 illustre sur un exemple simple l'importance de ces deux recommandations. Les deux distributions normales tracées ont toutes deux une « *probabilité de performance défavorable* » de 23%. Analysée seule, cette valeur ne permet pas de mettre en exergue la grande différence qui existe entre les deux distributions. La courbe noire indique en effet une situation vraisemblablement stable ($\mu = 3$) mais dont le résultat est peu fiable du fait de la variabilité ou de la mauvaise connaissance sur les données ($\sigma = 2,7$), alors que la courbe grise illustre une situation qui semble beaucoup plus critique puisque soit la confiance que l'on a sur l'estimation de la valeur moyenne ($\mu = 1,2$) est relativement bonne, soit la variabilité naturelle est assez faible ($\sigma = 0,27$). Dans les deux cas néanmoins, la « *probabilité de performance défavorable* » relativement élevée de 23% souligne la présence de points délicats dans l'étude, mais ceux-ci ne peuvent réellement être identifiés que par l'examen des valeurs moyennes et de dispersion.

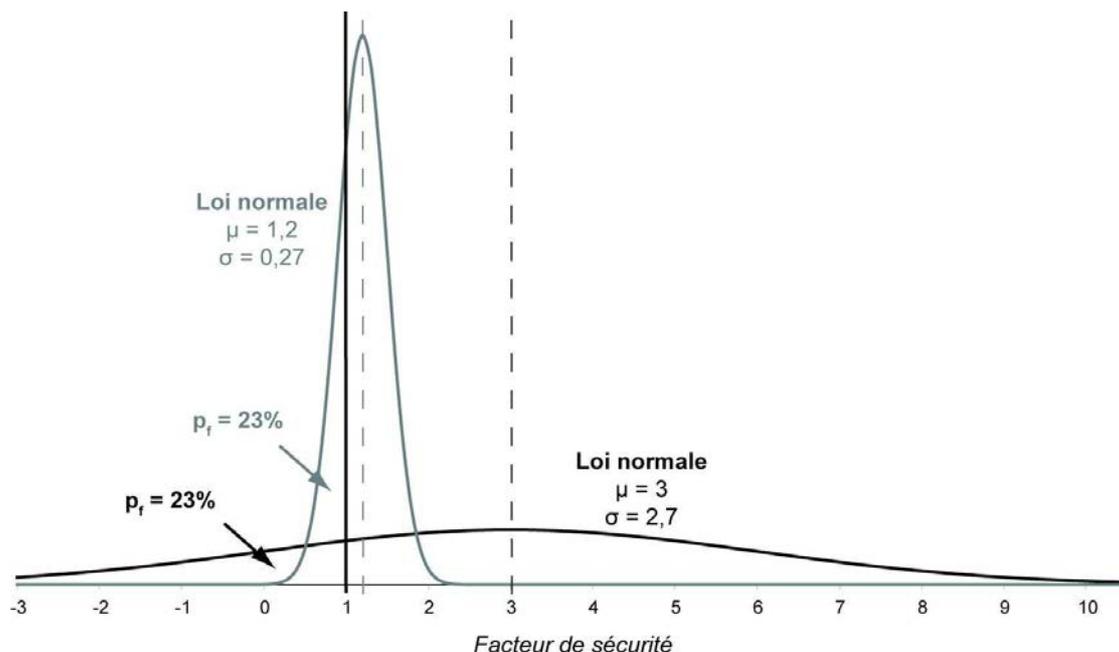


Figure 2.14. Danger d'une interprétation trop rapide de la « *probabilité de performance défavorable* »

Malgré ces remarques qui insistent sur le danger de l'utilisation abusive de la notion de « *probabilité de performance défavorable* », une interprétation pratique et concrète de la probabilité calculée est peut-être pour autant possible. Il avait en effet été montré que dans le cas des chutes de blocs notamment, des résultats d'analyse qui n'avaient pas de sens pratique localement pouvaient trouver une signification concrète à plus grande échelle. Une approche permettant d'évaluer le nombre de piliers pouvant rompre dans le secteur minier étudié, homogène du point de vue des conditions d'exploitation, est-elle alors possible dans notre étude ?

Pour caractériser une zone homogène, la technique généralement utilisée consiste à étudier un pilier « moyen », représentatif de l'ensemble du secteur, dont les caractéristiques sont décrites par une valeur moyenne (la plus probable sur la zone) et un écart-type illustrant les indéterminations sur cette valeur. Il a été montré que, dans la pratique, ces indéterminations peuvent aussi bien concerner une variabilité naturelle (spatiale ou temporelle) qu'une connaissance limitée des valeurs exactes des paramètres, ce qui rend difficile l'interprétation du résultat exprimé sous une forme probabiliste.

Pour le secteur minier étudié, les indéterminations concernant les paramètres caractéristiques de ce pilier « moyen » représentatif de l'ensemble de la zone, sont dues :

- pour la densité, à une variabilité géologique dans l'espace : les roches du recouvrement ne sont en effet pas tout à fait homogènes verticalement sur les 140 mètres du recouvrement et horizontalement sur les 2 hectares de la zone ;
- pour la profondeur, à une variabilité spatiale du relief et de la hauteur d'exploitation ;
- pour la hauteur et les dimensions des piliers, à une répartition aléatoire causée spatialement à la fois par des techniques d'exploitation (abattage à l'explosif) entraînant des dimensions non uniformes et le phénomène d'écaillage pouvant toucher n'importe quel pilier (figure 2.15), et temporellement par ce même phénomène d'écaillage.

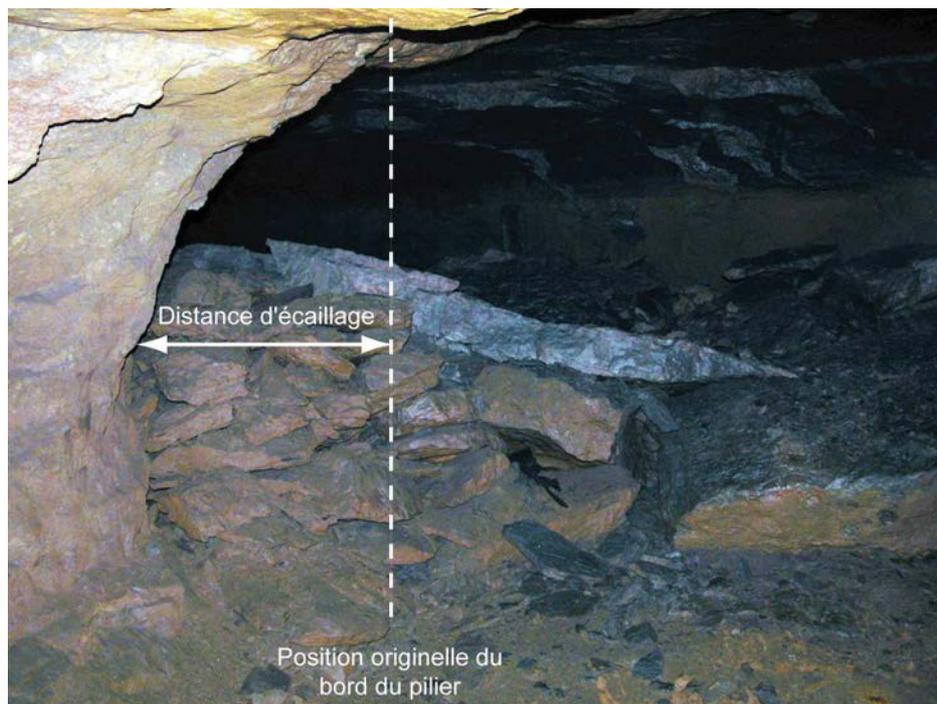


Figure 2.15. Phénomène d'écaillage qui peut affecter chaque pilier minier d'une manière différente dans le temps et dans l'espace (pilier des mines de fer de Lorraine)

Les incertitudes sur les données du problème concernent alors toutes, à cette échelle globale de l'ensemble du secteur minier, des variabilités spatiales. Mais caractériser ces variabilités de manière précise peut s'avérer une chose délicate. La variance 'totale' sur les valeurs présentées dans le tableau 2.8, que l'on notera ici σ_T^2 , est en effet supposée intégrer à la fois une part de variabilité naturelle (σ_N^2) mais aussi une part de mauvaise connaissance sur les valeurs (σ_C^2). Pour les dimensions des piliers par exemple, dont nous avons vu qu'elles entraînaient une grande partie de l'indétermination

de la valeur du facteur de sécurité, on peut se demander quelle part du 1 mètre d'erreur estimée est due à un manque de connaissance et quelle part est due à l'écaillage et aux méthodes de creusement. Dit autrement, quelle part de l'indétermination peut être réduite, et quelle part ne peut être que précisée ?

La figure 2.16 illustre schématiquement la distinction entre ces deux « composantes » de l'indétermination d'un paramètre. A la variabilité naturelle d'une valeur qui ne peut être représentée que sous la forme d'une fonction de distribution et qui seule peut avoir une signification concrète en terme de fréquence spatiale, s'ajoute quasiment systématiquement une part de mauvaise connaissance qui induit une augmentation de la variance de celle-ci.

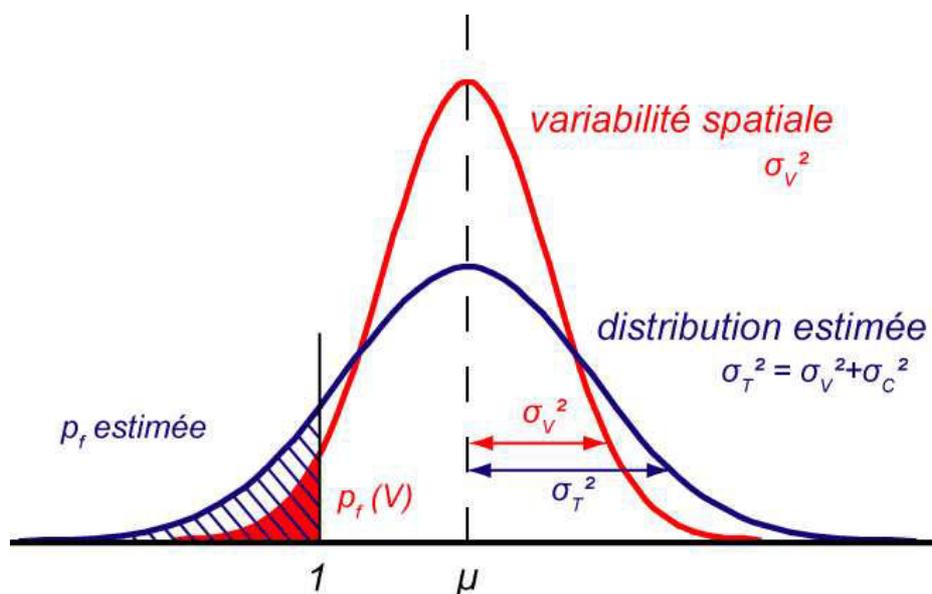


Figure 2.16. Part de la mauvaise connaissance σ_C^2 et part de la variabilité spatiale σ_V^2

Dans la méthodologie présentée précédemment, la distribution du facteur de sécurité du pilier « moyen » (figure 2.12) est obtenue par l'intégration de divers facteurs dans l'analyse. La dispersion des valeurs de cette distribution résulte de trois causes :

- la variabilité spatiale qui affecte les données du secteur ;
- la mauvaise connaissance sur la fonction de distribution des données ;
- mais aussi, l'*incertitude de modèle*, qui concerne aussi bien l'utilisation de modèles que les paramètres de ceux-ci.

De ces trois causes, seule la première peut avoir une interprétation « fréquentiste », les deux dernières étant de nature purement « épistémique ». La figure 2.16 peut alors également être utilisée pour aider à interpréter de manière pratique la distribution du facteur de sécurité du pilier « moyen ». Dans ce cas, σ_V^2 sera la part de variance due à la variabilité spatiale des données, σ_C^2 représentera la part globale de mauvaise connaissance dans le problème, qui touche à la fois les valeurs des données et les modèles.

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau 2.8 peuvent être repris de manière à préciser ces remarques :

- les incertitudes de modèle (43% de la variance totale), de nature purement épistémique, peuvent être réduites en intégrant de l'information dans le problème : ajout de nouveaux cas dans les bases de données pour caler les paramètres de modèle, nouvelles mesures sur le terrain à comparer aux résultats des modélisations, etc. ;
- les incertitudes de données expliquent 57% de la variance totale (soit une variance de 0,026) et seule *une partie* de ces 57% est due à une variabilité spatiale (que l'on notera $\sigma_V^2(\text{SF})$).

Dans la pratique, l'évaluation de cette « partie » $\sigma_V^2(\text{SF})$ revêt une importance considérable dans les analyses de risque puisqu'elle permet de déterminer $p_f(V)$, probabilité liée à la présence d'une

variabilité spatiale dans le problème et qui permet donc une interprétation concrète des résultats en terme de fréquence spatiale. On pourra estimer que la proportion des piliers instables dans la zone correspond à cette valeur $p_f(V)$, mais pour autant, comme dans le cas de l'analyse des risques liés aux chutes de blocs, on ne pourra pas dire quels piliers exactement sont concernés par un tel état critique.

L'étude conjuguée de la figure 2.16 et du tableau 2.8 permet de constater que $\sigma_V^2(SF)$ peut varier entre 0, dans le cas d'une égalité des valeurs de tous les paramètres sur l'ensemble de la zone (aucune variabilité spatiale), et 57% de la variance totale du facteur de sécurité, ce qui correspondrait à un cas où les lois de distributions sur les données seraient connues très exactement, ayant été par exemple déterminées grâce à l'analyse d'un très grand nombre d'essais mécaniques ou de mesures sur site. Le tableau 2.9 présente les estimations de $p_f(V)$ qui peuvent être réalisées pour différentes valeurs de $\sigma_V^2(SF)$, en supposant une distribution normale de la distribution de la variabilité spatiale.

Tableau 2.9. Parts respectives de σ_V et de σ_C et conséquences sur $p_f(V)$

Poids respectif sur la variance totale (%)		Variance correspondante		$p_f(V)$ (%)
Variabilité	Connaissance	Variabilité $\sigma_V^2(SF)$	Connaissance σ_C^2	
0	100	0,000	0,046	0
10	90	0,005	0,041	1
20	80	0,009	0,037	4
30	70	0,014	0,032	8
40	60	0,018	0,028	11
50	50	0,023	0,023	14
57	43	0,026	0,020	15

On rappelle que $\sigma_C^2 = 0,046$

Sur le secteur minier d'étude, le nombre de piliers dont le facteur de sécurité est inférieur à 1 et qui sont donc dans un état 'instable', est alors compris entre 0 et 15 *en fonction de la quantité de connaissance dans le problème*. Plusieurs constatations peuvent suivre ce résultat :

- l'interprétation pratique en « fréquence de piliers ayant un facteur de sécurité inférieur à 1 » de la valeur de 23% calculée initialement après une étude classique est majorante ;
- l'ajout de connaissances permettra de mieux estimer σ_V^2 et donc le nombre de piliers ayant un facteur de sécurité inférieur à 1 ;
- pour travailler opérationnellement, l'étude peut être poursuivie soit en se plaçant dans le « pire cas », i.e. en considérant que 15 piliers ont pu rompre, soit en donnant un jugement d'expert sur le poids respectif de la variabilité par rapport à la mauvaise connaissance dans le problème ;
- l'interprétation en « fréquence temporelle » est encore impossible ici car aucune hypothèse n'a été faite utilisant le temps, sauf peut-être le phénomène d'écaillage. Mais ce dernier reste difficilement intégrable (par un modèle) dans l'étude...

4 PRISE EN COMPTE DE L'ASPECT TEMPOREL DE L'ALEA

Les travaux précédents ont insisté sur l'utilisation de l'outil probabiliste comme un moyen d'exprimer des fréquences *spatiales* de ruptures. Cependant, la caractérisation précise d'un aléa nécessiterait également, pour des raisons importantes en terme d'aménagement du territoire ou de communication avec le public, de s'intéresser à sa composante temporelle. Cette partie va se consacrer à cette tâche. Ces objectifs sont les suivants :

- présenter les avantages d'une réelle prise en compte du temps dans les analyses de risques ;
- détailler une méthodologie permettant de compléter les études qui sont effectuées aujourd'hui, notamment celles utilisant le concept de la prédisposition ;
- proposer un exemple pratique permettant d'illustrer les propos, la méthodologie et d'en présenter les avantages et les limites.

4.1 Intégrer le facteur temps : pourquoi ?

Le temps semble difficile à intégrer dans l'analyse des aléas liés aux objets rocheux du fait d'un contexte lourd en incertitudes sur les mécanismes étudiés et sur les données et outils utilisés. Malgré tout, les avantages d'une réelle prise en compte du facteur temporel de l'aléa seraient nombreux :

- elle permettrait une comparaison des aléas induits par les objets rocheux avec d'autres aléas naturels : « *de cette manière, l'aléa chute de blocs peut être comparé à d'autres aléas naturels, comme les inondations ou les tremblements de terre, pour lesquels des périodes de retour centennales ou millénales peuvent être déterminées* » (Hantz et al., 2003). Une telle comparaison aurait une vertu *pédagogique* importante et la communication avec le grand public en utilisant des outils déjà connus médiatiquement serait facilitée ;
- elle permettrait de répondre à un manque qui existe aujourd'hui dans la littérature scientifique, comme le présentent par exemple Guzzetti et al. (2003) « *la plupart des tentatives d'évaluation de l'aléa glissement de terrain d'une manière quantitative (i.e. de manière probabiliste ou déterministe) ont fourni des estimations de la distribution spatiale des glissements de terrain, mais n'ont rien dit sur l'occurrence temporelle des ruptures de pentes. Les méthodes basées sur une analyse statistique prédisent où les glissements de terrains vont apparaître dans le futur en se basant sur les glissements de terrains qui sont apparus dans le passé (cartes d'inventaires) et les méthodes déterministes prédisent où les glissements peuvent se produire en se basant sur de simples lois mécaniques* ». Très peu de travaux existent en fait sur l'occurrence temporelle des événements ;
- elle permettrait de répondre concrètement à de nombreuses demandes des décideurs publics et des destinataires des études de risque. Comme l'indique bien Durville (2004), la prédisposition par exemple « *peut être assimilée à une probabilité ordinale, relative, sans que la probabilité d'occurrence dans un laps de temps donné, qui nous préoccupe ici, soit estimée. L'information apportée par un tel zonage, pour intéressante qu'elle soit, ne peut donc satisfaire complètement le décideur* ». Ces propos sont complétés dans le Guide technique pour la caractérisation et la cartographie des aléas mouvements de terrain où il est indiqué que « *l'occurrence temporelle n'est pas estimée dans l'absolu, mais il manque alors une des composantes de l'aléa, et l'absence d'information à ce sujet rend difficile l'utilisation opérationnelle de la carte, par exemple pour des questions de constructibilité* » (Antoine et al., 2000). On peut ainsi se demander comment prendre aujourd'hui des décisions dans un tel contexte incertain et décider par exemple de la future urbanisation d'un terrain si on ne sait pas si le phénomène redouté se manifesterà dans les 10, 100 ou 1000 prochaines années.

4.2 Intégrer le facteur temps : comment ?

Le facteur temps intervient à plusieurs niveaux dans une analyse de risque. Il apparaît ainsi :

- dans les mécanismes internes d'évolution des objets rocheux étudiés : vieillissement, fluage, réactions chimiques, etc. ;
- au travers de facteurs externes, variables dans le temps, pouvant modifier les conditions de stabilité des objets étudiés : conditions climatiques, pluie, température, sismicité, etc. ;
- dans la gestion du risque : notion de période de retour, de durée de vie souhaitée pour un ouvrage, etc.

Plusieurs études ont été menées sur le comportement et les mécanismes d'évolution des matériaux rocheux, notamment sur le phénomène de fluage (Grgic (2001) pour le minerai de fer lorrain, Auvray (2003) pour le gypse) et permettent d'établir des lois rhéologiques pour certaines roches à partir d'essais en laboratoire sur des échantillons. Mais le passage « en grand » des résultats et pour des durées beaucoup plus longues que la durée des essais (le plus souvent inférieure à l'année) reste encore malheureusement très délicat. Devant les multiples difficultés liées aux incertitudes concernant les objets et mécanismes étudiés, et qui ont déjà été présentées tout au long de ce mémoire, une intégration « complète » du facteur temporel dans une analyse de risque apparaît encore problématique. Des approches empiriques ont alors été privilégiées et on peut en distinguer deux grands types.

Etude statistique d'événements du passé

Lorsqu'un inventaire d'événements survenus dans le passé peut être dressé, l'analyse statistique de la base de données constitue une manière très efficace d'étudier l'occurrence temporelle de ces derniers. Ainsi, de la même manière que pour les crues et les avalanches, et comme il l'a été présenté précédemment, des lois empiriques peuvent être mises au point, reposant sur l'hypothèse que les conditions d'hier seront les mêmes que demain. Pour Hantz et al. (2002), cette hypothèse est justifiée lorsque l'on travaille à l'échelle d'un secteur homogène de grande dimension et pour des durées d'étude de l'ordre de la durée de vie des ouvrages ou à l'échelle de quelques générations.

Plusieurs travaux concernant le problème des chutes de blocs depuis des versants rocheux se sont attachés à déterminer de telles lois temporelles. Guzzetti et al. (2003) par exemple, à propos de l'étude de la stabilité des versants de la Yosemite Valley en Californie, disposent d'une base de données contenant 463 événements recensés sur une période de 145 ans (entre 1857 et 2002). Utilisant cet inventaire d'une taille rare dans l'étude des aléas liés aux objets rocheux, ils déterminent une loi statistique liant la fréquence d'une chute de bloc à son volume (plus ce dernier est important, plus la fréquence annuelle de chute d'un bloc est faible). Des travaux similaires sont présentés dans Hantz et al. (2002) et une loi du même type (loi puissance) est également établie à partir d'une centaine d'événements recensés dans le massif de la Chartreuse. Ainsi, des périodes de retour pour des chutes de blocs de volumes donnés peuvent être établies et on pourra estimer qu'un bloc d'un volume V tombe, *en moyenne*, tous les $n(V)$ années *d'un point quelconque* du versant étudié. De la même manière, et sur un autre site, un relevé systématique des chutes de pierres étant survenues le long des 11 km du tronçon de la RN 1 sur l'île de la Réunion entre 1992 et 1995 a permis de répertorier 423 événements et a conduit à l'estimation d'une probabilité journalière de chute de 0,29 environ (une chute se produit en moyenne plus d'un jour sur quatre).

Dans le domaine minier, les inventaires, s'ils existent (ce qui est rarement le cas), contiennent généralement beaucoup moins de données. Quelques études se sont néanmoins attachées à définir des lois permettant d'estimer l'occurrence temporelle des effondrements engendrés par des ruptures de piliers :

- Carter et Miller (1996) se concentrent sur l'étude de la stabilité de piliers couronnes (généralement présents pour des gisements filoniens) de mines métalliques canadiennes. Ils constituent une base de données contenant 283 piliers couronne, dont 37 ont rompu. L'occurrence temporelle de ces ruptures est présentée sur la figure 2.17. Une analyse statistique de la base de données constituée permet d'estimer des ordres de grandeur des

temps caractéristiques des ruptures. Les auteurs interprètent la distribution bimodale obtenue en postulant l'existence de deux tendances pouvant amener à la rupture : la première reflète des ruptures liées à des défauts de dimensionnement (« *defects* »), la seconde est liée à des effets d'usure et de vieillissement des structures (« *wearing out* ») ;

- van Besien et Rockaway (1988) étudient un inventaire comprenant 42 cas de ruptures de piliers ayant engendré des effondrements localisés au droit de mines exploitées par chambres et piliers de l'Est des Etats-Unis. Chacun de ces cas étant caractérisé par une série de variables, ils recherchent des corrélations entre la date de rupture et ces paramètres. Une relation est mise au point pour estimer le délai de temps maximal D_{sag} (en années) entre l'exploitation et le début de l'effondrement (l'effondrement peut se produire entre $t=0$ et $t=D_{sag}$ après l'exploitation) en fonction de S_p la contrainte (en MPa) qui s'exerce sur le pilier :

$$D_{sag} = 148 - 32,5 S_p + 2,1 S_p^2 \quad (\text{Eq. 2.16})$$

On remarquera que cette relation n'intègre que la contrainte qui s'applique sur le pilier et ne fait par exemple aucune distinction sur le mécanisme de rupture ayant provoqué les effondrements.

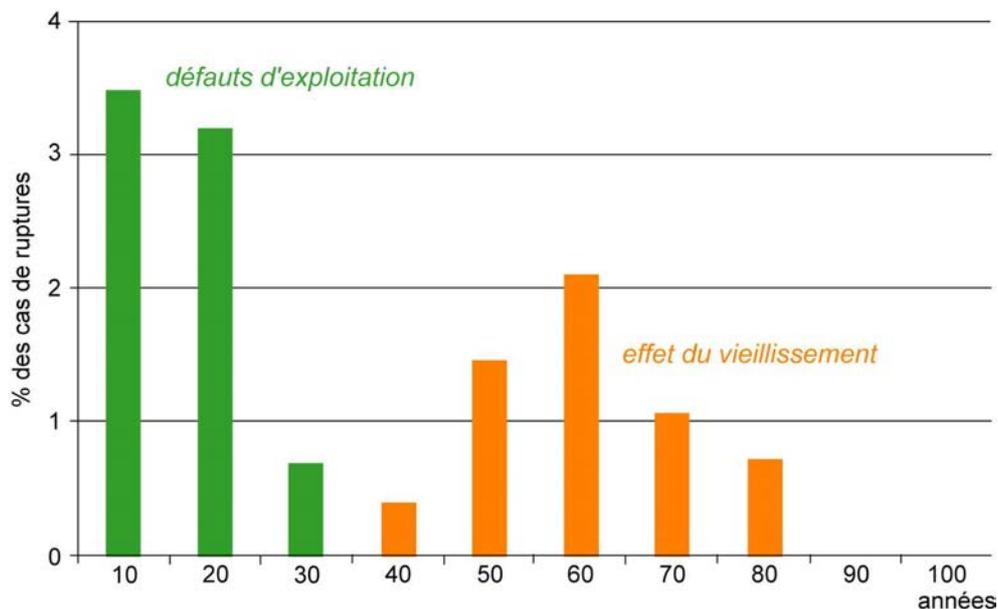


Figure 2.17. Pourcentage des ruptures observées par rapport au nombre de cas étudiés (37 ruptures sur 283 données) en fonction du temps depuis la fin de l'exploitation (d'après Carter et Miller (1996))

Intégration du temps dans les mécanismes physiques

Plusieurs auteurs insistent sur la nécessité de s'intéresser aux mécanismes de rupture et de fracturation des matériaux rocheux, dont l'influence sur la compréhension du déroulement des événements est importante. Une meilleure compréhension de ces mécanismes, et notamment de leur évolution dans le temps, pourrait permettre une meilleure gestion locale de l'aléa et du risque (Stead et al., 2004). Ainsi, plutôt que de réaliser une analyse de l'occurrence temporelle indépendante des mécanismes physiques de rupture, certains travaux ont tenté d'intégrer le facteur temps directement dans les modèles mécaniques :

- soit certains paramètres externes (piézométrie, pluviométrie, etc.) ont été exprimés sous forme de séries temporelles ;
- soit des paramètres géométriques (largeur d'une structure) ou mécaniques (résistance) ont été considérés comme évoluant (généralement diminuant) dans le temps.

Kemeny (2003), partant de l'hypothèse que le comportement dans le temps des roches fragiles est contrôlé par l'ouverture ou le glissement le long de discontinuités, propose de modéliser une fracture

par un ensemble de ponts rocheux dont la cohésion se détériorerait dans le temps selon les contraintes appliquées (en traction et en cisaillement). La loi de Charles (1958) est utilisée pour représenter la réduction du pont rocheux sous forme d'une loi puissance. L'exemple proposé insiste à la fois sur la nécessité de prendre en compte le temps, et estime la durée de vie d'une pente particulière à 250 ans.

Huisman et al. (2006) proposent, dans le cadre de l'étude de la stabilité des pentes, d'améliorer la méthode SSPC (Slope Stability Probabilistic Classification) développée par Hack et al. (2003) et déjà présentée dans le paragraphe 1.1. Celle-ci a une vocation opérationnelle forte : à partir de mesures facilement réalisables sur le terrain, des paramètres caractérisant le comportement des roches sont évalués et, utilisant ceux-ci, la stabilité de la pente peut être évaluée pour des modes de rupture dépendants ou indépendants de l'orientation des discontinuités. Dans cette méthode, un des paramètres évalué concerne le « degré d'érosion » de la masse rocheuse. Plutôt que de le considérer indépendant du temps comme originellement, Huisman et al. (2006) proposent de le corriger pour intégrer les effets de facteurs internes ou externes qui rendent l'intensité de l'érosion variable dans le temps, en utilisant le modèle empirique de Colman (1981) permettant de décrire la variation d'érosion en fonction du temps.

Dans le cas des effondrements engendrés par les ruptures de piliers miniers, van der Merwe (2003b) propose une procédure « basée sur l'observation » pour évaluer la durée de vie d'un pilier avant sa rupture. Il constate sur le terrain que l'effondrement des piliers des mines peu profondes exploitées en chambres et piliers des bassins houillers du Nord-Est de l'Afrique du Sud résulte généralement du mécanisme d'écaillage (figure 2.15). Il modélise ensuite ce mécanisme par une réduction de la largeur des piliers et cherche, à partir d'une base de données comportant 51 cas de ruptures, à déterminer un « taux moyen d'écaillage », fonction du bassin houiller étudié et de la veine de charbon exploitée. Un modèle permettant d'estimer la durée de vie d'un pilier est ensuite déterminé après une analyse des corrélations existant entre les données de l'inventaire des cas de piliers effondrés. Une utilisation de ce modèle sera proposée dans la partie suivante.

Remarques sur ces travaux

Les analyses statistiques d'inventaires permettent de développer des lois qui représentent des résultats moyens sur l'ensemble d'une zone. Elles ne permettent pas de « spatialiser » les résultats : on peut ainsi évaluer la probabilité d'une chute de blocs dans la Yosemite Valley ou d'une rupture de pilier couronne au Canada dans un laps de temps donné, mais on ne peut par contre pas dire exactement où l'accident arrivera dans la zone d'étude.

Hantz et al. (2002) tentent de pallier ce problème avec leur méthode HGP (Historique, Géomécanique, Probabiliste) dans laquelle les résultats obtenus après l'analyse statistique des données et exprimés en terme de fréquence de chutes complètent ceux d'une analyse géomécanique ayant permis l'identification des zones les plus instables. Une hiérarchie des zones les plus critiques est ainsi définie sur la zone d'étude et des résultats sont exprimés sous forme de probabilités.

A la différence des analyses purement statistiques, les travaux tentant d'intégrer le temps directement dans les modèles de rupture ont l'avantage de s'intéresser à un objet particulier plutôt qu'à une zone homogène contenant de nombreux objets. La durée de vie d'un pilier minier donné peut par exemple être évaluée. Mais il apparaît pour ces études qu'elles ne sont pas « purement » mécaniques : un inventaire de données historiques a en fait été nécessaire pour construire, ou caler, des modèles empiriques intégrant le temps.

L'inconvénient principal des analyses statistiques est qu'elles sont complètement dépendantes de la base de données sur lesquelles elles reposent. Le faible nombre d'événements est bien sûr une source importante d'incertitude (de modèle) sur la validité des formules mais le danger le plus important est la tentation que l'on peut avoir à appliquer sans réserve les résultats qui ont été obtenus dans un certain contexte à un site d'étude différent.

4.3 Probabilité d'occurrence temporelle de l'aléa « fontis »

Le dernier commentaire, concernant l'exportation de certains modèles construits dans des contextes particuliers à d'autres sites, amène à s'interroger sur la possibilité d'obtenir des modèles plus « universels » qui pourraient être utilisés d'une manière plus générale.

Dussauge-Peisser et al. (2002) cherchent par exemple, dans le cadre d'études concernant les chutes de blocs, à valider de manière générale la forme de la loi puissance ($n(V) = a \cdot V^{-b}$) et la valeur du paramètre b de celle-ci, qui ont été obtenus lors d'une étude concernant la vallée de la Chartreuse et qui permettent d'estimer la fréquence (par jour, année ou siècle) des chutes de blocs en fonction de leur volume V . Les auteurs s'interrogent notamment sur la validité de cette loi pour d'autres sites : la Yosemite Valley en Californie, les gorges d'Arly dans les Alpes ou des versants en British Columbia au Canada. En effet, s'il est validé, un modèle « universel » pourrait avoir de nombreux avantages :

- la création d'un modèle permettrait d'améliorer la connaissance scientifique sur les mécanismes et réduirait ainsi l'incertitude de ressources qui peut être présente dans les études d'aléa ;
- le caractère universel du modèle le rendrait applicable à des sites où les données sont peu nombreuses, ce qui permettrait d'émettre, par extrapolation, des conclusions pour ces sites.

Dans ce paragraphe, de la même manière que dans les travaux de Dussauge-Peisser et al. (2002), un modèle pour estimer l'occurrence temporelle des fontis va être esquissé. Un fontis est un phénomène d'instabilité qui résulte de la remontée au jour d'un éboulement initialisé au sein d'une excavation souterraine par la rupture du toit, et qui provoque l'apparition en surface d'un cratère de quelques mètres de diamètre (figure 2.18). Dans certaines régions sous-minées, ces phénomènes peuvent être nombreux et devenir très problématiques en terme de sécurité publique ou de développement urbain.

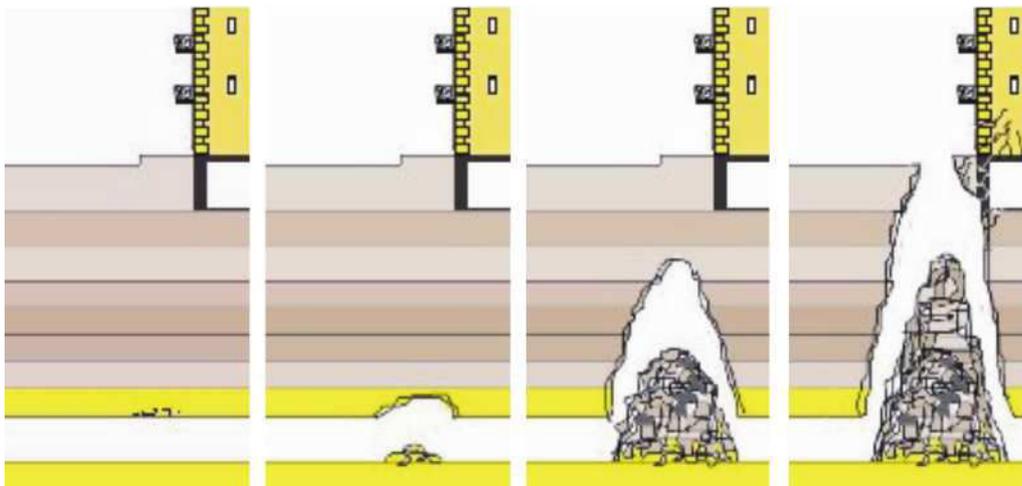


Figure 2.18. Mécanisme de développement d'un fontis

Le mécanisme de fontis a été choisi dans le cadre de cette étude pour plusieurs raisons :

- le phénomène est particulièrement problématique du fait du caractère très soudain de sa débouchée au jour et des conséquences qu'il peut avoir ;
- le phénomène est, à la différence d'autres aléas engendrés par les anciennes exploitations minières, « relativement fréquent » et peut concerner des zones sous-minées d'ampleur importante (figure 2.19). L'étude de la fréquence d'apparition revêt donc, pour ce type d'événement, une importance particulière dans un contexte de gestion et maîtrise de l'aléa ;
- des bases de données d'événements ont pu être constituées du fait du nombre relativement important des événements. Mais, à l'instar de la majorité des travaux sur l'Après mine, les études n'ont généralement été réalisées qu'à des échelles locales pour des sites d'extension limitée. Aucune réelle tentative de mise en commun des résultats n'a jusqu'alors été effectuée.



Figure 2.19. Zone sous-minée totalement dévastée par le phénomène de fontis

La démarche utilisée pour mettre au point un tel modèle destiné à évaluer l'occurrence temporelle de l'aléa fontis peut être déroulée en plusieurs temps :

1. réalisation d'un Etat de l'art général sur les différentes connaissances et identification des résultats qui paraissent les plus pertinents ;
2. construction d'un modèle à partir des différentes hypothèses retenues, puis calibrage et validation de celui-ci en le confrontant à des cas réels parfaitement documentés ;
3. application à des cas « classiques » de manière à en identifier les limites.

