



HAL
open science

Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides (H₂O, CO₂) dans leur processus d'altération

Alice Saad

► **To cite this version:**

Alice Saad. Influence du changement climatique et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés : rôle des fluides (H₂O, CO₂) dans leur processus d'altération. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT : 2011PEST1117 . tel-00657462

HAL Id: tel-00657462

<https://theses.hal.science/tel-00657462>

Submitted on 6 Jan 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES, INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

Thèse de doctorat

Géotechnique

SAAD ALICE

**INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES CONDITIONS EXTREMES
SUR LES MASSIFS FRACTURES. ROLE DES FLUIDES DANS LEUR PROCESSUS
D'ALTERATION**

Thèse dirigée par Jeanne-Sylvine Guédon

Soutenue le 21 septembre 2011

Jury :

Patrick Dudoignon	Président du jury	Université de Poitiers
Didier Hantz	Rapporteur	Université Joseph Fourier
Christian Schroeder	Rapporteur	Université Libre de Bruxelles
Dominique Fourmaintraux	Examineur	DFINGENIERIE
Thierry Winiarski	Examineur	ENTPE
Jeanne-Sylvine Guédon	Directrice de thèse	Ifsttar
Jean-Didier Mertz	Invité	LRMH
Marion Bost	Invitée	Ifsttar

RESUME

L'objectif de ce travail est de comprendre le processus d'altération des calcaires oolithiques et d'estimer leur cinétique d'altération en fonction des conditions climatiques présentes en France. Pour y répondre, des cycles de vieillissement accéléré, basés sur les paramètres issus de l'étude bibliographique et sur les données de température et de précipitations réelles, ont été définis. Ensuite, des lots d'échantillons de deux calcaires oolithiques ont subis ces vieillissements. Les mesures réalisées pour déterminer l'endommagement ont été choisies en fonction de leurs caractéristiques métrologiques et de leur pertinence. Les résultats obtenus ont été comparés avec les mêmes mesures réalisées sur des calcaires altérés de façon naturelle prélevés sur site. Ainsi, les liens entre le processus d'altération des calcaires et leurs caractéristiques mécaniques, physiques et surtout microstructurales ont été établis. Cette analyse a également abouti à des cinétiques d'altération. Les résultats ont été validés par l'étude d'un autre calcaire oolithique sous d'autres conditions climatiques. Enfin, l'influence de changements climatiques éventuels sur les cinétiques d'altération peut être évaluée à l'aide d'un outil statistique.

TITLE

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE AND EXTREME CONDITIONS ON FRACTURED ROCK MASS. ROLE OF FLUIDS IN ITS WEATHERING PROCESS

ABSTRACT

The objective of this work is to understand the weathering process of oolitic limestone and estimate their weathering kinetics under French climatic conditions. Accelerated ageing cycles, based on parameters deduced from a literature review and on temperature and precipitation data, have been defined. Then samples of two oolitic limestones have undergone these ageing. The measurements used to determine damage were chosen based on their metrological characteristics and their relevance. The results were compared with the same measurements performed on naturally weathered limestone. Thus, the relationships between the weathering process of oolitic limestone and their mechanical, physical and microstructural characteristics have been established. This analysis also led to weathering kinetics. The results were validated by the study of another oolitic limestone under different climatic conditions. Finally, the influence of a potential climate change on the weathering kinetics was determined using a statistical tool.

MOTS-CLES

Massif calcaire, climat, gel-dégel, dissolution, altération, mesures de laboratoire

KEYWORDS

Limestone, climate, freeze-thaw, dissolution, weathering, laboratory measurements

Cette thèse a été préparée à :

Ifsttar

Département Géotechnique, Eau et Risques

58 boulevard Lefebvre

75015 Paris, France

Table des matières

AVANT PROPOS	7
INTRODUCTION	11
<hr/>	
1. ETUDE DES PARAMETRES EN JEU DANS LE PROCESSUS D'ALTERATION DES CALCAIRES EN CLIMAT TEMPERE	13
<hr/>	
1.1. Processus d'altération des calcaires	15
1.2. Les facteurs d'altération climatiques	19
1.3. Les facteurs d'altération de site	26
1.4. Paramètres	33
1.5. Conclusion : cadre de l'étude	36
<hr/>	
2. DES DONNEES DE SITE AU LABORATOIRE	41
<hr/>	
2.1. Choix des zones géographiques et des calcaires de référence	43
2.2. Description des sites étudiés	45
2.3. Cycles annuel d'altération accélérés retenus en laboratoire	53
2.4. Conclusion	72
<hr/>	
3. CHOIX DES METHODES DE MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT ET D'OBSERVATIONS DE L'ALTERATION EN LABORATOIRE	75
<hr/>	
3.1. Considérations métrologiques	77
3.2. Mesure des propriétés mécaniques	78
3.3. Mesure des propriétés physiques	85
3.4. Observations de l'altération	88
3.5. Conclusion	91
<hr/>	
4. ESSAIS DE FAISABILITE POUR L'EVALUATION ET LA MISE EN EVIDENCE DE L'ENDOMMAGEMENT EN LABORATOIRE	99
<hr/>	
4.1. Endommagement en fonction de chacun des phénomènes d'altération étudiés	101
4.2. Endommagement par étapes successives	114
4.3. Conclusion	116

5. PROCESSUS D'ALTERATION DES CALCAIRES DE REFERENCE	123
5.1. Technique d'obtention des résultats	125
5.2. Processus d'altération du calcaire de Chamesson en Bourgogne	126
5.3. Processus d'altération de la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon	145
5.4. Conclusion	167
6. COMPORTEMENT A LA FISSURATION ET CINETIQUES D'ALTERATION	169
6.1. Evaluation du comportement vis-à-vis de la fissuration	171
6.2. Moyen d'obtention des cinétiques d'altération	179
6.3. Cinétiques d'altération des calcaires de référence	185
6.4. Conclusion	192
7. VALIDATION DES RESULTATS A L'AIDE D'UN AUTRE CALCAIRE SOUS UN AUTRE CLIMAT	195
7.1. Le calcaire de Vilhonneur en Poitou-Charentes	196
7.2. Validation des cinétiques d'altération	200
7.3. Validation du processus d'altération	204
7.4. Conclusion	211
8. PREVISION DE LA DUREE DE VIE DES CALCAIRES EN FONCTION DU CLIMAT	213
8.1. Prévision de l'impact du climat sur l'altération des calcaires	214
8.2. Prévision de l'impact des changements climatiques sur l'altération des calcaires	228
8.3. Conclusion	231
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	233
BIBLIOGRAPHIE	239
ANNEXES	247
RESUME	281

Avant propos

Ce sujet de recherche comprend différents termes (changements climatiques, conditions extrêmes, massifs fracturés, rôle de l'eau, phénomènes d'altération) donnant un cadre général à l'étude qui a été menée. Il s'agit d'une thèse expérimentale qui fait intervenir de nombreux paramètres. Les mots-clés du sujet méritent donc, avant tout approfondissement, d'être définis. Ces définitions permettront de donner un cadre précis à ce travail et de justifier les choix de ce cadre. Cet avant propos évitera donc toute ambiguïté vis-à-vis des attentes du lecteur.

Cadre

➤ Le climat

○ Définition

Le climat correspond à une **représentation statistique de certaines quantités caractéristiques** (température, précipitations ...) sur des durées allant du mois au million d'années. Le climat correspond donc à un état « moyen » d'un système complexe, appelé système climatique, qui comprend cinq composantes majeures interagissant entre elles (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, biosphère et surface terrestre) et influencées par des phénomènes externes tels l'ensoleillement, l'orbite terrestre et l'activité humaine (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). La complexité d'un tel système, et le fait notamment que ses différentes composantes ont des temps de réponse différents à un changement d'état, fait que le climat n'est pas figé mais varie en fonction du temps et de l'échelle considérée. C'est ce que l'on appelle la **variabilité climatique**. Ce **comportement non linéaire** du système entraîne une évolution parfois chaotique de celui-ci pouvant mener à ce que l'on appelle des **événements extrêmes** (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

○ Les conditions extrêmes

Les événements extrêmes sont à considérer selon deux échelles (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) :

- Echelle **spatiale** tout d'abord, car un événement extrême à un endroit donné ne l'est plus à un autre endroit (c'est le cas de précipitations, dont le débit serait exceptionnel en Europe, mais normal en climat équatorial).

- Echelle **temporelle** ensuite, car l'échelle de temps d'un événement extrême peut être variable, de quelques heures (orages) à plusieurs jours (vague de chaleur, froid intense), voire mois ou années (sécheresse) selon le phénomène considéré. De plus, il est nécessaire d'adopter l'échelle de temps adéquate à un événement extrême particulier (un orage, même intense, ne sera pas forcément visible sur des statistiques de pluviométrie annuelle).

Les événements climatiques extrêmes sont donc des **phénomènes météorologiques localisés, à la fois dans l'espace et le temps**, provenant essentiellement de la non linéarité et la complexité du système climatique et de la variabilité qui en découle.

○ Les changements climatiques

Il est désormais admis que le climat est soumis à **différents changements** (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007) au niveau de la **température**, du niveau des **précipitations**, et de la fréquence des tempêtes. Par exemple pour la température, on observe une hausse moyenne à la surface du globe de presque 0,8°C au cours des cents dernières années (Figure 1).

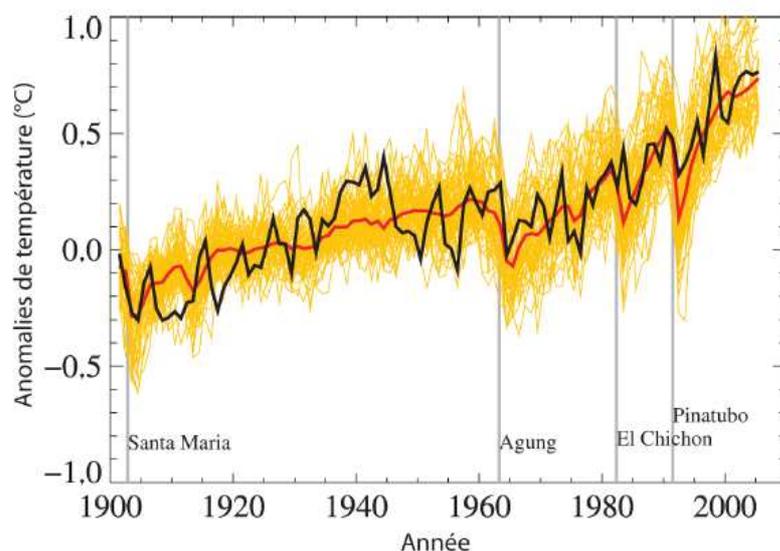


Figure 1 Moyenne mondiale des températures en surface au cours du XXe siècle (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Les anomalies de températures sont indiquées par rapport aux moyennes pour la période de 1901-1950. En noir : observations. En jaune : obtenues au moyen de 58 simulations effectuées par 14 modèles climatiques différents basés sur les facteurs d'origines naturelle et humaine qui influencent le climat. En rouge : moyenne de ces simulations. Lignes verticales : date des éruptions volcaniques majeures

➤ Le massif rocheux fracturé

Le massif rocheux se compose :

- d'un **squelette rocheux**

Selon le Larousse, il s'agit d'un « matériel chimique soudant entre eux les éléments constitutifs d'une roche » ;

- de **discontinuités** (joints, diaclases, failles ou fractures/fissures, ...).

Les massifs rocheux sont discontinus. Les discontinuités ont en commun une résistance à la traction négligeable ou nulle, une résistance au cisaillement différente de celle du squelette rocheux et une conductivité hydraulique normalement plus grande, d'où découle une influence importante sur les comportements mécanique et hydraulique (Homand et Duffaut, 2000). Ainsi, nous parlerons de **fissures** pour les discontinuités à l'échelle de l'éprouvette de laboratoire et de **fracture** pour les discontinuités à l'échelle du massif rocheux.

➤ L'eau et les phénomènes d'altération

Les phénomènes d'altération sont définis ici comme les événements spécifiques qui mènent à une **modification du massif rocheux**. L'ensemble des phénomènes d'altération conduit au processus d'altération du massif. Son résultat est l'altération.

L'altération est un terme utilisé dans différents contextes. Nous avons choisi de nous baser sur la définition du dictionnaire de Géologie (Foucault et Raoult, 2005). Il définit l'altération de la manière suivante : « modification des propriétés physico-chimiques des minéraux et donc des roches par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines ». Plusieurs éléments jouent donc un rôle dans l'altération : « Elle dépend du climat, de la température des eaux, de

la nature des roches et de leur degré de fracturation ». Concernant son effet sur les roches, l'altération les rend « moins cohérentes ». Par cette perte de cohérence, la « désintégration » de ces roches est facilitée.

L'altération étudiée ici se limite aux surfaces du massif rocheux (c'est-à-dire les premiers centimètres), soit à la surface de la roche et à la surface des épontes des fractures. Nous nous intéressons aux surfaces des massifs car ce sont ces zones qui sont le plus touchées par les variations climatiques.