Réalisation d'un Etat de l'art

Devant le problème de la venue au jour de fontis au droit d'anciennes exploitations minières, plusieurs auteurs ont tenté de décrire, voire d'esquisser, des modèles « locaux » permettant d'estimer l'occurrence temporelle de ces événements sur des sites de grande ampleur parfaitement localisés :

- Durville (2004) indique que « *les fontis apparaissent quelques dizaines d'années après la cessation d'exploitation, se multiplient pendant quelques années et se raréfient ensuite, l'ensemble de la carrière étant effondré* » ;
- Saint George (2006), de l'Université d'Auckland, décrit que « *après la fermeture de la mine, il y a une période durant laquelle le processus de remontée de voûte n'affecte pas la surface. Puis, quelque temps plus tard, les fontis apparaissent en surface, probablement avec un taux croissant sur plusieurs dizaines d'années. Viendra ensuite un temps où le taux d'occurrence diminuera, lorsque les vides potentiels qui restent au fond seront limités. Le reste des vides se sera stabilisé. Cette phase constitue la partie décroissante de la courbe d'évolution.* » Le but du jeu, dans un contexte d'analyse du risque, est alors de « *deviner où nous sommes sur cette courbe* » ;
- Schwartzmann et Tritsch (1991), à propos de nombreux effondrements se développant dans la commune de Chanteloup-les-Vignes (Yvelines), détaillent l'évolution des fontis en trois phases. La première, qui commencerait dès l'arrêt de l'exploitation, serait caractérisée par une fréquence croissante d'apparition des fontis. La seconde, atteinte après 10-20 ans, verrait une fréquence d'apparition semblant constante sur plusieurs dizaines d'années, voire plus d'un siècle. Enfin, la troisième phase commencerait lorsque les fontis antérieurs sont suffisamment nombreux pour aboutir à un début d'auto-comblement des cavités. La fréquence d'apparition diminuerait alors.

Développement d'un « modèle général »

Ces descriptions présentent des tendances d'évolution dans le temps de la venue au jour des fontis assez proches les unes des autres. En se basant sur celles-ci, un « modèle général » peut être mis au point pour décrire cette évolution :

- il se passe une certaine durée entre la fin des travaux (temps T_0) et l'apparition du premier fontis en surface ;
- entre le temps T_1 (apparition en surface des premiers fontis) et le pic d'activité (T_2), la fréquence de survenue des fontis est croissante ;
- entre le temps T_2 et le temps T_3 , l'auto-comblement progressif des vides au fond, ainsi que la réduction du nombre de carrefours susceptibles de tomber, induisent une fréquence décroissante (à l'échelle de la zone) du nombre de fontis qui débouchent au jour ;
- après T_3 , l'évolution de l'apparition des fontis est caractérisée par un comportement « stable ».

La figure 2.20 récapitule les différents résultats proposés par Durville (2004), Saint George (2006) et Schwartzmann et Tritsch (1991) et présente la tendance du « modèle général » esquissé. Plusieurs divergences existent néanmoins entre les auteurs :

- pour Schwartzmann et Tritsch (1991), T_0 serait égal à T_1 et, plutôt qu'un pic d'apparition à T_2 , la fréquence de venue au jour des fontis connaîtrait un plateau ;
- pour Schwartzmann et Tritsch (1991) et Durville (2004), l'apparition d'un fontis après T_3 serait impossible, « l'ensemble de la carrière étant effondré ». Pour Saint George (2006) par contre, des fontis, en nombre « erratique », pourraient encore venir au jour du fait de l'existence de certains vides résiduels au fond.

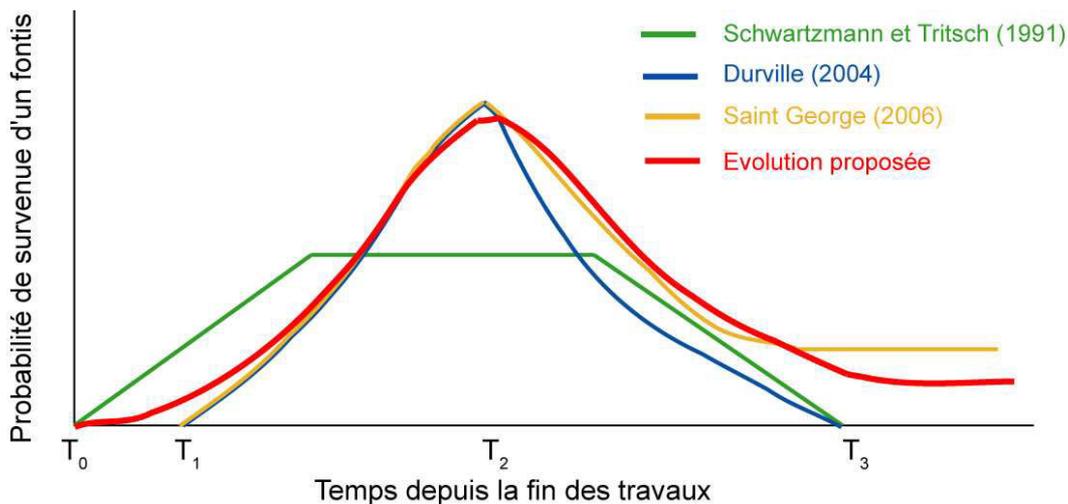


Figure 2.20. Esquisse d'un « modèle général » pour décrire l'évolution dans le temps de la venue au jour de fontis

Précision et calibrage du modèle

Les paramètres caractéristiques du « modèle général » peuvent être précisés à partir de plusieurs études basées sur l'analyse d'inventaires de fontis :

- Dyne (1998) mène une étude en utilisant une base de données contenant 79 fontis qui se sont développés en Pennsylvanie de l'Ouest. La figure 2.21.a présente la répartition du nombre de fontis qui sont venus au jour en fonction du temps passé depuis la fin des travaux : toutes les cuvettes d'effondrement sont apparues au moins 20 ans (T_1) après la fin de l'exploitation et environ 71% d'entre elles sont apparues dans les 60 premières années. La période moyenne d'incubation est de 60 ans (T_2) ;

- Peng (1992) constate que la plupart des effondrements apparaissent entre 30 et 40 ans, 50% dans les 50 ans et 100% dans les 100 ans (T_3). Ces indications laissent à penser que la courbe d'évolution n'est pas symétrique par rapport à T_2 , qui serait de l'ordre de 30 à 50 ans ;
- van Besien et Rockaway (1988), dans une démarche non plus à propos des effondrements liés aux ruptures des piliers comme présentée dans le paragraphe précédent, indiquent que la mise en place d'une loi telle que celle proposée par l'équation (2.16) n'est pas possible dans le cas des fontis. Ils citent néanmoins les travaux de Burns (1982) et de Matheson (1986) qui constatent qu'après 30-50 ans (T_2), il y a un déclin marqué du nombre de fontis débouchant en surface ;
- pour modéliser la décroissance de la courbe de fréquence après T_2 , Richards et al. (2002) supposent un comportement non linéaire, « avec une pente nulle juste après le pic, et sur la fin de la pente » et choisissent de représenter la probabilité p de voir un fontis déboucher au jour sous une forme sinusoïdale (figure 2.21.b) :

$$p(t) = A \left(1 + \cos \frac{t\pi}{T} \right), \quad (\text{Eq. 2.17})$$

avec le paramètre A qui serait choisi pour que la probabilité entre $t = 0$ et T soit égale à P , la probabilité totale d'un effondrement. T , qui correspond à $T_3 - T_2$, est choisie égale à 50 ans d'après la bibliographie ;

- Swift et Reddish (2002) présentent une étude de stabilité des terrains au droit d'anciennes mines de fer peu profondes de Grande-Bretagne. Sur leur site d'étude à Holwell (Sud-Est de Nottingham), 42 fontis ont débouché au jour depuis l'abandon de la mine en 1943 et une datation approximative des occurrences de ceux-ci a pu se faire par l'étude de photographies aériennes. La figure 2.21.c présente l'un des résultats obtenus par les auteurs : la décroissance du nombre de fontis après le pic serait en forme de loi puissance. On soulignera malgré tout les difficultés liées à ce site qui résultent du nombre important de fontis ayant débouché au jour durant la phase d'exploitation (42 fontis sur 84 au total). Ceci implique une analyse délicate des fontis ayant débouché peu de temps après l'exploitation : sont-ils dus directement à l'exploitation ou traduisent-ils un vieillissement de la zone ?

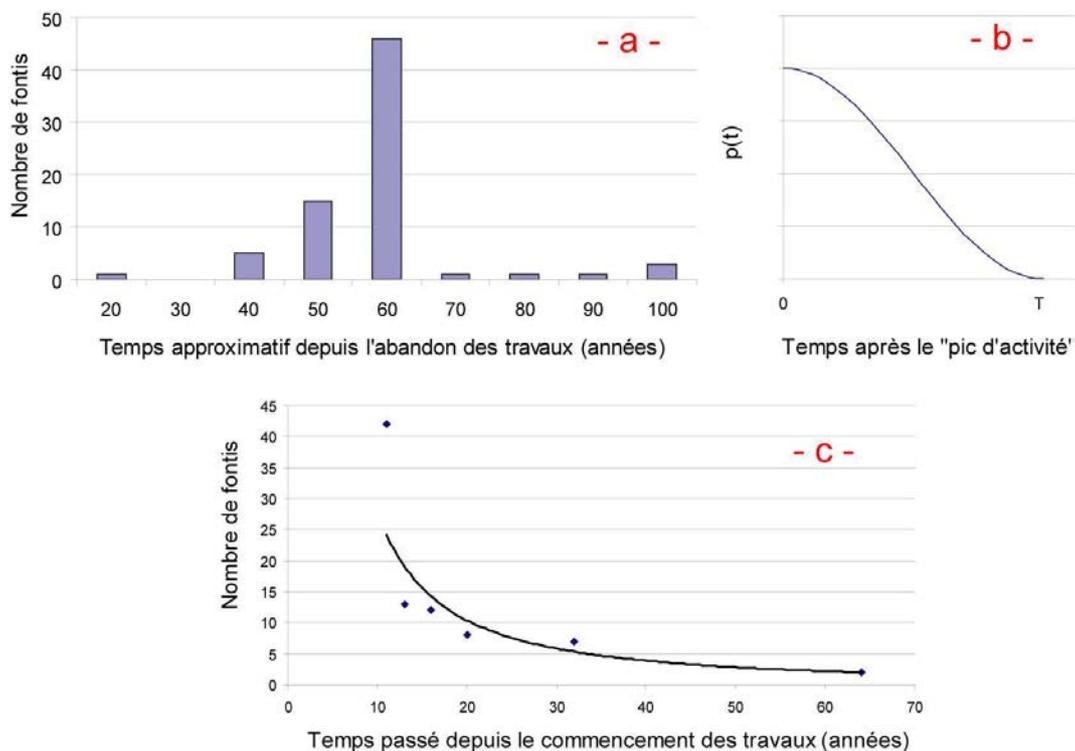


Figure 2.21. Evolution temporelle des fontis en Pennsylvanie de l'Ouest (a, Dyne, 1998), Modèle proposé pour l'évolution du nombre de fontis après le pic d'activité (b, Richards et al., 2002), et Décroissance du nombre de fontis à Holwell (Grande-Bretagne) (c, Swift et Reddish, 2002)

Même si la bibliographie semble montrer que les évolutions dans le temps du nombre de fontis débouchant au jour sont relativement similaires selon les auteurs et que les paramètres du modèle de cette évolution sont du même ordre de grandeur, le « modèle général » esquissé à partir de résultats de la littérature reste encore critiquable. On peut notamment lui reprocher d'être fortement ancré sur de l'expertise et de ne s'être développé que sur l'étude de très peu de cas (le modèle de Richards et al. (2002) est par exemple uniquement basé sur l'analyse de 3 fontis...).

Kotyrba (2005) présente une base de données d'accidents qui apparaît très intéressante dans une perspective de validation de ces résultats et du « modèle général ». Celle-ci concerne la mine de charbon de Siemianowice en Haute Silésie (Pologne) exploitée à faible profondeur et au droit de laquelle plusieurs fontis se sont développés. Cette base de données possède la particularité d'avoir été constituée par une compagnie minière tenue par les autorités polonaises de dresser un inventaire complet des « déformations de surfaces discontinues » survenant au droit de son exploitation. Cette particularité induit plusieurs avantages importants dans le cadre de cette étude :

- le nombre important de fontis recensés (38) est exact ;
- l'« âge » de chaque fontis est connu précisément. Les dates de l'exploitation au fond, ainsi que les dates des remontées au jour des effondrements, ont en effet été recensées par la compagnie minière ;
- l'inventaire couvre une longue période de temps, 50 ans, entre 1952 et 2002.

La figure 2.22 présente l'histogramme du nombre de fontis après la fin d'exploitation. Cette forme de distribution rappelle fortement celle proposée par Carter et Miller (1996) pour l'analyse de la stabilité de piliers couronne (figure 2.17). La distribution bimodale pourrait être expliquée par une première tendance (entre T_0 et T_1) reflétant des ruptures dues à des imperfections liées à l'exploitation ou à des conditions spécifiques de site (présence de failles, d'infiltrations, mauvais dimensionnement, etc.), suivie d'une seconde tendance témoignant d'effets d'usure, de vieillissement, qui peuvent s'étaler quant à eux sur plus d'un siècle. La première tendance semble en fait correspondre à ce qui avait été qualifié de processus de « mortalité infantile » (figure 2.2).

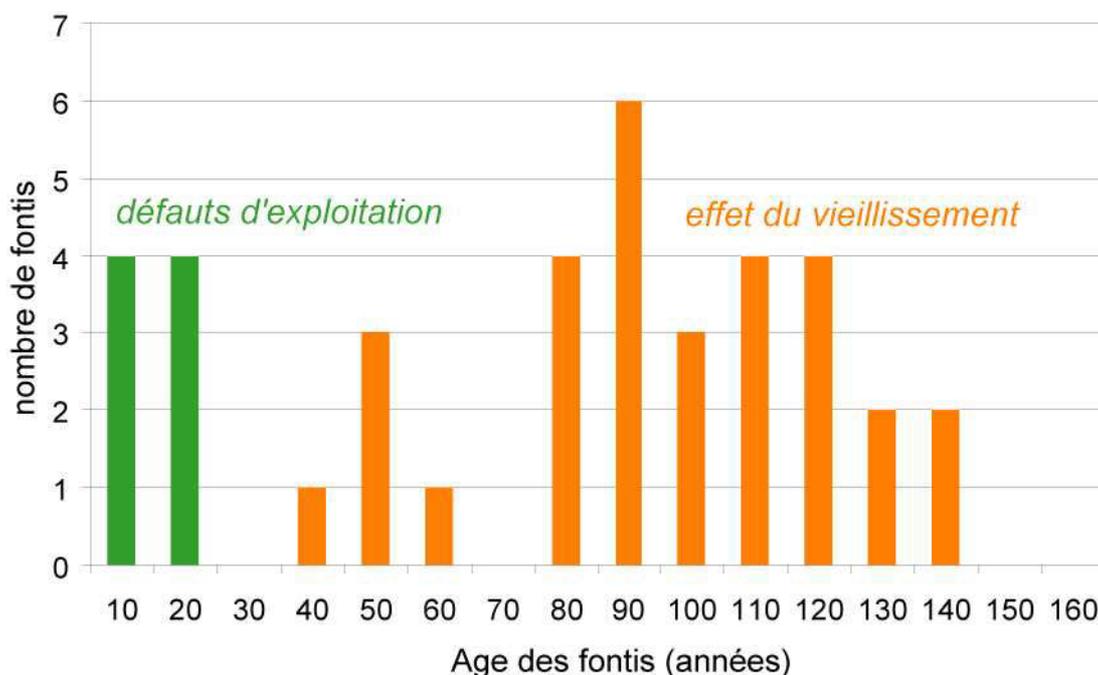


Figure 2.22. Evolution des fontis au droit de la mine de Siemianowice

L'étude proposée ici s'inscrit dans le contexte des risques induits après la phase d'extraction minière, pendant la période de l'Après mine, et en ce sens, elle s'intéresse au phénomène de vieillissement des exploitations. Les 8 fontis présents dans la première *famille* ont alors été retirés de l'inventaire et la figure 2.23 présente, compte tenu de cette remarque, l'histogramme des occurrences cumulées des fontis dus à un vieillissement des travaux.

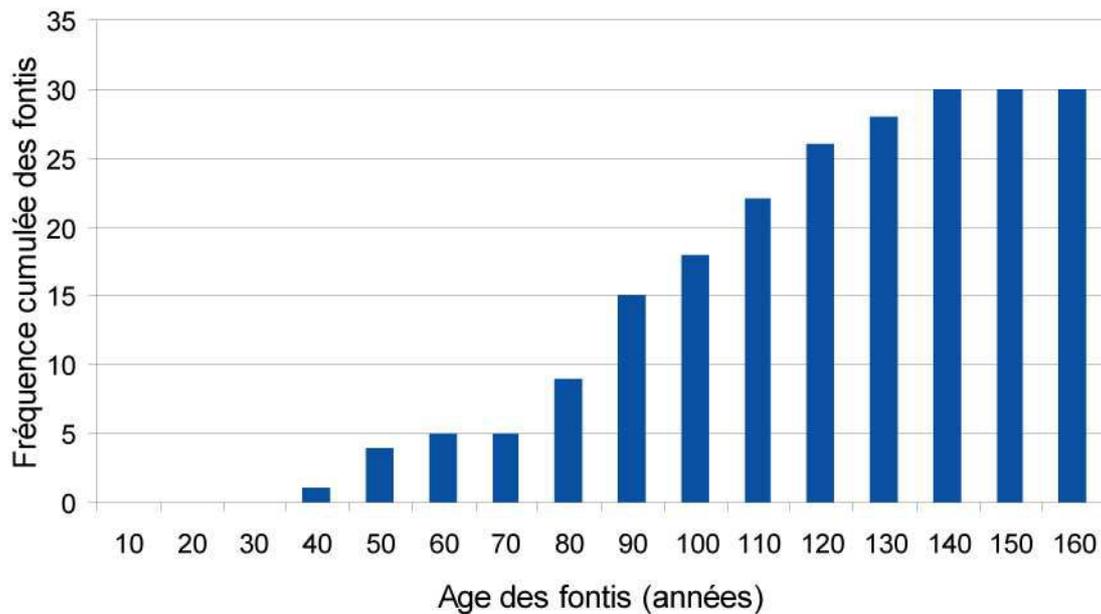


Figure 2.23. Histogramme du nombre cumulé de fontis survenus pendant la phase de l'Après mine au droit de la mine de Siemianowice

La répartition des fontis survenus pendant la phase de l'Après mine reportée sur la figure 2.22 (tracés en orange) semble très proche de celle proposée par le « modèle général ». De manière à proposer une formulation mathématique de ce dernier, qui puisse à la fois représenter analytiquement cette tendance et être utilisée par la suite pour réaliser des analyses dans d'autres contextes, un ajustement de la courbe des fréquences cumulées (figure 2.23) avec des fonctions explicites peut être effectué. Il a été choisi de réaliser ce calage au travers de la minimisation de la quantité χ^2 , avec

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(n_{obs}(i) - n_{th}(i))^2}{n_{th}(i)} \quad (\text{Eq. 2.18})$$

et où $n_{obs}(i)$ et $n_{th}(i)$ représentent respectivement le nombre cumulé de fontis observés et le nombre de fontis théoriques, i.e. estimé par la fonction étudiée, dans la classe i (ici un délai de temps : entre 40 et 50 ans après l'exploitation par exemple). Cette quantité χ^2 , appelée « distance du Khi 2 », constitue en fait un indicateur de la qualité du modèle, basé sur l'estimation des différences entre le modèle théorique et les résultats réels.

La forme en « S » de la courbe des fontis cumulés au droit de la mine de charbon de Siemianowice (figure 2.23) pousse à tester un ajustement de la courbe empirique avec plusieurs fonctions statistiques « classiques » présentées dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10. Différents ajustements statistiques testés

Loi normale		Loi lognormale	
Paramètres	n : nombre de fontis attendus	Paramètres	n : nombre de fontis attendus
	μ : âge moyen		μ : âge moyen
	σ : écart-type de l'âge		σ : écart-type de l'âge
Calage	n = 31,3 μ = 88,3 σ = 30,7	Calage	n = 45,9 μ = 4,72 σ = 0,58
χ^2	2,95	χ^2	3,15
Correspondance	Moyenne = 88 ans	Correspondance	Moyenne = 132 ans
	Ecart-type = 31 ans		Ecart-type = 83 ans
Loi uniforme		Loi triangulaire	
Paramètres	T_{\min} : date du premier fontis	Paramètres	n : nombre de fontis attendus
	T_{\max} : date du dernier fontis		T_{\min} : date du premier fontis
Calage	$T_{\min} = 20,2$ $T_{\max} = 155$		T_{med} : date la "plus probable"
			T_{\max} : date du dernier fontis
χ^2	11,46	χ^2	2
Correspondance	Moyenne = 88 ans	Correspondance	Moyenne = 86 ans
	Ecart-type = 39 ans		Ecart-type = 27 ans
Loi Bêta		Loi de Weibull	
Paramètres	n : nombre de fontis attendus	Paramètres	n : nombre de fontis attendus
	a : paramètre de forme		α : paramètre de forme
	b : paramètre de forme		β : paramètre d'échelle
Calage	n = 32,3 a = 3,9 b = 4,7	Calage	n = 31,8 α = 3,1 β = 100,3
χ^2	2,61	χ^2	2,55
Correspondance	Moyenne = 90 ans	Correspondance	Moyenne = 90 ans
	Ecart-type = 32 ans		Ecart-type = 32 ans

La figure 2.24 présente la probabilité de voir un fontis se développer en fonction du temps passé depuis la fin des travaux et selon les différents ajustements proposés. L'allure de chacune de ces courbes représente globalement le comportement du modèle général. Dans la pratique, les résultats obtenus pourront être interprétés de la manière suivante :

- la date *la plus probable* pour voir se développer un fontis est de l'ordre de 90 ans après la fin des travaux, période qui est dépassée aujourd'hui pour la plupart des zones ;
- on peut s'attendre à un nombre de fontis apparaissant au jour de l'ordre de 32, variant entre 30 (estimation dans le cas d'une loi triangulaire) à 46 (dans le cas d'une loi lognormale, qui est celle pour laquelle le calage est le moins bon, loi uniforme mise à part). Aujourd'hui 30 fontis ont débouché au jour, ainsi le nombre d'occurrences attendues dans le futur est faible ;
- la probabilité de voir se développer un fontis après 170 ans est relativement faible (de l'ordre de 1%), et ce quelque soit la loi de distribution utilisée (exception faite de la loi lognormale).

Certaines de ces distributions possèdent des inconvénients qui peuvent limiter leur utilisation dans un contexte d'analyse de l'aléa et d'estimation de la probabilité temporelle des ruptures :

- l'utilisation des lois uniforme ou Bêta nécessite la définition par expertise de la longueur de l'étude, et donc l'estimation a priori de la date à partir de laquelle on considérera nulle la probabilité de voir un fontis se développer. Ce choix apparaît très restrictif ;

- les lois uniforme, triangulaire, Bêta et de Weibull impliquent le fait que la probabilité de voir un fontis se développer puisse être quasiment nulle après un certain laps de temps, lorsque la courbe de fréquence cumulée atteint un certain palier.

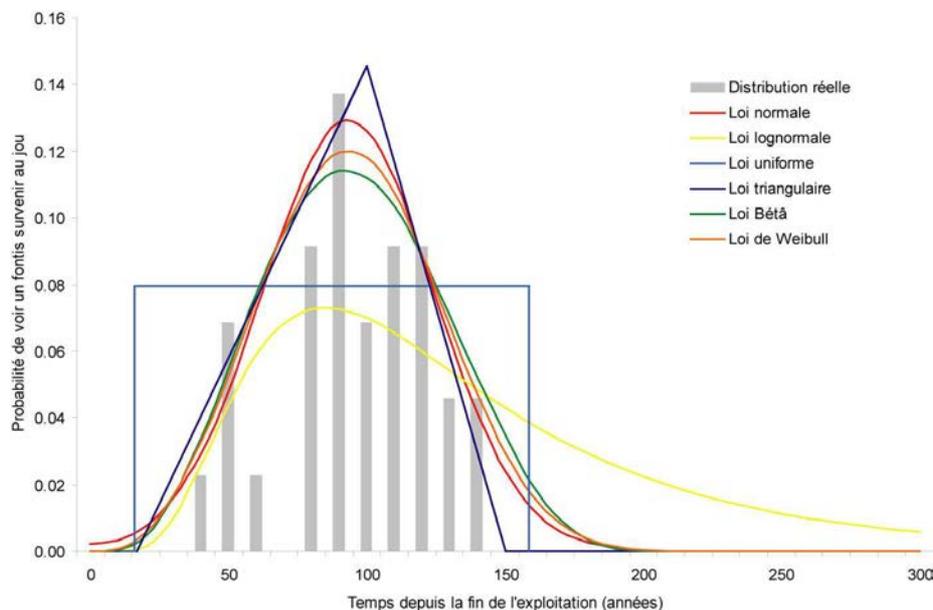


Figure 2.24. Ajustement de la courbe d'évolution du développement des fontis au droit de la mine de Siemianowice par différentes lois classiques

Parmi l'ensemble des formulations présentées, les lois normales et de Weibull retiennent plus l'attention que les autres pour plusieurs raisons :

- ces lois sont parmi celles dont la valeur de χ^2 est la plus faible ;
- ces lois sont déjà utilisées dans des contextes d'étude similaires : la loi normale est fréquemment rencontrée dans le domaine des risques naturels et la loi de Weibull est généralement utilisée en mécanique pour caractériser des phénomènes de vieillissement ;
- ces lois sont facilement *compréhensibles* d'un point de vue physique et une « vulgarisation » des résultats peut être possible : la loi normale est définie par une moyenne et un écart-type, deux notions relativement bien connues, la loi de Weibull est quant à elle définie par un « terme d'usure » et une « durée de vie moyenne » du système ;
- une préférence sera néanmoins accordée à la loi de Weibull, qui peut ne pas être symétrique, ce qui semble mieux représenter la tendance générale observée dans plusieurs études (Peng (1992), Richards et al. (2002))

Difficultés dans la réalité

La qualité de la tendance du modèle général a ici pu être vérifiée sur un cas bien documenté. Des formulations mathématiques ont été proposées, et même si aucune n'a vraiment pu se dégager (seules des préférences ont pu être avancées), les différents résultats concordent entre eux.

Dans la pratique, le travail qui a été réalisé sur la mine de Siemianowice est néanmoins généralement difficile à exporter et un exemple va être donné ici pour illustrer les difficultés d'intégrer réellement le facteur temps dans les études du fait de nombreuses incertitudes. Cet exemple est issu de la région parisienne et est basé sur les travaux de l'Inspection Générale des Carrières (IGC). A Paris et dans la proche couronne, cette Inspection est notamment chargée de réaliser une cartographie des travaux souterrains et de recenser les différents incidents qui ont pu survenir au droit de ceux-ci.

A Vitry-sur-Seine, des carrières de gypse, ou « plâtrières », ont été exploitées dès le XIV^{ème} siècle et s'étendent aujourd'hui sur 63 hectares au Sud de la ville. L'historique de l'exploitation permet de distinguer deux grandes périodes : depuis 1375, date des premières traces d'existence de plâtrières,

jusqu'au XIX^{ème} siècle, l'exploitation s'est faite artisanalement de manière très limitée. Vers 1830, l'exploitation est devenue plus industrielle et quatre grandes plâtrières ont été créées. Dans ces exploitations, le gypse était extrait sur des hauteurs voisines de 5 mètres, à des profondeurs de 50 mètres environ.

L'étude de l'inventaire et des cartes de l'IGC (Atlas IGC, 1968) a permis de recenser sur la commune 17 fontis dont la venue au jour est datée. Parmi ceux-ci, un est apparu pendant les phases de travaux, les 16 autres résultant vraisemblablement d'un vieillissement de l'exploitation (tableau 2.11).

Utilisant cet inventaire, une approche similaire à celle réalisée sur la mine de charbon de Siemianowice peut être réalisée. Ici se pose néanmoins un problème important que l'on peut souvent rencontrer dans la pratique : l'inventaire utilisé peut être incomplet ou contenir des informations incertaines. Dans le cas des plâtrières de Vitry-sur-Seine, le problème principal auquel l'expert doit faire face concerne l'indétermination sur l'âge du fontis (cet « âge » est défini comme la différence entre la date de venue au jour de l'effondrement et la date d'exploitation de la zone à l'aplomb de celui-ci) et s'explique, plutôt que par une mauvaise datation des événements au jour comme c'est souvent le cas dans des études réalisées à partir de l'analyse de photographies aériennes, par la très grande durée de l'exploitation des différents secteurs.

Tableau 2.11. Nombre de fontis ayant débouché au jour au droit des différents secteurs d'exploitation

Secteur d'exploitation	Date de début des travaux	Date de fin des travaux	Durée d'exploitation	Nombre de fontis
Plâtrière du Nord	1846	1940	94 ans	3 + 1*
Plâtrière du Centre	1830	1932	102 ans	8
Plâtrière du Midi	1840	1930	90 ans	5

* : fontis apparu durant les travaux

Utilisant les âges « moyens », c'est-à-dire estimés à partir de la date moyenne d'exploitation (1893 pour la plâtrière du Nord, 1881 pour celle du Centre et 1885 pour celle du Midi), une loi de Weibull et/ou une loi normale peuvent être ajustées aux données de fréquence cumulée des fontis en fonction du temps (figure 2.25). Ces deux types de lois ont été retenus suite aux remarques émises dans le paragraphe précédent.

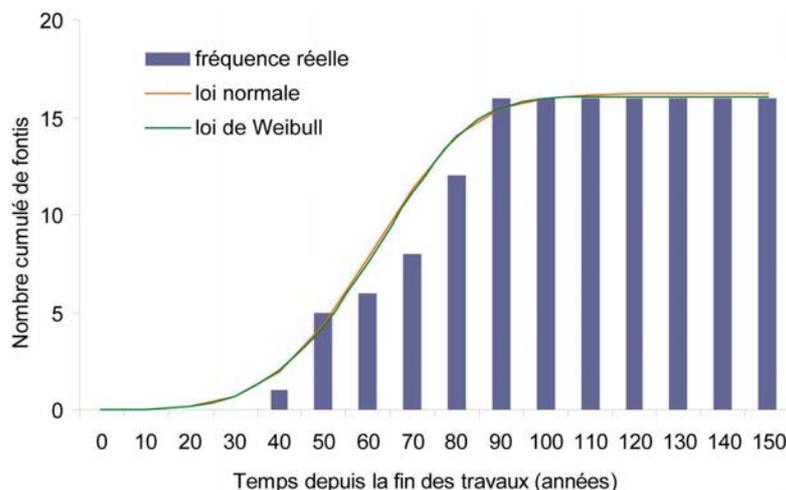


Figure 2.25. Ajustement de modèles pour estimer le nombre de fontis en fonction du temps au droit des anciennes plâtrières de Vitry-sur-Seine

Pour la loi de Weibull, les paramètres ajustés n (nombre total de fontis attendus), α (paramètre de forme, caractéristique du vieillissement) et β (paramètre d'échelle, représentant l'espérance de vie du toit d'une galerie) valent respectivement 16, 4,3 et 72 ans. Pour la loi normale, μ (durée de vie moyenne) et σ (écart-type de la durée de vie) valent 16, 66 ans et 18 ans. Dans les deux cas, les ajustements sont très bons avec des valeurs de χ^2 faibles.

Ainsi, selon l'un ou l'autre de ces modèles, le phénomène de fontis semble quasiment terminé : le nombre total de fontis attendus (n) est très proche du nombre de fontis étant déjà venus au jour et la probabilité de voir un fontis se développer est quasi nulle (2.10^{-12} dans le cas d'une loi normale, 0 dans le cas de la loi de Weibull).

Néanmoins, ces résultats doivent être regardés avec attention puisque l'incertitude sur l'âge exact des fontis n'a pas été prise en compte. La figure 2.26 présente, pour chacun des événements, les plages de variation, comprises entre 90 et 102 ans, de ces âges.

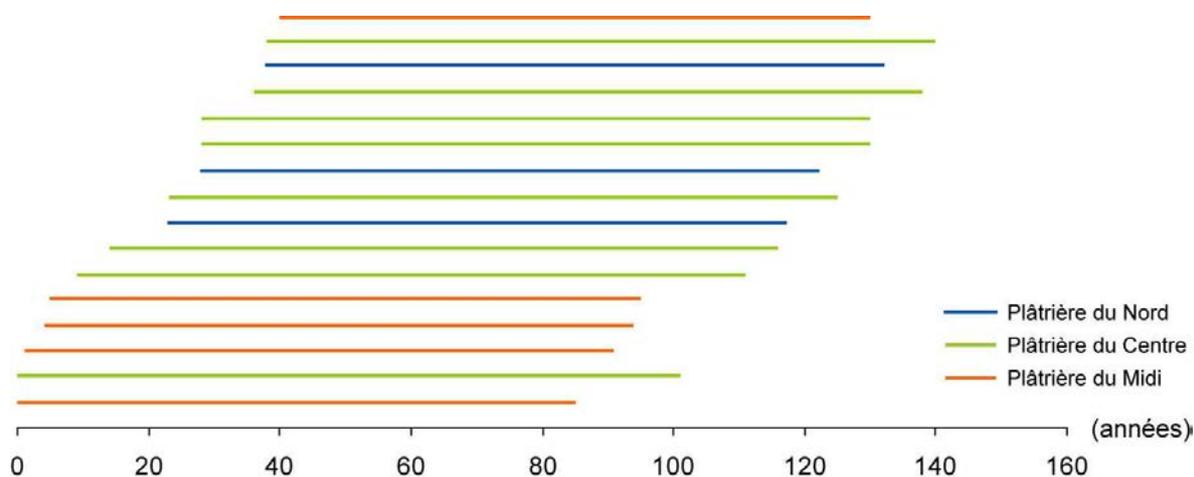


Figure 2.26. Incertitudes de datation des 16 fontis ayant débouché au jour au droit des anciennes plâtrières de Vitry-sur-Seine

De manière à prendre en compte ces incertitudes, 10000 listes contenant un âge possible de ces 16 fontis ont été générées aléatoirement, c'est-à-dire en tirant un âge aléatoire, selon une loi uniforme, dans l'intervalle de variation associé. Pour chacune de ces listes, des lois de Weibull et des lois normales ont ensuite été ajustées aux données, de manière similaire à la technique utilisée pour obtenir la figure 2.25. La figure 2.27 présente alors l'enveloppe des fonctions de fréquence cumulée obtenue en utilisant ces deux types de lois.

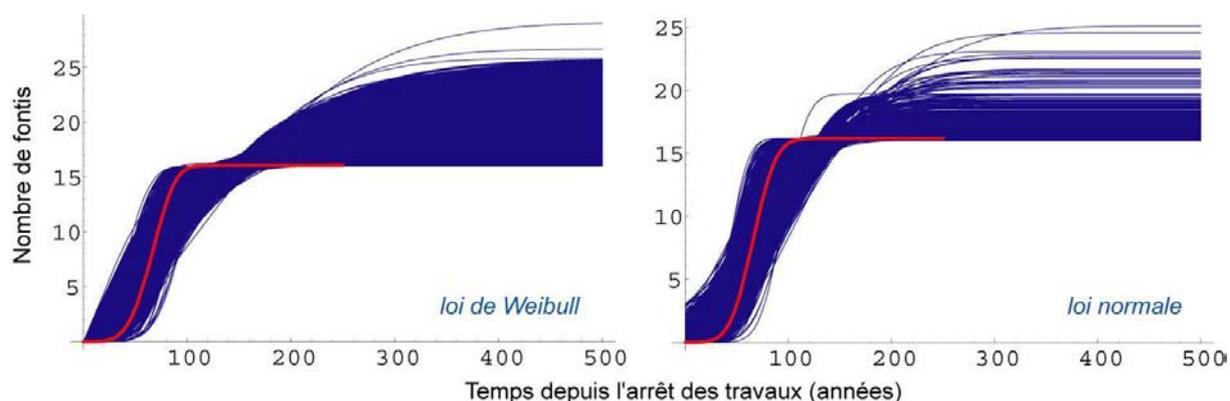


Figure 2.27. Ajustement de modèles pour estimer le nombre de fontis en fonction du temps au droit des plâtrières de Vitry-sur-Seine lorsque les incertitudes sur la datation des effondrements est prise en compte. Les courbes rouges correspondent à celles présentées sur la figure 2.26

Les courbes tracées sur la figure 2.27 ne font ainsi qu'appartenir à un ensemble de solutions possibles. Le tableau 2.12 présente les caractérisations des paramètres n , a , β , μ , σ des lois de distributions considérées. Il apparaît notamment que la loi de Weibull semble dans cette étude plus sécuritaire que la loi normale.

Tableau 2.12. Caractérisation statistique des paramètres des lois de Weibull et normales ajustées

Loi de Weibull			Loi normale		
n, nombre de fontis attendus			n, nombre de fontis attendus		
$n_{\min} = 16$	$n_{\text{moyen}} = 18$	$n_{\max} = 29$	$n_{\min} = 16$	$n_{\text{moyen}} = 16,5$	$n_{\max} = 25$
α , taux de vieillissement			μ , moyenne (années)		
$\alpha_{\min} = 1$	$\alpha_{\text{moyen}} = 2$	$\alpha_{\max} = 7,6$	$\mu_{\min} = 42$	$\mu_{\text{moyen}} = 68$	$\mu_{\max} = 124$
β , espérance de vie (années)			σ , écart-type (années)		
$\beta_{\min} = 48$	$\beta_{\text{moyen}} = 90$	$\beta_{\max} = 183$	$\sigma_{\min} = 12$	$\sigma_{\text{moyen}} = 34$	$\sigma_{\max} = 97$
Probabilité de voir un fontis se développer dans les 50 ou 100 prochaines années					
$P_{50\min} = 0\%$	$P_{50\text{moyen}} = 3\%$	$P_{50\max} = 15\%$	$P_{50\min} = 0\%$	$P_{50\text{moyen}} = 1\%$	$P_{50\max} = 16\%$
$P_{100\min} = 0\%$	$P_{100\text{moyen}} = 4\%$	$P_{100\max} = 26\%$	$P_{100\min} = 0\%$	$P_{100\text{moyen}} = 1\%$	$P_{100\max} = 24\%$

Compte tenu des incertitudes existant sur l'âge exact des fontis, il apparaît que le phénomène n'est peut-être pas terminé comme on aurait pu le croire :

- la probabilité *moyenne* qu'un nouvel effondrement survienne dans les 50 ou 100 prochaines années n'est pas nulle (comprise entre 1 et 4%) et la probabilité *maximale* est de l'ordre de 25% dans les 100 ans ;
- le nombre total de fontis que l'on peut attendre peut varier de 16 à 29, avec une valeur moyenne de l'ordre de 18.