L'endommagement se détermine par des caractéristiques physiques mesurées sur un matériau dégradé. Donc l'altération en surface du massif conduit à l'endommagement. C'est-à-dire que l'on observe une altération mais l'on mesure un endommagement.

L'eau participe d'un point de vue **physico-chimique** (eau acide, cycles de gel-dégel) au processus d'altération. Notons que l'eau à l'état naturel n'est pas pure. Des composés de l'air ou du sol sont dissous dans celle-ci pour former une solution aqueuse avec différents ions ou composés ioniques. Parmi ceux-ci, on trouve notamment du **dioxyde de carbone dissous** : l'acide carbonique, qui participe à l'acidification de l'eau.

Approche choisie

La quantité d'eau liquide non immobilisée dans les massifs rocheux participe au processus d'altération. Il paraît donc nécessaire d'étudier l'influence de ce fluide sur l'altération des massifs rocheux pour anticiper les conséquences possibles, comme des **chutes de blocs** rocheux. Par ailleurs, la hausse des températures en altitude engendre une baisse de la durée de gel, mais participe probablement à une augmentation de la fréquence de **cycles de gel-dégel**, ce qui serait une source supplémentaire d'endommagement du massif. Le changement climatique ne s'observe pas seulement au niveau de la température. En effet, la distribution et l'intensité des précipitations à la surface du globe semblent se modifier (Terray et Braconnot, 2007). **L'eau des précipitations** constitue également une source de modifications des massifs rocheux dans la mesure où elle est souvent **acidifiée par la pollution atmosphérique**. Il est donc important de mieux connaître l'influence d'une eau ruisselante acide sur une roche.

Les connaissances actuelles ne permettent pas de prédire avec certitude les effets sur les données climatiques dus aux changements climatiques. Nous choisissons donc dans cette étude de regarder **l'état climatique actuel et les différentes possibilités aggravantes** (augmentation des précipitations et des cycles de gel-dégel). Ensuite, les conditions extrêmes étudiées seront limitées aux **événements de gel** (températures négatives) et aux **précipitations**.

Nous avons, de plus, choisi de limiter cette étude à une roche particulièrement sensible à l'eau acide (état naturel de l'eau de pluie) : le **calcaire**. Par ailleurs, pour l'étude des effets du climat, nous souhaitons nous baser sur des données climatiques réelles. Nous souhaitons une région soumise aux cycles de gel-dégel. Nous avons donc choisi la **Bourgogne** et son climat océanique à tendance continentale. Nous cherchions également une zone touchée par des périodes de fortes précipitations. Notre choix s'est porté sur le **Languedoc-Roussillon** et son climat méditerranéen. Enfin, le rôle de l'eau est pris en compte dans ses **états liquide et solide**.

Introduction

Les chutes de blocs rocheux causent des dégâts matériels importants et surtout des pertes humaines. Ce risque est actuellement peu prévisible. L'estimation de la probabilité de rupture en fonction du temps est l'une des principales préoccupations en matière de risques liés à l'instabilité des falaises ou de versants rocheux. Or des études ont montré qu'il existe des corrélations entre les conditions climatiques et les chutes de blocs rocheux (Frayssines, 2005; Hantz et al., 2003). Les changements climatiques actuels posent donc de nouvelles questions quant à l'évolution du risque de chute de blocs rocheux.

Ce projet de recherche a pour but d'améliorer les prévisions de rupture d'un bloc rocheux en fonction des conditions climatiques dans lesquels il se trouve et d'évaluer l'impact des changements climatiques sur ce risque de rupture. Une première analyse (cf. Avant propos) a permis de préciser le cadre de travail en l'orientant sur les calcaires et les conditions climatiques présentes en France métropolitaine.

Les calcaires choisis sont des calcaires oolithiques ayant une microstructure et des porosités à l'eau très proches, composés à plus de 99% de calcite mais présentant des sensibilités à la gélivation différentes (d'après l'essai normalisé qui définit la sensibilité à la gélivation d'une pierre en œuvre). L'étude concerne deux calcaires provenant d'un site situé en Bourgogne et d'un site situé dans le Languedoc-Roussillon.

L'objectif plus précis de ce travail est de : *comprendre le processus d'altération des calcaires oolithiques et d'estimer la cinétique d'altération en fonction des conditions climatiques présentes en France métropolitaine.*

Pour répondre à cet objectif, tout d'abord, le **Chapitre 1** vise à déterminer les facteurs climatiques et les facteurs de site entrant en jeu dans le processus d'altération des massifs calcaires par une synthèse bibliographique. Cette synthèse a permis d'aboutir à des paramètres (température de la roche, degré de saturation, qualité de l'eau avant percolation, temps de percolation et débit de l'apport en eau) qu'il est possible de faire varier en laboratoire.

Des cycles de vieillissement accéléré basés sur ces paramètres et sur les données annuelles de température et de précipitations réelles ont été définis dans le **Chapitre 2**, appelés dans le cadre de cette étude, les « cycles annuels d'altération accélérés ». Les deux phénomènes d'altération retenus dans ces cycles sont la dissolution et la gélivation. Des mesures réalisées pour évaluer la cinétique d'altération de ces calcaires et leurs processus d'altération ont été soigneusement choisies en fonction de leurs caractéristiques métrologiques dans le **Chapitre 3** et de leur pertinence vis-à-vis de l'altération dans le **Chapitre 4**. Ainsi, entre chaque cycle, des propriétés mécaniques (fréquence de résonance, vitesse du son, résistance à la compression uniaxiale) et physiques (porosité et perméabilité) sont mesurées. De plus, des observations de l'endommagement sont également faites à l'échelle de l'échantillon (par analyse d'images) et à l'échelle de la microstructure (porosimétrie au mercure et MEB).

Les résultats obtenus en laboratoire à l'issue des cycles annuels d'altération accélérés par dissolution et cycles de gel-dégel sont analysés dans le **Chapitre 5** pour mettre en évidence les liens entre le processus d'altération des calcaires oolithiques et leurs caractéristiques mécaniques, physiques et microstructurales. Cette analyse a également abouti, au **Chapitre 6**, à des cinétiques d'altération dépendant des conditions climatiques aux quelles le calcaire est soumis. L'étude du processus d'altération des calcaires étudiés et les cinétiques d'altération obtenues ont été validés par l'étude d'un troisième calcaire oolithique sous d'autres conditions climatiques en Poitou-Charentes dans le **Chapitre 7**.

La synthèse des conclusions obtenues permet de mettre en place au **Chapitre 8** un réseau bayésien pour estimer la probabilité de rupture d'un calcaire oolithique en fonction des

conditions climatiques et de ces caractéristiques. Ce réseau sert de support pour évaluer l'influence de changements climatiques éventuels sur les cinétiques d'altération. L'organisation des Chapitres est résumée dans la Figure 1.

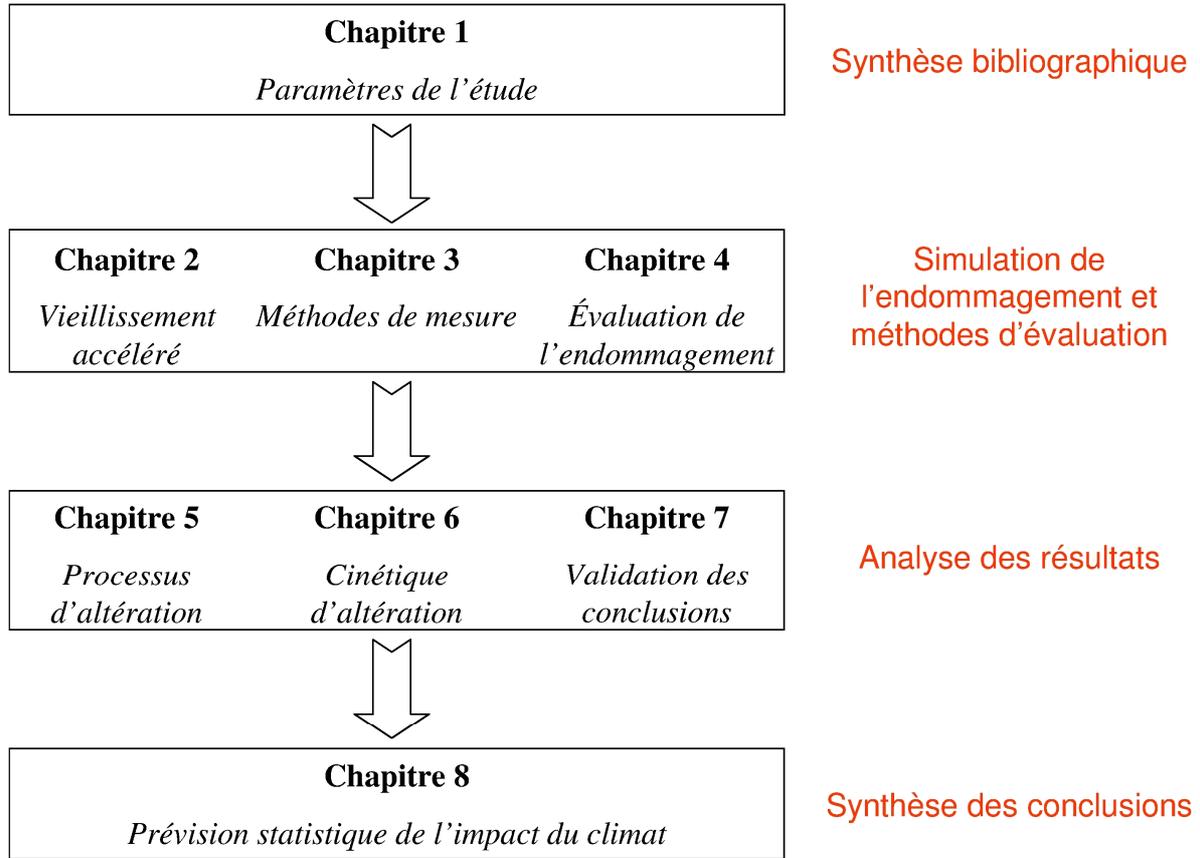


Figure 1 Organisation du mémoire

1. Etude des paramètres en jeu dans le processus d'altération des calcaires en climat tempéré

INTRODUCTION

Ce chapitre vise à préciser les termes du sujet de recherche pour déterminer une façon judicieuse de le traiter en mettant en évidence le rôle majeur de l'eau dans le processus d'altération. Nous avons donc cherché à déterminer :

- l'ensemble des facteurs participant au processus d'altération ;
 - le rôle connu de chacun de ces facteurs dans le processus d'altération ;
 - les paramètres (mesurables ou observables) liés au processus d'altération qui découlent des facteurs d'altération.
-

1. ETUDE DES PARAMETRES EN JEU DANS LE PROCESSUS D'ALTERATION DES CALCAIRES EN CLIMAT TEMPERE	13
1.1. Processus d'altération des calcaires	15
1.1.1. Processus et phénomènes d'altération	15
1.1.1.1. Phénomènes d'altération chimique	15
1.1.1.2. Phénomènes d'altération physico-mécanique	16
1.1.1.3. Synthèse	17
1.1.2. Facteurs d'altération et paramètres	18
1.1.2.1. Facteurs d'altération	18
1.1.2.2. Paramètres	18
1.1.3. Conclusion	18
1.2. Les facteurs d'altération climatiques	19
1.2.1. Définition	19
1.2.1.1. Température	19
1.2.1.2. Précipitations	19
1.2.1.3. Humidité de l'air	20
1.2.1.4. Ensoleillement	20
1.2.1.5. Vent	21
1.2.2. Rôles dans le processus d'altération	22
1.2.3. Liens entre facteurs d'altération climatiques et paramètres en jeu	24
1.2.4. Conclusion	25
1.3. Les facteurs d'altération de site	25
1.3.1. Définition	25
1.3.1.1. Altitude	25
1.3.1.2. Orientation	26
1.3.1.3. Caractéristiques de la roche	27
1.3.1.4. Caractéristiques des fractures	27
1.3.1.5. Présence de végétation	28
1.3.1.6. Présence d'une circulation d'eau	28
1.3.2. Rôles dans le processus d'altération	28
1.3.3. Liens avec les facteurs d'altération climatiques	31
1.3.4. Conclusion	33
1.4. Paramètres	33
1.4.1. Récapitulatif des liens avec les facteurs d'altération	33
1.4.2. Définition	34
1.4.2.1. Paramètres propres au site	34
1.4.2.2. Paramètres liés également au climat	34
1.4.3. Choix des paramètres de l'étude	35
1.5. Conclusion : cadre de l'étude	35

1.1. Processus d'altération des calcaires

1.1.1. Processus et phénomènes d'altération

Cette étude vise à regarder l'altération dans son ensemble, c'est-à-dire en étudiant le processus global. Nous devons néanmoins définir l'ensemble des phénomènes d'altération pour aboutir à un processus global.

1.1.1.1. Phénomènes d'altération chimique

Dissolution

La dissolution consiste en une attaque du calcaire par l'action d'eaux acides, issues des précipitations (Coque, 2008). Elle concerne principalement les roches carbonatées et donc les calcaires qui sont solubles dans l'eau naturelle.