La figure 2.28 apparaît ainsi très intéressante dans un contexte d'évaluation du risque. L'enveloppe de l'ensemble des courbes peut en effet fournir de nombreux renseignements qui peuvent s'avérer utiles à la fois pour les experts devant fournir un résultat d'analyse et pour les décideurs voulant prendre une décision :

- un encadrement du nombre de fontis qui peut encore se produire peut être donné ;
- une estimation de la date après laquelle le phénomène est très rare (au risque $x\%$ de se tromper) peut être fournie.

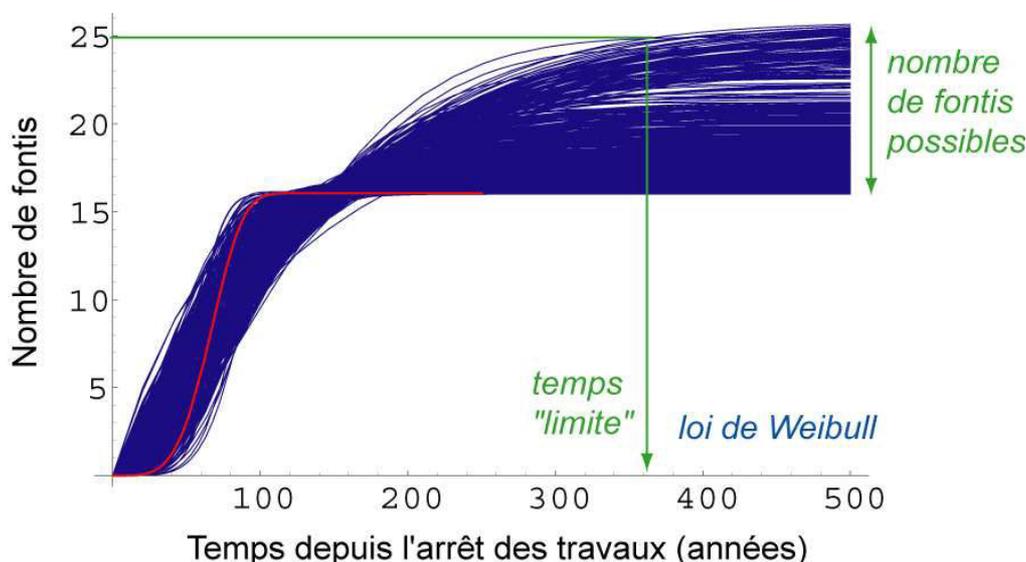


Figure 2.28. Interprétation des résultats obtenus

4.4 Bilan sur l'intégration du facteur temps dans les analyses

Le travail présenté à propos de la détermination de l'occurrence temporelle des fontis repose sur une interaction entre une démarche d'expertise et l'utilisation de bases de données. La méthodologie proposée est assez générale pour pouvoir s'adapter à d'autres phénomènes ou mécanismes.

Le modèle qui peut être mis en place en utilisant cette méthodologie permet d'indiquer les tendances de l'évolution temporelle des phénomènes étudiés. Développer un tel modèle permet de répondre à un manque bibliographique qui est apparu au regard du faible nombre d'études intégrant le facteur temps (les études probabilistes concernent plus la composante spatiale de l'aléa). En cela, le travail réalisé ici constitue une solution à un problème d'incertitude de ressources. Il permet également d'apporter des débuts de solution à des demandes pratiques des acteurs de la gestion de risque : il peut aider à une meilleure planification des travaux à court, moyen ou long terme, dans des zones à risques.

Cette étude a néanmoins mis le doigt sur les nombreuses limites qui existent encore quant au modèle développé. Pour que ce dernier puisse être appliqué dans la pratique sur un site donné, ses paramètres caractéristiques doivent en effet être ajustés aux spécificités du site. Le modèle est alors fortement conditionné par la qualité de la base de données disponibles, et même s'il apporte une solution à l'incertitude de ressources, il soulève d'importants problèmes d'incertitudes de modèle.

Cette étude permet de ce fait d'insister à la fois sur le manque d'inventaires de cas historiques qui existent aujourd'hui, et sur la nécessité d'en constituer pour permettre d'améliorer la qualité générale des analyses. Dès lors, comme le présente le Guide technique pour la caractérisation et la cartographie des aléas mouvements de terrain, « *ce type d'analyse quantitative a posteriori est [...] amené à se développer dans les années à venir, et confère tout leur intérêt aux recherches historiques et au recensement d'événements passés* » (Antoine et al., 2000).

5 CONCLUSIONS

A travers les nombreux exemples proposés dans ce chapitre, une réflexion poussée sur l'utilisation de l'outil probabiliste dans le contexte des analyses de risques a pu être menée. Une clarification de plusieurs notions souvent délicates à manier et à interpréter a ainsi été effectuée. D'importants résultats en ressortent.

Les probabilités constituent, dans un premier temps, un excellent outil pour aider au traitement des incertitudes qui peuvent être rencontrées dans les études :

- l'application de techniques probabilistes a montré, sur un exemple simple d'analyse, son importance et ses qualités vis-à-vis de la prise en compte ou de la quantification des incertitudes de données, de modèle, d'expertise, ainsi que vis-à-vis du traitement de problèmes connexes comme l'influence sur le résultat de l'étude du choix des fonctions de distribution ou l'utilisation des simulations de Monte Carlo ;
- une méthode originale a été mise au point pour intégrer 1) l'existence de plusieurs modèles, 2) le fait que chaque modèle combine d'une certaine manière les données et qu'il ne permet d'approcher la réalité de façon approximative, 3) l'indétermination des paramètres de modèles, et 4) l'indétermination des données (figure 2.13).

Il a alors pu être montré que l'outil probabiliste constituait une *solution performante d'aide à l'expertise* au sens où il permet d'aider l'ingénieur dans sa démarche d'analyse et de tendre vers une amélioration et une précision des résultats. Les probabilités permettent en effet d'insister sur les liens forts qui existent entre certaines catégories d'incertitudes, liens qui induisent des choix méthodologiques importants dans l'étude :

- il a été constaté que l'expression de résultats quantifiés pouvait permettre de montrer que la réduction des incertitudes de données pouvait devenir inefficace pour préciser le résultat de l'étude si les incertitudes de modèle étaient trop importantes ;
- la réduction de certains types d'incertitudes peut induire l'augmentation d'un autre type : le développement d'un modèle pour évaluer l'occurrence temporelle des fontis permet ainsi de faire face au problème de l'incertitude de ressources, mais engendre l'existence d'une incertitude de modèle liée à la représentativité de ce dernier.

L'outil probabiliste peut, dans un second temps, permettre de répondre aux attentes de certains acteurs de la gestion du risque. Mais l'interprétation des résultats est délicate et une discussion sur la signification des approches fréquentiste et épistémique a été menée :

- dans le domaine de la gestion des risques en général, la demande est aujourd'hui pressante de pouvoir apporter une réponse quantifiée à l'estimation de la probabilité *fréquentiste* d'occurrence d'un événement ;
- l'interprétation des résultats probabilistes dépend cependant de la caractérisation des incertitudes qui sont rencontrées dans l'étude. Une interprétation pratique trop rapide des résultats peut alors se révéler erronée si certaines hypothèses de caractérisation des incertitudes ne sont pas valides (la notion de probabilité de rupture est ainsi dangereuse) ;
- dans certains cas, il est possible d'exprimer des probabilités *spatiales* d'occurrence de l'aléa ;
- une approche *temporelle* est plus difficile mais est néanmoins essentielle pour une bonne gestion du risque. Des propositions pour établir des modèles et répondre à certains manques scientifiques ont alors été effectuées. Les avantages et les limites de ces travaux ont également été illustrés.

CHAPITRE 3. MISE EN PRATIQUE

Les premiers chapitres du mémoire ont permis d'introduire des outils et méthodes permettant une prise en compte des incertitudes dans les analyses de risque et de présenter les avantages que l'utilisation des probabilités pouvaient avoir dans de telles études.

Ce troisième chapitre se propose d'*illustrer pratiquement les différents résultats* qui ont pu être obtenus précédemment. Il se donne pour principaux objectifs de :

- présenter la faisabilité de la mise en application opérationnelle des principaux outils et méthodologies introduits, et notamment leur complémentarité avec les outils déjà existants et utilisés aujourd'hui ;
- présenter la capacité d'adaptation de ces outils à des réalités pratiques, où les enjeux économiques, environnementaux ou sécuritaires peuvent être importants ;
- mettre en perspective les apports réels de travaux de la thèse, par la présentation concrète de leurs avantages.

Le premier cas d'étude concerne l'évaluation de la stabilité d'une mine de charbon sud-africaine. Les travaux présentés entrent dans le cadre d'un projet de coopération qui a été développé durant la thèse avec l'Université de Pretoria.

La seconde application a trait à l'analyse du risque d'effondrement des terrains au droit d'une ancienne carrière souterraine de gypse située en France. Cette étude a donné lieu à plusieurs communications lors de conférences (Cauvin, 2007a ; Cauvin, 2007b) et a notamment été récompensée par le 3^{ème} prix « Jeunes chercheurs » lors d'une conférence internationale à Saint Petersburg (Russie) en avril 2007.

1 EVALUATION DE LA STABILITE A LONG TERME D'UNE MINE SOUTERRAINE DE CHARBON EN AFRIQUE DU SUD

1.1 Le programme PROTEA de coopération en recherche scientifique

Le programme PROTEA de coopération en recherche scientifique a été instauré de manière à contribuer, par la recherche, au développement des relations entre communautés scientifiques française et sud-africaine. Il vise principalement à développer une synergie entre chercheurs des deux pays. En France, ce programme est coordonné par le Centre National des Œuvres Universitaires et Scolaires (CNOUS), sous la tutelle du Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Ministère des Affaires Étrangères, et il est supervisé en Afrique du Sud par la National Research Foundation (NRF).

Dans le cadre de ce programme de coopération, un projet a été proposé en 2005 par l'INERIS et l'Université de Pretoria pour une durée de deux ans. Sont aussi intégrés au programme le Centre d'Informatique Géologique (CIG) de l'École des Mines de Paris et le Centre for Mine Closure à Pretoria. L'objectif principal du projet est de renforcer les compétences des deux pays en terme de gestion de l'Après mine par un échange de connaissances et de ressources disponibles à un contexte national, et de renforcer les compétences mutuelles. Il a en effet été constaté que, même si des approches nationales se mettent progressivement en place, il existe à un niveau international une totale absence de formalisme sur les méthodes d'analyse et d'affichage des risques. Pour atteindre un tel objectif, des échanges de personnels spécialisés des deux pays ont été réalisés, ainsi que des visites de sites, et des travaux de recherche ont été présentés et expliqués.

Ce chapitre présente donc une étude réalisée en Afrique du Sud dans le cadre de ce programme et qui a été complétée par des résultats issus du travail de thèse. Les avantages de ce travail, à la fois d'un point de vue technique mais aussi au niveau de la communication, seront ensuite décrits.

1.2 Présentation de l'exploitation minière et des objectifs de l'étude : entre théorie et pratique

Présentation du site d'étude

La mine étudiée dans le cadre du programme PROTEA est située à une centaine de kilomètres à l'Est de Johannesburg dans la province de Mpumalanga. L'exploitation d'un charbon bitumineux, destiné aussi bien à la consommation nationale qu'à l'export, y a débuté au milieu des années 1960 et la majeure partie des réserves a aujourd'hui été extraite. En moyenne, un million de tonnes de charbon ont ainsi été produites chaque année.

L'exploitation s'est faite à faible profondeur, entre 17 et 88 mètres, par la technique des chambres et piliers. Sur les cinq couches de charbon de la séquence géologique du site, identiques à celles du bassin de Witbank, une seule a été et est exploitée aujourd'hui.

La figure 3.1 présente la zone de l'exploitation sur laquelle se focalise l'étude. Trois secteurs (A, B et C) peuvent y être distingués, caractérisés par des dimensions d'exploitation relativement homogènes. L'extraction s'est faite de la zone A vers la zone C jusqu'en décembre 2006, date à laquelle les travaux ont cessé. Les piliers de la zone B, dont le dimensionnement était originellement plus large, ont fait l'objet d'une extraction secondaire.

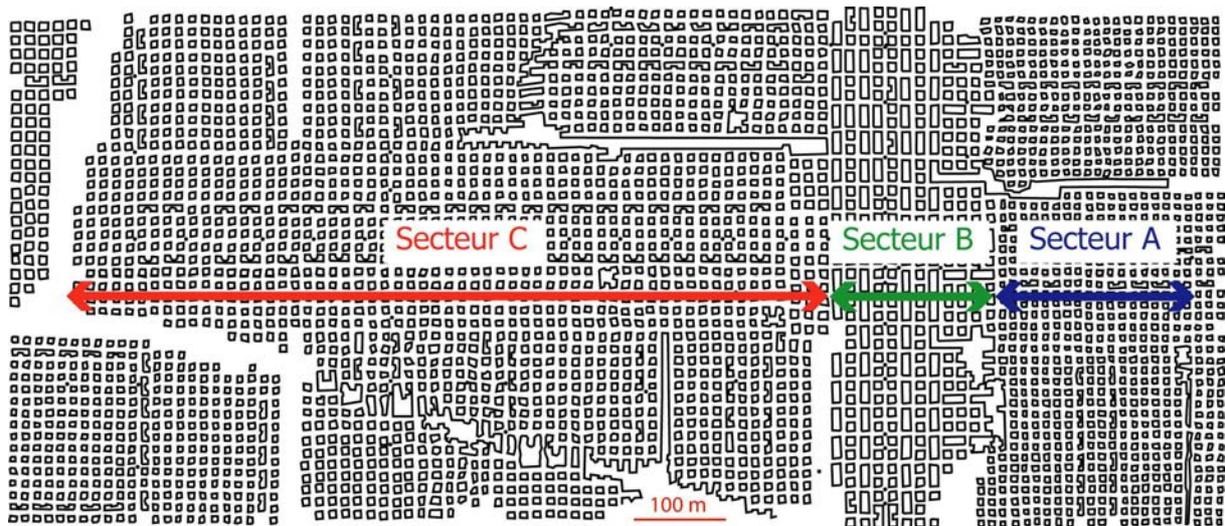


Figure 3.1. Présentation de la zone d'étude

Une visite sur le terrain en novembre 2006 a révélé de nombreuses chutes de toits ainsi qu'un écaillage particulièrement important des piliers de la zone (figure 3.2).



Figure 3.2. Ecaillage des piliers constaté lors d'une visite sur le site d'étude

Les défis d'une mine mature

Le site concerné par l'étude est un exemple classique de ce qui est appelé en Afrique du Sud une « mine mature », c'est-à-dire une mine qui arrive en fin de vie. Dans de telles exploitations, la majeure partie des réserves a été extraite et le défi des ingénieurs est d'essayer de pousser au maximum l'extraction avant la fermeture définitive du site et dans l'attente de la mise en production de nouvelles mines. Cet accroissement de l'extraction pose néanmoins le problème de la stabilité de la mine à court terme (sécurité des mineurs) et à plus long terme (problèmes de l'Après mine).

Dans le contexte de la gestion des mines matures, les travaux proposés ici étudient la faisabilité d'une reprise des vieux piliers dans la zone présentée sur la figure 3.1. Par « reprise des vieux piliers », il faut entendre l'extraction du charbon présent sur la surface externe des piliers, qui mènerait à une diminution de leurs dimensions et donc à l'augmentation du taux de défrètement de l'exploitation.

De part les enjeux économiques, de sécurité et de communication pour la société, sous-jacents à ce contexte, nous taisons le nom exact de la mine. Mais les données et résultats présentés dans cette étude sont bien réels.

Objectifs de l'étude

Les objectifs concrets qui ont mené le développement de cette étude sont les suivants :

- estimer la stabilité actuelle de la zone présentée sur la figure 3.1 et évaluer la potentialité d'une réduction des dimensions des piliers ;
- estimer la stabilité à long terme de la zone ;
- compléter l'approche utilisée classiquement en Afrique du Sud par les principaux résultats de la thèse (en terme de gestion de l'incertitude et de l'utilisation des probabilités) et examiner les apports concrets apportés par ces travaux dans le contexte des « mines matures ».

Le travail de la thèse sera ainsi mis en perspective dans le cadre d'une application concrète liée à des travaux d'extraction miniers. Les résultats théoriques présentés dans les précédents chapitres vont être mis au service des besoins pratiques des ingénieurs de l'exploitation, en terme de sécurité des ouvriers, des infrastructures de surface mais aussi de rentabilité de la mine.

1.3 Analyse de l'aléa

Méthode retenue

De manière à répondre à l'objectif premier de cette étude, à savoir l'évaluation de la stabilité actuelle de la zone, une méthode en plusieurs étapes a été utilisée :

- une étude locale : la stabilité des piliers des secteurs A, B et C est estimée en ne considérant qu'un unique pilier. Cette évaluation amène à identifier le secteur « le plus sensible », dans lequel l'impact d'une reprise de l'extraction est examiné ;
- une étude régionale : l'influence d'une rupture d'un pilier du secteur le plus sensible sur les secteurs voisins est examinée ;
- une étude temporelle : une estimation du temps « le plus probable » des ruptures de piliers est recherchée ;
- des propositions d'actions : détermination des actions nécessaires à entreprendre pour répondre aux objectifs initiaux.

Ressources disponibles

En Afrique du Sud, le comportement des mines de charbon est relativement bien connu. Ceci s'explique par :

- les travaux menés suite à la catastrophe de Coalbrook en 1960 dans laquelle 437 mineurs ont péri, concernant notamment l'évaluation de la résistance des piliers, qui ont été développés pour permettre de mener un meilleur dimensionnement des exploitations souterraines (Salamon et Munro, 1967 ; Bieniawski, 1968) ;
- l'initiative de recherche intitulée « Coaltech 2020 » lancée en 1999, face aux défis proposés par la gestion des « mines matures », pour étudier la possibilité d'étendre la production des mines du bassin houiller de Witbank à l'horizon 2020 et qui a débouché sur des travaux plus spécifiques destinés à étudier le phénomène d'écaillage des piliers (van der Merwe, 2003b ; van der Merwe, 2004b) ou la résistance des piliers (van der Merwe, 2003a).

Les ressources spécifiques sur le site d'étude ont été plus difficilement récupérables. La mine ayant changé plusieurs fois de propriétaire et de personnel durant les dernières décennies, les plans d'exploitation ont été perdus et seuls des plans numériques relatifs au projet de dimensionnement ont pu être récoltés. Ce problème est très comparable à celui qui été présenté précédemment dans le cadre de l'évaluation des risques au droit des anciennes mines en France où les plans sont parfois difficilement disponibles. Dans le cas de l'exploitation étudiée, des mesures sur le terrain ont été

menées par les exploitants sur 80 piliers et galeries et une comparaison avec les plans numériques a ainsi pu être réalisée. Ainsi, sont connues sur l'exploitation :

- les largeurs et hauteurs actuelles de 80 piliers et galeries, mesurées sur site en 2006 ;
- les largeurs et hauteurs « initiales » des piliers et galeries, telles que figurant sur les plans de développement. Ces valeurs, par différence avec les valeurs actuelles, permettent d'estimer l'influence du phénomène d'écaillage (figure 3.2) ;
- la profondeur de chaque pilier, par interprétation des cartes topographiques et des cotes d'exploitation.

Enfin, face au problème particulier de l'évaluation de l'occurrence temporelle des effondrements, un inventaire compilé par van der Merwe (2006a) regroupant plusieurs cas de rupture de piliers de mines du bassin de Witbank entre 1919 et 2000 a pu être utilisé. Concernant le site d'étude à proprement parler, une estimation de l'âge des différents secteurs a été rendue possible par l'analyse des plaques métalliques (« pegs numbers ») installées au fond et dont la date d'installation a été répertoriée.

Principales incertitudes rencontrées

Au regard de ce qui vient d'être présenté, on considérera que l'*incertitude de ressources* peut être négligée dans cette étude.

Concernant l'*incertitude d'expertise*, elle touche principalement au problème du choix des modèles qui seront utilisés d'une part pour évaluer la résistance des piliers et d'autre part pour estimer la durée de vie de ceux-ci. Les outils à disposition sont en effet :

- pour l'évaluation de la résistance des piliers des mines de charbon sud africains, diverses formulations existent :

- $\sigma_p = k_1 \frac{w^\alpha}{h^\beta}$ avec $k_1=7,176$, $\alpha=0,46$ et $\beta=0,66$ (Salamon et Munro, 1967) ;(Eq. 3.1)

- $\sigma_p = a_2 + b_2 \frac{w}{h}$ avec $a_2=2,76$ MPa et $b_2=1,52$ MPa (Bieniawski, 1968) ;(Eq. 3.2)

- $\sigma_p = k_3 \frac{w}{h}$ avec $k_3=3,5$ MPa (van der Merwe, 2003a), (Eq. 3.3)

où σ_p représente la résistance du pilier, w sa largeur et h sa hauteur (figure 3.3).

- pour l'évaluation de la durée de vie des piliers, deux approches différentes peuvent être utilisées :
 - la formule de van der Merwe (2003b) basée sur l'étude du phénomène d'écaillage ;
 - l'analyse statistique de l'inventaire des cas d'effondrements de piliers dans le bassin de Witbank compilé par van der Merwe (2006a) en utilisant une méthode similaire à celle présentée dans le chapitre 2 concernant le phénomène de fontis.

On notera que seul le modèle de l'aire tributaire sera utilisé ici pour estimer la contrainte qui s'exerce sur le pilier puisque c'est à partir de celui-ci que les trois formules de résistance ont été développées.

L'*incertitude de modèle* concerne dans cette étude aussi bien l'utilisation de modèles pour approcher la réalité que les paramètres des modèles (valeurs des différents coefficients dans les formules de résistance notamment (équations 3.1, 3.2 et 3.3)) qui ont été déterminés par des analyses statistiques utilisant un nombre limité de données. Ces paramètres de modèle sont valables pour l'ensemble des mines de charbon sud-africaines et ne sont donc pas, comme les données, spécifiques du site de l'étude. Le fait que les modèles utilisés proviennent de rétro-analyses d'événements apparus dans des contextes géologiques et miniers similaires confère cependant une qualité certaine aux approches mises en place. Dans cette étude, l'hypothèse a été faite (par choix d'expert) que tous les paramètres de modèles pouvaient être caractérisés sous forme de distribution normale avec un coefficient de variation de 10%.

Enfin, les valeurs des *données* caractérisant le site d'étude peuvent être touchées par de nombreuses indéterminations :

- le phénomène d'écaillage, ainsi que les conséquences d'un abattage mécanique, ont rendu les dimensions (largeur et hauteur) des piliers aléatoires sur l'ensemble de la mine. Les mesures réalisées sur le site ont permis de caractériser cette variabilité spatiale sous forme de loi normale avec un coefficient de variation d'environ 7% ;
- la profondeur d'exploitation est déterminée par interprétation des plans topographiques. On constate une augmentation générale de la profondeur depuis le secteur A (environ 30 mètres) vers le secteur C (environ 45 mètres). Pour chaque secteur, la profondeur sera caractérisée par une distribution uniforme dont les valeurs maximales et minimales correspondent à cette topographie ;
- la densité volumique des terrains est estimée par expertise (le recouvrement étant d'origine sédimentaire) à une valeur moyenne de 25 kN.m^{-3} . Pour représenter la variabilité due à des raisons géologiques, une loi normale est choisie et un coefficient de variation de 7% est retenu pour exprimer la dispersion autour de la moyenne (Favre, 2004).

Le tableau 3.1 résume les différentes fonctions de distributions et les valeurs retenues pour caractériser les données et les paramètres de modèle. La figure 3.3 présente les notations retenues pour les paramètres géométriques.

Tableau 3.1. Caractérisation des données et paramètres de modèle retenus pour l'analyse

Paramètre	Distribution	Secteur A			Secteur B			Secteur C			
		μ	ε	COV	μ	ε	COV	μ	ε	COV	
Incertitudes de données											
Nombre de piliers		18			16			46			
Largeur actuelle du pilier (m)	w	normale	5,4	0,6	6%	8,5	1	6%	6,2	0,8	7%
Largeur de la maille * (m)	C		12	0		15	0		14	0	
Hauteur actuelle du pilier (m)	h	normale	3,2	0,5	7%	3,7	0,7	10%	3,9	0,6	8%
Profondeur d'exploitation (m)	D	uniforme	29	1,5	3%	36	4	6%	45	5	6%
Densité des terrains (kN.m^{-3})	γ	normale	25	3,4	7%	25	3,4	7%	25	3,4	7%
Incertitudes de modèle											
Salamon et Munro (1967)	k_1	normale	7,2			1,4			10%		
	α	normale	0,5			0,1			10%		
	β	normale	0,7			0,1			10%		
Bieniawski (1968), (MPa)	a_2	normale	2,8			0,6			10%		
	b_2	normale	1,5			0,3			10%		
van der Merwe (2003a), (MPa)	k_3	normale	3,5			0,7			10%		

* la « largeur de la maille » C est la somme de la largeur du pilier et de la largeur d'une galerie

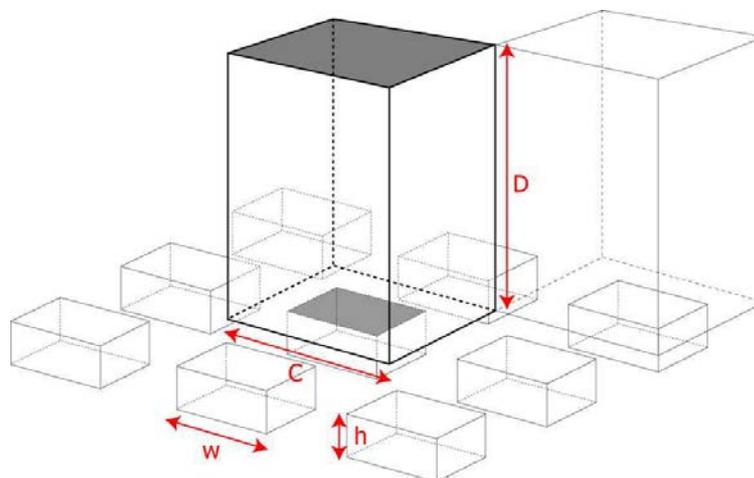


Figure 3.3. Notations utilisées pour les dimensions géométriques

Analyse spatiale de l'aléa

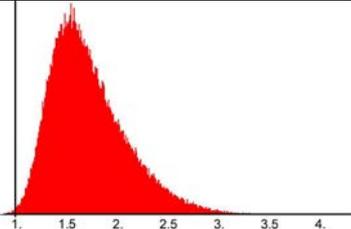
Stabilité d'un unique pilier

La stabilité de chacun des trois secteurs de l'exploitation est caractérisée dans un premier temps par l'estimation du facteur de sécurité d'un pilier « moyen », représentatif de la zone. La méthodologie utilisée dans cette partie est identique à celle présentée dans le chapitre précédent : les incertitudes liées aux données, aux modèles et à la difficulté de mener l'expertise sont intégrées de manière probabiliste par l'utilisation de simulations de Monte Carlo et la « *probabilité de performance défavorable* » p_f peut être estimée. Dans cette étude, seul le modèle de l'aire tributaire est utilisé pour estimer la sollicitation que reçoit le pilier alors que les trois formulations (équations 3.1, 3.2 et 3.3) permettant d'évaluer la résistance des piliers (qui ont été déterminées au travers de l'utilisation du modèle de l'aire tributaire) seront tour à tour comparées.

Le *Secteur A*, premier secteur exploité de la zone, est le moins profond des trois. Le taux de défrètement y avoisine les 80%. Le tableau 3.2 présente les résultats obtenus dans le Secteur A par l'utilisation, individuelle puis collective, des trois formules d'estimation de la résistance des piliers.

Tableau 3.2. Caractérisation du facteur de sécurité des piliers du Secteur A

Formule de résistance	Facteur de sécurité		p_f
	μ	σ	
Salamon et Munro, 1967	2,02	0,39	0
Bieniawski, 1968	1,48	0,21	0,004
van der Merwe, 2003a	1,64	0,30	0,005
Toutes	1,72	0,38	0,003



100000 simulations de Monte Carlo ont été effectuées pour obtenir ces résultats

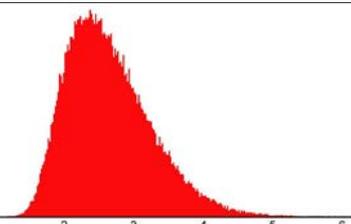
La lecture du tableau 3.2 permet de tirer plusieurs conclusions :

- l'*incertitude d'expertise* semble relativement faible puisque la distribution estimée apparaît mono-modale. Compte-tenu de l'état des connaissances sur le problème et des incertitudes présentes dans l'analyse, le choix de modèles différents n'induit pas de résultats divergents ;
- le modèle de Bieniawski (1968) est le plus sécuritaire (le facteur de sécurité moyen est le plus faible, donc le pilier sera jugé plus faible) devant celui de van der Merwe (2003a) puis celui de Salamon et Munro (1967) ;
- lorsque les incertitudes de données et de modèle sont prises en compte dans l'analyse, le facteur de sécurité moyen vaut 1,72 avec un écart-type de 0,38 et on constate qu'un nombre extrêmement faible de simulations a donné un facteur de sécurité inférieur à 1 (0,3%).

Les piliers du *Secteur B* ont des dimensions relativement importantes. Mais il faut noter que ceux-ci ont fait l'objet d'une extraction secondaire, après qu'ils aient été originellement dimensionnés pour faire office de piliers barrières. Dans ce secteur, le taux de défrètement vaut environ 70% pour une profondeur de l'ordre de 36 mètres. Le facteur de sécurité des piliers peut être évalué à 2,63 avec un écart-type de 0,61 expliqué par les indéterminations liées aux valeurs des données, aux modèles et au choix de ceux-ci. Parmi l'ensemble des simulations réalisées, aucune n'a permis d'obtenir un facteur de sécurité inférieur à 1.

Tableau 3.3. Caractérisation du facteur de sécurité des piliers du Secteur B

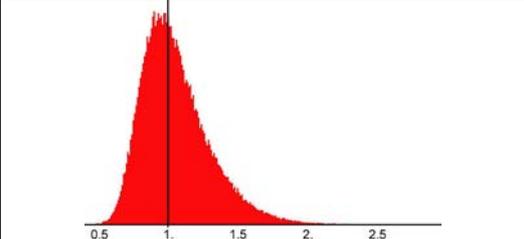
Formule de résistance	Facteur de sécurité		p_f
	μ	σ	
Salamon et Munro, 1967	2,85	0,63	0
Bieniawski, 1968	2,19	0,35	0
van der Merwe, 2003a	2,83	0,57	0
Toutes	2,63	0,61	0



Enfin, le *Secteur C*, le plus profond et dans lequel l'exploitation s'est terminée en décembre 2006, est caractérisé par un taux de défrèvement de 80%. Les simulations réalisées ont permis d'y estimer un facteur de sécurité de moyenne 1,05 et d'écart-type 0,25. 48% de ces simulations ont abouti à l'estimation d'une valeur de SF inférieure à 1.

Tableau 3.4. Caractérisation du facteur de sécurité des piliers du Secteur C

Formule de résistance	Facteur de sécurité		p_f
	μ	σ	
Salamon et Munro, 1967	1,22	0,27	0,206
Bieniawski, 1968	0,93	0,15	0,704
van der Merwe, 2003a	1,00	0,21	0,538
Toutes	1,05	0,25	0,482



Les résultats présentés ici ne sont néanmoins pas suffisants à ce stade pour déterminer les sources d'incertitudes prépondérantes dans l'étude, ni pour fournir une estimation du nombre de piliers de la zone pouvant être dans un état instable.

Etude précisée dans le Secteur C

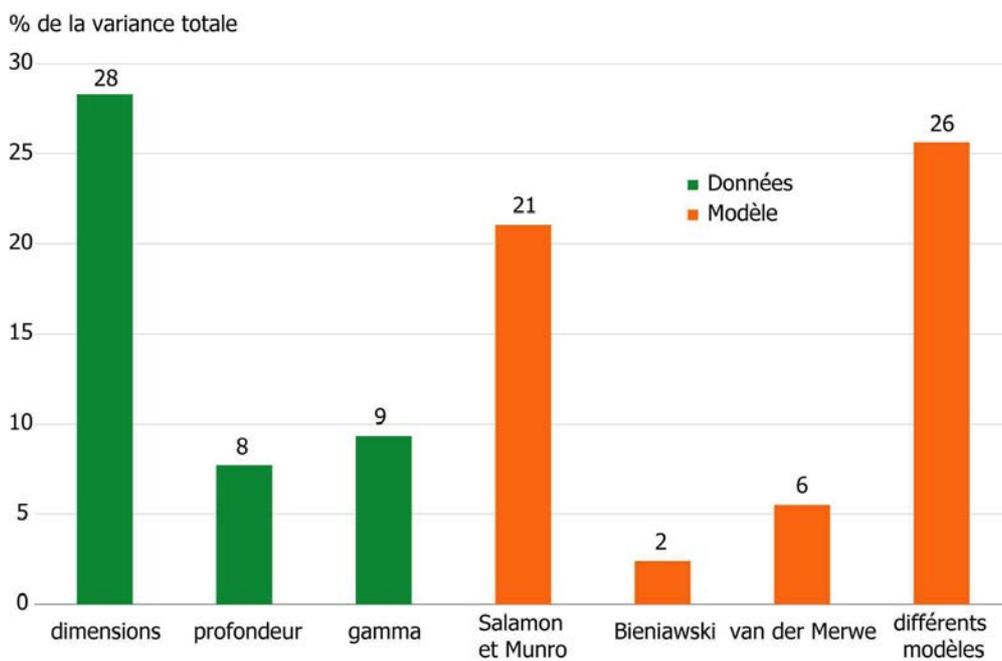
Les résultats d'évaluation du facteur de sécurité et de la « *probabilité de performance défavorable* » semblent indiquer que le Secteur C est le plus critique de l'ensemble de la zone. Il apparaît alors important d'y préciser les résultats obtenus de manière à, d'une part, analyser les différentes contributions des sources d'indéterminations intervenant dans l'analyse et, d'autre part, donner une interprétation pratique et opérationnelle de ces résultats.

Le tableau 3.5 propose les résultats de l'analyse qui a pu être menée selon la méthodologie présentée dans le chapitre précédent. La variance « intergroupe » est dans cette étude relativement faible (26% de la variance totale) par rapport à la variance « intragroupe », indiquant que les modèles permettant d'évaluer la résistance des piliers sont relativement cohérents entre eux. De plus, il apparaît que les incertitudes de données expliquent 45% de la variance finale du facteur de sécurité, contre 55% pour les modèles. La source principale d'incertitude dans le problème concerne les dimensions des piliers (28% de la variance totale).

Il a été constaté dans le chapitre précédent que la dispersion sur les valeurs des dimensions des piliers s'expliquait à la fois par une variabilité spatiale (résultant ici en grande partie du phénomène d'écaillage particulièrement problématique) et par une mauvaise connaissance sur les valeurs des données. Dans cette étude, la valeur de la variance caractérisant cette dispersion a été évaluée d'après 46 mesures sur site : elle fait ainsi uniquement référence à une variabilité spatiale. Pour appuyer cette remarque, la répartition aléatoire des dimensions des piliers est illustrée sur la figure 3.4 sur laquelle ont été reportées les largeurs des 46 piliers de la Zone C le long du profil de mesures. On constate bien que les différentes valeurs se répartissent aléatoirement de part et d'autre de la moyenne.