Le carbonate de calcium (CaCO_3) est légèrement soluble dans l'eau pure : la quantité maximale de calcite qui peut être dissoute dans de l'eau pure n'est que de 13 mg/L à 16°C (Salomon, 2006). Mais la solubilité est bien plus grande lorsque l'eau contient du dioxyde de carbone dissous (CO_2). Ce dernier est très soluble dans l'eau pure, cette solubilité obéissant à la loi de Henry selon laquelle elle augmente à mesure que la température décroît et augmente quand la pression s'élève. Au total, cela donne un acide faible, l'acide carbonique (H_2CO_3).

Le dioxyde de carbone se trouve librement dans l'atmosphère à des concentrations de l'ordre de 0,03% par volume, mais dans les sols, sa concentration est bien supérieure : elle peut atteindre fréquemment 2% et même des valeurs records de l'ordre de 10% (Salomon, 2006). Ces fortes teneurs sont la conséquence d'un enrichissement lié à la respiration des racines des plantes et à celle des micro-organismes du sol, enfin et surtout à la décomposition de matière organique. L'eau qui percole au travers du sol traverse cette atmosphère particulière et s'enrichit en CO_2 dissout ce qui a pour résultats de la rendre plus acide. De ce fait, le massif qui se trouve recouvert par un sol est généralement plus atteint par la dissolution que celui qui ne l'est pas.

La dissolution du calcaire peut s'exprimer de la façon suivante (Salomon, 2006) :



Le carbonate de calcium ionise pour donner un cation de calcium et un anion de carbonate.



Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau en donnant de l'acide carbonique qui se dissocie en ions bicarbonates et hydrogène.



Les ions hydrogènes (2), carbonates et bicarbonates et le CO_2 constituent un système dont les équilibres se modifient notamment en fonction du pH (3). Ces équilibres chimiques conditionnent donc les proportions relatives des différents ions du système carbonaté.

On peut résumer le processus comme suit :



La capacité de l'eau à pouvoir dissoudre du carbonate de calcium est désignée sous le nom d'« agressivité » de l'eau. Une eau agressive (ou « sous-saturée » par rapport à CaCO_3) peut être mesurée en considérant le CO_2 libre ou en mesurant la concentration des divers ions de l'eau.

En résumé, les principaux facteurs qui favorisent la dissolution sont (Miserez, 1973):

- l'abondance de l'eau disponible (et surtout son renouvellement) ;
- la présence d'un couvert végétal dense (ce qui engendre la production de CO_2 et d'acides d'origine biologique) ;

- un temps de contact important eau-roche carbonatée (sol jouant le rôle de compresse humide, manteaux neigeux, forte porosité, etc.).

Activité biologique

L'activité biologique comprend la corrosion de la roche par des organismes biologiques. Ces organismes sont apportés par les eaux et le vent (Dévigne, 2008). Les organismes adhérant au massif participent à son altération chimique (Wierzchos et al., 2003) : algues vertes, lichens, champignons, bactéries. Ils produisent une désagrégation et une microdivision de la surface du massif ainsi qu'une attaque chimique par sécrétion d'acide oxalique produit par les lichens comme par les racines des végétaux supérieurs. Les microorganismes peuvent aussi avoir un rôle de couche protectrice limitant les contacts avec d'autres facteurs d'altération, tels que les précipitations (Wierzchos et al., 2003). Les racines des plantes produisent également des acides capables d'attaquer les calcaires (acides humiques, fulviques, etc.) (Salomon, 2006). Les variations de la pression en CO₂ sont aussi très importantes pour le mécanisme de la dissolution ou de la précipitation des calcaires.

1.1.1.2. Phénomènes d'altération physico-mécanique

La dilatation hydrique

La dilatation hydrique concerne les sites où il y a de fortes variations du degré de saturation. Elle a lieu suite à des cycles de saturation-séchage en surface du massif (Pissart et Lautridou, 1983) qui conduisent à une fatigue de la roche suite à des dilatations/contractions micrométriques successives. A la fin du XIX^{ème} siècle, Merrill (1895) évoque déjà l'action de ce phénomène qui produirait un gonflement de la roche. Ce phénomène n'est important qu'en présence d'argiles, l'eau se fixant entre les feuillets d'argiles.

La dilatation thermique

La dilatation thermique concerne les sites où il y a de fortes variations de la température. Les propriétés thermiques du massif conduisent à une fatigue de certaines parties du massif soumises à des cycles thermiques nombreux et de grandes amplitudes. Ces cycles conduisent à des dilatations/contractions micrométriques du matériau. Lorsque les températures sont négatives, en plus de l'expansion volumique de l'eau gelée des pores (cf. gélivation), le massif se contracte (Prick, 1996). Le coefficient de dilatation thermique d'un calcaire est de l'ordre de quelques nm/m/°C.

Gélivation

La gélivation concerne les sites où il y a de l'eau et des températures négatives. Il s'agit de l'action du gel sur les massifs rocheux.

Depuis longtemps le gel a été reconnu et étudié comme un agent important de l'altération des massifs rocheux (Hirschwald, 1912; Thomas, 1938). Quand la température au sein de la roche devient suffisamment basse, l'eau contenue dans les pores peut geler.

Le comportement du gel résulte du couplage entre (Figure 1-1) :

- l'expansion volumique de 9% lors de la transition eau-glace (Prick, 1996)
- les effets d'interphase qui gouvernent le processus de cristallisation via la distribution en taille de pores, l'eau ne gelant pas dans les capillaires les plus fins grâce aux énergies impliquées à l'interface solide-liquide (Remy et al., 1994)
- les transports d'eau surfondue au sein du réseau poreux dont le phénomène de cryosuccion qui entraîne l'eau des sites non gelés vers les pores déjà gelés et le phénomène de pressions hydrauliques développées par l'eau poussée par les cristaux de glace (Thomachot, 2002).

Le gel se manifeste en fait à deux échelles, la microgélivation, qui affecte les réseaux de pores et la macrogélivation, qui concerne les réseaux de fissures (Bost, 2008).