Tableau 3.5. Influence relative des différentes sources d'incertitude sur le facteur de sécurité d'un pilier du Secteur C

Nature de l'incertitude		Caractérisation des paramètres		Facteur de sécurité	
Incertitudes de données		Distribution	cov	σ^2	%
Dimensions (m)	w, h	Uniforme	7-8%	0,017	28
Profondeur (m)	D	Uniforme	6%	0,005	8
Densité (kN.m ⁻³)	γ	Normale	7%	0,006	9
Incertitudes de modèle		Distribution	cov	σ^2	%
Paramètres de modèle					
Salamon et Munro, 1967	k_1, α, β	Normale	10%	0,013	21
Bieniawski, 1968	a_2, b_2	Normale	10%	0,001	2
Van der Merwe, 2003a	k_3	Normale	10%	0,003	6
Difficulté des modèles à représenter la réalité				0,016	26
Tout				0,061	



σ^2 : variance, cov : coefficient de variation (σ/μ)

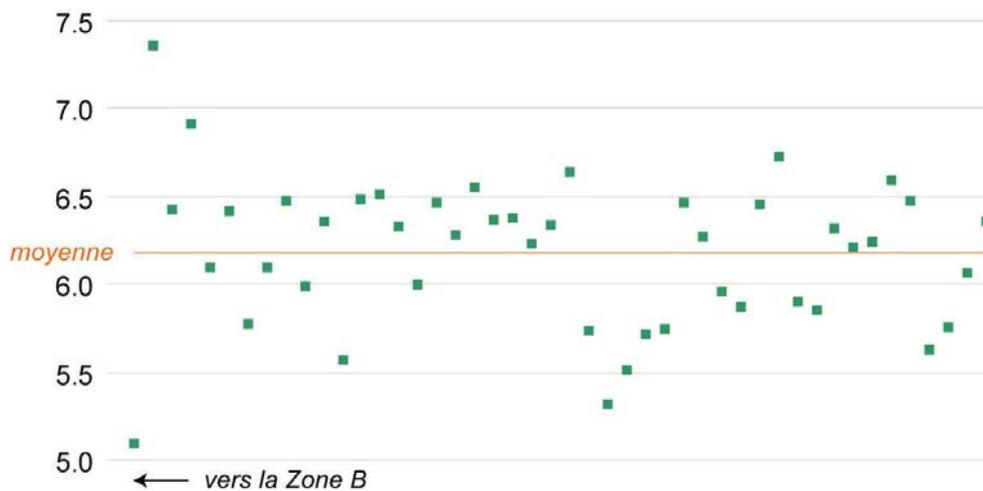


Figure 3.4. Largeurs des piliers de la Zone C évaluées le long du profil de mesure (chaque point vert correspond à un pilier)

Le fait que la variabilité spatiale ait été évaluée sur site est particulier à la zone d'étude. Une telle caractérisation est en effet relativement peu fréquente dans la majeure partie des analyses qui sont réalisées, généralement pour des raisons financières (les mines sont généralement abandonnées et aucun personnel n'est disponible sur place) ou d'inaccessibilité des travaux (mines ennoyées, présence d'un air vicié suite à l'arrêt de la ventilation, éboulements au fond, etc.).

Les commentaires concernant la figure 2.16 peuvent être examinés à la lumière de cette caractéristique. La variance σ_V^2 expliquée par la variabilité spatiale est dans le cadre de cette étude, comprise entre 0,017 (variance due uniquement aux dimensions des piliers) et 0,028 (variance due à l'ensemble des données, d'après le tableau 3.5). On peut en effet supposer que les valeurs de la profondeur de l'exploitation et de la densité des terrains du recouvrement sont également affectées par une variabilité spatiale sur l'ensemble de la Zone C, mais uniquement cette fois de manière partielle, et non de manière totale comme pour les dimensions des piliers.

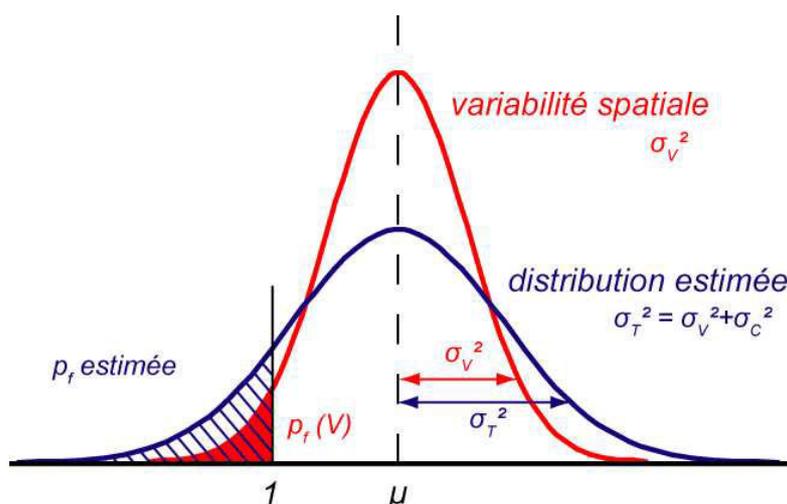


Figure 2.16. Part de la mauvaise connaissance σ_C^2 et part de la variabilité spatiale σ_V^2

En supposant une distribution normale du facteur de sécurité des piliers (avec une moyenne de 1,05), la « probabilité spatiale de rupture » $p_f(V)$ sera estimée entre 35 et 38%. En supposant une distribution lognormale du facteur de sécurité, hypothèse peut-être plus en accord avec la distribution présentée dans le tableau 3.4, on peut évaluer que $p_f(V)$ est comprise entre 43 et 45%. Compte-tenu de ces différents résultats, *la Zone C semble dans un état très critique, puisque environ 4 piliers sur 10, n'importe où dans la zone, ont un facteur de sécurité inférieur à 1 et sont dans un état instable.*

Mode de rupture des piliers

Le nombre de piliers pouvant être affectés par une rupture est donc élevé sur l'ensemble de la zone et, théoriquement, cette rupture peut survenir sous deux formes distinctes : elle peut être « graduelle » et contrôlée, ou elle peut être « soudaine » et violente. La différence entre les deux modes de rupture dépend du comportement du pilier post-rupture et de celui du recouvrement (Salamon et Oravec, 1976) (figure 3.5).

Pour van der Merwe et Madden (2002), cette distinction est dépendante du module de post-rupture E_{pf} du pilier. Un module négatif signifiera qu'une fois la rupture initialisée, l'énergie présente dans le système {pilier, recouvrement} sera suffisante pour qu'un processus de rupture généralisée puisse être engendré sans aucun ajout de forces extérieures. Ce module peut être estimé à partir de l'élanement du pilier de la manière suivante (van der Merwe et Madden, 2002) :

$$E_{pf} = 0,562 \frac{W}{h} - 2,93 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

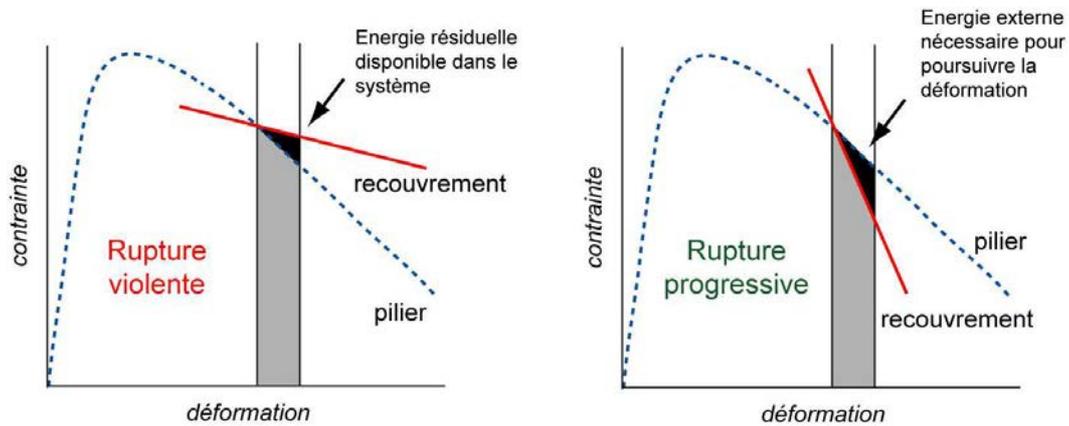


Figure 3.5. Deux modes pour la rupture d'un pilier minier (d'après Salamon et Oravec, 1976)

D'après l'équation 3.4, E_{pf} vaut $-2,05$ GPa dans le Secteur C, impliquant une rupture du pilier sous une forme « violente », qui peut induire un effondrement en cascade (ou « rupture en dominos ») des piliers de l'ensemble du secteur. Cette constatation implique alors d'étudier la possibilité de la propagation de la rupture aux secteurs environnants. Cette propagation est en effet permise par la continuité des bancs du recouvrement, constatée lors d'essais au fond durant la phase d'exploitation, autorisant un transfert des charges sur les piliers encore en place.

Stabilité de l'ensemble de la zone

Pour estimer l'ampleur du transfert de la charge libérée par un effondrement dans la Zone C sur l'ensemble des piliers de la zone, la prise en compte de l'interaction avec le recouvrement est nécessaire. Néanmoins, aucune formulation empirique n'existe pour traiter un tel problème et une modélisation numérique a dû être réalisée dans cette étude en utilisant le logiciel LAMODEL, un code aux éléments frontières pseudo-tridimensionnel (Heasley, 1998).

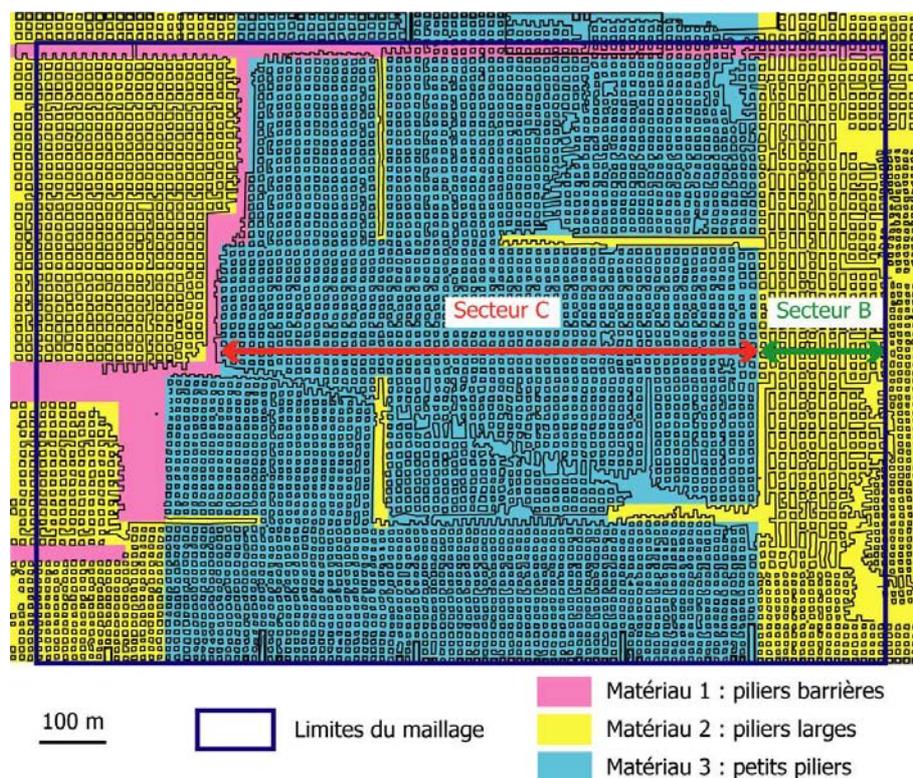


Figure 3.6. Limites de la zone modélisée et caractérisation des propriétés mécaniques des piliers

La zone d'étude est présentée sur la figure 3.6. Cette zone d'environ 1000 x 1000 m a été divisée en mailles de 2,5 x 2,5 m. Le tableau 3.6 présente les lois de comportement et les propriétés mécaniques caractérisant les matériaux des différents types de piliers. Les résistances au pic ont été estimées en utilisant la formule 3.3. Les déformations au pic l'ont été en appliquant à ces dernières un module de Young de 4 GPa, caractéristique du minerai de charbon de la région de Witbank. Enfin, la relation 3.4 a été utilisée pour caractériser le comportement post-rupture.

Tableau 3.6. Lois de comportement et propriétés mécaniques utilisées pour les différents piliers

	Matériau 1	Matériau 2	Matériau 3	Matériau 4
Type de pilier	Pilier barrière	Pilier moyen	Petit pilier	Petit pilier – rupture amorcée
Secteur concerné		Secteur B	Secteur C	Secteur C
Loi de comportement	Linéaire élastique	Amortissement de contrainte	Amortissement de contrainte	Amortissement de contrainte
Module de Young (E)	4 GPa	-	-	-
Module de Poisson	0,25	0,3	0,3	0,3
Résistance au pic σ_E	-	7,85 MPa	5,6 MPa	4 MPa
Déformation au pic ϵ_E	-	0,002	0,0014	0,001
Résistance ultime σ_U	-	0,1 MPa	0,1 MPa	0,1 MPa
Déformation ultime ϵ_U		4,71	2,77	2,77

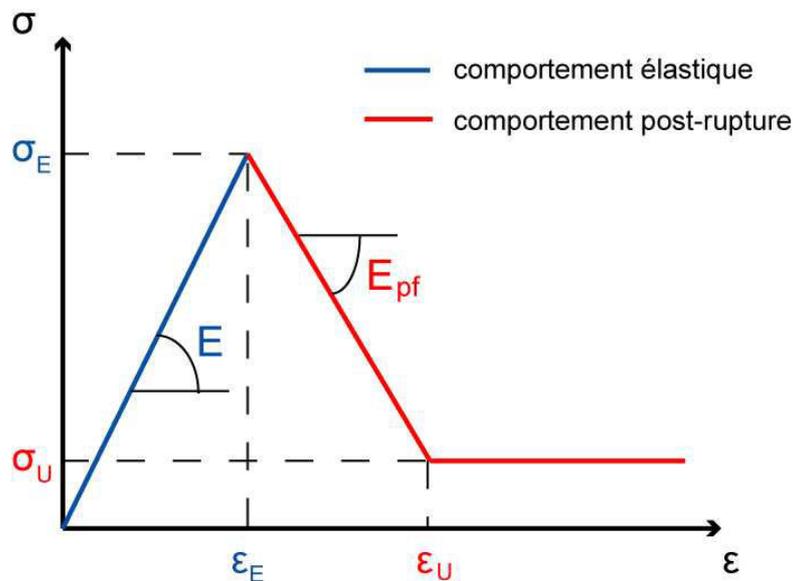


Figure 3.7. Loi de comportement de type « amortissement de contrainte »

Une première étude a été réalisée pour modéliser l'état actuel de la zone d'étude et servir de calibrage. La figure 3.8 présente les résultats obtenus : la contrainte verticale qui sollicite les piliers du Secteur C est estimée à 5,5 MPa. Leur résistance étant estimée à 5,6 MPa par la formule de van der Merwe (2003a) (valeur moyenne des résistances estimées), le facteur de sécurité de ces piliers a ainsi une valeur d'environ 1. Dans le Secteur B, les piliers sont sollicités par une contrainte de 3,5 MPa, ce qui conduit à une estimation de leur facteur de sécurité à environ 2,3, valeur légèrement inférieure à celle estimée dans le paragraphe précédent. Ceci s'explique du fait de la topographie et de l'épaisseur du recouvrement qui a été supposée homogène sur l'ensemble de la zone.

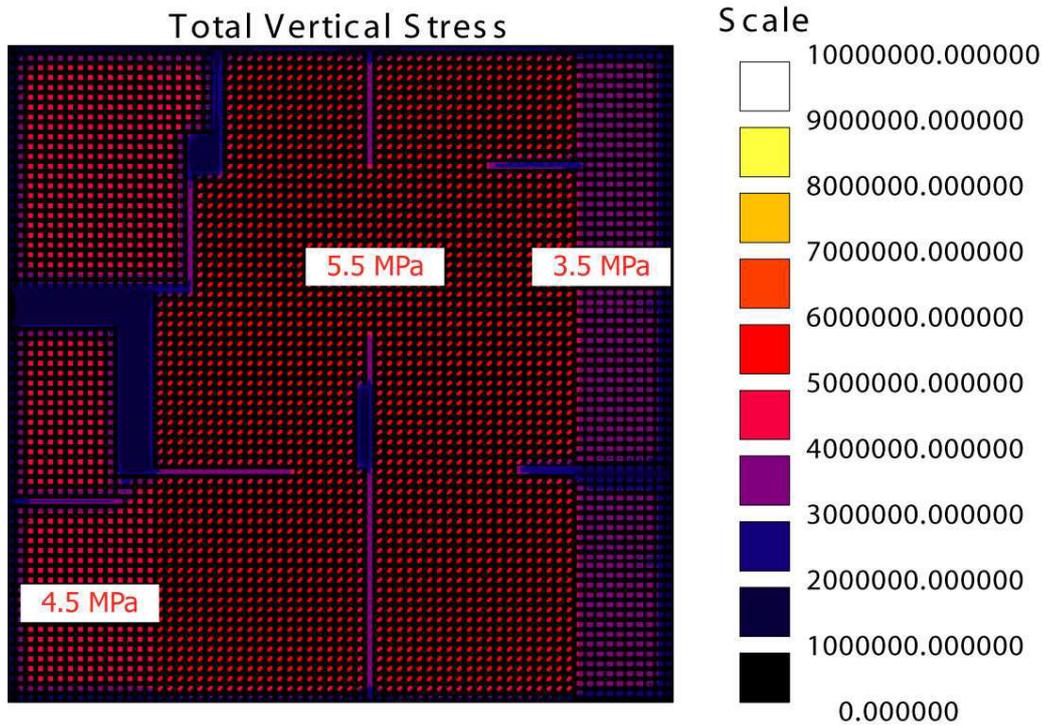


Figure 3.8. Contrainte verticale qui s'exerce sur les piliers (en Pa)

Une seconde simulation a été réalisée en « affaiblissant » volontairement les piliers de la zone centrale correspondant aux piliers du Secteur C. Plutôt qu'un matériau de type 3, le comportement des petits piliers a cette fois été caractérisé par les propriétés d'un matériau de type 4 (tableau 3.6) : la résistance au pic a ainsi été réduite à 4 MPa pour refléter un état post-rupture. La figure 3.9 présente les résultats obtenus : les piliers des zones environnantes, notamment le Secteur B, voient leur facteur de sécurité diminuer de 2,3 à une valeur proche de 1. *Cette modélisation illustre le fait qu'une rupture initialisée dans le Secteur C peut s'entendre dans les zones environnantes.*

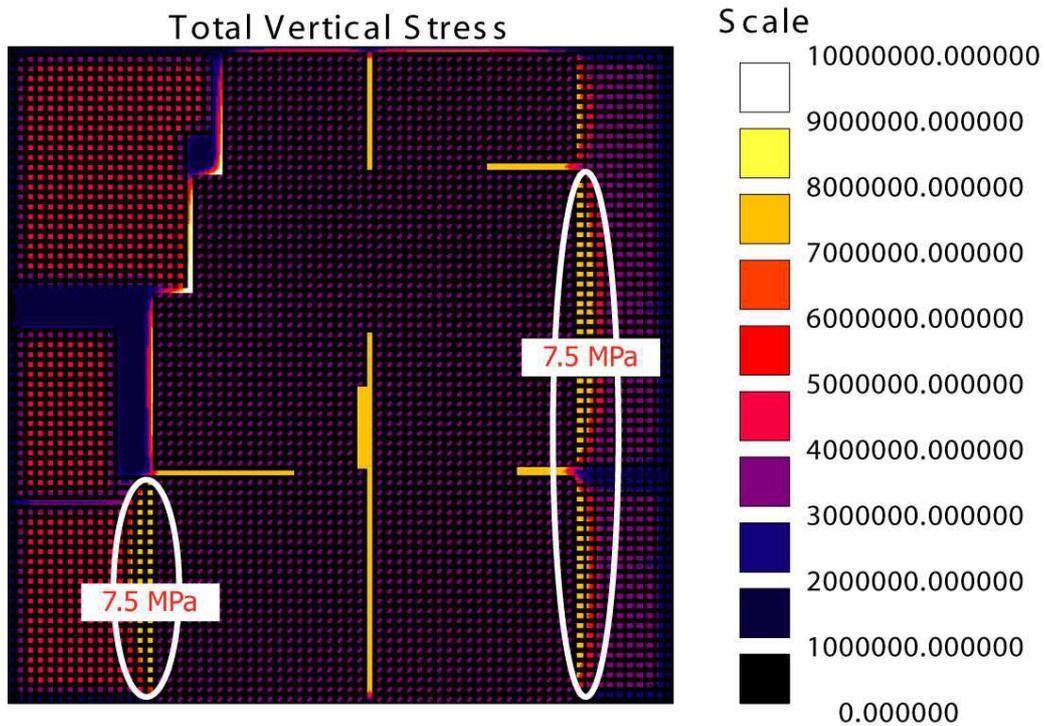


Figure 3.9. Contrainte verticale qui s'exerce sur les piliers (en Pa) après affaiblissement des piliers du Secteur C

Analyse temporelle de l'aléa

D'un problème qui semblait ne concerner que le Secteur C, il a pu être montré que l'ensemble de la zone d'étude pouvait être touché par des ruptures de piliers. Le problème est d'autant plus important que la rupture des piliers pourrait être violente et engendrer un effondrement en masse. Pour des raisons de sécurité pour les ouvriers travaillant sur site, ou à plus long terme pour les infrastructures qui pourraient se développer en surface, il apparaît important d'intégrer à cette analyse une dimension temporelle, en essayant d'estimer la date possible de l'effondrement. Pour cela, deux stratégies différentes vont être utilisées et vont se compléter mutuellement.

Utilisation du modèle empirique de Van der Merwe (2003b)

Van der Merwe (2003b) décrit le processus d'écaillage comme principale cause des ruptures de piliers dans les mines de charbon sud-africaines. Il propose de modéliser ce processus par une diminution constante dans le temps des dimensions des piliers, qui se traduit dans la pratique par une diminution de la résistance du pilier (selon l'équation 3.3) et une augmentation de la contrainte qui s'exerce sur le pilier (cf. modèle de l'aire tributaire). La rupture survient alors lorsque les dimensions du pilier sont telles que le facteur de sécurité devient inférieur à 1. L'étude statistique d'une base de données de cas d'effondrements permet de mettre au point une relation entre le « taux d'écaillage » R , l'âge du pilier L et sa hauteur h :

$$R = m \times \left(\frac{h}{L} \right)^x, \quad (\text{Eq. 3.5})$$

avec m et x deux constantes qui, dans le cas d'une exploitation de la veine n°2 du bassin de Witbank, valent respectivement 0,1624 et 0,8135. La relation est qualifiée, sur l'ensemble de la base de données, par un coefficient de corrélation de 80% (Van der Merwe, 2003b).

La relation 3.5 peut être utilisée dans cette étude de manière à comparer le « taux d'écaillage » estimé au taux d'écaillage réel, déterminé comme différence entre la largeur des piliers telle qu'apparaissant sur le plan et la largeur mesurée sur le site (tableau 3.7).

Tableau 3.7. Comparaison entre « écaillage mesuré » et « écaillage réel »

	Hauteur de pilier h (m)	Age L (années)	R estimé (Eq. 3.5) (m/an)	Largeur d'écaillage estimée d (m)	Largeur d'écaillage mesurée (m)	erreur
Secteur A	3,1	25	0,030	0,74	0,71	5%
Secteur B	3,3	44	0,020	0,87	0,80	8%
Secteur C	3,5	31	0,027	0,85	0,80	6%

Les erreurs d'estimation de la largeur d'écaillage sont relativement faibles, comprises entre 5 et 8%, ce qui témoigne de l'importance du processus d'écaillage dans la zone étudiée. On notera en outre que les largeurs estimées sont supérieures aux largeurs réelles, différence qui s'explique en partie par le fait que l'exploitation est restée active durant ces dernières années, avec un aérage souterrain important induisant généralement un taux d'écaillage moindre que dans des zones abandonnées (van der Merwe, 2004b). Le modèle d'écaillage semblant valide sur la zone d'étude, il peut alors être utilisé à des fins de prédiction de la durée de vie (L) des piliers (van der Merwe, 2003b) en utilisant la formule :

$$L = \left(\frac{d_c}{m \times h^x} \right)^{\frac{1}{1-x}} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Dans cette formule, h est la hauteur du pilier et d_c représente la « largeur critique » d'écaillage. Ainsi, si l'écaillage conduit à une diminution de la largeur initiale du pilier de d_c , celui-ci passera d'un état stable à un état instable et le facteur de sécurité du pilier deviendra inférieur à 1.

L'application de la formule (3.6) pour la zone d'étude permet d'estimer une durée de vie des piliers d'environ 150 ans dans le Secteur A, 280 ans dans le Secteur B et 70 ans dans le Secteur C. On retrouve le fait que le Secteur C est le plus problématique de la zone.

L'utilisation dans la pratique de ce modèle pose néanmoins plusieurs problèmes :

- ses *limites* sont clairement *affichées* par la valeur de 80% du coefficient de corrélation estimée pour caractériser la qualité du modèle ;
- sa mise en place et son utilisation semblent très *empiriques*, au sens où elles sont basées sur des régressions linéaires simples et sur très peu de données ;
- l'estimation de la durée de vie d'un pilier minier est un concept relativement *nouveau*, du moins peu courant dans le milieu de la mécanique des roches.

Ces limites pratiques induisent des problèmes de communication avec les ingénieurs miniers et une difficulté à transmettre les résultats des études : ces derniers semblent trop approximatifs et déconnectés de la réalité de terrain pour être valables. Le message a de plus beaucoup de mal à passer auprès des gens peu habitués à l'utilisation de modèles statistiques. Pour tenter de passer outre ces problèmes, un modèle supplémentaire a alors été développé, basé cette fois sur une analyse statistique de plusieurs cas d'effondrements survenus en Afrique du Sud. Une telle analyse semble moins empirique et plus ancrée sur des faits concrets (certains effondrements ayant particulièrement marqué les esprits des ingénieurs) que la méthode proposée par van der Merwe (2003b).

Réalisation d'une analyse statistique de plusieurs cas d'effondrements

Une base de données, composée de 31 cas d'effondrements survenus depuis 1919 dans le bassin houiller de la région de Witbank, a pu être constituée à partir des travaux de Salamon et Munro (1967), Madden (1991) puis van der Merwe (2006a). Ces cas concernent des mines exploitées par chambres et piliers, situées entre 20 et 90 mètres de profondeur, avec un taux de défrètement variant entre 70 et 90%. La plus vieille exploitation date de 1912, la plus récente de 1985. On notera que la mine concernée par cette étude possède des caractéristiques, en terme d'âge et de conditions d'exploitation, cohérentes avec les individus de la base de données. La figure 3.10 présente l'histogramme des effondrements en fonction de l'âge des exploitations : certains sont apparus peu de temps après les travaux d'extraction, d'autres beaucoup plus tard. L'âge maximal apparaissant dans la zone est 52 ans.

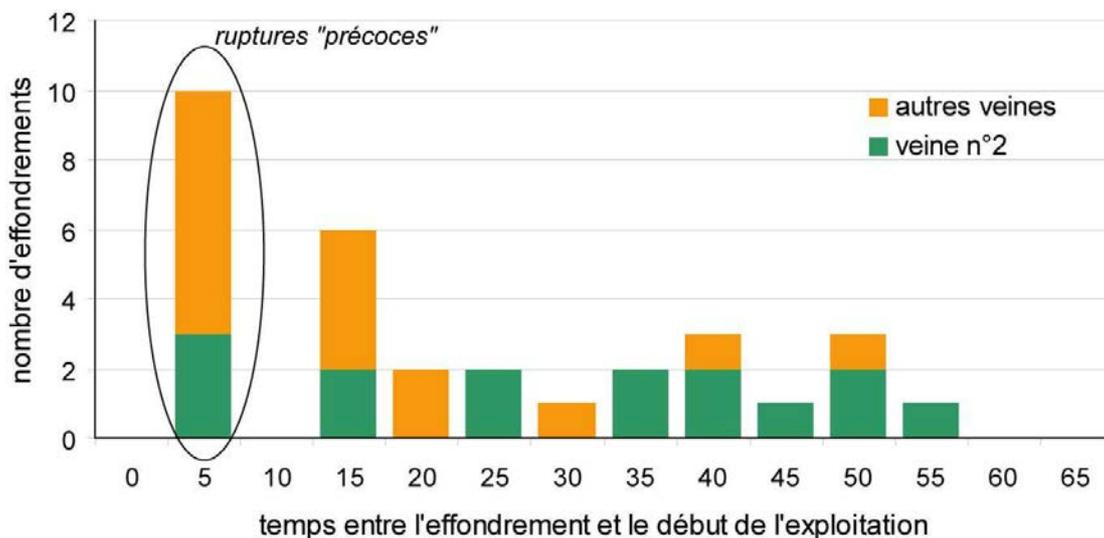


Figure 3.10. Répartition des âges des 31 effondrements de la base de données

De nombreuses ruptures « précoces » sont survenues dès le début de l'exploitation, de la même manière que ce qui avait été présenté par Carter et Miller (1996) ou précédemment dans le cas des fontis. Pour les effondrements qui semblent avoir été induits par un vieillissement des travaux, décrire une évolution de comportement général semble difficile au vu du peu de données disponibles. En vert sur l'histogramme sont par exemple représentés les cas d'effondrements étant apparus lorsque la veine n°2 du log de Witbank avait été exploitée. Mener une analyse identique à celle réalisée pour les fontis avec ces 12 cas semble difficile, notamment en ce qui concerne une extrapolation pour des temps supérieurs à 50 ans. On peut malgré tout dégager de manière qualitative certaines tendances :

- les effondrements apparus lorsque la veine n°2 du log de Witbank est exploitée semblent survenir plus tard que ceux apparus lorsque les autres veines de charbon étaient minées ;
- ces effondrements peuvent survenir n'importe quand après la fin des travaux : aucun âge « moyen » ne semble pouvoir être identifié ;
- ils peuvent survenir jusqu'à des délais au moins égaux à 52 ans.

Ces remarques nous font dire que la Zone C, qui date de 1975 et qui a donc 30 ans, peut tout à fait être concernée par un effondrement. Ces résultats confirment en partie les résultats de l'étude précédente au sens où ils insistent sur le fait qu'une rupture des piliers est possible. Ils ne permettent pas malgré tout d'estimer une date moyenne à laquelle pourra survenir l'effondrement.

1.4 Utilisation concrète des résultats avancés

Principaux résultats obtenus par cette étude

D'un point de vue technique, les résultats de l'étude sont les suivants :

- il apparaît que les Secteurs A et B sont stables au temps de l'étude. La confrontation de plusieurs modèles et la variabilité des données ne permettent pas de mettre en avant des ruptures potentielles ;
- le Secteur C apparaît quant à lui problématique. Quelque soit le modèle utilisé pour estimer la résistance du pilier, une situation d'instabilité des piliers est révélée (les modèles s'accordent même sur ces différents points).
- une grande partie de la dispersion du facteur de sécurité d'un pilier du Secteur C peut s'expliquer par la variabilité spatiale des dimensions des piliers. La rupture d'un pilier peut alors apparaître n'importe où sur la zone ;
- une rupture dans le Secteur C se ferait de manière violente et provoquerait un effondrement en masse ;
- une rupture dans le Secteur C pourrait s'étendre dans l'ensemble de l'exploitation et entraîner l'effondrement dans d'autres zones, comme présenté sur la figure 3.11 ;
- la rupture est possible dans des délais proches : une première étude montre que la durée de vie des piliers du Secteur C est de l'ordre de 70 ans, une seconde indique que la rupture est possible dans des délais allant jusqu'au moins 50 ans après l'exploitation.

Recommandations pratiques

Suite à ces résultats, plusieurs actions pratiques peuvent être envisagées pour prévenir et limiter les conséquences possibles d'une rupture de pilier dans le Secteur C :

- la reprise des travaux dans le Secteur C ne doit pas être effectuée, la stabilité de ce secteur étant déjà à l'heure actuelle très problématique ;
- la reprise des travaux dans les autres secteurs ne doit pas être entreprise du fait de la possibilité d'un effondrement en masse du Secteur C qui pourrait s'étendre dans l'ensemble de l'exploitation ;

- un réseau de surveillance, à base d'extensomètres déployés au fond ou de sondes microsismiques implantées dans le recouvrement (Bennani et al., 2004), peut être installé de manière à constituer un moyen d'alarme avant un effondrement de la surface. Il est malgré tout à noter que la surveillance reste dans ce cas très délicate du fait de la rapidité à laquelle peut se dérouler un effondrement de type « rupture en dominos ».

Face à ces recommandations nécessaires pour garantir la sécurité des ouvriers, et du fait de l'âge avancé de la mine et des faibles réserves en charbon encore en place, les exploitants ont retenu la solution de stopper les travaux et de renoncer à poursuivre toute exploitation ultérieure.

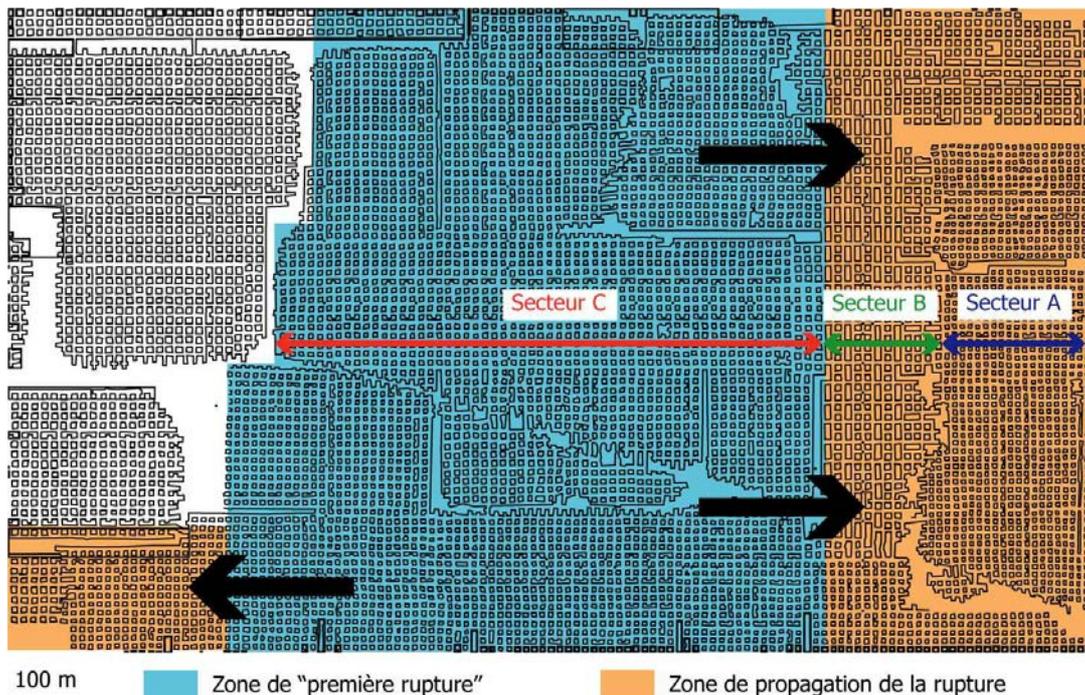


Figure 3.11. Propagation de la rupture depuis le secteur C vers les secteurs voisins

Apports concrets des méthodes de traitement des incertitudes et d'utilisation des probabilités

Les méthodes introduites dans le travail de thèse, concernant le traitement des incertitudes et l'utilisation des probabilités ont permis de *préciser*, *d'améliorer* et *d'appuyer* les résultats qui ont été avancés :

- la comparaison entre les résultats issus de différents modèles (aussi bien que ceux permettant d'estimer la résistance des piliers que les modèles temporels), indiquant que ceux-ci vont dans le même sens, a permis de *réduire l'incertitude d'expertise* et de conforter les conclusions de l'analyse ;
- l'estimation chiffrée de la composante spatiale de l'aléa ($p_f(V)$ comprise entre 43 et 45%) permet de se rendre compte de l'importance du problème et de l'ampleur de la zone pouvant être affectée par des ruptures de piliers ;
- l'intégration de la composante temporelle de l'aléa à l'étude, au travers de deux modèles qui permettent de tirer des conclusions semblables, ajoute un bénéfice à l'analyse et conduit à des conséquences pratiques fortes ;
- la mise à disposition de données chiffrées, ayant une signification pratique réelle (facteur de sécurité, proportion de piliers étant dans un état instable, etc.) permet de *faciliter la communication* entre les différents acteurs, et notamment entre les exploitants et les experts en charge de l'étude de l'aléa.

Les travaux menés dans un cadre théorique et mathématique lors de la thèse trouvent alors dans cet exemple des applications concrètes.

2 ANALYSE DE LA STABILITE DES TERRAINS AU DROIT DE LA CARRIERE DE GYPSE DE GROZON

2.1 Présentation du site

Localisation

La carrière de Grozon se situe dans le département du Jura (39) à quelques kilomètres au nord de la commune de Poligny (figure 3.12). La géomorphologie des terrains de surface de la région est constituée d'une série de buttes et de vallons assez peu marqués, d'une altitude moyenne de l'ordre de 380 mètres.

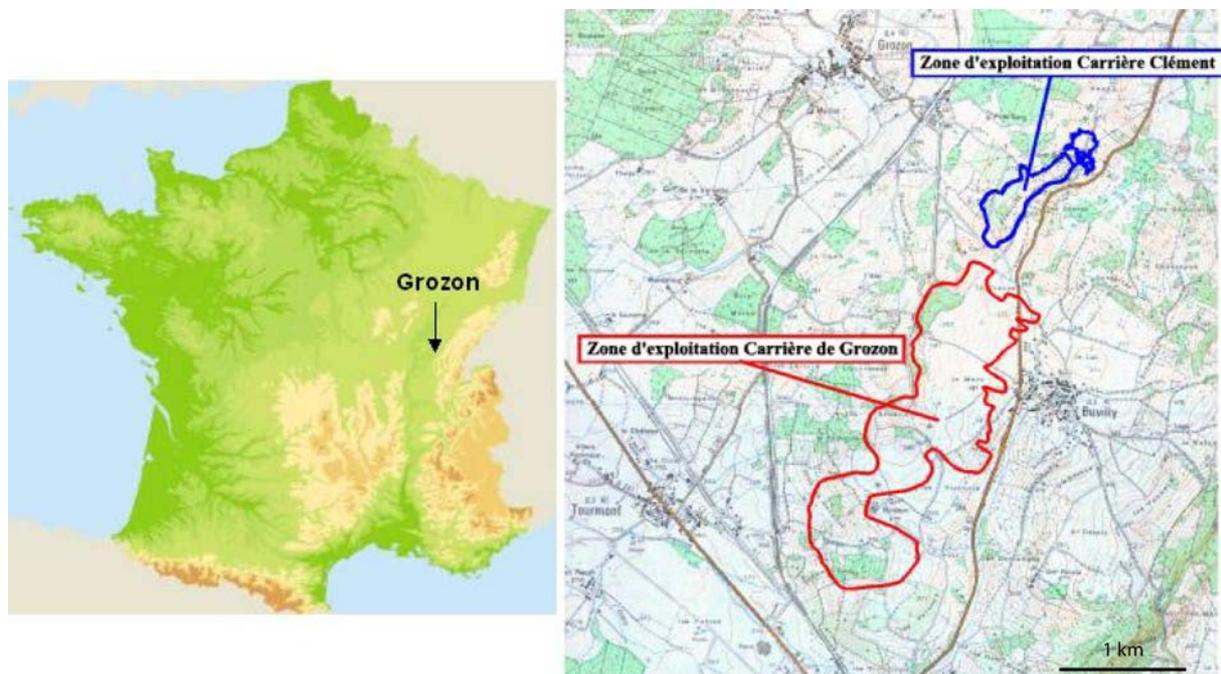


Figure 3.12. Localisation de la carrière de Grozon

La carrière, exploitée par la société Placoplatre (filiale de BPB Placo), a fermé ses portes en 2005 pour des raisons principalement économiques. Cette fermeture marque la fin d'une longue histoire. Après des débuts d'exploitation artisanaux, les premières installations industrielles se sont développées sur le site à partir de 1912. La carrière ne cessera alors de s'industrialiser et, dans les années 1990, plus de 80 personnes y travaillaient. A partir de cette date, le déclin a commencé et des postes ont été supprimés. En 1998, la société après avoir plusieurs fois changé de nom a pris celui de Placoplatre (La Voix du Jura, 2005).

La zone de carrière, qui représente environ 300 hectares, est formée de deux secteurs (figure 3.12):

- une Zone Nord qui englobe deux anciennes carrières (Cailler et Clément) totalement inaccessibles aujourd'hui et très mal connues (seuls quelques vieux plans, dépourvus d'échelle et datant des années 1940 ont été retrouvés). L'analyse de photographies aériennes et de quelques rares documents d'époque laisse penser que la majorité des travaux préparatoires ont été réalisés avant les années 1940 mais que l'extraction s'est poursuivie jusqu'au milieu des années 1950 ;
- une Zone Sud, dite « carrière de Grozon » sur laquelle cette étude se concentrera.

Contexte géologique et hydrogéologique

L'exploitation s'est tenue sous une butte, globalement orientée Nord-Sud, située au sein d'une zone plissée composée de formations datant du Trias et du Jurassique (-205 à -150 Ma environ). Le log stratigraphique du gisement et des bancs du recouvrement fait se succéder, de haut en bas, les formations suivantes (figure 3.13.a, Didier (1997a)) :

- au sommet, les calcaires et marnes du Jurassique inférieur ou Lias. Ces formations coiffent les collines de la région, leur épaisseur atteint dans les points hauts jusqu'à 25 mètres ;
- les marnes, calcaires lithographiques, et argiles marneuses du Rhétien, étage terminal du Trias (épaisseur environ 22 mètres) ;
- les marnes du Keuper (Trias, épaisseur de 14 mètres) qui surmontent le gisement de gypse anhydrite.

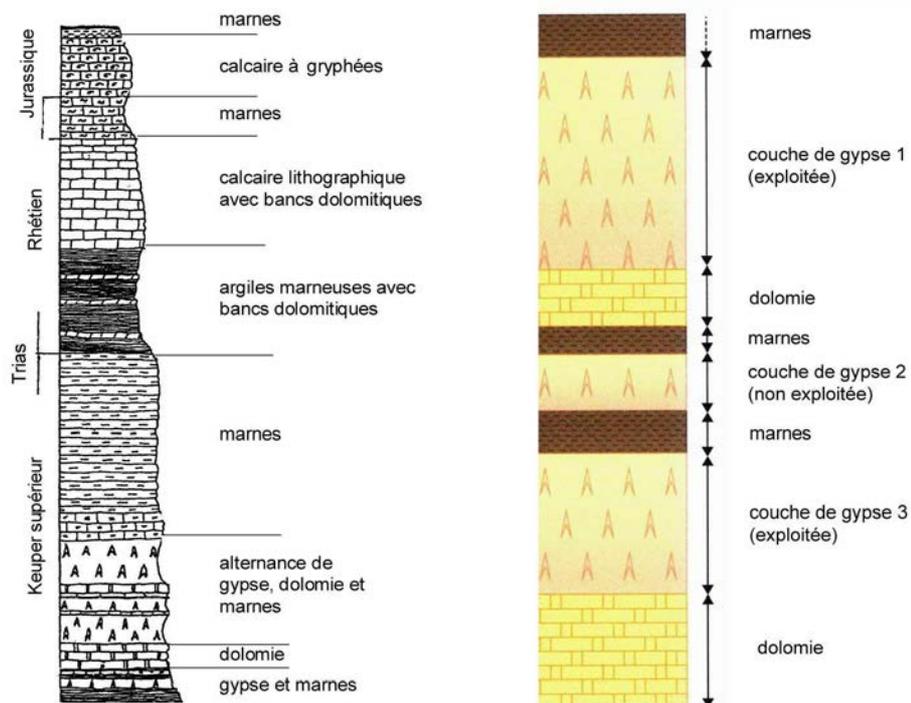


Figure 3.13. Coupe stratigraphique des terrains (a, Didier (1997a)), et Coupe stratigraphique des couches exploitées (b, Auvray (2003))

Le matériau extrait provient quant à lui d'un ensemble de trois couches de gypse, datant du Keuper Supérieur, et séparées par de minces alternances de dolomie et de marnes gypseuses. De façon plus précise, on trouve (figure 3.13.b, Auvray (2003)) :

- au toit, les marnes du Keuper ;
- le banc 1 de gypse massif et anhydrite de 2,5 à 3,8 mètres de puissance ;
- un intercalaire formé de dolomie et marnes (1,4 mètres d'épaisseur) ;
- le banc 2 de gypse massif et anhydrite de 1 mètre de puissance ;
- un intercalaire composé de marnes (0,6 mètre d'épaisseur) ;
- le banc « de gypse massif et anhydrite de 1,80 à 2,60 mètres d'épaisseur ;
- au mur, une dolomie massive de 2 mètres d'épaisseur ;
- un ensemble marnes, gypse et marnes sur 0,80 mètre ;
- du gypse et de l'anhydrite sur une épaisseur de 1 mètre.

En terme d'hydrogéologie, le gisement de gypse est séparé des nappes phréatiques, présentes au sein du calcaire à gryphées et du calcaire lithographique du Rhétien, par environ 20 mètres de terrains imperméables (figure 3.13.a). Les galeries de la carrière sont très sèches et aucune venue d'eau n'a été observée récemment au fond, excepté peut-être en très faible quantité à proximité des zones faillées et broyées.

Méthodes et historique d'exploitation

Sur les trois bancs de gypse (figure 3.13.b), seules les couches 1 et 3 ont été exploitées, généralement sur un seul niveau et parfois sur deux, la couche 2 ayant été laissée en place aussi bien pour des raisons économiques (c'est la moins épaisse) que de sécurité (ne pas l'exploiter permet d'augmenter l'épaisseur et la résistance de l'intercalaire entre les couches 1 et 3).

L'exploitation a débuté à la fin du XIX^{ème} siècle par le versant ouest de la butte et s'est poursuivie vers l'Est en s'enfonçant sous celle-ci. Les travaux en couche 1 se sont ensuite poursuivis vers l'Est et le Nord jusque dans les années 1960, puis se sont étendus vers le Sud en direction de Poligny. Le développement des travaux en couche 3 est moins régulier : il a commencé à l'Est de la zone centrale à partir des années 1940, et s'est étendu vers l'Ouest puis le Sud, par îlots discontinus.

Les carriers ont, depuis le début de l'exploitation, utilisé la méthode des « chambres et piliers abandonnés », laissant en place des piliers de gypse de manière à assurer la stabilité du site. L'abattage s'est fait à l'explosif. Le schéma de dimensionnement a largement évolué au fil des années : le traçage est devenu de moins en moins désordonné, les dimensions de piliers et des galeries de plus en plus régulières et les profondeurs de plus en plus importantes (tableau 3.8). La figure 3.14 présente l'historique de l'exploitation.

Tableau 3.8. Evolution du schéma de dimensionnement des travaux

Date	Banc(s) exploité(s)	Dimensions des piliers	Dimensions des galeries	τ	H (m)	Remarques
avant 1920	1	2m x 2m - 10m x 10m	2-3m - 10m	~ 75%	20-40	Dimensionnement très désordonné
1920-1958	1 et 3	5m x 5m	5-6m	75-78%	40-60	Piliers des couches 1 et 3 mal superposés
1958-1963	1 et 3	5m x 5m	5-6m	75-78%	40-60	Dimensionnement encore plus régulier, galeries parallèles entre elles
1963-1978	1 3	18m x 6m 19m x 7m	6m 5m	~ 63% ~ 54%	30-60	Nouveau dimensionnement suite à l'accident de Champagnole
depuis 1978	1 et 3	6m x 6m	6m	75%	40-60	* Respect de la bonne superposition des piliers * Depuis 1988, seule la couche 1 est exploitée

τ : taux de défruitement ; H : profondeur

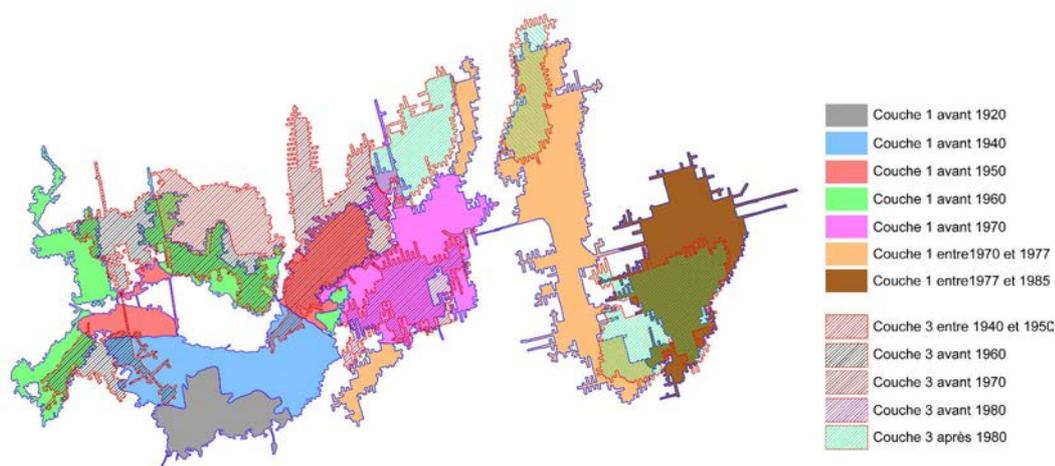


Figure 3.14. Historique d'exploitation de la carrière de Grozon

Phénomènes de rupture

De part la nature des matériaux rencontrés, la géomorphologie du site et le schéma d'exploitation, différents types d'instabilités ont pu être rencontrés :

- des chutes de toits et remontées de voûtes (phénomène de *fontis*), relativement fréquents au fond (figure 3.15.b) et au jour (figure 3.15c) et sur lesquels on reviendra par la suite ;
- des soufflages du mur, qui traduisent l'incursion relative des matériaux du mur vers l'intérieur des galeries (figure 3.15.d). Ce « soulèvement » est engendré soit par le gonflement des matériaux sous-jacents qui chassent le mur immédiat vers l'intérieur des galeries (généralement valable pour des matériaux sensibles à l'eau : marnes, etc.), soit par le poinçonnement des piliers qui transmet des contraintes trop importantes au regard de la résistance mécanique des formations du mur qui entrent en plasticité, soit encore par l'existence d'une contrainte horizontale élevée. Le mur est alors contraint à se déformer ;
- des ruptures de piliers, qui concernent majoritairement les petits piliers isolés, en présence d'hétérogénéités, ou les piliers dont la superposition est mauvaise, et qui peuvent se produire par écrasement (principe de l'aire tributaire) ou être dues à l'effet du temps (vieillessement, fluage, écaillage (figure 3.15.a), etc.). Ces ruptures de piliers peuvent provoquer des effondrements localisés, qui n'atteindront la surface que sous des conditions particulières (faible profondeur, recouvrement peu cohérent) et créer des cuvettes d'effondrement, ou être de plus grande ampleur et générer des affaissements de surface, comme ce fut notamment le cas suite aux éboulements au fond en 1963 et 1967.



Figure 3.15. Différents désordres rencontrés dans la carrière

Plusieurs phénomènes peuvent être aggravants vis-à-vis de ces mécanismes de rupture :

- la présence d'eau, provenant d'infiltrations des eaux superficielles ou de battements de la nappe, qui peut entraîner l'altération de la résistance mécanique des roches ;
- le fluage et l'influence du temps, qui peuvent causer un « affaiblissement » des propriétés mécaniques des roches.

Rappel des études d'analyse de risque

De manière à mieux appréhender et gérer le risque d'instabilité en surface, une analyse a été proposée par l'INERIS utilisant la méthode dite des « configurations types » (Didier et al., 1999). Cette technique s'appuie sur l'identification de configurations représentatives des différents secteurs d'exploitation, au sein desquelles une analyse spécifique est réalisée. Elle permet de minimiser le temps de l'étude, tout en proposant des résultats suffisamment précis pour que des décisions en terme de planification puissent être prises. L'échelle de travail choisie est en fait suffisamment précise pour s'adapter à des considérations opérationnelles concrètes.

Les six configurations types retenues pour la carrière de Grozon (tableau 3.9) se différencient en fonction de trois paramètres principaux :

- la nature et l'épaisseur du recouvrement, notamment la présence en son sein du banc de calcaire à gryphées proche de la surface ;
- le nombre et la nature des bancs exploités (extraction du banc de gypse 1, du banc de gypse 3 ou des deux successivement) ;
- les instabilités potentielles du mur (soufflage).

Tableau 3.9. Configurations types sur la carrière de Grozon

Recouvrement	Banc(s) exploité(s)	Instabilités du mur	Configuration
Zone à « flanc de coteau » ou en bordure de dalle calcaire de surface	1	-	1
	1 et 3 en niveaux superposés	-	2
Zone exploitée « sous une dalle calcaire » franche en surface	1	Sans	3
	1	Instabilités potentielles	4
	3	-	5
	1 et 3 en niveaux superposés	-	6

Le tableau 3.10 présente les types de désordres qui peuvent être engendrés dans chacune des configurations retenues. Les phénomènes sont souvent similaires au fond mais néanmoins leurs conséquences en surface peuvent être différentes. Ainsi, même si le phénomène de chutes de toit est important sur l'ensemble de la zone, les fontis peuvent, pour des configurations situées sous la dalle calcaire (3, 4, 5 et 6), s'auto-combler du fait de la profondeur relativement importante ou voir leur développement stoppé par la présence de la dalle calcaire, alors qu'ils peuvent très facilement

déboucher au jour dans les configurations 1 et 2. De plus, si certains désordres sont possibles en surface, leur probabilité d'apparition peut être très différente selon les configurations (elle dépend alors de plusieurs paramètres comme le sous-dimensionnement possible des ouvrages, la présence de failles, les venues d'eau, etc.).

Tableau 3.10. Mécanismes d'instabilité et désordres en surface pour chaque configuration

Configuration	Mécanismes d'instabilité			Désordre attendu ou observé en surface			
	Chute de toit, montée de voûte	Rupture de piliers	Soufflage du mur	Affaissement de faible amplitude	Fontis < 10m	Fontis > 10m	Effondrement spontané en masse
1	**	*		*	**	*	
2	**	**		*	**	*	*
3	**	**		*	*	*	
4	**	*	*	*	*	*	*
5	*			*	*		
6	**	*	*	*	*	**	*

Les fontis > 10m correspondent au fond à des ruptures localisées de petits piliers

* : possible, ** : le plus probable

Pour chacune des configurations, un niveau d'aléa a été estimé en fonction de l'intensité des désordres attendus et de leur probabilité d'occurrence en utilisant une règle de croisement empirique (Didier et al., 1999). La figure 3.16.a présente la carte d'aléa obtenue par cette méthode. Dans le cas de la carrière de Grozon, pour l'exercice, une analyse en utilisant une méthode multicritère a également été réalisée (Merad, 2003). La figure 3.16.b présente la carte d'aléa alors obtenue, les différences avec la méthode par configurations types sont minimes.

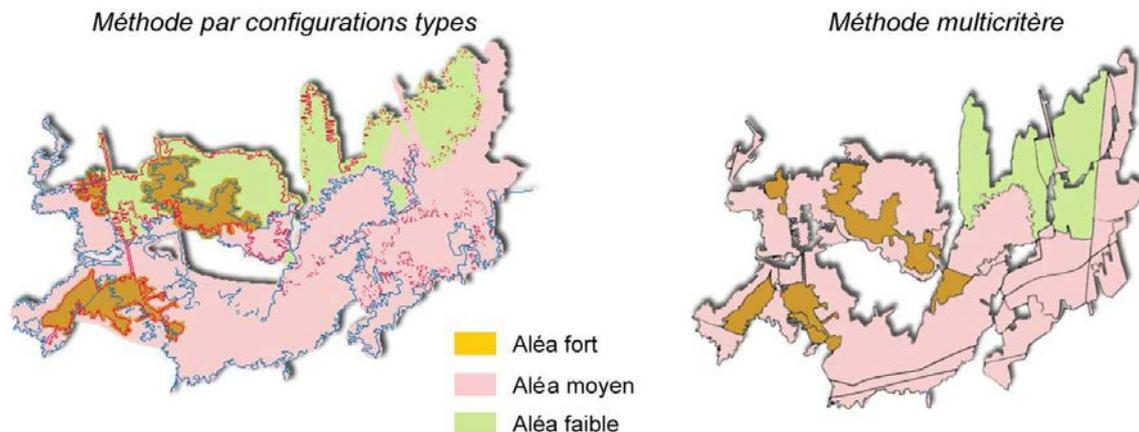


Figure 3.16. Carte d'aléa obtenue par la méthode par configurations types (a) et par une méthode multicritère (b)

Choix du site, objectifs et méthodologie de l'étude

Les objectifs que se fixe cette étude sont multiples. Ils consistent à répondre à plusieurs questions :

- peut-on *réellement* intégrer les résultats de la thèse, en terme de prise en compte des incertitudes et d'estimation des probabilités d'occurrence des événements, dans les outils d'analyse de risque qui sont utilisés aujourd'hui ?
- est-il possible d'exprimer *localement* et *sous une forme quantitative* la prédisposition, et ainsi identifier plus finement qu'à une échelle homogène les secteurs dans lequel le phénomène a le plus de chances d'apparaître ?
- peut-on, sur le site particulier retenu pour cette étude, exprimer réellement l' « aléa », c'est-à-dire intégrer la notion du temps dans l'étude ?

Le choix de la carrière de Grozon pour répondre à ces questions a été retenu pour plusieurs raisons :

- l'étendue spatiale du site est « assez limitée », ce qui rend possible une investigation sur le terrain, et dans un même temps, l'« ampleur » des désordres sur place est relativement importante ;
- de nombreuses connaissances sur la zone existent ;
- les relations avec l'exploitant sont privilégiées.

L'étude s'est focalisée sur les configurations 1 et 2, à flanc de coteau, et s'est intéressée au mécanisme de chutes de toit et de montées de voûte, induisant l'apparition en surface de cuvettes d'effondrements. La méthodologie qui a été utilisée pour l'analyse consiste en trois phases :

- une collecte des données ;
- la modélisation spatiale du phénomène de fontis et la mise au point d'une carte de susceptibilité « spatiale » quantitative ;
- la modélisation temporelle du phénomène de fontis et l'intégration du facteur temps à l'analyse de l'aléa.

2.2 Identification des ressources et caractérisation des incertitudes

Collecte des données et présentation de la zone d'étude

Le site de Grozon a été choisi pour réaliser cette étude du fait de la disponibilité de nombreux documents techniques :

- relatifs au matériau gypse : Dejean et Tritsch (1978), Helal (1982), Auvray (2003) ;
- relatifs à l'exploitation et aux mécanismes de rupture dans des carrières de gypse : plans d'exploitation, rapports sur le dimensionnement des travaux (Dejean (1978), Didier (1997a), Trebucq et Thoraval (2001)) ;
- relatifs à l'analyse des aléas : Didier (1997b), Didier et al. (1999), Merad (2003), Salmon (2004).

Les informations extraites de ces documents ont été complétées par :

- une analyse stéréographique de photographies aériennes permettant de déterminer le nombre de fontis ayant atteint la surface et d'évaluer le développement de la végétation ;
- des visites sur le terrain, au fond, pour mesurer ou préciser certains paramètres géométriques sur l'exploitation et sur les propriétés des terrains, et au jour, à l'aide d'un GPS pour lever différents points topographiques ou la position de fontis encore visibles.

Dans la zone sur laquelle s'est focalisée l'étude, d'une superficie d'environ 15 hectares, 34 cuvettes d'effondrement d'un diamètre de 3 à 5 mètres ont été répertoriées à partir des levés de terrain ou d'après l'interprétation des photographies aériennes (figure 3.17). La zone investiguée, délimitée en rouge, correspond à des secteurs situés à flanc de coteau ou en bordure de dalle calcaire de surface qui sont particulièrement concernés par le phénomène de fontis puisque l'exploitation y est peu profonde (10 à 50 mètres).

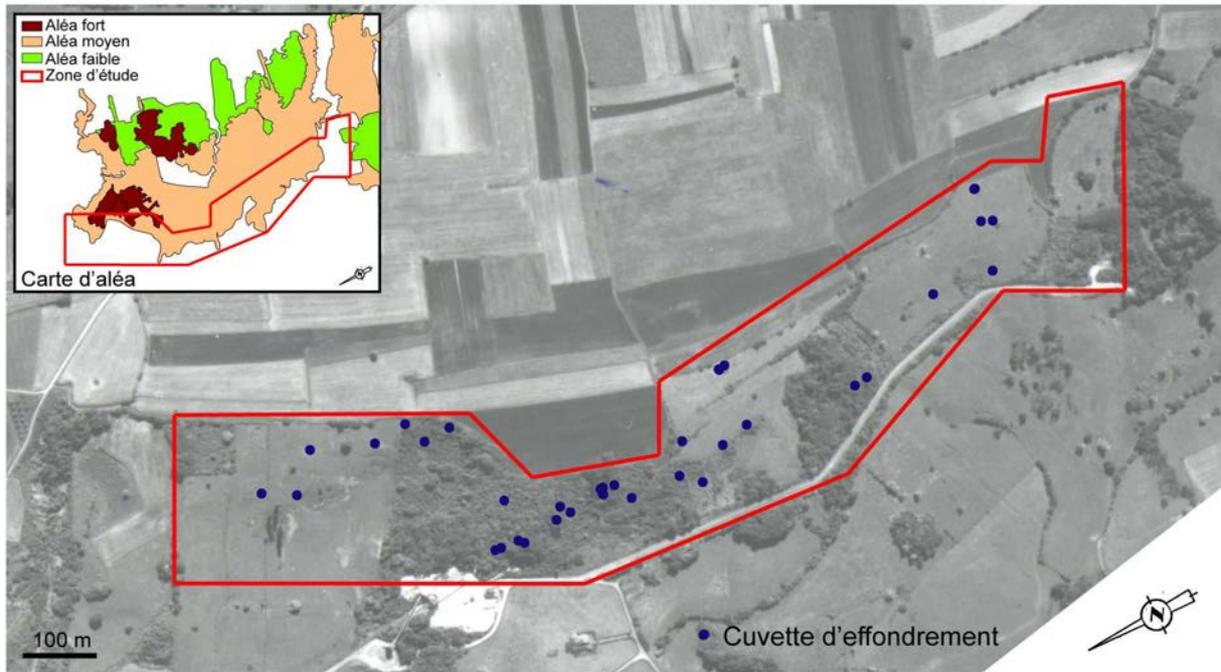


Figure 3.17. Délimitation de la zone d'étude et localisation des cuvettes d'effondrement

L'ensemble des informations disponibles (cartes, rapports techniques ou observations de terrain), ainsi que les connaissances vis-à-vis des mécanismes de rupture pouvant affecter la carrière, rendent les incertitudes de ressources relativement limitées dans cette étude. Le seul problème concerne en fait l'identification des cuvettes d'effondrement en surface, rendue difficile pour deux raisons :

- les travaux de comblement des cuvettes dans les zones de pâture (figure 3.18), ou le développement végétal du reste de la zone ;
- la mauvaise qualité des photographies aériennes, surtout pour les jeux les plus anciens.

Ces remarques peuvent conduire à l'oubli ou à la non-représentation de plusieurs cuvettes d'effondrement.



Figure 3.18. Comblement d'une cuvette de fontis entre avril et septembre 2006

Réalisation d'un modèle spatial

La zone d'étude a été découpée en mailles de 25 m x 25 m. Au total, 245 mailles sont ainsi concernées par la présence de travaux souterrains. Chacune d'entre elles a été caractérisée par

plusieurs informations relatives à l'exploitation, au recouvrement ou à la présence de cuvettes en surface (figure 3.19) :

- l'interprétation des plans du fond et de l'historique d'exploitation a permis de déterminer l'*âge de l'exploitation* (qui, en plus de renseigner sur la date des travaux, permet de caractériser la variabilité du schéma de dimensionnement des travaux), les *dimensions des piliers et galeries* et le *nombre de couches exploitées* ;
- les levés topographiques au GPS et la réalisation d'un krigeage de ces données a permis de reconstituer la topographie de surface, et de déduire la *profondeur des travaux*, par différence avec le niveau de la couche de gypse exploitée, supposée s'enfoncer horizontalement sous la butte ;
- l'interprétation de photographies aériennes et des levés de terrain a permis d'estimer le *nombre de cuvettes* d'effondrement ayant atteint la surface.



Figure 3.19. Maillage de la zone d'étude et caractérisation de chaque maille par des informations relatives au dimensionnement des travaux (géométrie et date d'exploitation) ou au recouvrement (profondeur des travaux)

Méthode et modèle

Pour analyser l'aléa lié au phénomène de fontis sur la zone étudiée, la démarche retenue comporte deux phases (l'hypothèse est faite ici que ces deux phases sont indépendantes) :

- la première consiste à étudier la potentialité qu'une *rupture du toit* de la carrière déclenche au fond le mécanisme de formation de la cloche de fontis ;
- la seconde s'intéresse à la capacité de la *remontée de voûte* à atteindre la surface sans que le fontis ne s'auto-comble de lui-même.

Ce choix méthodologique s'appuie sur la démarche classique, utilisée dans des études antérieures et présentée dans certains guides techniques (Tritsch et al., 2002). L'incertitude d'expertise est de ce point de vue relativement limitée dans cette analyse. Elle est plus importante lorsqu'il s'agit de choisir les modèles permettant de réaliser ces phases d'étude.

Initialisation au fond de la rupture du toit

L'étude de la stabilité du toit immédiat de l'exploitation est conduite selon un processus qui consiste à comparer la contrainte de sollicitation qui agit sur le banc de matériau formant le toit, à la contrainte admissible par celui-ci, exprimée par sa résistance (ici à la flexion). Des calculs classiques de résistance des matériaux dans lesquels le toit est assimilé à une poutre ou à une plaque, encadrée en ses bords et chargée par tout ou partie du recouvrement, peuvent être utilisés pour évaluer la sollicitation que reçoit le banc du toit.

Le modèle de « *poutre avec appuis encastrés* » est généralement utilisé dans le cas des toits bien stratifiés constitués de bancs assez épais. Même s'il s'adapte plus particulièrement à un contexte de galeries isolées, ce modèle peut être appliqué dans le cas des exploitations en chambres et piliers en considérant, non pas la largeur de la galerie comme longueur portante, mais la distance maximale séparant deux piliers. Le moment fléchissant maximal et l'effort de cisaillement maximal, qui s'exercent sur les bords de la poutre, peuvent être établis par les relations (3.7) et (3.8). La figure 3.20 présente les notations utilisées.

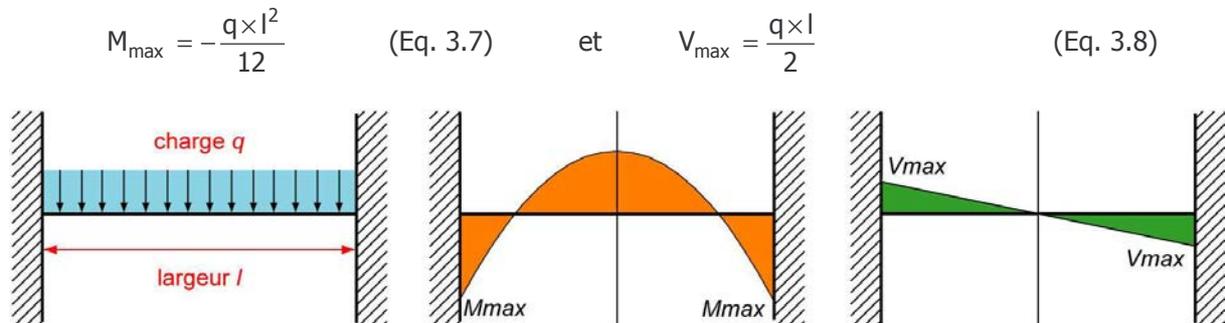


Figure 3.20. Moments de flexion et effort de cisaillement pour une poutre encastrée en ces extrémités

Le modèle de « *plaque reposant sur quatre piliers* » s'avère plus adapté aux exploitations menées en chambres et piliers, et en cela il reflète souvent mieux la réalité que l'approche bidimensionnelle proposée par le modèle de poutre. Ce modèle a été établi par Timoshenko (1961) et s'applique lorsque le premier banc est épais et résistant, peu fracturé verticalement, et que la largeur exploitée est assez grande. La dalle est ici considérée comme un carré de longueur a et les piliers de largeur u comme des appuis rigides appliquant des réactions constantes concentrées en leur centre, le toit étant chargé uniformément par la pression q (figure 3.21). Le moment fléchissant maximal et l'effort de cisaillement maximal peuvent être établis par les relations (3.9) et (3.10) où β et μ dépendent du rapport u/a :

$$M_{\max} = \beta q a^2 \quad (\text{Eq. 3.9}) \quad \text{et} \quad V_{\max} = \mu q a \quad (\text{Eq. 3.10})$$

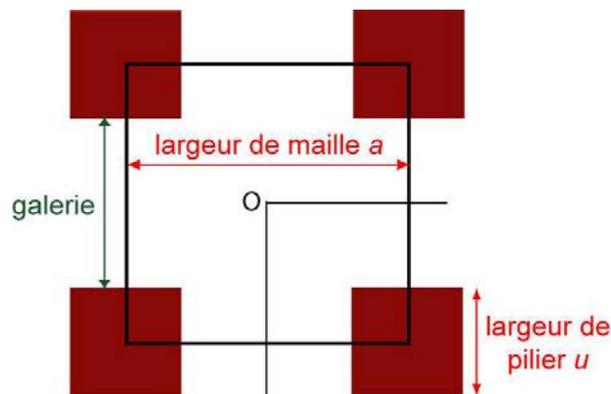


Figure 3.21. Notations et géométrie utilisée dans le modèle de la plaque reposant sur quatre piliers

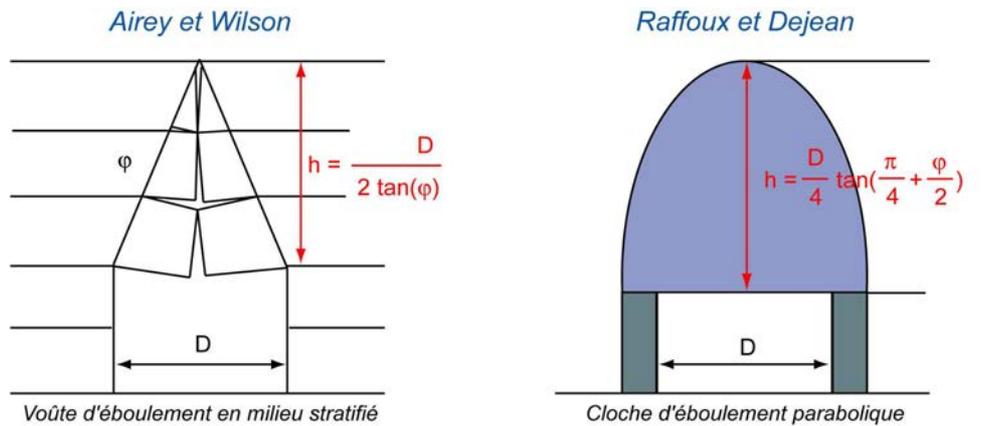
L'estimation des moments fléchissants et des efforts de cisaillement maximaux par ces deux modèles permet de déterminer les contraintes de flexion S_{\max} et de cisaillement T_{\max} maximales par les relations (3.11) et (3.12) où t correspond à l'épaisseur de la poutre ou de la plaque considérée :

$$S_{\max} = \frac{6M_{\max}}{t^2} \quad (\text{Eq. 3.11}) \quad \text{et} \quad T_{\max} = \frac{3V_{\max}}{2t} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Les valeurs S_{max} et T_{max} sont enfin comparées à la résistance à la flexion et à la résistance au cisaillement du matériau de manière à identifier le mode de rupture préférentiel, et à évaluer la stabilité du toit.

La valeur de la charge q qui s'exerce sur la poutre (ou la plaque) est généralement délicate à évaluer. Dans le cas de l'exploitation de Grozon, compte-tenu de la géologie du recouvrement et du comportement des matériaux, deux hypothèses peuvent être faites quant à la nature de cette surcharge qui s'applique sur le banc du toit immédiat :

- la surcharge est induite par le poids de bancs sus-jacents qui s'appuient sur le banc du toit ;
- la surcharge résulte d'une « voûte de détente » qui se forme dans les bancs de toit supérieurs. Les « dimensions » de cette voûte peuvent être estimées, dans le cas d'une étude en deux dimensions (modèle de poutre encastrée), par les modèles de Airey et Wilson ou de Raffoux et Dejean (cités par Piguët (1983)), et dans le cas d'une étude tri-dimensionnelle (modèle de dalle) par des modèles plus sophistiqués représentant la voûte sous une forme de paraboléoïde (figure 3.22).



Modèle 3D de la paraboléoïde, 3 hypothèses pour estimer le rayon de la cloche de chargement

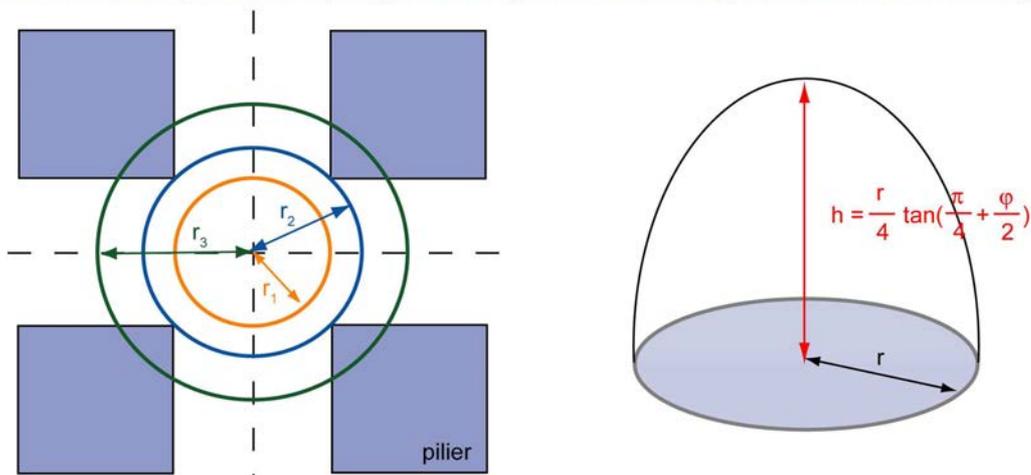


Figure 3.22. Hypothèses et modèles de surcharge

Le modèle tri-dimensionnel de voûte permet d'estimer respectivement la hauteur et le volume de celle-ci. Plusieurs hypothèses peuvent être faites pour estimer le rayon à la base de la cloche : on peut supposer que celui-ci varie entre la demi-largeur de la galerie (r_1) jusqu'à la largeur de celle-ci (r_3) (figure 3.22).

Remontée et auto-comblement de la cloche de fontis

Le mécanisme de remontée de voûte et la possibilité d'un auto-comblement de la cloche de fontis peuvent être analysés en utilisant l'approche volumétrique développée par l'INERIS. Celle-ci permet d'estimer la hauteur de remontée du fontis jusqu'à son auto-comblement en fonction des dimensions de l'exploitation et de facteurs liés aux différents matériaux, comme l'angle de talus des terrains ou leur coefficient de foisonnement (Didier et Salmon, 2004). La hauteur de remontée de fontis est ensuite comparée à la profondeur des travaux et la possibilité de débouché au jour de la cloche est ainsi estimée (figure 3.23).