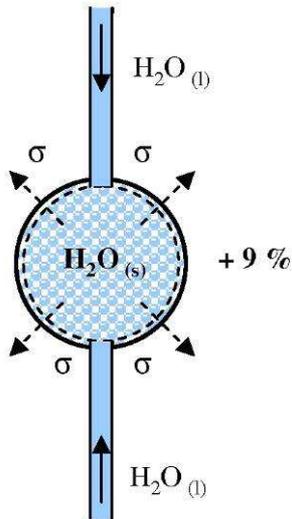


Figure 1-1 Schéma décrivant les actions de l'eau lors de la gélification (d'après Prick (1996), Remy et al. (1994) et Thomachot (2002))

On peut différencier l'action de deux types de cycle de gel-dégel (Norikazu et al., 1999):

- le gel-dégel journalier

Il affecte la roche sur quelques centimètres. Les cycles de gel-dégel journaliers sollicitent les fissures et le réseau poreux par écartement (Matsuoka, 2001). Il s'y ajoute un effet de fatigue de la sollicitation purement thermique lors des multiples variations de température (Ishikawa et al., 2004).

- le gel-dégel saisonnier

Il peut affecter la roche sur plusieurs mètres. Il contribue à l'ouverture et à la propagation des fissures existantes. Il a lieu lors du dégel au printemps : une longue période à température négative suivie d'une hausse de température contribue à l'ouverture et à la propagation des fissures existantes de façon différente au gel-dégel journalier (Bost, 2008).

Dans cette étude, où nous nous intéressons à l'altération en surface, nous ne parlerons donc que de gel-dégel journalier.

Cristallisation des sels

Ce phénomène est étudié depuis le 19^{ème} siècle (Turner, 1833). Le principe de ce phénomène d'altération est, pour simplifier, le sel qui cristallise dans les pores de la roche et cause des contraintes à l'intérieur du réseau poreux. Certains sels sont plus néfastes que d'autres et l'altération dépend aussi de la concentration en sels (Angeli, 2007).

Activité biologique

En plus de son aspect chimique, l'activité biologique participe également à une altération mécanique. En effet, les racines peuvent se développer dans les fractures du massif et en grandissant exercer une contrainte mécanique, jusqu'à 1,5 MPa (IPGP, 2008a), sachant que la résistance en traction d'un calcaire compacte est de l'ordre de 10 MPa (Massonnet et Cescotto, 1994). Ce phénomène d'altération ne sera pas étudié ici.

1.1.1.3. Synthèse

Cette partie a présenté les phénomènes d'altération chimique (dissolution et activité biologique) et physico-mécanique (dilatation hydrique, dilatation thermique, gélification, cristallisation des sels et activité biologique) rencontrés en surface des massifs rocheux (surface de la roche ou surface des épontes des fractures) en zone tempérée (Tableau 1-1).

Phénomène d'altération	Description	Conditions nécessaires
Dissolution	Corrosion des calcaires par des eaux acides	Eau chargée en CO ₂ (acide)
Activité biologique (point de vue chimique)	Corrosion des calcaires par des organismes biologiques	Apport d'organismes biologiques par les eaux ou le vent
Dilatation hydrique	Fatigue de la roche suite à des cycles de saturation-séchage	Variations du degré de saturation
Dilatation thermique	Fatigue de la roche suite à des cycles thermiques	Variations de la température
Gélivation	Fatigue de la roche suite à des cycles de gel-dégel	Présence d'eau et température négative
Cristallisation des sels	Fatigue de la roche suite à des cycles de cristallisation-précipitations	Présence de sels et variations du degré de saturation
Activité biologique (point de vue mécanique)	Pressions générées par le développement des racines des plantes	Présence de plantes

Tableau 1-1 Description des phénomènes d'altération présents en zone tempérée, touchant les massifs calcaires, détaillés dans ce paragraphe

En l'absence de conditions particulières (présence de sels par exemple), les phénomènes d'altération touchant généralement les calcaires sont la dissolution et la gélivation. Nous nous intéressons donc à ces deux phénomènes.

1.1.2. Facteurs d'altération et paramètres

1.1.2.1. Facteurs d'altération

Les facteurs d'altération constituent les éléments qui initient les phénomènes d'altération en les accentuant ou en les diminuant. Dans le cadre de l'altération des massifs rocheux, nous avons choisi de les distinguer en deux types :

- les facteurs climatiques

Les facteurs climatiques sont les facteurs induits par le climat et les phénomènes météorologiques. Ils comprennent donc : la température, les précipitations, l'humidité, l'ensoleillement et le vent

- les facteurs de site

Les facteurs de site sont tous les facteurs liés aux conditions du terrain. Ils comprennent donc : l'altitude, l'orientation du massif, la composition de la roche, les propriétés hydrauliques des fractures, la présence de végétation et la présence d'une circulation d'eau.

Ces deux types de facteurs sont propres à chaque lieu d'observation. Les parties 1.2 et 1.3 sont consacrées à la définition de ces facteurs et à la détermination de leurs rôles dans le processus d'altération.

1.1.2.2. Paramètres

Les paramètres sont des variables que l'on sait contrôler en laboratoire.

Ils dépendent des facteurs d'altération, climatiques et de site, définis précédemment. On pourra donc distinguer les paramètres qui dépendent des facteurs d'altération climatiques de ceux qui ne dépendent que des facteurs d'altération de site.

Ils sont essentiels à l'élaboration du modèle destiné à reproduire en laboratoire des conditions semblables aux conditions réelles, en fonction de facteurs d'altération déterminés. Ce modèle est présenté dans le Chapitre 2 (2.3).

L'étude des facteurs d'altération et de leurs rôles dans le processus d'altération va permettre de déterminer ces paramètres.

1.1.3. Conclusion

Le processus d'altération d'un massif calcaire se compose de phénomènes d'altération chimiques et physico-mécanique. Ces phénomènes d'altération n'ont pas tous la même

importance dans le processus d'altération. De plus ces phénomènes d'altération s'entremêlent. Il est donc difficile de les dissocier. Nous avons donc choisi de considérer le processus d'altération dans son ensemble.

1.2. Les facteurs d'altération climatiques

Nous allons dans cette partie présenter ces facteurs d'altération et leur rôle dans les différents phénomènes d'altération décrits dans la partie précédente.

1.2.1. Définition

1.2.1.1. Température

Les températures sont mesurées, pour la climatologie régionale, sous un abri météorologique standard, ce qui permet d'obtenir des valeurs comparables partout (Durand-Dastès, 2008).

Les variations de température sont un des facteurs climatiques les plus importants influençant l'altération des massifs rocheux (Frayssines, 2005; Bost, 2008). En effet, on peut observer une très bonne corrélation entre les températures minimales moyennes et le nombre de chutes de blocs rocheux observé dans la région grenobloise (Figure 1-2).