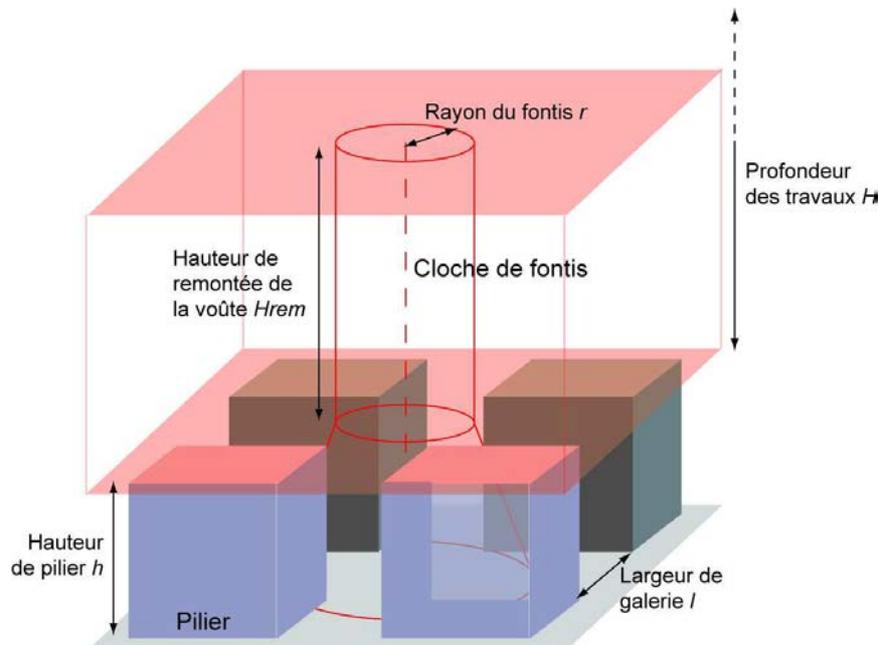


Figure 3.23. Calcul de la hauteur de remontée d'un fontis dans une exploitation menée en chambres et piliers

Incertitudes de modèle

Les modèles utilisés dans cette étude reposent sur des hypothèses parfois fortes (encastrement parfait du toit, etc.) ou sont de nature purement géométrique. En ce sens, ils ne permettent d'approcher que très simplement la réalité et une comparaison entre les différents résultats, ou un retour d'expérience lorsqu'il est possible, devront être effectués pour valider l'étude.

A côté de cette relative « simplicité » des modèles, les paramètres contrôlant ceux-ci peuvent jouer un rôle important et devront être regardés avec une grande attention.

Néanmoins, l'étude menée ici s'intéresse principalement à l'utilisation et à la transposition dans la pratique des résultats obtenus. Pour des raisons de communication, elle ne sera ainsi pas totalement complète du point de vue « *prise en compte des incertitudes de modèle* ». Rien n'empêcherait cependant de réaliser cette étude en suivant la démarche proposée dans le chapitre 2.3 à propos de la stabilité du pilier minier.

Caractérisation des données

L'incertitude de données va être exprimée sous une forme « statistique ». Ce paragraphe présente les valeurs moyennes retenues, ainsi que les hypothèses permettant de traduire la dispersion sur les données par une fonction de distribution et d'écart maximum par rapport à la moyenne.

Pour être le plus réaliste possible, les valeurs des données ont été mesurées autant que possible directement sur site. Les indéterminations sur ces valeurs ont, cependant, souvent été caractérisées par jugement d'expert et des lois de distributions uniformes ou triangulaires ont alors été choisies pour refléter les difficultés de l'expertise. Ces lois simples apparaissent suffisantes eu égard à la quantité et la nature des données disponibles (pas de relevé systématique des dimensions des piliers, peu d'essais mécaniques, etc.) et permettent réellement de traduire la connaissance de l'expert (une estimation des valeurs minimales, maximales, les plus vraisemblables se révèle relativement aisée). Une plus grande précision quant à la forme des lois aurait reposé sur des hypothèses plus fortes, peut-être invalides dans ce cas d'étude.

Données relatives à l'exploitation souterraine

Les *dimensions des travaux* ont été déterminées par analyse des plans d'exploitation et les valeurs obtenues ont été confirmées par des visites sur site. Pour chaque configuration d'exploitation, une largeur de maille a a été supposée constante et c'est donc uniquement la largeur / des galeries et leur hauteur h , considérées comme des variables aléatoires, qui permettent de refléter l'indétermination sur les dimensions des travaux (tableau 3.11).

Une loi de distribution uniforme a été choisie pour refléter la dispersion des valeurs prises par la largeur des galeries, dispersion qui s'explique à la fois par une variabilité spatiale du dimensionnement des travaux et par une mauvaise connaissance sur les valeurs exactes. Dans le cas d'une exploitation menée sur deux niveaux, les largeurs de maille et de galerie retenues correspondent à celles des travaux en couche supérieure (exploitation du banc de gypse 1).

Les hauteurs de galeries apparaissent, après plusieurs visites de terrain, relativement homogènes sur le site et leur dispersion est plus limitée que pour les largeurs de galeries. Une loi de distribution triangulaire a alors été retenue pour caractériser ces valeurs. Dans le cas des exploitations menées sur deux couches, une hauteur de travaux « cumulée » a été utilisée, correspondant à la somme des hauteurs d'exploitation de chaque niveau, diminuée d'une épaisseur de 1 mètre d'intercalaire.

Tableau 3.11. Caractérisation des dimensions des travaux en fonction de la configuration d'exploitation

Configuration et date d'exploitation	Largeur de maille (m)	Largeur de galerie (m)			Hauteur de galerie (m)		
		Loi uniforme			Loi triangulaire		
		min	moyenne	max	min	moyenne	max
Couche 1 avant 1920	11	2,5	5,5	8,5	2	2,5	3
Couche 1 avant 1960	11	4	5,5	7	2	2,5	3
Couche 1 avant 1970	11	4,5	5,5	6,5	2	2,5	3
Couche 1 avant 1977	15	5	6	7	2	2,5	3
Couche 3 avant 1960	11	4	5,5	7	2	2,5	3
Couche 3 avant 1980	14,5	4	5	6	2	2,5	3
Couches 1 et 3 avant 1940	11	4	5,5	7	3	4	5
Couches 1 et 3 avant 1960	11	4	5,5	7	3	4	5
Couches 1 et 3 avant 1970	11	4,5	5,5	6,5	3	4	5
Couches 1 et 3 avant 1977	15	5	6	7	3	4	5

Données concernant le recouvrement

La *profondeur H* des travaux a été déterminée par un krigeage réalisé à partir des données topographiques recueillies par un levé GPS. Par un calage entre le maillage et les lignes topographiques, chaque cellule a alors pu être caractérisée par des profondeurs minimale, moyenne et maximale (figure 3.24). Une loi de distribution uniforme a été retenue pour représenter la répartition des valeurs entre ces différentes bornes.

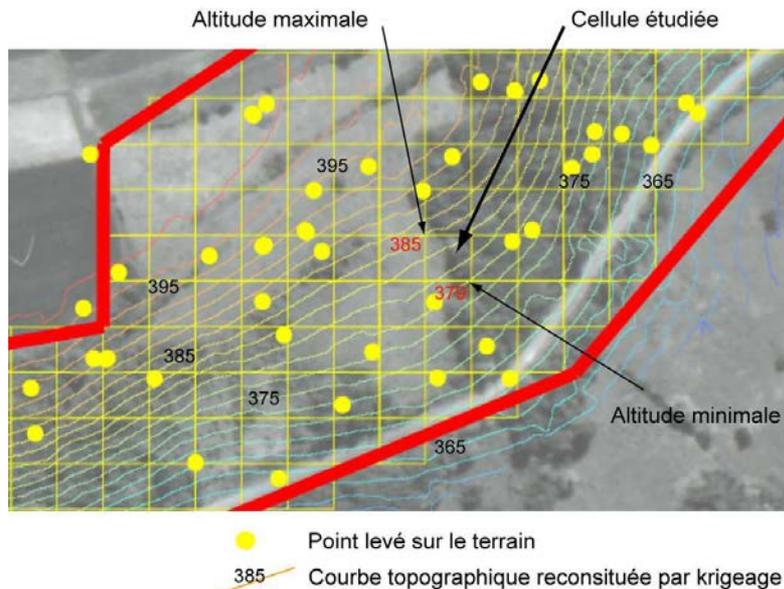


Figure 3.24. Détermination de la profondeur des travaux par interprétation des résultats du krigeage

La contrainte q qui s'exerce sur le banc du toit immédiat peut, comme il l'a été présenté précédemment, être induite par le poids des couches sus-jacentes qui s'appuient sur le banc. Dans ce cas, q vaudra $\gamma \times h_s$, où γ représente le poids volumique des terrains et h_s la *hauteur des couches entièrement pesantes*. L'inspection sur le terrain de fontis en développement a fait apparaître au-dessus du banc de gypse du toit, une couche relativement homogène et continue formée d'une alternance de bancs plus ou moins marneux d'une épaisseur d'une vingtaine de centimètres. Un décollement de cet ensemble de couches avec un banc sus-jacent a pu être observé à environ 2 mètres au-dessus du banc de gypse du toit (figure 3.25) : h_s est ainsi estimé à 2 mètres.

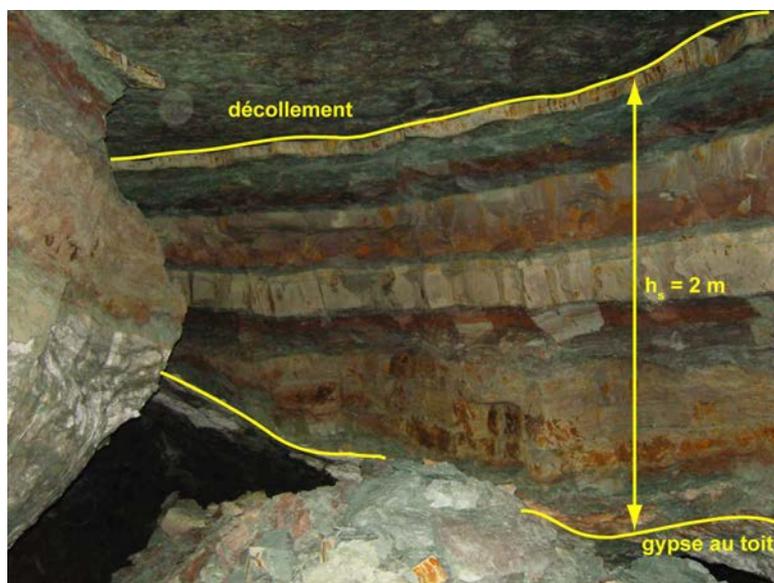


Figure 3.25. Hauteur h_s du banc entièrement pesant sur le toit immédiat

Les modèles utilisés pour estimer les moment fléchissant et effort de cisaillement du banc du toit immédiat considèrent une géométrie rectangulaire de la galerie, et donc une *épaisseur du banc de gypse au toit* constante. Cependant, il s'avère que les galeries de la carrière de Grozon ont une forme « voûtée » (figure 3.26) qui leur confère une stabilité accrue. De manière à pouvoir utiliser les modèles de poutre et de dalle, une géométrie rectangulaire, « équivalente » à cette structure d'arche, a été recherchée. Pour y parvenir, deux critères ont été retenus : (1) la largeur de galerie l , et (2) la valeur maximale de la contrainte en flexion, qui « contrôle » la rupture (si rupture il y a, c'est dans les zones de contrainte maximale qu'elle s'initialisera), doivent toutes deux être conservées.

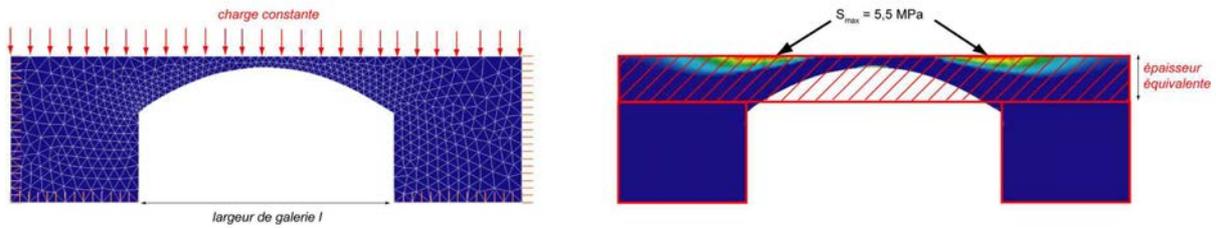


Figure 3.26. Etude de l'influence de la forme voûtée des galeries

Une étude en déformation plane utilisant le code en éléments finis CESAR-LCPC a été menée pour déterminer cette épaisseur « équivalente » : les valeurs de contraintes maximales ont été estimées par le logiciel pour une galerie en forme d'arche (dont la géométrie a été mesurée exactement sur le terrain), soumise à une contrainte équivalente au poids de 2 mètres de terrain marneux (figure 3.26), et la valeur de t a été déduite par l'utilisation de la formule (3.11) en conservant une largeur de galerie l fixe. Par cette méthode, l'épaisseur t du banc de gypse du toit est estimée à 1 mètre. On considérera également que, compte-tenu des indéterminations sur la géométrie des galeries et de l'utilisation d'un modèle bidimensionnel en déformations planes avec un comportement élastique des matériaux, la valeur estimée peut varier entre 0,6 et 1,2 (hauteur maximale possible de gypse laissé au toit) et suit une loi uniforme. Il est enfin à noter qu'au vu de la figure 3.26, un critère permettant également de corriger la largeur l de la galerie aurait pu être choisi puisque les zones de contrainte maximale ne sont plus exactement au droit du « coin » des piliers.

Données relatives aux propriétés des matériaux

Une distribution uniforme, variant entre 24 et 25 kN.m⁻³, a été retenue pour caractériser le *poids volumique des terrains* du recouvrement (gypse + marnes). Ces valeurs sont extraites des travaux de Auvray (2003) et sont caractéristiques de ces formations rocheuses.

Des essais en laboratoire ont permis de mesurer la *résistance à la compression du gypse* (Dejean et Tritsch (1978), Auvray (2003)). Mais de tels essais ne permettent que de caractériser le comportement instantané des matériaux. La résistance à long terme, qui nous intéresse bien plus lorsque l'on se positionne dans un contexte d'Après mine, peut quant à elle être estimée à partir de règles qui *corrigent* cette résistance instantanée. Helal (1983) propose par exemple pour le gypse de Grozon de retenir comme valeur à long terme, la limite inférieure de la distribution des résistances élastiques instantanées. Dans l'étude présente, les données de Auvray (2003) ont été étudiées à la lumière de cette méthode (une loi lognormale a été retenue pour la distribution de la résistance mécanique du gypse) et une valeur de R_c de 36 MPa a été obtenue pour le gypse du banc 1. De la même manière, la résistance R_t à la traction simple pour le gypse 1 a été estimée à 2,5 MPa.

Les essais en laboratoire sont généralement utilisés pour estimer uniquement les résistances à la compression R_c et à la traction simple R_t des matériaux. La *résistance à la flexion* R_f est quant à elle plus difficilement accessible, et des règles de correction existent pour la déterminer à partir des valeurs précédentes (équations 3.13 et 3.14) :

$$R_f = 2,4R_t \quad (\text{Eq. 3.13}) \quad \text{et} \quad R_f = \frac{R_c}{5} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Ainsi, utilisant ces règles, R_f pour le banc de gypse 1 qui constitue le toit de l'exploitation peut être estimée entre 6,1 et 7,3 MPa et on la caractérisera sous forme d'une distribution triangulaire de moyenne 6,7 MPa.

Les essais en laboratoire ont également permis de mesurer l'*angle de frottement* φ des terrains du recouvrement (Auvray, 2003). Une loi triangulaire a été choisie pour représenter ce paramètre, centrée sur la valeur de 45°, avec un écart maximal de $\pm 5^\circ$.

Pour étudier la potentialité d'un auto-comblement de la cloche de fontis, des données caractérisant le foisonnement des terrains sont nécessaires. On s'intéresse ici à l'*angle de talus* θ des terrains et à leur *coefficient de foisonnement* f , rapport entre le volume des terrains foisonnés et le volume initialement occupé par les matériaux en place (figure 3.27). Des mesures géométriques sur le terrain et par interprétation de photographies permettent d'évaluer une valeur de 35° pour θ et de 1,4 pour f . Une distribution triangulaire a été choisie pour le premier paramètre du fait de la relative bonne confiance en cette valeur moyenne (avec un écart maximal de $\pm 5^\circ$), alors qu'une distribution uniforme, variant entre 1,35 et 1,45 a été choisie pour caractériser f .

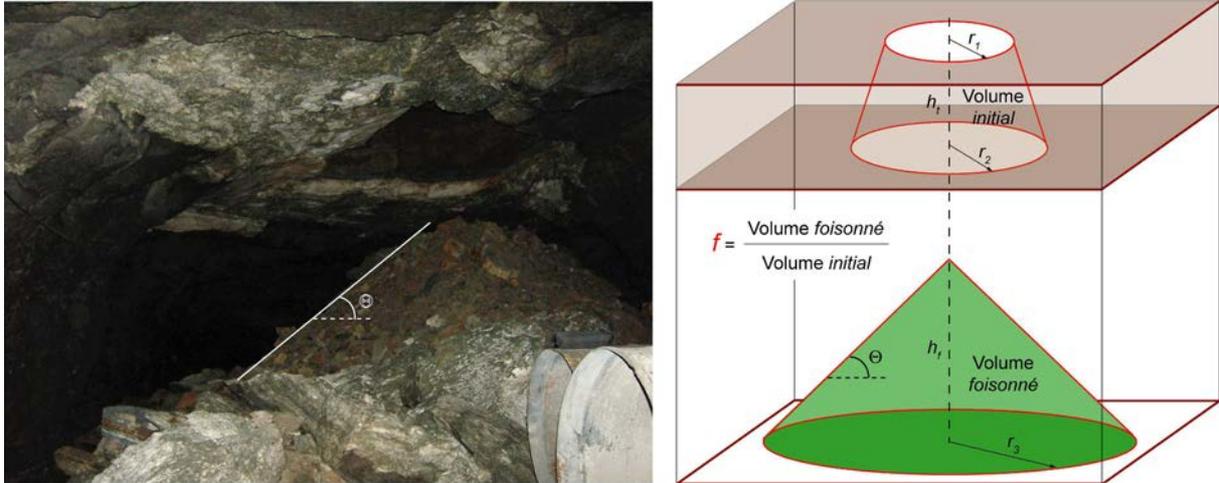


Figure 3.27. Détermination de l'angle de talus θ des terrains et de leur coefficient de foisonnement f

Ces mêmes études sur le terrain ont permis de vérifier le fait que la cloche de fontis remonte vers la surface de manière quasiment horizontale (hypothèse nécessaire au modèle) et d'estimer que le rayon au fond des fontis était d'environ 1,8 mètres. Cette valeur au fond concorde avec les valeurs mesurées pour les cuvettes d'effondrement en surface, dont le diamètre est d'environ 3-4 mètres.

Synthèse

Le tableau 3.12 propose une synthèse des valeurs retenues pour les différentes données nécessaires à l'étude.

Tableau 3.12. Synthèse sur la caractérisation des données de l'étude et de leur indétermination

Donnée		Unité	Caractérisation				Source	
			min	moyenne	max	loi		
Largeur de maille	a	m	Selon la configuration d'exploitation				constante	Interprétation des plans d'exploitation + visites au fond
Largeur de galerie	l	m					uniforme	
Hauteur de galerie	h	m					triangulaire	
Epaisseur du banc du toit	t	m	0,6	1	1,2	uniforme	Modélisation numérique	
Epaisseur des bancs sus-jacents	h_s	m	(-)	2	(-)	constante	Inspection de terrain	
Profondeur de l'exploitation	H	m	Selon la topographie			uniforme	Krigeage	
Poids volumique des terrains	γ	kN.m^{-3}	24	25	26	uniforme	Auvray (2003)	
Résistance à la flexion du gypse	R_f	MPa	6,3	6,7	7,1	triangulaire	Essais en laboratoire + application d'une règle de correction	
Résistance à la compression	R_c	MPa	(-)	36,5	(-)			
Angle de frottement des terrains	φ	°	40	45	50	triangulaire	Essais en laboratoire	
Coefficient de foisonnement	f	-	1,35	1,4	1,45	uniforme	Mesures sur le terrain + interprétation de photographies	
Angle de talus naturel	θ	°	30	35	40	triangulaire		
Rayon du fontis	r	m	(-)	1,8	(-)	constante		

2.3 Analyse spatiale de l'aléa

Une première analyse déterministe

La démarche la plus « classique » aujourd'hui pour évaluer l'aléa consiste à travailler de manière déterministe et à intégrer des marges de sécurité (en amont ou en aval de l'analyse) de manière à refléter l'incertitude existant sur les modèles et les données utilisées.

Le tableau 3.13 présente les résultats de l'analyse de la stabilité du banc de gypse au toit, considéré soit comme une dalle, soit comme une poutre encastée. Ces résultats intègrent les deux hypothèses de chargement du banc ainsi que les différents modèles permettant d'évaluer le volume de la voûte de surcharge. Les valeurs utilisées sont les valeurs moyennes présentées précédemment : l'épaisseur t du banc ou de la dalle est de 1 mètre, la largeur l de la galerie vaut 5,5 mètres et la largeur a de la maille est de 11 mètres.

Tableau 3.13. Evaluation déterministe de la stabilité du banc de gypse au toit

	Hyp. 1 : banc continu	Hypothèse 2 : voûte de surcharge				
		2D Airey et Wilson	2D Raffoux et Dejean	3D, Ø=l	3D, Ø=√2l	3D, Ø=2l
Evaluation de la hauteur portée						
Hauteur de voûte		3,89	4,69	3,32	4,69	6,64
Hauteur équivalente*	2	2,59	3,13	1,66	2,35	3,32
Utilisation du modèle de poutre encastrée						
S _{max} (MPa)	1,57	2,04	2,46	1,31	1,85	2,61
T _{max} (MPa)	0,30	0,39	0,47	0,25	0,36	0,50
SF en flexion	4,26	3,29	2,72	5,13	3,63	2,57
SF en cisaillement	26,17	20,34	16,85	31,78	22,47	15,89
Utilisation du modèle de plaque ($k=u/a=0,5$ // μ (cisaillement) = 0,419 // β (flexion) = 0,0487)						
S _{max} (MPa)	1,84	2,38	2,88	1,53	2,16	3,05
T _{max} (MPa)	0,36	0,47	0,56	0,30	0,42	0,60
SF en flexion	3,64	2,81	2,33	4,39	3,11	2,20
SF en cisaillement	22,25	17,17	14,22	26,81	18,96	13,41

* la hauteur équivalente correspond à un chargement uniforme et non sous forme de voûte

Plusieurs résultats ressortent de ce tableau :

- les hauteurs équivalentes estimées pour les voûtes de surcharge sont de l'ordre de 2,5 mètres quelque soit le modèle utilisé (2D ou 3D), c'est-à-dire proches de la valeur utilisée dans l'hypothèse d'un chargement par un banc continu. Ainsi, même si les deux hypothèses de chargement du banc du toit immédiat correspondent à des réalités physiques différentes, elles sont quasiment équivalentes en terme de stabilité de l'ouvrage ;
- les facteurs de sécurité en cisaillement sont 6 à 7 fois supérieurs à ceux en flexion, laissant à entendre que la rupture, si elle se produit, sera induite par le fléchissement des strates. Cette hypothèse est renforcée dans la réalité par la forme en voûte des galeries, laissant à penser qu'un cisaillement dans les « coins » des piliers est peu probable ;
- le facteur de sécurité en flexion minimal est de 2,2.

Des marges de sécurité doivent malgré tout être utilisées en amont ou en aval de l'analyse pour corriger ces résultats et intégrer les incertitudes existant sur les modèles et les données. Le poids de certaines indéterminations peut en effet être important. Ainsi par exemple, si le banc de gypse du toit a une épaisseur de 80 centimètres au lieu de 1 mètre, le facteur de sécurité calculé sera réduit à 1,4. Il diminuera également si les portées au toit sont plus grandes que les valeurs moyennes.

Ces résultats montrent alors que, même si les ruptures de toits apparaissent relativement « peu fréquentes », elles peuvent néanmoins se produire et ne doivent pas être négligées. Ces remarques trouvent un sens concret dans la réalité puisqu'on observe au fond un nombre relativement faible, mais non nul, de carrefours de galeries endommagés.

Concernant les remontées possibles de cloches de fontis, un calcul utilisant les valeurs moyennes des données indique que l'auto-comblement d'un fontis de 1,8 mètres de rayon survient pour des profondeurs d'exploitation supérieures à 27 mètres pour les exploitations en monocouche et à 52 mètres pour les multicouches. Si néanmoins, on considère non plus les valeurs moyennes du coefficient de foisonnement et de l'angle de talus, mais les valeurs les plus pessimistes (c'est-à-dire leur valeur minimale), la cloche de fontis peut remonter de 9 mètres supplémentaires et atteindre 36 mètres sans s'auto-combler. Cette hauteur augmentera également pour des carrefours de galeries plus larges que la moyenne et pour des hauteurs de galeries plus importantes. Une marge de sécurité doit ensuite être ajoutée *de manière verticale* à cette hauteur estimée pour refléter les incertitudes de données et de modèle. Ainsi, on pourra considérer que les fontis peuvent remonter jusqu'à une

hauteur de 40 mètres dans le recouvrement. Une marge *latérale* doit également être introduite, cette fois pour tenir compte du problème de calage entre les travaux au fond et la surface, ainsi que de la remontée des cloches de fontis qui peut ne pas être totalement verticale.

Compte-tenu de ces remarques, on pourra considérer de manière sécuritaire que *l'ensemble* de la zone peut potentiellement être affecté par des venues au jour de fontis. La figure 3.28 présente la carte d'aléa qui peut être réalisée sur le secteur d'étude (on retrouve les résultats de la figure 3.16). Un niveau d'aléa peut être choisi par expertise, en fonction de l'intensité et de la probabilité d'occurrence estimée du phénomène. Ici un niveau « moyen » a été retenu.

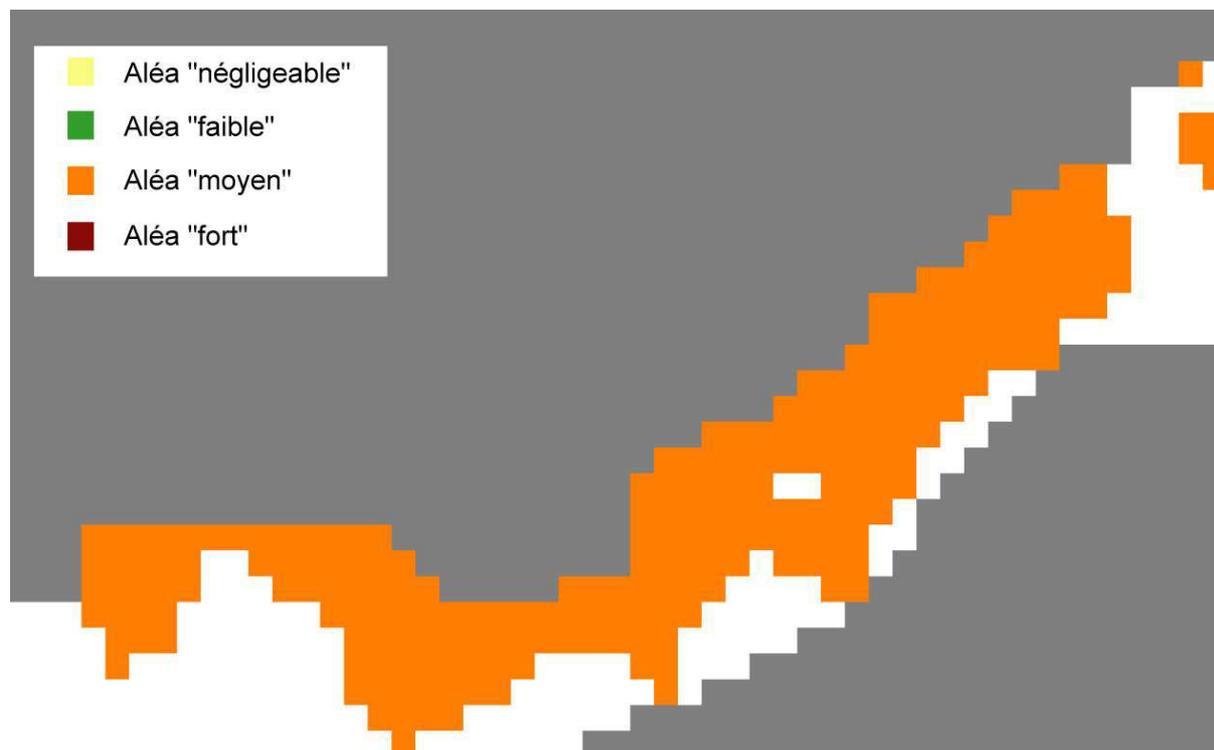


Figure 3.28. Carte d'aléa *déterministe*

La mise à disposition de cette carte peut néanmoins poser plusieurs problèmes dans la pratique :

- la vision de l'aléa n'est pas suffisamment spatialisée : on ne sait pas par exemple où le phénomène est le plus probable ;
- le niveau utilisé est, compte-tenu des différentes marges de sécurité utilisées, peut-être trop pessimiste dans certains secteurs.

Analyse probabiliste de l'aléa « fontis »

Les résultats du tableau 3.13 indiquent que les modèles utilisés donnent des conclusions assez proches les unes des autres, que ce soit pour l'estimation de la surcharge s'exerçant sur le banc du toit ou pour la contrainte en flexion qui sollicite celui-ci. L'incertitude d'expertise liée au choix du modèle semble de ce fait relativement faible et une approche quantifiée est par là même possible.

Tous ces modèles ont, de plus, des formulations assez simples et intègrent sensiblement les mêmes paramètres : l'incertitude de modèle semble alors être la même pour tous les modèles utilisés dans cette étude. Nous allons donc focaliser l'étude sur l'incertitude de données. Les méthodes présentées dans le chapitre précédent pourraient néanmoins être appliquées pour intégrer davantage de sources d'incertitudes.

Dans ce paragraphe, seul le modèle de plaque encastrée proposé par Timoshenko (1961) est utilisé. Ce dernier s'adapte en effet mieux aux exploitations menées en chambres et piliers. On considère un

chargement de cette dalle par un paraboloïde de rayon $\sqrt{2} l$ qui représente le chargement tridimensionnel « moyen ». Des simulations de Monte Carlo sont lancées pour chacune des mailles du modèle spatial en utilisant les caractérisations « statistiques » des données définies dans les tableaux 3.11 et 3.12. On s'intéresse principalement à déterminer :

- la fréquence $f_{rupture}$ des simulations donnant une contrainte S_{max} dans le banc du toit supérieure à la résistance en flexion R_f du gypse ;
- la fréquence $f_{remontée}$ des simulations donnant une hauteur H_{rem} de remontée du fontis avant auto-comblement supérieure à la profondeur H des travaux.

Chacune des cellules sera caractérisée par une valeur f_{fontis} , égale au produit $f_{rupture} \times f_{remontée}$ et qui constituera un *indicateur de la potentialité qu'une cloche de fontis de 1,8 m de rayon puisse s'amorcer au fond, par la rupture par flexion du banc de gypse constituant le toit immédiat de l'exploitation, et puisse remonter dans le recouvrement jusqu'à déboucher en surface* (figure 3.29).

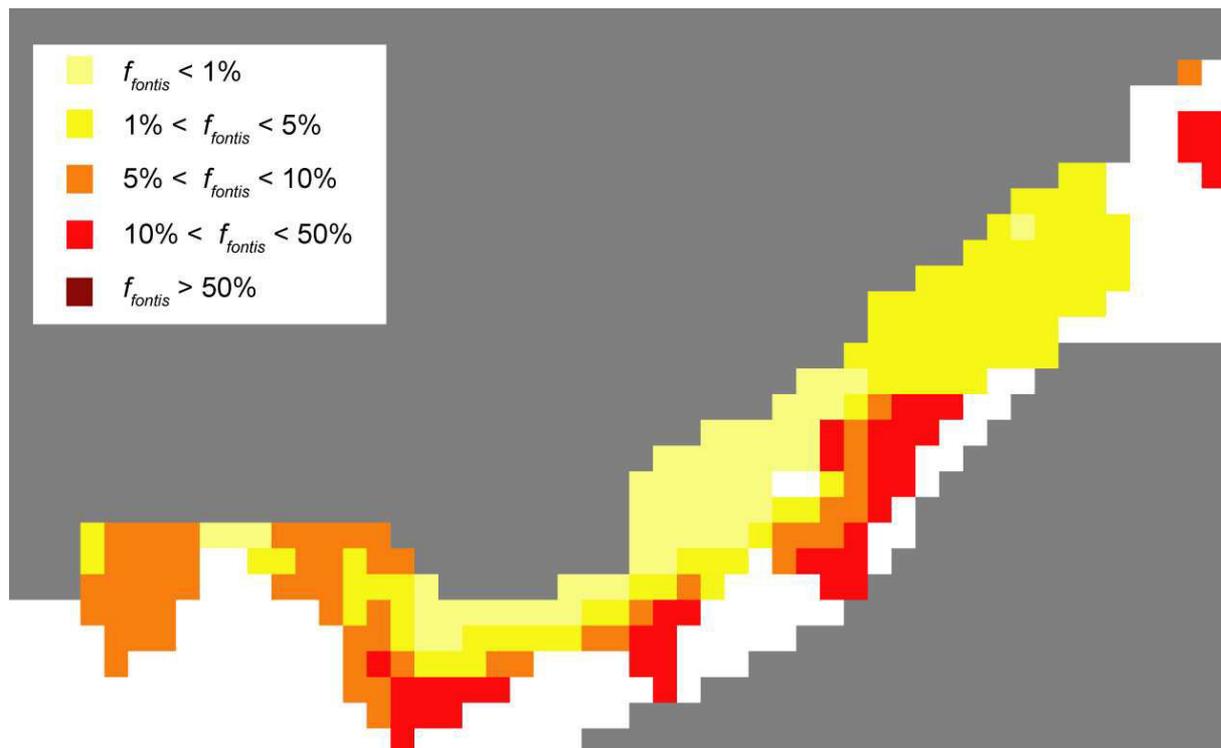


Figure 3.29. Carte d'aléa *probabilisée*

La vision proposée par la carte d'aléa « probabilisée » apparaît plus intéressante que la vision déterministe (figure 3.28) au sens où elle permet de mieux distinguer spatialement et de manière quantifiée les secteurs les plus sujets au phénomène de fontis. Un dégradé de couleurs s'articulant autour de la couleur orange retenue précédemment pour le niveau moyen représenté sur la carte d'aléa déterministe a été choisi ici pour figurer cette variabilité spatiale.

Cette carte d'aléa « probabilisée » peut être comparée à la carte de densité réelle des cuvettes d'effondrement (figure 3.30). On s'aperçoit que :

- les cuvettes sont apparues dans des zones où la fréquence f_{fontis} calculée est non négligeable (supérieure à 3-4%), témoignant d'une certaine qualité des résultats de la modélisation ;
- une cellule comportant deux cuvettes ressort sur la carte de densité réelle observée des cuvettes d'effondrement (cerclée en rouge sur la figure 3.30). Pour les conditions d'exploitation et de profondeur de ces mailles, le calcul probabiliste montre que la venue au jour de fontis est très improbable. Les cuvettes observées résulteraient alors d'un mécanisme d'effondrement différent de celui qui a été modélisé (phénomène de rupture de dalle suivi d'une remontée de voûte). Des ruptures de piliers, possibles à ces fortes profondeurs, pourraient être à l'origine de ces cuvettes d'un diamètre plus important que les autres cuvettes (environ 8 mètres).

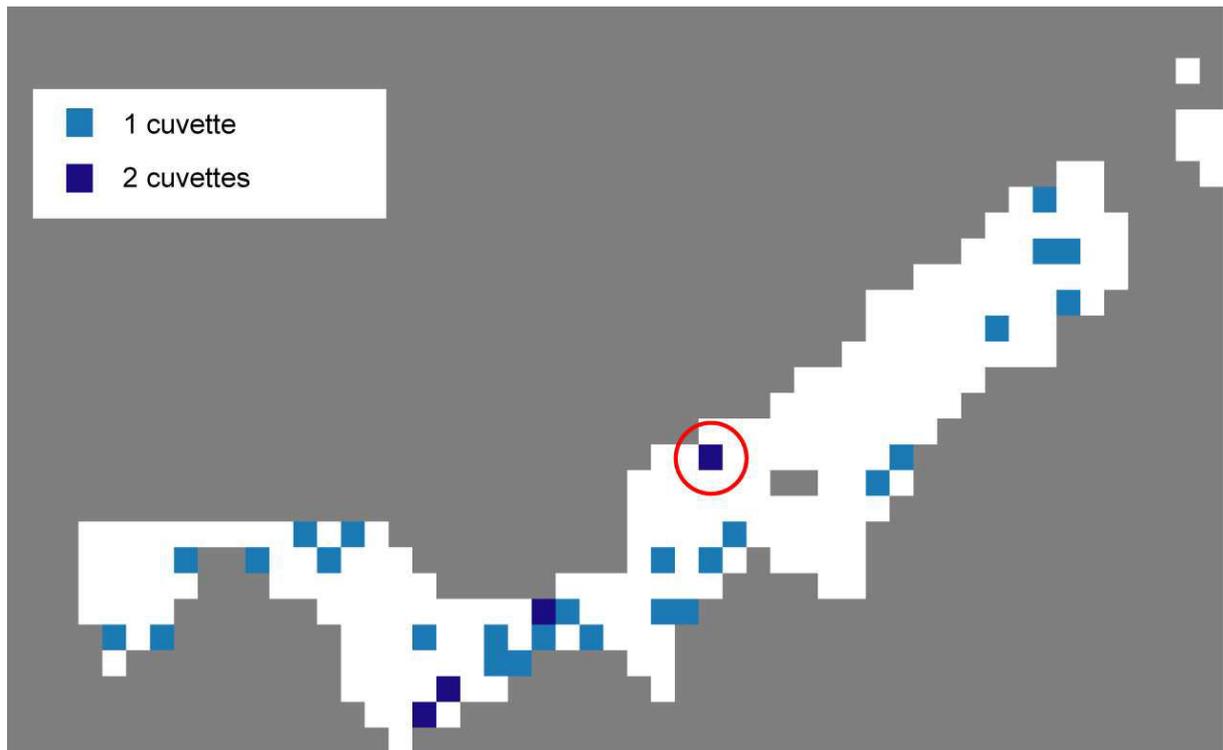


Figure 3.30. Carte de densité réelle des cuvettes d'effondrement

La fréquence f_{fontis} calculée lors de cette étude a été obtenue par des simulations de Monte Carlo permettant d'intégrer les indéterminations sur les données (tableaux 3.11 et 3.12). Comme décrit dans le chapitre précédent, ces indéterminations peuvent être expliquées par l'existence d'une variabilité naturelle à l'échelle du site d'étude, à laquelle s'ajoutent des problèmes de mauvaise connaissance sur les valeurs des paramètres des fonctions de distribution représentant cette variabilité. En pratique, la valeur de f_{fontis} estimée correspond à la borne supérieure de la fréquence spatiale de fontis pouvant survenir par maille (cette borne serait atteinte si aucune incertitude épistémique n'existait, ce qui n'est pas le cas dans cette étude). Ainsi, on peut s'attendre à ce que, *au maximum*, entre un carrefour de galeries sur 10 et un carrefour de galeries sur 2 soit concerné par le phénomène de fontis débouchant en surface dans les cases rouges de la figure 3.29 ($10\% < f_{fontis} < 50\%$). Pour déterminer le nombre exact de ces fontis, il conviendrait de déterminer sur chacune des données la part exacte de l'indétermination due à l'existence d'une variabilité spatiale et d'interpréter la valeur de f_{fontis} à la lumière de ces indications (figure 2.16). On ne travaillera alors ici qu'avec des valeurs majorées de ces chiffres.

Analyse de l'aléa « effondrement localisé lié à une rupture de pilier »

La comparaison entre la carte d'aléa probabilisée et celle de la densité des cuvettes d'effondrement observées en surface a illustré le fait que des mécanismes différents du phénomène de remontée de voûte pouvaient également être à l'origine de désordres en surface dont les caractéristiques sont proches des fontis (cuvettes de plusieurs mètres de diamètre). Une telle constatation était auparavant impossible avec la seule carte d'aléa déterministe: l'étude aurait ainsi pu ne pas être totalement complète et ne pas intégrer tous les mécanismes de rupture potentiels.

Le phénomène de rupture de piliers doit être regardé avec attention : les conséquences qu'il peut avoir, s'il concerne plusieurs piliers, peuvent être similaires à l'affaissement qui avait déjà touché la carrière à la fin des années 1960, dans une zone exploitée sous la dalle calcaire.

Les deux cuvettes d'effondrement, identifiées comme dues à des ruptures localisées de piliers, sont situées à une profondeur d'environ 41 mètres. D'après le modèle de l'aire tributaire, la contrainte qui peut s'exercer sur un pilier carré de 5,5 mètres de côté entouré de galeries de 5,5 mètres de largeur

vaut à cette profondeur 4,1 MPa. Cette valeur est très largement inférieure à la résistance minimale à la compression déterminée précédemment (36,5 MPa) et le facteur de sécurité du pilier peut être estimé à 8,8. Un tel nombre semble indiquer que, dans ce cas, une rupture du pilier est pratiquement impossible. Plusieurs remarques peuvent malgré tout être émises :

- le modèle de l'aire tributaire ne semble pas adapté à des travaux situés sous un recouvrement penté en bordure d'une dalle rigide (aucune prise en compte des « effets de bords ») ;
- le modèle ne tient pas compte des possibilités d'infiltrations d'eau superficielle dont les conséquences sont importantes pour le matériau gypse ou de la présence de fractures, qui toutes deux peuvent « affaiblir » les piliers.

Pour ces raisons, une stratégie identique à celle utilisée pour l'analyse de risque menée pour la mine de charbon d'Afrique du Sud vue précédemment apparaît délicate à entreprendre. Une méthodologie par rétro-analyse a ici été préférée pour juger de la possibilité d'une rupture de pilier. Cette dernière permet en effet d'intégrer les conditions spécifiques de la zone d'étude. Puisque des ruptures sont déjà apparues pour des facteurs de sécurité très grands, nous avons considéré qu'elles pouvaient encore apparaître dès lors que le facteur de sécurité calculé pour une maille par le modèle de l'aire tributaire était inférieur à 10. Cette valeur a été choisie par expertise en ajoutant une marge de sécurité à la valeur de 8,8 estimée précédemment. Ainsi l'aléa a été jugé de manière déterministe :

- à un niveau « négligeable » si $SF > 10$;
- à un niveau « faible » si $SF \leq 10$.

Le choix de réaliser l'étude de manière déterministe pour l'aléa « effondrement localisé dû à une rupture de pilier » s'explique par le fait qu'un modèle physique réellement adapté à représenter le mécanisme de la rupture redoutée dans un tel environnement minier et géologique est indisponible dans cette étude (une modélisation par éléments finis aurait éventuellement pu être envisagée mais celle-ci n'aurait pas pu permettre d'obtenir des conclusions à l'échelle choisie pour l'étude). Une incertitude de ressources est donc ici présente (inexistence d'outils adaptés) et, de ce fait, une étude d'aléa probabiliste intégrant de manière quantifiée et précise les incertitudes de données s'avèrerait non pertinente. Elle reposerait en effet sur des modèles non validés et ses conclusions en terme de prise en compte des incertitudes de données seraient très discutables. Cet exemple insiste alors encore une fois sur la difficulté d'obtenir des résultats probabilistes lorsque les connaissances générales sur un problème montrent des limites.

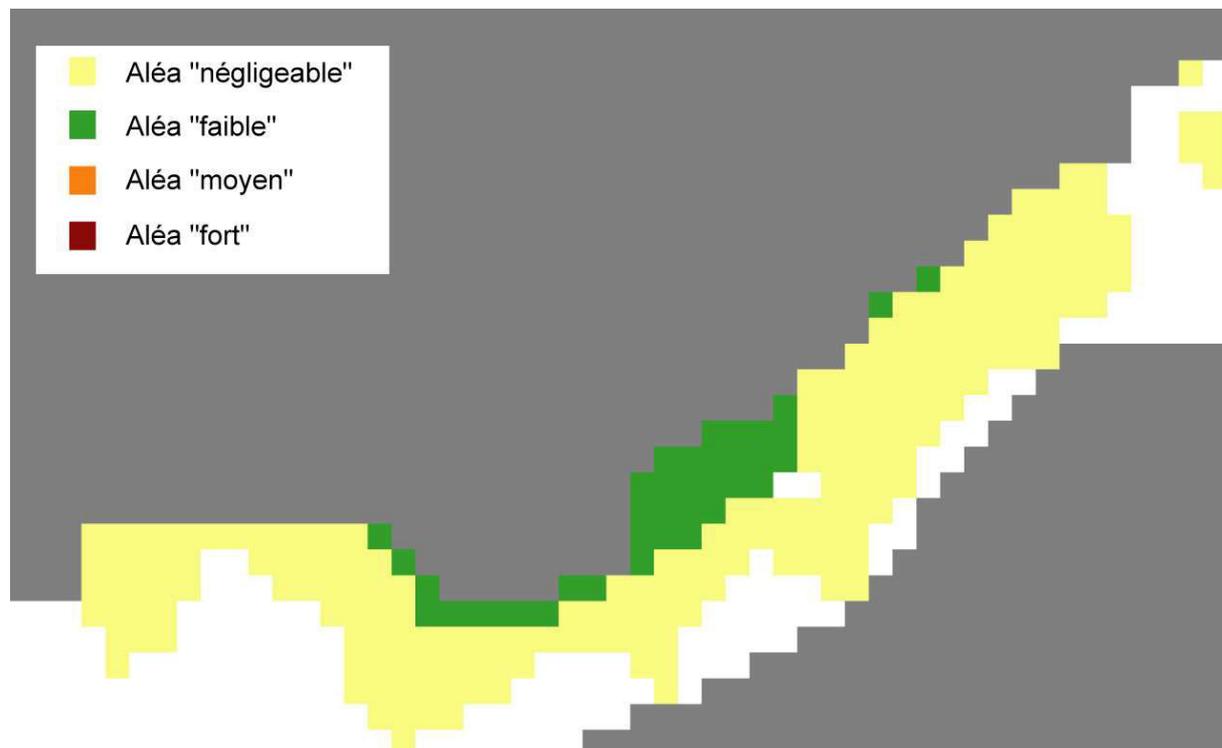


Figure 3.31. Carte probabiliste pour l'aléa « effondrement dû une rupture de pilier »

La figure 3.31 présente les résultats obtenus avec cette méthodologie lorsque les valeurs définies dans les tableaux 3.11 et 3.12 ont été utilisées pour caractériser les données. L'échelle retenue pour les niveaux d'aléa est la même que celle de la figure 3.28 où une approche déterministe avait été utilisée. Les zones situées en bordure de la dalle calcaire de surface, qui correspondent au recouvrement le plus épais, sont ainsi concernées par une possibilité d'effondrement dû à une rupture de pilier minier. On note que la zone délimitée intègre bien les cuvettes repérées sur la figure 3.30.

2.4 Analyse temporelle de l'aléa

Construction d'un modèle pour l'analyse temporelle de l'aléa fontis pour la carrière de Grozon

Les résultats *spatiaux* présentés sur la figure 3.29 permettent d'identifier les secteurs dans lesquels le phénomène de fontis pourrait se manifester. Cependant, ces résultats n'indiquent pas si l'apparition au jour d'une cuvette d'effondrement est encore possible, ni même quand elle pourrait se produire.

Mener une analyse *temporelle* similaire à celle présentée dans le chapitre précédent apparaît malgré tout difficile dans le cas de la carrière de Grozon pour des raisons déjà évoquées plus tôt :

- l'inventaire des fontis n'est sûrement pas complet du fait des travaux de comblement des cuvettes dans les zones de pâture (figure 3.18), du développement végétal de certains secteurs, ou des difficultés à interpréter les anciennes photographies aériennes ;
- le faible nombre de jeux de photographies aériennes du secteur, parfois très espacés les uns des autres (1938, 1958, 1969, 1978, 1996), induit une grande indétermination dans la datation des événements (de l'ordre de la vingtaine d'années, voire supérieure à 40 ans pour les fontis les plus anciens).

Une approche originale a été développée ici pour faire face à ces problèmes. Elle s'appuie sur plusieurs constatations importantes :

- les travaux au fond sont relativement bien datés et le schéma d'exploitation est connu (figure 3.14 et tableau 3.11) ;
- les 32 fontis au jour (les deux cuvettes dues à des ruptures localisées de piliers ont été retirées de l'inventaire) peuvent être localisés précisément par rapport aux différentes configurations de travaux souterrains ;
- la fréquence *maximale* de fontis pouvant déboucher au jour peut être estimée pour chacune des mailles du modèle spatial (figure 3.29) ;
- la tendance générale de l'évolution dans le temps de la venue au jour des fontis est connue et a pu être modélisée dans le chapitre précédent après l'analyse d'inventaires d'effondrements.

Les dix configurations d'exploitation rencontrées dans la zone d'étude peuvent être caractérisées en fonction de plusieurs paramètres : le temps passé depuis la fin des travaux, la surface de la zone concernée par un type de configuration donné (nombre de mailles), le nombre de fontis observés dans chacune d'entre elles, ainsi que le nombre maximal de fontis *estimés* par le modèle (tableau 3.14). Ce dernier paramètre est obtenu de la manière suivante :

- on estime le nombre de fontis potentiels dans chacune des mailles comme produit entre le nombre de carrefours de galeries présents, constituant les sites potentiels d'amorce du phénomène de rupture (figure 3.32) et la fréquence calculée f_{fontis} indiquant la possibilité qu'un fontis s'enclenche au fond et débouche au jour (figure 3.29) ;
- on somme l'ensemble des valeurs correspondant aux différentes mailles d'une même configuration d'exploitation.

Tableau 3.14. Comparaison entre nombre de fontis *estimés* et nombre de fontis *observés* pour les différentes configurations d'exploitation

Configuration d'exploitation	Temps passé depuis la fin des travaux (années)	Nombre de mailles	Nombre de carrefours de galerie présents par maille	Nombre de fontis <i>estimés</i> ($N_{\text{estimé}}$)	Nombre de cuvettes de fontis <i>observées</i> ($N_{\text{observé}}$)	$N_{\text{observé}} / N_{\text{estimé}}$
Couche 1 avant 1920	87	60	6,25	23,02	16	0,70
Couche 1 avant 1960	47	41	6,25	4,20	4	0,95
Couche 1 avant 1970	37	15	6,25	2,45	1	0,41
Couche 1 avant 1977	30	37	2,574	9,25	2	0,22
Couche 3 avant 1960	47	14	6,25	3,56	1	0,28
Couche 3 avant 1980	27	8	2,256	0,02	0	0
Couches 1 et 3 avant 1940	67	10	6,25	3,70	3	0,81
Couches 1 et 3 avant 1960	47	14	6,25	5,20	1	0,19
Couches 1 et 3 avant 1970	37	44	6,25	8,17	4	0,49
Couches 1 et 3 avant 1977	30	2	2,574	0,64	0	0
TOTAL		245		60,21	32	

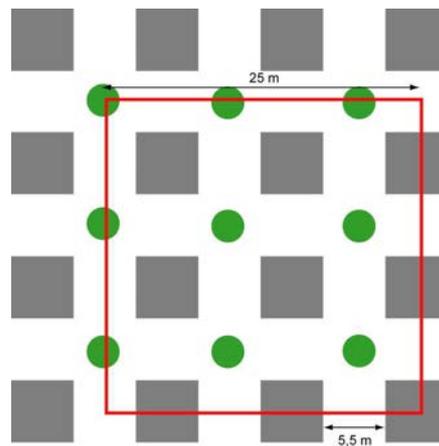


Figure 3.32. Nombre de carrefours de galeries par maille (pour les configurations d'exploitation par piliers carrés)

Le rapport $N_{\text{observé}}/N_{\text{estimé}}$ présenté dans le tableau 3.14, peut être interprété comme le ratio entre le nombre d'effondrements ayant réellement eu lieu et le nombre maximal d'effondrements attendus. Il témoigne ainsi du « degré de dégradation » du secteur considéré : plus ce rapport est proche de 1, plus on peut considérer que le nombre d'événements pouvant encore survenir est faible.

Un examen plus attentif du tableau 3.14 semble indiquer que plus le temps passé depuis la fin des travaux est grand, plus le rapport $N_{\text{observé}}/N_{\text{estimé}}$ est important. Ceci permet d'insister sur le fait que le facteur « temps », au travers du phénomène de vieillissement des matériaux par exemple, intervient dans le développement des ruptures. Cette remarque concorde parfaitement avec les résultats des travaux menés précédemment dans le cadre du développement d'un modèle général pour évaluer l'occurrence temporelle des fontis.

Lors de ces derniers, une tendance générale avait été dégagée pour modéliser l'occurrence temporelle des fontis en fonction du temps passé depuis la fin des travaux et avait été confrontée de manière satisfaisante à plusieurs cas de la littérature. Cette tendance peut être utilisée dans le cadre de l'étude présente pour examiner la possibilité de futurs effondrements au droit de la carrière de Grozon. Pour se faire, les dix valeurs obtenues pour le rapport $N_{\text{observé}}/N_{\text{estimé}}$ en fonction du temps passé depuis la fin des travaux peuvent être *calées* sur une loi de Weibull, modèle statistique qui s'était révélé parfaitement adapté pour un tel objectif (figure 3.33).

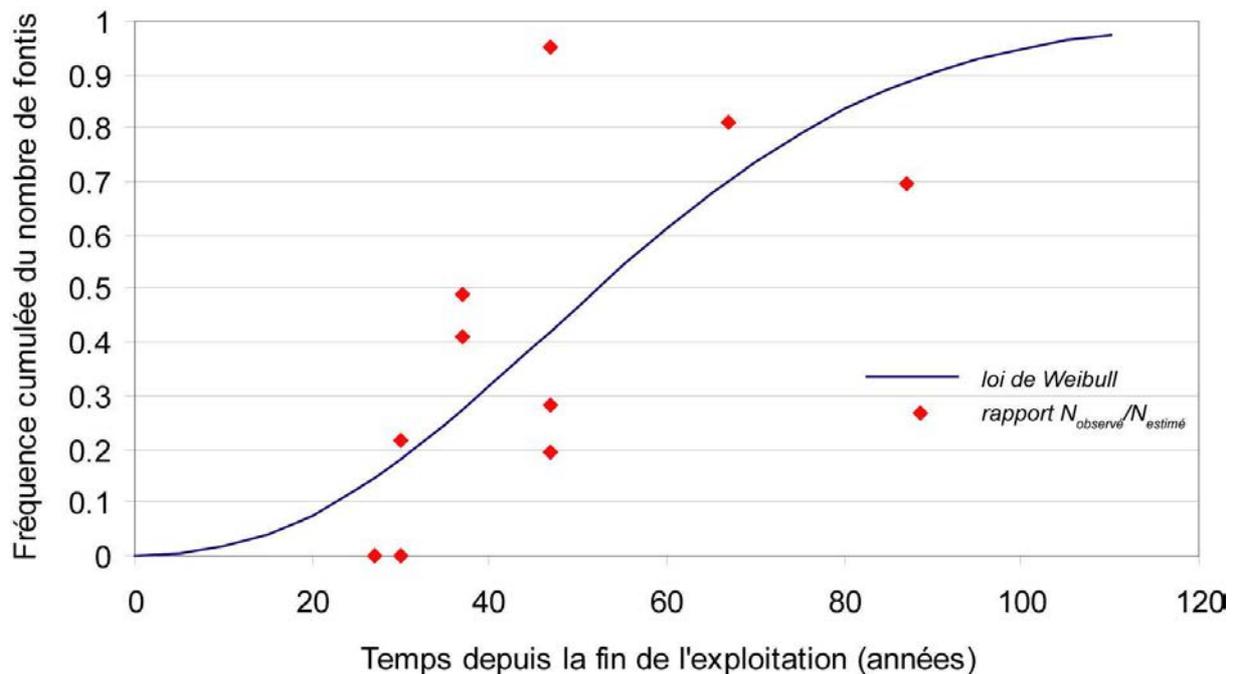


Figure 3.33. Ajustement des valeurs $N_{\text{observé}}/N_{\text{estimé}}$ obtenues pour le site de Grozon par une loi de Weibull

Cet ajustement donne les valeurs de α (terme d'usure) de 2,25 et de β (espérance de vie d'un carrefour de galerie) de 62 ans. Ces valeurs peuvent bien évidemment être discutées à la lumière des nombreuses incertitudes de données et de modèle qui existent ici, et de nombreuses constatations peuvent être émises : le nombre de points pour réaliser le calage est faible (10), une autre forme loi aurait pu être choisie, etc. Il faut malgré tout noter que les valeurs obtenues dans cette modélisation sont du même ordre de grandeur que celles proposées par Peng (1992), Dyne (1998) et van Besien et Rockaway (1988).

Compte-tenu de ces remarques, les résultats ne seront uniquement regardés qu'en terme de tendances. Ils permettent néanmoins d'obtenir certains ordres de grandeurs de paramètres dont l'importance peut être grande :

- le temps *critique* des ruptures est de l'ordre de 50 ans : les secteurs d'exploitation récents voient donc augmenter la possibilité de voir un fontis déboucher au jour, alors que les plus anciens semblent de plus en plus proches de leur état final ;
- le temps *limite* des ruptures, après lequel il n'y a plus que 1% de chance de voir un fontis déboucher au jour, est de l'ordre de 125 ans (il vaut 100 ans pour un risque de 5%).

L'évolution de la probabilité de voir un fontis se développer au jour étant variable dans le temps, les résultats donnés en terme d'évaluation de l'aléa ne peuvent plus être « figés » comme sur les cartes présentées aujourd'hui. Dans un but opérationnel, cette évolution peut être décrite en quatre phases :

- une première phase pendant laquelle l'évolution de la probabilité annuelle de voir un fontis se développer au jour est *croissante* (jusqu'à environ 25 ans après la fin de l'exploitation) ;
- une phase, dite *critique*, pendant laquelle la probabilité annuelle de voir un fontis déboucher au jour est supérieure à 1% (entre 25 et 75 ans après l'exploitation) ;
- une phase *décroissante* jusque 125 ans (il reste à partir de cette date un risque résiduel de 1% de voir un fontis déboucher au jour sur l'ensemble de la zone) ;
- une phase *stable* durant laquelle le phénomène de fontis est négligeable.

La figure 3.34 présente, compte-tenu de cette description, une évaluation de l'aléa qui peut être menée à divers horizons : 0 (aujourd'hui), 30 ans (2037) et 50 ans (2057). Un ensemble dynamique (évoluant dans le temps) de cartes peut ainsi être constitué, illustrant le fait que les différents secteurs de l'exploitation évoluent tous vers une relative stabilité, atteinte à l'horizon 2057 pour les plus vieux d'entre eux.

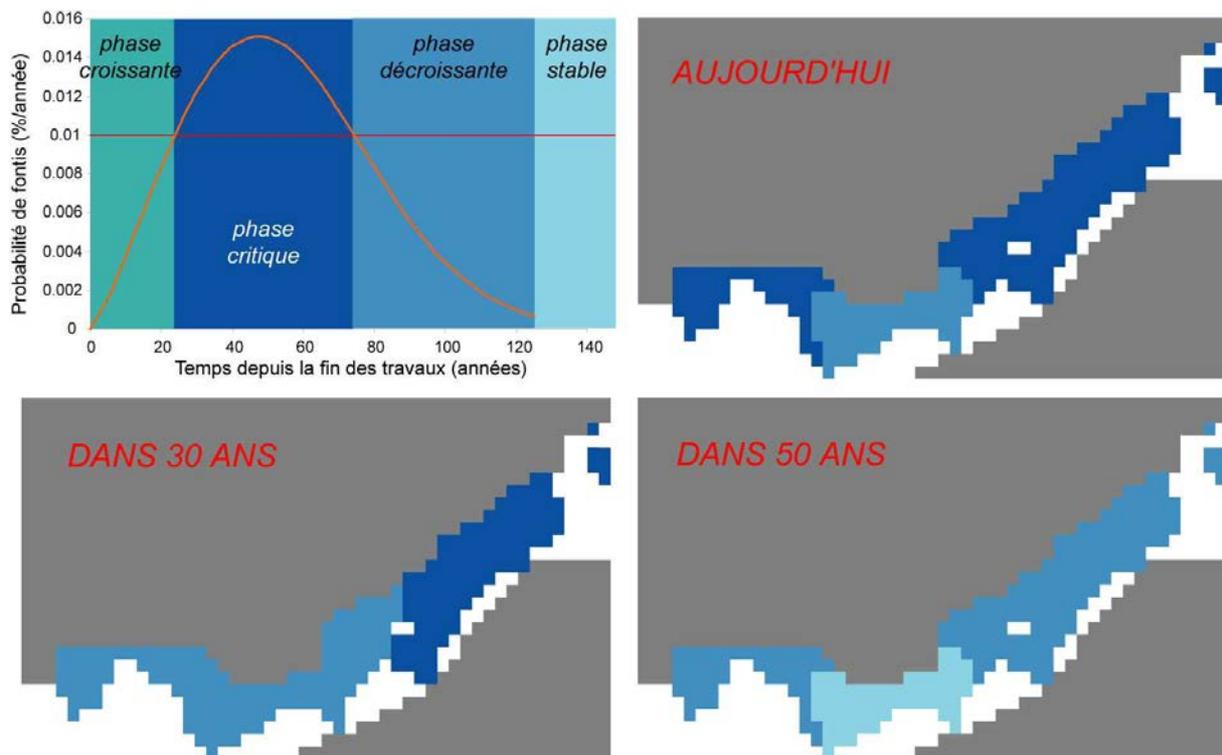


Figure 3.34. Probabilité annuelle de voir un fontis apparaître au jour, à divers horizons

Limites du modèle

Certaines limites du modèle temporel mis en place ont été soulignées précédemment. On rappelle par exemple le fait que le modèle est fortement dépendant de la base de données des 10 points qui ont permis de déterminer les paramètres n , a et β , engendrant alors un *problème d'incertitude de modèle*.

Néanmoins, une des principales remarques qui peut être effectuée concerne le fait que le modèle temporel développé soit conditionné par la modélisation physique qui a été réalisée pour étudier le phénomène de fontis. Ainsi, le modèle présenté sur la figure 3.33 est valable *uniquement* pour les mécanismes qui ont été représentés et ne peut être utilisé que pour évaluer la possibilité de voir un fontis survenir au jour du fait d'une rupture du toit immédiat des travaux.

Dans l'étude mécanique, les travaux, séparés des aquifères par une quinzaine de mètres de terrains marneux, ont par exemple été supposés secs et le rôle de l'eau n'a pas été incorporé dans l'étude. Néanmoins, si des modifications hydrogéologiques venaient à apparaître (pompage dans la nappe, fortes précipitations, etc.), les mécanismes considérés ne seraient peut-être pas les plus judicieux, les hypothèses faites dans le raisonnement pourraient s'avérer fausses et de nouveaux modèles, sans doute plus complexes, devraient alors être mis en place. Des probabilités *spatiales* différentes seraient ainsi estimées et les paramètres du modèle temporel ne seraient plus les mêmes.

Cette limite apparente du modèle temporel peut être discutée à la lumière de deux remarques dans le cadre de ces travaux :

- une instrumentation microsismique installée dans la carrière a permis de mettre en avant l'influence du rôle de l'eau dans le développement de fontis, au travers d'une corrélation entre l'activité sismique enregistrée sur le site et la pluviométrie (Balland (2006) et figure 3.35) ;
- les résultats apportés par l'utilisation du modèle *mécanique* retenu semblent malgré tout relativement cohérents, du point de vue du nombre de fontis estimés et de leur localisation, avec la réalité et les mécanismes étudiés sont ainsi tout à fait probables.

Ces remarques nous amènent alors à insister sur l'importance des hypothèses ayant conduit à l'obtention des résultats lors de l'interprétation de ces derniers.

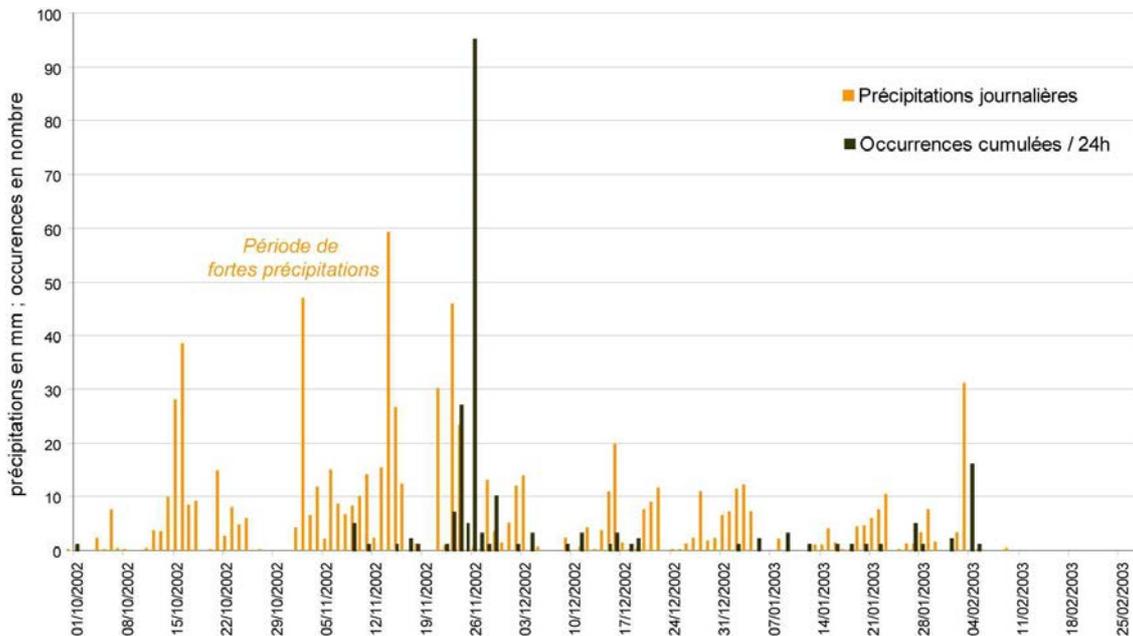


Figure 3.35. Précipitations et nombre d'événements enregistrés dans la zone instrumentée

2.5 Principaux résultats et avancées mises en avant par le travail

Ce travail a permis de mettre en avant, à travers un exemple concret inspiré de la gestion du problème de l'Après mine en France, le fait que les outils probabilistes présentent plusieurs avantages qui peuvent à la fois aider l'expert dans son travail et les pouvoirs publics dans leur prise de décision :

- l'utilisation des probabilités comme solution à la prise en compte des incertitudes peut, sous certaines hypothèses, conduire à l'estimation de la probabilité d'occurrence *spatiale* d'un aléa et à la mise en place de *cartes de sensibilité spatiale*. L'expert et le décideur peuvent alors se faire une idée de la localisation possible des prochains événements ;
- une approche probabiliste peut permettre d'apporter un complément à l'analyse en identifiant clairement des mécanismes qui auraient pu ne pas être considérés ou être négligés dans une étude déterministe. La démarche d'expertise se trouve ainsi améliorée ;
- au travers d'une comparaison entre les prévisions et la réalité, l'expert et les pouvoirs publics peuvent se faire une idée de l'état actuel de la carrière et juger du nombre de nouveaux événements qui peuvent être encore attendus. Le facteur *temporel* de l'aléa, par le biais de tendances, peut alors être ajouté à l'analyse.

Ce travail souligne encore néanmoins les difficultés de réellement parvenir à une expression probabiliste d'un aléa et insiste sur les compléments méthodologiques et scientifiques qui doivent encore être apportés :

- les résultats estimés ne doivent aujourd'hui être regardés que sous forme de *tendances* ;
- les résultats sont encore fortement dépendants du retour d'expérience qui a pu être acquis sur le site de l'étude ;
- les résultats sont dépendants des hypothèses méthodologiques qui ont été émises, notamment en ce qui concerne la modélisation des mécanismes étudiés.

Compte-tenu de ces remarques, on peut souligner que l'outil probabiliste constitue alors plus aujourd'hui une *aide à l'expertise* qu'une réelle solution à l'expression quantifiée d'un aléa.

3 PRINCIPALES LEÇONS ENSEIGNÉES PAR CES EXEMPLES

Les deux exemples proposés dans ce troisième chapitre sont tirés de deux contextes différents. La première étude a des conséquences économiques à court terme importantes alors que la seconde s'intéresse plus à la gestion d'un problème à long terme. Dans les deux cas cependant, l'importance que pouvait avoir un traitement des incertitudes et l'utilisation de l'outil probabiliste s'est particulièrement révélée.

Il a pu être montré que la prise en compte des incertitudes et le calcul de probabilités pouvaient constituer une réelle *aide à la démarche d'expertise*. La caractérisation des indéterminations présentes dans le problème et l'identification des liens entre celles-ci en utilisant les outils présentés dans les premiers et seconds chapitres, induisent alors des choix méthodologiques forts sur la stratégie de résolution d'un problème et sur les outils adéquats pour y parvenir. Des méthodes qualitatives apparaissent ainsi plus adaptées à des études dans lesquelles l'incertitude de ressources est forte que des méthodes quantitatives dont les résultats seraient très difficilement interprétables dans la pratique.

L'importance de la communication entre les acteurs de la gestion du risque a pu être soulignée, et par là même la nécessité de la part de l'expert d'avoir des outils permettant de « vulgariser » ces résultats d'études. Les comparaisons de modèles, notamment lorsque certains se basent sur des événements concrets, apparaissent alors être particulièrement efficaces pour faire passer un message qui semblerait peut-être trop théorique ou qui serait basé sur des approches difficiles à intégrer pour des acteurs non habitués à la théorie des probabilités. De la même manière, la cartographie semble parfaitement convenir pour illustrer certains résultats à la condition que les représentations choisies puissent être facilement interprétées et soient suffisamment expliquées. La carte 3.29 peut ainsi être vue, du fait de certaines hypothèses vérifiées dans le cas de la carrière de Grozon, comme une *carte de sensibilité spatiale* indiquant le lieu et la densité de fontis qui peuvent survenir.

A travers les deux cas présentés, les outils et méthodes introduits dans les premiers chapitres ont pu être appliqués concrètement et leurs avantages opérationnels pour de meilleures analyses d'aléa ont été mis en avant :

- l'ampleur *spatiale* des phénomènes étudiés peut maintenant, sous certaines hypothèses, être réellement quantifiée, ce qui n'était pas le cas avec l'utilisation de concepts comme la prédisposition ;
- une idée de la temporalité des événements peut maintenant être donnée, principalement sous forme de tendances, et peut permettre de répondre à certaines attentes des destinataires des études de risque.

Les résultats avancés dans les deux exemples proposés doivent néanmoins être regardés avec une attention particulière. Les méthodes utilisées ont leurs propres limites et ces dernières conduisent au fait qu'une part d'incertitude peut subsister dans les études. Traiter cette incertitude peut aujourd'hui être encore très délicat pour des raisons scientifiques ou méthodologiques et faute de pouvoir la réduire, il convient alors de l'indiquer très clairement dans les analyses. Illustrer l'existence d'indéterminations constitue déjà en effet un premier pas pour la prise en compte de celles-ci.

Enfin, il est à noter que pour les deux exemples proposés, c'est globalement la même méthodologie d'analyse qui a été utilisée par l'expert. Celle-ci s'avère donc aussi efficace dans deux contextes différents. Elle pourrait alors également être appliquée plus généralement dans d'autres conditions.

Cette méthodologie peut se résumer ainsi :

1. présentation du contexte général de l'étude ;
2. identification de la stratégie permettant de répondre au problème et des méthodes à utiliser pour y parvenir ;

3. description des différentes catégories d'incertitudes selon la typologie présentée dans le premier chapitre ;
4. détermination des principales sources d'incertitudes et évaluation de la possibilité de conduire une analyse quantifiée ;
5. caractérisation des incertitudes selon les méthodes proposées dans les précédents chapitres : utilisation de fonctions de distribution, de marges de sécurité, etc. ;
6. propagation des différentes indéterminations au sein des modèles physiques, géométriques ou mécaniques ;
7. interprétation pratique, si possible, des résultats probabilistes obtenus. Une estimation de la *susceptibilité spatiale* du phénomène peut notamment être obtenue après cette étape ;
8. utilisation d'un modèle spatial et ajustement de celui-ci aux données du site. L'objectif de cette phase est d'obtenir une évaluation de la probabilité temporelle de voir se produire un événement redouté ;
9. interprétation pratique globale des résultats en prenant en compte leurs éventuelles limites ;
10. utilisation d'outils de communication destinés à faciliter la restitution des travaux aux différents acteurs de la gestion du risque ;
11. propositions d'actions pour remédier à l'existence d'un aléa, voire le réduire.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse concerne d'une manière générale l'analyse des risques pouvant être induits par l'existence d'objets rocheux. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement à plusieurs spécificités de ce type d'analyse, notamment l'existence d'un contexte fort en incertitudes auquel doit faire face quotidiennement l'expert géotechnicien en charge d'une étude d'aléa, et les difficultés actuelles à exprimer les résultats de telles analyses sous une forme quantifiée, qui s'avèrerait pourtant utile à de nombreuses demandes du public et des autorités.

Le premier chapitre du mémoire a porté sur la notion d'incertitude dans le contexte des analyses de risque. Une définition de celle-ci ainsi qu'une typologie détaillée ont pu être mises au point dans le but de répondre à trois objectifs : 1) cartographier les différentes indéterminations pouvant être rencontrées par l'expert dans une étude, 2) s'adapter à la méthodologie de réalisation d'une analyse de risque, et notamment à l'interaction de quatre *paramètres* forts que sont les ressources, l'expert, les modèles et les données, et 3) permettre une intégration, voire un traitement opérationnel, des incertitudes dans les études.

Dans la typologie établie, quatre catégories d'incertitudes ont été proposées et pour chacune d'entre elles, des illustrations pratiques et des méthodes de traitement ont été fournies. Lorsque ces dernières n'existaient pas dans la littérature, des outils ont été proposés et mis en application. Il s'est alors par exemple avéré que 1) *l'indice d'existence* peut être un outil puissant permettant de pallier le problème de l'incertitude liée à l'existence des ouvrages souterrains et que 2) lorsque *l'intégration* concrète de l'incertitude dans l'analyse (via une quantification par exemple) n'est pas possible, la *confrontation* peut être un excellent moyen de prendre en compte celle-ci en *illustrant* l'influence qu'elle peut avoir dans les analyses.