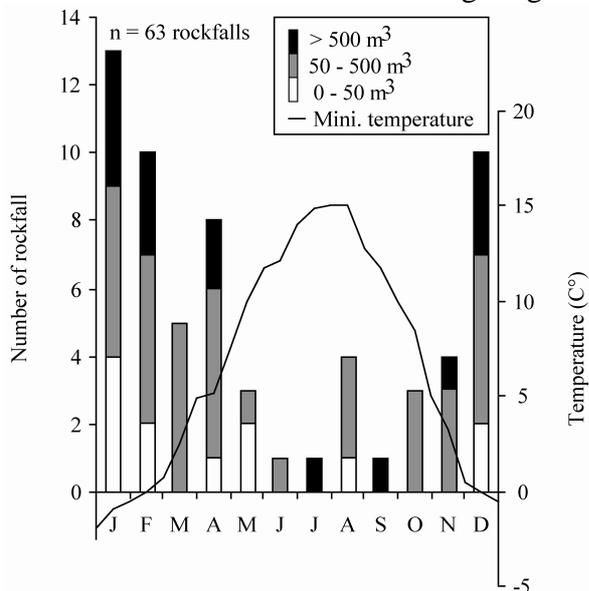


Figure 1-2 Distribution des chutes de blocs rocheux tout au long de l'année pour la période de 1984 à 2004 en fonction de la moyenne des températures minimales de la période 1971-2000 à la station Saint-Martin d'Hères (Frayssines, 2005)

1.2.1.2. Précipitations

Les précipitations correspondent à la pluie, la bruine, la grêle, la neige et le grésil (Durand-Dastès, 2008). Les mesures sont données en hauteur d'eau, évaluées en millimètres quelle que soit la forme des précipitations.

Les précipitations faibles sont à l'origine de l'augmentation du degré de saturation du massif en surface (roche ou fractures). Les précipitations fortes vont entraîner du ruissellement et les infiltrations se font alors sur une faible épaisseur. Les précipitations conditionnent donc en partie le degré de saturation du massif (IPGP, 2008b).

Les eaux de précipitations liquides à l'arrivée au sol se fractionnent en plusieurs composantes qui déterminent le bilan en eau d'une surface élémentaire de sol (Parriaux, 2006) :

- l'évapotranspiration réelle (somme de l'évaporation physique et de la transpiration de la biomasse);
- l'infiltration (quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol);

- le ruissellement (excédent de la pluie qui dépasse la capacité d'évapotranspiration et d'infiltration ; l'eau ruisselle à la surface du sol).

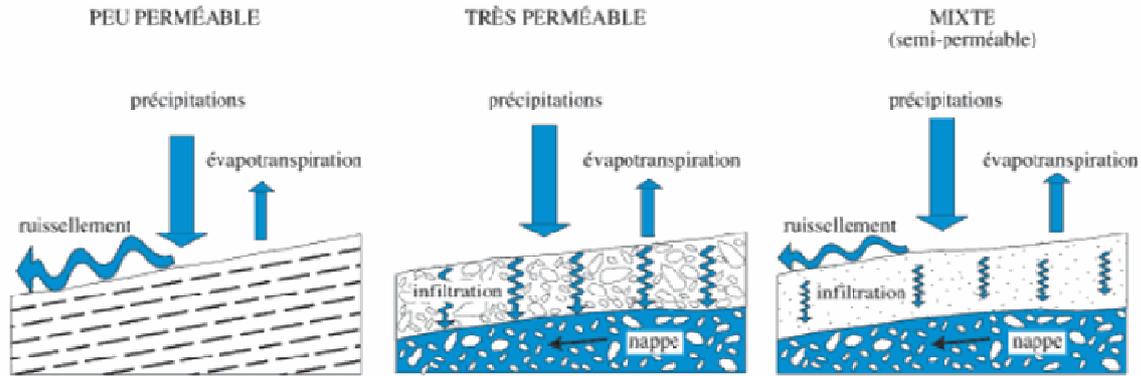


Figure 1-3 Partition eau de surface – eau souterraine en fonction de la perméabilité du massif (Parriaux, 2006)

La quantité de précipitations attribuée à chacune de ces composantes dépend de nombreuses données : climat, pente du terrain, exposition, occupation du sol, présence de drainages, urbanisation, perméabilité du sol et du massif.

Du point de vue de la perméabilité, on peut dire qu'un massif peu perméable aura une infiltration pratiquement nulle et de grands ruissellements (cas des roches argileuses) alors que dans un massif très perméable, toute l'eau s'infiltrate et il n'y a pas de ruissellement (cas des roches karstiques) (Figure 1-3). De plus, en paroi, la vitesse du vent va avoir un impact sur la quantité d'eau reçue par la roche et donc son degré de saturation (Flori, 1989).

La neige constitue un élément particulier des précipitations. En altitude, lors du dégel de printemps, on observe une fonte massive de la neige qui offre une grande quantité d'eau au massif qui était immobilisée pendant l'hiver. La neige participe aussi à la variation du degré de saturation du massif.

1.2.1.3. Humidité de l'air

L'humidité désigne la quantité de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air (Durand-Dastès, 2008). On définit ainsi :

- l'humidité absolue, il s'agit de la teneur en vapeur d'eau de l'air. Elle est limitée par la quantité maximale que l'air peut absorber avant qu'il y ait saturation à une température et une pression données. Il s'agit donc du rapport entre la masse de vapeur d'eau et le volume d'air à la pression et la température considérées.

- l'humidité relative, il s'agit de la mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir à la pression et la température considérées. Si sa valeur est supérieure à 100%, cela génère des précipitations.

Ainsi, l'humidité relative varie lorsque l'on change la température ou la pression alors que l'humidité absolue de l'air reste inchangée.

1.2.1.4. Ensoleillement

L'ensoleillement (ou durée d'insolation), en météorologie, est le temps pendant lequel un lieu est exposé au soleil (Durand-Dastès, 2008). Il est exprimé en heures.

L'ensoleillement accentue d'une part les variations de température et d'autre part favorise l'évaporation et donc diminue le degré de saturation du massif (Durand-Dastès, 2008). Evidemment, ce point est lié également à l'orientation du massif.