Il a pu être constaté à travers plusieurs exemples que, dans la pratique, le choix réel des méthodes de traitement des incertitudes s'effectuait surtout en fonction de la caractérisation de l'ensemble des indéterminations présentes dans l'analyse. Les liens forts entre les différentes catégories de la typologie induisent en effet des choix méthodologiques importants : une méthode performante pour traiter un certain type d'incertitude peut par exemple s'avérer peu intéressante vis-à-vis du résultat final de l'analyse si les autres types ne sont pas également pris en compte. Un traitement qualitatif de l'incertitude semble ainsi particulièrement adapté à des études où les incertitudes de ressources jouent un rôle important.

Dans ce contexte d'incertitude, les probabilités sont apparues comme des moyens de traduire certaines des catégories de la typologie établie. Une méthode originale et novatrice a ainsi pu, au travers de cette thèse, être développée pour faire face aux incertitudes liées au choix et à l'utilisation de modèles permettant d'approcher la réalité. L'utilisation de l'outil probabiliste dans les études de risques liés au sol et au sous-sol a cependant été examinée avec beaucoup d'attention et a fait spécifiquement l'objet du second chapitre du mémoire. Une discussion a été proposée pour évaluer les différentes significations que l'on pouvait donner à des valeurs probabilistes et a particulièrement insisté sur l'antagonisme des approches fréquentistes et épistémiques.

L'exemple simple de l'analyse de stabilité d'un pilier minier a été utilisé comme fil conducteur pour illustrer les propos et a permis notamment de détailler l'application concrète de plusieurs méthodes opérationnelles. Il est particulièrement ressorti de cet exemple que les hypothèses de caractérisation des indéterminations étaient prépondérantes quant à la signification concrète d'un résultat probabiliste

d'analyse d'aléa et que, sous certaines conditions, l'interprétation de certaines valeurs quantitatives d'un point de vue spatial était possible.

L'étude bibliographique réalisée dans le cadre de ce second chapitre a montré, en complément de certains résultats proposés, que si l'expression de la probabilité d'occurrence *spatiale* d'un aléa apparaissait possible dans certains cas, le facteur temporel semblait encore difficile à prendre en compte dans les études. Un premier pas vers l'intégration de cette composante importante de l'aléa, dont les conséquences en terme de gestion du risque sont importantes, a alors été effectué et une méthodologie permettant d'évaluer l'occurrence temporelle d'un fontis au droit d'une zone sous-minée a été proposée. A travers plusieurs exemples, les difficultés et limites de cette méthodologie ont clairement pu être soulignées. Ses avantages et la nécessité de son intégration apparaissent ainsi particulièrement importants.

Des travaux menés dans cette thèse et des deux cas d'application proposés dans le troisième chapitre du mémoire, il est ressorti que l'utilisation des probabilités comme outil de prise en compte des incertitudes apportait une réelle aide à la démarche d'expertise. L'outil probabiliste, dont l'adaptation aux méthodes d'analyse actuelles semble possible et relativement aisée à réaliser, permet en effet d'accompagner l'expert tout au long de son travail, d'insister sur des points particulièrement problématiques et le cas échéant d'apporter des solutions à l'intégration de certaines difficultés.

L'importance de la communication entre les différents acteurs de la gestion du risque a également été mise en perspective dans l'ensemble de ce travail. Il a été fortement souligné que les résultats d'une analyse menée par un expert géotechnicien avaient vocation à être diffusés auprès des décideurs publics et des populations concernées et qu'en cela ils se devaient d'être intelligibles et exploitables par ces derniers. La prise en compte des incertitudes dans les études apparaît dans ce cadre particulièrement importante puisqu'elle permet à l'expert à la fois de montrer ses propres limites ou le manque de ressources dont il dispose, mais aussi d'insister sur les efforts qu'il entreprend pour les réduire.

Comme nous l'avons dit en introduction, la thèse s'adresse en particulier à l'ingénieur et à l'expert *du terrain*. Pour ce dernier, l'intégration des incertitudes et l'utilisation de l'outil probabiliste dans les analyses de risques apparaissent particulièrement bénéfiques. Les avantages pour les uns peuvent cependant apparaître dans certains cas comme des inconvénients pour d'autres acteurs de la gestion du risque. Ainsi, les décideurs publics peuvent être peu enclins à disposer de résultats où le doute du « *sachant* » est mis en avant. De même, des résultats exprimés par l'expert sous forme de probabilités peuvent accentuer le poids des pouvoirs publics quant à la responsabilité réelle et la décision de la gestion du risque, par rapport à la situation antérieure où la décision reposait pleinement sur l'ingénieur.

Une interaction réelle entre les différents acteurs de la gestion du risque apparaît primordiale pour tendre vers une amélioration des études. L'expression des incertitudes permet alors à l'expert de faire un pas vers l'instauration d'un dialogue avec les autres acteurs. Les propositions émises dans le cadre de la thèse à propos des cartographies possibles de l'indice d'existence montrent que l'expert peut aller plus loin que l'expression de ses doutes et réellement amener des solutions. Elles insistent également sur le fait que la décision doit être plus concertée. Une perspective intéressante de la thèse serait alors de réaliser une étude dans laquelle les différents acteurs (expert, pouvoirs publics, population concernée, compagnies d'assurance, etc.) seraient intégrés dès le début du travail et présenteraient leurs réelles attentes de manière à ce qu'une réponse concertée soit obtenue.

Pour améliorer la contribution de l'expert dans ce débat, d'autres perspectives au travail réalisé peuvent être envisagées. La nécessité de la prise en compte de la composante temporelle de l'aléa a par exemple été fortement soulignée. Mais, du fait de leurs limites affichées, les travaux menés pour construire un modèle permettant d'évaluer la probabilité d'occurrence de fontis en fonction du temps ne constituent pour l'instant qu'un premier pas vers l'objectif fixé. Il apparaît alors intéressant, pour

réduire le problème de l'incertitude de ressources liée à la mauvaise compréhension des phénomènes, de constituer des inventaires d'événements plus nombreux ou de réaliser un retour d'expérience plus systématique de cas d'effondrements.

Enfin, les travaux présentés dans la thèse se sont surtout concentrés sur le concept de l'aléa et seules quelques mises en perspective utilisant la notion de risque ont été réalisées. Cependant, maintenant que l'apport des probabilités apparaît plus clair vis-à-vis de l'aléa, des efforts peuvent être entrepris pour évaluer la possibilité d'une réelle évaluation probabiliste du risque. La notion de vulnérabilité pourrait ainsi par exemple être intégrée à l'étude au travers de considérations humaines ou financières (dégâts au bâti, aux réseaux, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P., COJEAN R., DURVILLE J.-L., POTHERAT P., LANDRY J., LEROI E., MARIE R., VILLAIN J., TOULEMONT M., 2000, Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain. *Guide technique, Collection Environnement -Risques naturels, LCPC Editions, ISBN 2-7208-5001-8, 92 pages.*
- ATLAS de l'Inspection Générale des Carrières (IGC), 1968. Planches n° 31-64, 31-65, 31-66, 32-64, 32-65, 32-66, 32-67, 33-66, 33-67.
- AUVRAY C., 2003, Vieillissement et comportement rhéologique du gypse. *Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy.*
- AZZOUZ A., BALIGH M.M., LADD C.C., 1983, Corrected field vane strength for embankment design. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 109(3), pp 730-734.*
- BADEA A., GIPOULOUX O., 2005, Calcul des incertitudes liées aux stockages des déchets nucléaires. *17^{èmes} Journées Scientifiques de la SEH – Colloque International Incertitude et Environnement, Mesures, Modèles, Gestion, Arles, 23-25 novembre 2005.*
- BAECHER G.B., CHRISTIAN J.T., 2003, Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, *John Wiley & Sons, Ltd, 618 pages.*
- BALLAND C., 2007, Avant-projet détaillé du projet SAFE: Surveillance et Auscultation d'un Foudroyage Expérimental. *Rapport INERIS DRS-07-75728-01884 A, Programme EAT-DRS-02, 37 pages.*
- BEKENDAM R.F., 2004, Stability and subsidence assessment over shallow abandoned room and pillar limestone mines. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. A European Perspective. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004. pp 657-670.*
- BELL F.G., DE BRUYN I.A., 1999, Subsidence problems due to abandoned pillar workings in coal seams. *Bulletin Engineering Geology Environment, Vol. 57, pp 225-237.*
- BENNANI M., JOSIEN J.-P., BIGARRE P., 2004, Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine, besoins, méthodes : apport de la microsismique. *Revue Française de Géotechnique, n° 106-107, 1^{er} et 2^e trimestres 2004, pp 5-14.*
- BERNIER J., PARENT E., BOREUX J.-J., 2000, Statistique pour l'environnement. Traitement bayésien de l'incertitude. *Lavoisier, Technique et Documentation, ISBN 978-2-7430-0355-5, 363 pages.*
- BERNOULLI J., 1713, *Ars conjectandi.*
- BETOURNAY M.C., 2004, Canadian Manual for Metal Mine Shallow Stope Decommissioning. *Mining and Mineral Sciences Laboratories, CANMET, Report MMSL 04-022TR, 143 pages.*
- BIENIAWSKI Z.T., 1968, The effect of specimen size on compressive strength of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 5, pp 325-335. Pergamon Press 1968.*
- BOUCHON-MEUNIER B., 1995, La logique floue et ses applications. *Edts Addison-Wesley France, SA.*
- BOURRELIER P.-H., DENEUFBOURG G., DE VANSAY B., 2000, Les catastrophes naturelles, le grand cafouillage. *Editions Osman Eyrolles, Santé & Société, 262 pages.*
- BUCHHEISTER J., BAYRAKTARLI Y., LAUE J., FABER M., 2006, Uncertainties in a deterministic and probabilistic approach on liquefaction susceptibility. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Paper n°1011, Genève, Suisse, 3-8 septembre 2006.*

BURNS K., 1982, Prediction of delayed subsidence. *Proceedings Workshop on surface subsidence due to underground mining, West Virginia University, Morgantown, WV, 30 nov.-2 déc. 1981, pp 220-223.*

BUVAT I., 2000, Introduction à l'approche bootstrap. *Polycopié de cours, U494 INSERM, 46 pages.*

CARTER T.G., MILLER R.I., 1996, Some observations on the time dependency of collapse of surface crown pillars. *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium, Montreal, Vol. 1, pp 285-294.*

CASTILLO E., GUTIERREZ J.M., HADI A.S., 1998, Modeling Probabilistic Networks of Discrete and Continuous Variables. *Journal of Multivariate Analysis, Vol. 64, pp 48-65.*

CAUVIN M., 2004, Elaboration d'une méthode permettant de distinguer risque d'effondrement brutal et risque d'effondrement progressif des terrains suite à une exploitation du sous-sol. *Rapport de stage de fin d'études, Ecole des Mines de Nancy.*

CAUVIN M., VERDEL T., SALMON R., DIDIER C., 2006, Représentation cartographique de la connaissance d'expert dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Miniers. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 27-29 juin 2006, Lyon, France. 8 pages.*

CAUVIN M., 2007a, Management of underground issues in France using probabilistic methods. *International Conference of students and young researchers 'Topical issues of rational use of natural resources', Saint Petersburg, Russie, 25-27 avril 2007.*

CAUVIN M., 2007b, Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité dans le domaine des risques liés au sous-sol. Application à la carrière souterraine de Grozon. *XXV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bordeaux, France, 23-25 mai 2007.*

CAUVIN M., VERDEL T., SALMON R., 2007, Modelling uncertainties in mining pillar analysis. *Risk Analysis, Accepté.*

CHARLES R.J., 1958, Static fatigue of glass. *Journal of Applied Physics, Vol. 29, pp 1549-1560.*

CHRISTIAN J.T., BAECHER G.B., 2002, The point-estimate method with large numbers of variables. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26(15), pp 1515-1529.*

COATES D.F., 1970, Principes de la mécanique des roches. *Monographie 874, Direction des Mines. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources.*

COLMAN S.M., 1981, Rock-weathering rates as functions of time. *Quaternary Research, Vol. 15, pp 250-264.*

Comité Français de Mécanique des Roches (CFMR), 2004, Manuel de mécanique des roches. Tome 2 – Applications. *Presses de l'ENSMP, Paris, 2004.*

Commission interministérielle de l'évaluation des politiques publiques, Commissariat Général du Plan, 1997, La prévention des risques naturels, rapports d'évaluation. *La documentation Française, 702 pages.*

DEJEAN M., 1978, Exploitation des carrières de gypse de Grozon en couches 1 et 3 par piliers superposés. Etude de l'influence du décalage de superposition des piliers. *Rapport Laboratoire de Mécanique des Terrains, CERCHAR-Ecole des Mines de Nancy, MDJ/78-76-2160 n°111, 11 pages.*

DEJEAN M., TRITSCH J.-J., 1978, Caractérisation géomécanique sur le site des sondages GB 66, 67, 68 et 69 des Plâtrières modernes de Grozon en vue de l'utilisation d'une nouvelle méthode de découpage. *Rapport CERCHAR Industrie 78-76-9533 n°208, 12 pages.*

- DEJEAN M., 1981, Note sur les études de stabilité des carrières de gypse de Grozon. *Rapport CERCHAR Industrie CTO-MDj/JS 760 n°81/93, 7 avril 1981.*
- DIDIER C., 1997a, Etude du risque d'instabilité des carrières de gypse de Grozon – Compte rendu de la phase informative. *Rapport INERIS SSE-CDi/BS-97-26ED04/R03, 25 juin 1997, 17 pages.*
- DIDIER C., 1997b, Etude du risque d'instabilité des carrières de gypse de Grozon – Compte rendu de la phase d'analyse. *Rapport INERIS SSE-CDi/BS-97-26ED04/R04, 25 juin 1997, 28 pages.*
- DIDIER C., TRITSCH J.-J., 1999, Recherche et développement de méthodes de mise en sécurité des falaises sous-minées instables, *Rapport INERIS SSE-99-21EP04/R03, février 1999, 177 pages.*
- DIDIER C., TRITSCH J.-J., WATELET J.-M., ARMANGUE A., 1999, Evaluation du risque d'instabilité en surface à l'aplomb d'une ancienne carrière souterraine. Principes d'une analyse par configurations types. *Actes du 9^{ème} Congrès International de Mécanique des Roches, Vol.1, Paris, France, 25-28 août 1999. pp 9-14.*
- DIDIER C., SALMON R., 2004, Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, JNGG 2004, Lille, 28-30 juin 2004, pp 451-462.*
- DIDIER C., LELOUP J., 2005, The MRPP: A powerful operational regulatory tool to prevent and manage post-mining risks. *Colloque International Post mining 2005, 16-18 novembre 2005, Nancy, France, CD-Rom.*
- DUNCAN J.M., 1999, Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.*
- DURVILLE J.-L., 2004, Quelques remarques sur l'emploi des probabilités dans le domaine des risques naturels – cas des mouvements de terrain. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 249, mars-avril 2004, réf 4509, pp 3-17.*
- DUSSAUGE-PEISSER C., HELMSTETTER A., GRASSO J.-R., HANTZ D., DESVARREUX P., JEANNIN M., GIRAUD A., 2002, Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 2, pp 15-26.*
- DUZGUN H.S.B., YUCEMEN M.S., KARPUZ C., 2002, A probabilistic model for the assessment of uncertainties in the shear strength of rock discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 39, pp 743-754.*
- DUZGUN H.S.B., EINSTEIN H.H., 2004, Assessment and Management of Roof Fall Risks in Underground Coal Mines. *Safety Science, Volume 42, Issue 1, January 2004, pp 23-41.*
- DYNE L.A., 1998, The prediction and occurrence of chimney subsidence in Southwestern Pennsylvania. *Thèse de Master, Virginia Polytechnic Institute and State University.*
- EL-RAMLY H., MORGENSTERN N.R., CRUDEN D.M., 2003, Probabilistic stability analysis of a tailing dyke on presheared clay-shale. *Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, pp 192-208.*
- EL-SHAYEB Y., 1999, Apport de la logique floue à l'évaluation de l'aléa Mouvement de Terrain des sites géotechniques : Propositions pour une méthodologie générale. *Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy, France, 197 pages.*
- FAVRE J.-L., BRUGNOT G., GRESILLON J.-M., JAPPIOT M., 1998, Evaluation des risques naturels, une approche probabiliste ? *Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C-3 295, 34 pages.*

FAVRE J.-L., 2004, Les approches statistique et probabiliste de la susceptibilité des terrains aux grands glissements. *Séminaire INERIS « Une approche probabiliste des risques : Pourquoi ? Comment ? », 1^{er} octobre 2004, 18 pages.*

FENTON G.A., GRIFFITHS D.V., Probabilistic Foundation Settlement on a Spatially Random Soil. *ASCE Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 128(5), pp 381–390.

FOUGERON J., 2005, Effondrement/Affaissement. Rôle et influence de la couverture dans le cas des mines de fer en Lorraine. *Rapport LAEGO/ENSG LG.JF.SOS.PSI.RPRE.05.0338.B., rapport GISOS n°113.*

GISOS (Collectif), 2005, Synthèse des travaux réalisés sur le site pilote de Tressange 2002-2004. *Rapport LAEGO/ENSG LG.FH.SOS.PSI.RPRE.04.0603.B., rapport GISOS n°97.*

GRIFFITHS D.V., FENTON G.A., LEMONS C.B., 2002, Probabilistic analysis of underground pillar stability. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp 775-791.

GRGIC D., 2001, Modélisation du comportement à court et à long terme des roches de la formation ferrifère lorraine. *Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, 269 pages.*

GUZZETTI F., REICHENBACH P., WIECZOREK G.F., 2003, Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, pp 491-503.

HACK H.R.G.K., PRICE D.G., RENGERS N., 2003, A new approach to rock slope stability – a probability classification (SSPC). *Bulletin Engineering Geology Environment*, Vol. 62, pp 167-185.

HANTZ D., DUSSAUGE-PEISSER C., JEANNIN M., VENGEON J.-M., 2002, Danger d'éboulements rocheux: de l'opinion d'expert à une évolution qualitative. *Symposium « Geomorphology : from expert opinion to modelling », Strasbourg, 2002.*

HANTZ D., VENGEON J.-M., DUSSAUGE-PEISSER C., 2003, An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, pp 693-701.

HARR M.E., 1987, Reliability-based design in Civil Engineering. *New York, McGraw-Hill.*

HEASLEY K.A., 1998, Numerical modeling of coal mines with a laminated displacement-discontinuity code. *Thèse de doctorat, Colorado School of Mines, 187 pages.*

HEITFELD M., MAINZ M., SCHETELIG K., 2005, Post mining hazard assessment in North Rhine-Westphalia (Germany) at the example of the Aachen hard coal mining district. *Colloque International Post mining 2005, 16-18 novembre 2005, Nancy, France, CD-Rom.*

HELAL H.M., 1982, Etude et développement d'une méthode de mesure des contraintes par surcarottage. Applications à l'étude de stabilité d'ouvrages souterrains. *Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy.*

HOEK E., 2000, Practical Rock Engineering. *Consulté en ligne le 24/08/2007 <www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>*

HOFER E., 1996, When to separate uncertainties and when not to separate. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 54, pp 113-118.

HUISMAN M., HACK H.R.G.K., NIEUWENHUIS J.D., 2006, Predicting rock mass decay in engineering lifetimes: the influence of slope aspect and climate. *Environmental & Engineering Geoscience*, Vol. XII, No. 1, Février 2006, pp 39-51.

HUSEIN MALKAWI A.I., HASSAN W.F., ABDULLA F.A., 2000, Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural Safety*, Vol. 22, pp 161-187.

HUTCHINSON D.J., PHILLIPS C., CASCANTE G., 2002, Risk considerations for crown pillar assessment for mine closure planning. *Geotechnical and Geological Engineering* 20, pp 41-63.

INERIS (Collectif), 2004, L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique – volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. *Rapport INERIS DRS-04-51198-R01*, sous la direction de l'INERIS, 125 pages.

KEMENY J., 2003, The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: a fracture mechanics approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(1), pp 27-38.

KIM K., GAO H., 1995, Probabilistic Approaches to Estimating Variation in the Mechanical Properties of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. Vol. 32, No 2, pp. 110-120.

KOTYRBA A., 2005, A study of sinkhole hazard at area of locked colliery. *Colloque International Post mining 2005*, 16-18 novembre 2005, Nancy, France, CD-Rom.

KUO Y.L., JAKSA M.B., KAGGWA W.S., FENTON G.A., GRIFFITHS D.V., GOLDSWORTHY J.S., 2004, Probabilistic analysis of multi-layered soil effects on shallow foundation settlement. *Proceedings, 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Auckland*.

La Voix du Jura, 2005, Grozon : un coup dur pour le village. *Article de journal, Alain Buzon, La Voix du Jura*, numéro du 23 juin 2005.

LACOURT C., 2005, Proposition pour une formule de résistance pour les piliers des mines de fer de Lorraine. *Rapport de projet de 2^{nde} année, Ecole des Mines de Nancy*.

LAPLACE P.-S. (de), 1825, Essai Philosophique sur les Probabilités. 5^{ème} édition, Bachelier, Paris.

Larousse en trois volumes, 1966. *Librairie Larousse, Paris, ISBN 2-03-000820-6*.

Le Petit Robert, 1993. *Dictionnaires Le Robert, Paris, ISBN 2-85036-668-4*.

LIU J., LI Z., ZHANG Z., 2004, Stability analysis of block in the surrounding rock mass of a large underground excavation. *Tunnelling and Underground Space Technology* Vol. 19, pp 35-44.

MADDEN B.J., 1991, A re-assessment of coal pillar design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Janvier 1991.

MAQUAIRE O., THIERY Y., MALET J.-P., PUISSANT A., 2006, Evaluation et cartographie par SIG du risque 'glissement de terrain'. Application aux Alpes du Sud. *Congrès Interactions Nature-Société – Analyse et Modèles. UMR CNRS 6554 LETG, La Baule 2006*.

MATHERON G., 1962, Traité de géostatistique appliquée. *Technip, Paris*.

MATHESON G.M., 1986, Boulder County subsidence investigation. *Dames and Moore, Report, for Colorado Department of natural Resources, Mined and Land Reclamation Division, Denver, Colorado*.

MERAD M.M., 2003, Apport des méthodes d'aide multicritère à la décision pour l'analyse et la gestion des risques liés aux mouvements de terrains induits par les ouvrages souterrains. *Thèse de doctorat de l'Université Paris-Dauphine, Octobre 2003*.

MERAD M.M., SALMON R., 2004, Apport des méthodes d'aide multicritère à la décision pour l'analyse et la gestion des risques liés aux mouvements de terrains induits par les ouvrages souterrains. *Rapport INERIS DRS-04-56178/R01, Programme EAT-DRS-03 thème 4, 6 juillet 2004, 22 pages.*

METEO FRANCE, 2007, site Internet. *Consulté en ligne le 24/08/2007 <www.meteofrance.com>*

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2007, Site Internet. *Consulté en ligne le 24/08/2007 <www.ecologie.gouv.fr/rubrique.php?id_rubrique=67>*

MONOD J., 1973, Le Hasard et la Nécessité. Essais sur la philosophie naturelle de la biologie moderne, *Seuil.*

Ohio Department Of Transportation, State of Ohio (ODOH), 1998, Manual for Abandoned Underground Mine Inventory and Risk Assessment (AUMIRA). *Consulté en ligne le 24/08/2007 <<http://www.dot.state.oh.us/mines/MineManual/HTML/Main.htm>>.*

PARK H., WEST T.R., 2001, Development of a probabilistic approach for wedge failure. *Engineering Geology, Vol. 59, pp 233-251.*

PASTEUR L., 1888, Rapport sur l'utilisation des eaux d'égout de Paris.

PAULY J.-C., PAYANY M., 2002, Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin géographique. Cas des gorges du Tarn et de la Jonte (Lozère). *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 236, janvier-février 2002, réf 4406, pp 37-57.*

PEIRCE C.S., 1998, Chance, love, and logic : philosophical essays. *University of Nebraska Press, Lincoln and London.*

PENG S.S., 1992, Surface subsidence engineering. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.*

PHOON K.K., 2004, Towards reliability-based design for geotechnical engineering. *Special lecture for Korean Geotechnical Society, Seoul, 9 July 2004.*

PIGUET J.-P., 1983, La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation minière. *Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 163 pages.*

PIGUET J.-P., 2000, Méthodologie minière (fascicules 1 et 2). *Ecole des Mines de Nancy.*

PILCH N., SALMON R., 2005, Concession de Trémuson, Mines de Plomb, Zinc et Argent des Côtes d'Armor. Evaluation des aléas « mouvements de terrain ». *Rapport d'étude INERIS DRS-05-56321/R01 pour le compte de GEODERIS, 81 pages.*

POINCARÉ H., 1908, Science et Méthodes, *Flammarion.*

POULARD F., SALMON R., 2002, Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. *Rapport INERIS DRS-02-25304/R02, Programme EAT-DRS-03, 62 pages.*

Préfecture de la Région Lorraine, 2003, Le bassin ferrifère – « Etat des lieux » au 20 février 2003. *Consulté en ligne le 24/08/2007 <<http://www.crlorraine.fr/crlorraine/sites/crlorraine/repositories/repository/leconseilrgional/missionamenagementdute rritoire/aprsmines/etudesetrappports/etatdeslieuxbfprefecture>>*

Préfecture de la Région Lorraine, 2005, L'Après Mine dans le Bassin Ferrifère Lorrain – octobre 2005. *Consulté en ligne le 24/08/2007<<http://www.lorraine.drire.gouv.fr/mines/pdf/BilanBassinFer.pdf>>*

PRIM.NET, 2007, Portail de la prévention des risques majeurs. *Consulté en ligne le 24/08/2007 <www.prim.net>*

- RAAB T., BROSCHE F.J., 1996, Uncertainty, subjectivity, experience: a comparative pilot study. *Engineering Geology*, Vol. 44, pp 129-145.
- RICHARDS L., MAZENGARB C., BEETHAM D., BRATHEWAITE B., SMITH W., 2002, Waihi Underground Mine Workings Stage II Investigations (Risk Assessment & Mitigation). New Zealand: Hauraki District Council. Consulté en ligne le 24/08/2007 <<http://www.hauraki-dc.govt.nz/news/Mining-issues/MineWorkingsReport/>>
- ROGERS M.D., 2003, Risk Analysis under Uncertainty, the Precautionary Principle, and the New EU Chemicals Strategy. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 37, pp 370-381.
- ROMMENS C., CHOINACKI E., MERLE-SZEREMETA A., BRENOT J., SUGIER A., 2002, La nécessaire prise en compte des incertitudes dans les évaluations du risque : l'exemple du Groupe radioécologie du Nord-Cotentin (GRNC). *Environnement, Risques & Santé*, Vol. 1, n° 5-6, nov.-déc. 2002.
- ROSENBLUETH E., 1975, Point estimates for probability moments. *Proceedings, National Academy of Science* 72 (10), pp 3812-3814.
- SAINT GEORGE J., 2006, Communication personnelle.
- SALAMON M.D.G., MUNRO A.H., 1967, A study of the strength of coal pillars. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Septembre 1967.
- SALAMON M.D.G., ORAVECZ K.I., 1976, Rock Mechanics in Coal Mining. *Chamber of Mines of South Africa*, 1976.
- SALMON R., 2004, Intercomparaison de méthodes d'évaluation et de hiérarchisation des risques de mouvement de terrain. *Rapport INERIS DRS-04-56405/R03, Programme EAT-DRS-02, Sous-thème 1.4, 28 pages.*
- SCHWARTZMANN R., TRITSCH J.-J., 1991, Analyse succincte de la répartition des fontis sur la commune de Chanteloup-les-Vignes (78). *Compte-rendu INERIS GAI-RSh-JTr/JS, 71-2027/R04, 4 pages.*
- SINGH N.K., VICK S.G., 2003, Probabilistic rockfall hazard assessment for roadways in mountainous terrain. *3rd Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards. Sheraton Hotel. Edmonton, Alberta, Canada. 9-10 juin 2003.*
- STASSEN P., 1982, La mécanique des massifs rocheux appliquée à l'exploitation des mines. *Presses universitaires de Liège. Faculté des sciences appliquées – Exploitation des mines.*
- STEAD D., COGGAN J.S., EBERHARDT E., 2004, Realistic simulation of rock slope failure mechanisms: the need to incorporate principles of fracture mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 41, No. 3, CD-ROM.
- SWIFT G.M., REDDISH D.J., 2002, Stability problems associated with an abandoned ironstone mine. *Bulletin Engineering Geology Environment*, Vol. 61, pp 227-239.
- TIMOSHENKO S.P., 1961, Théorie des plaques et coques. *Editions Béranger, 579 pages.*
- TREBUCQ S., THORAVAL A., 2001, Description des mécanismes d'instabilité dans les carrières de gypse – application particulière au cas de la carrière de Grozon. *Rapport INERIS-DRS-01-25310/RN01, Programme DRS 02, 22 pages.*
- TRITSCH J.-J., TOULEMONT M., DURVILLE J.-L., POTERAT P., 2002, Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. *Guide Technique LCPC/INERIS/MATE, Collection Environnement – Risques naturels, LCPC Editions, 130 pages.*

- TRITSCH J.-J., 2004, Analyse des mécanismes de rupture des cavités souterraines isolées dites marnières, *Rapport INERIS DRS-04-45820/R01, Programme EAT-DRS-02, sous-thème 1.3, 73 pages.*
- US Army Corps of Engineers, 1999, Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies. *Engineer Technical Letter, 1102-2-556, 28 May 1999.*
- VAN BESIEN A.C., ROCKAWAY J.D., 1988, Influence of overburden on subsidence development over room and pillar coal mines. *Engineering Geology of Underground Movements. Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 5, pp 215-219.*
- VAN DER MERWE J.N., MADDEN B.J., 2002, Rock Engineering for Underground Coal Mining. *South African Institute of Mining and Metallurgy Special Publications Series No. 7.*
- VAN DER MERWE J.N., 2003a, New pillar strength formula for South African coal. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 103 (5), Juin 2003, pp 281-292.*
- VAN DER MERWE J.N., 2003b, Predicting coal life pillar in South Africa. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 103 (5), Juin 2003, pp 293-302.*
- VAN DER MERWE J.N., 2004a, Stability assessment of surface over Middelbult colliery mine workings. *Rapport d'étude, Stable Strata Consulting, 11 pages.*
- VAN DER MERWE J.N., 2004b, Verification of pillar life prediction. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 104 (11), Décembre 2004, pp 667-675.*
- VAN DER MERWE J.N., 2006a, South African coal pillar database. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 106 (2), Février 2006, pp 115-128.*
- VAN DER MERWE J.N., 2006b, Beyond Coalbrook: Critical review of coal strata control developments in South Africa. *Proceedings of the 25th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia, August 2006.*
- VAN DER SLUIJS J.P., RISBEY J.S., KLOPROGGE P., RAVETZ J.R., FUNTOWICZ S.O., QUINTANA S.C., PEREIRA A.G., DE MARCHI B., PETERSEN A.C., JANSSEN P.H.M., HOPPE R., HUIJS S.W.F., 2003, RIVM/MNP Guidance for Uncertainty Assessment and Communication – Detailed Guidance. *Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Department of Science Technology and Society, Utrecht University, The Netherlands.*
- VERDEL T., ABDALLAH M., 2007, Etude de comportement d'un mur en maçonnerie, sous l'effet d'un mouvement de terrain induit par un affaissement minier, par la méthodologie des plans d'expérience et des surfaces de réponse. *Engineering Structures, Soumise.*
- WALKER W.E., HARREMOËS P., ROTMANS J., VAN DER SLUIJS J.P. VAN ASSELT M.B.A., JANSSEN P., KRAYER VAN KRAUSS M.P., 2003, Defining Uncertainty: a Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment, Vol. 4, No. 1., pp 5-17.*
- WANG J., TAN W., FENG S., ZHOU R., 2000, Reliability analysis of an open pit coal mine slope. *Technical Note, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 37, pp 715-721.*
- WILLOWS, R.I. et CONNELL, R.K. (Eds.), 2003, Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making. *UKCIP Technical Report. UKCIP, Oxford.*
- YARAHMADI-BAFGHI A.R. et VERDEL T., 2003, The probabilistic key-group method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, N°28, pp 899-917.*
- ZADEH L.A., 1965, Fuzzy Sets. *Information and Control. Vol 8, pp 338-353.*

ANNEXE 1. MOYENNE ET VARIANCE D'UN ENSEMBLE DE LISTES CONCATENEES

Soient A et B deux listes composées respectivement de n et m estimations du facteur de sécurité d'un pilier menées en utilisant respectivement les modèles R_A et S_A , et R_B et S_B pour évaluer la résistance du pilier et la contrainte qui s'exerce sur lui.

On note $\mu(A)$ et $\mu(B)$, les moyennes de A et B, et $\sigma^2(A)$ et $\sigma^2(B)$ leurs variances.

Soit C la liste formée par la concaténation des deux listes A et B. C contient $n + m$ valeurs. On note :

$$C = \{c_i\}, \text{ pour } i \text{ de } 1 \text{ à } n + m.$$

$$C = \{c_i\} = \underbrace{\{a_1, a_2, \dots, a_n\}}_{n \text{ valeurs}} \underbrace{\{b_1, \dots, b_m\}}_{m \text{ valeurs}}$$

L'objet de cette annexe est d'exprimer la moyenne et la variance de C en fonction des moyennes et variances de A et B. Les résultats pourront être étendus à un nombre de listes plus important.

Rappel sur les formules de la moyenne et de la variance d'une liste X

Soit X une liste composée d'éléments x_i .

La moyenne $\mu(X)$ vaut :

$$\mu(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Eq. A.1})$$

Et sa variance $\sigma^2(X)$ vaut :

$$\sigma^2(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\mu(X))^2 \quad (\text{Eq. A.2})$$

Exprimée de manière moins formelle, la variance de X est égale à la « moyenne des carrés des x_i » moins le « carré de la moyenne des x_i ».

Expression de la moyenne de C

Utilisant la relation (Eq. A.1), on a :

$$\mu(C) = \frac{1}{n+m} \sum_{i=1}^{n+m} c_i = \frac{1}{n+m} \left(\sum_{i=1}^n c_i + \sum_{i=n+1}^{n+m} c_i \right) = \frac{1}{n+m} \left(\sum_{i=1}^n a_i + \sum_{j=1}^m b_j \right)$$

Soit

$$\boxed{\mu(C) = \frac{n \mu(A) + m \mu(B)}{n + m}}$$

Expression de la variance de C

Utilisant la relation (Eq. A.2), on a :

$$\sigma^2(C) = \frac{1}{n+m} \sum_{i=1}^{n+m} c_i^2 - (\mu(C))^2 = \frac{1}{n+m} \left(\sum_{i=1}^n a_i^2 + \sum_{j=1}^m b_j^2 \right) - (\mu(C))^2$$

Or, toujours d'après (Eq A.2), $\sum_{i=1}^n a_i^2 = n (\sigma^2(A) + \mu(A)^2)$ et $\sum_{j=1}^m b_j^2 = m (\sigma^2(B) + \mu(B)^2)$

Alors
$$\sigma^2(C) = \frac{n (\sigma^2(A) + (\mu(A))^2) + m (\sigma^2(B) + (\mu(B))^2)}{n+m} - \left(\frac{n \mu(A) + m \mu(B)}{n+m} \right)^2$$

Enfin
$$\sigma^2(C) = \frac{n \sigma^2(A) + m \sigma^2(B)}{n+m} + \frac{n (\mu(A))^2 + m (\mu(B))^2}{n+m} - \left(\frac{n \mu(A) + m \mu(B)}{n+m} \right)^2$$

Noté autrement,
$$\sigma^2(C) = \underbrace{\left[\frac{n \sigma^2(A) + m \sigma^2(B)}{n+m} \right]}_{\text{Variance « intragroupe »}} + \underbrace{\left[\frac{n (\mu(A))^2 + m (\mu(B))^2}{n+m} - \left(\frac{n \mu(A) + m \mu(B)}{n+m} \right)^2 \right]}_{\text{variance « intergroupe »}}$$

Le premier membre du terme de droite correspond à la variance « **intragroupe** ». Plus pratiquement, ce terme correspond à la moyenne des variances de chacune des listes. Il représente la dispersion des valeurs autour des moyennes pour chacun des groupes.

Le second membre correspond à la variance « **intergroupe** ». C'est la variance entre les moyennes des listes A et B (on reconnaît en effet la différence entre la moyenne des carrés des moyennes des listes A et B et la carré de la moyenne des moyennes des listes A et B). Cette variance représente pratiquement la dispersion des moyennes de chacun des groupes.

On retrouve en fait là le théorème de Huygens : la variance totale est égale à la somme de la variance *intragroupe* et de la variance *intergroupe*.

Simplification dans notre étude

Dans notre étude, le nombre de simulations ayant permis d'obtenir les listes A et B est le même. Alors $n = m$.

De là, on obtient que

$$\mu(C) = \frac{\mu(A) + \mu(B)}{2} \text{ et } \sigma^2(C) = \left[\frac{\sigma^2(A) + \sigma^2(B)}{2} \right] + \left[\frac{(\mu(A))^2 + (\mu(B))^2}{2} - \left(\frac{\mu(A) + \mu(B)}{2} \right)^2 \right]$$

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Daniel BOISSIER, Professeur, Polytech'Clermont, Université Blaise Pascal, Aubière

Monsieur Hani MITRI, Professeur, McGill University, Montréal, Québec, Canada

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur CAUVIN Maxime

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

**"Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité dans les études de risques liés
au sol et au sous-sol"**

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Génie civil - hydrosystèmes - géotechnique** »

Fait à Vandoeuvre, le 10 décembre 2007

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAUREN



NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANCEUVRE CEDEX