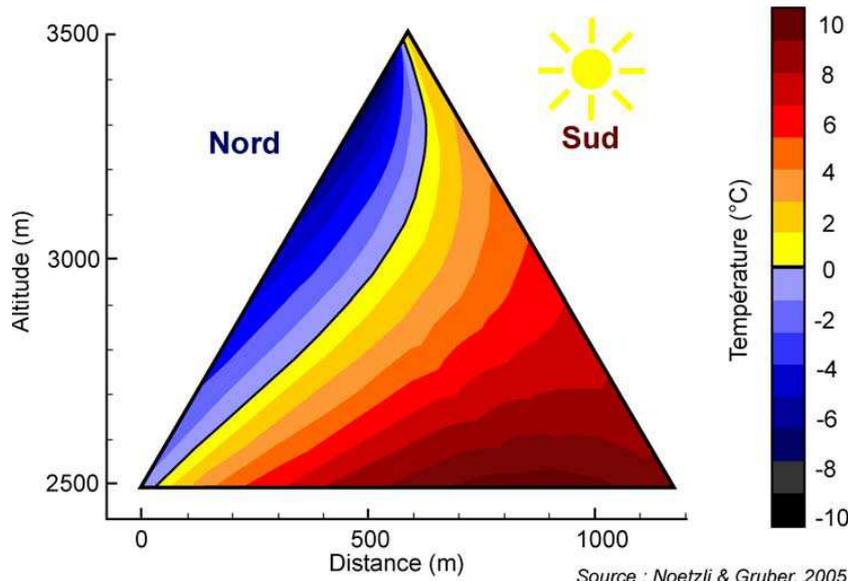


Figure 1-4 Modélisation du champ thermique à l'intérieur d'une montagne en fonction des conditions de surface (altitude et orientation) par un bilan énergétique (Noetzli et Gruber, 2005)

Les températures à l'intérieur d'un massif rocheux sont influencées par (Société Suisse de Géomorphologie, 2007) :

- le rayonnement solaire qui est le principal facteur expliquant les variations spatiales de la température en fonction de l'orientation;
- le déplacement du flux de chaleur par conduction des versants sud (adrets) vers les versants nord (ubacs) (Figure 1-4);
- les variations de la température de l'air, en l'absence de rayonnement solaire.

1.2.1.5. Vent

Le vent se caractérise par une direction et une vitesse (Durand-Dastès, 2008).

Il est considéré comme un facteur d'altération si :

- il est chargé en sels : il peut être alors à l'origine de l'altération par cristallisation des sels. Les zones concernées par ce facteur sont donc les zones côtières ou polluées (sulfates) ;
- on se situe en altitude, alors le foehn (vent fort, chaud et sec, apparaissant quand un vent dominant est entraîné au-dessus d'une chaîne montagneuse et redescend de l'autre côté après l'assèchement de son contenu en vapeur d'eau) peut avoir une influence sur les valeurs de températures (Figure 1-5) et de précipitations (Parriaux, 2006) ;
- il est combiné aux précipitations : il peut avoir une influence sur le degré de saturation de la roche, notamment en paroi dans la mesure où le vent donne une direction aux précipitations (Flori, 1989).

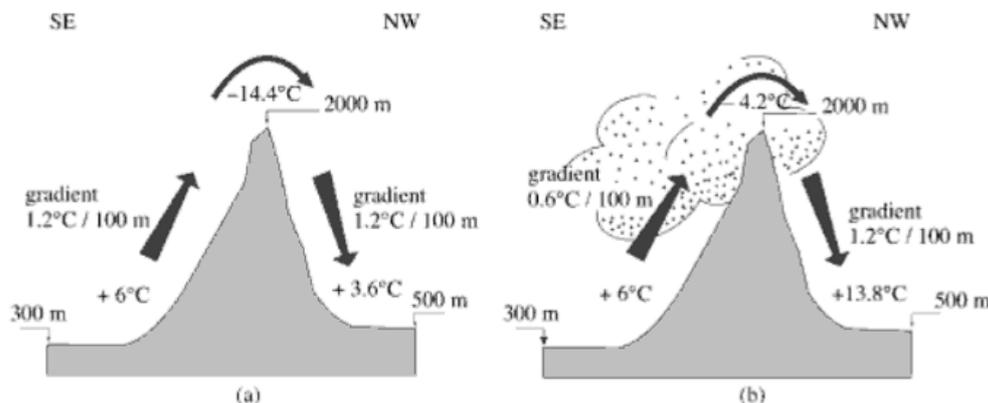


Figure 1-5 Effet climatique du franchissement d'une chaîne de montagnes par les courants atmosphériques de foehn. (a) cas d'un air sec, sans effet de foehn. (b) cas d'un air humide, avec effet de foehn (Parriaux, 2006)

1.2.2. Rôles dans le processus d'altération

D'après les définitions des facteurs d'altération climatiques, il semble intéressant de rapprocher la température et l'ensoleillement d'une part et les précipitations et l'humidité d'autre part. Par ailleurs, l'influence du vent ressort comme moins importante que celle des autres facteurs d'altération climatiques.

Altération chimique

Température et ensoleillement

Les variations de température et l'ensoleillement influent directement sur la **dissolution**. On sait que, d'un point de vue thermodynamique, le CO₂ est plus soluble à basse température qu'à haute température (Plummer et Busenberg, 1982) et donc, des eaux froides devraient être plus agressives. Mais cela doit être pondéré par le fait que, d'un point de vue cinétique, une augmentation de la température a tendance à favoriser les réactions chimiques et donc la dissolution, car elle facilite la vitesse de diffusion du CO₂ dans l'eau et celle de mise en solution des carbonates par l'eau chargée de CO₂ (Salomon et Pulina, 2005). En résumé, une température élevée augmente la vitesse de réaction chimique et une température basse augmente la solubilité du CO₂ dans l'eau, ce qui conditionne la quantité de calcite pouvant être dissoute.

La température et l'ensoleillement ont un impact sur l'**activité biologique** (Hall et al., 2005), en effet ils jouent un rôle sur la distribution géographique des organismes. De plus, l'altération biologique concerne plutôt la période estivale (où les températures sont élevées) mais aussi la journée en hiver (Hall et al., 2005). Par ailleurs, l'ensoleillement est nécessaire au développement d'une bonne partie des organismes et de la végétation.

Précipitations et humidité

Les précipitations jouent un rôle fondamental dans la **dissolution** puisqu'elles constituent un des apports majeurs en eau (Miserez, 1973). Cette eau issue des précipitations est acide (pH 5 en moyenne), car elle est chargée en CO₂ de l'atmosphère. De plus, du débit des précipitations va résulter un lessivage plus ou moins important de la surface. Ce phénomène est plutôt lié aux fortes précipitations. Des faibles précipitations permettent une meilleure infiltration de l'eau dans la roche, ce qui est aussi important pour la dissolution.

Des mesures de diminution d'épaisseur ont d'ailleurs été réalisées (Gérôme-Kupper, 1980) sur des plaquettes de calcaires exposées à l'air libre. Ce travail expérimental a permis d'obtenir des relations empiriques entre la vitesse de dissolution, la quantité de précipitations par an et la températures moyenne annuelle (Figure 1-6). Ces relations montrent très bien l'influence des valeurs de précipitations annuelles sur le lessivage de la roche.

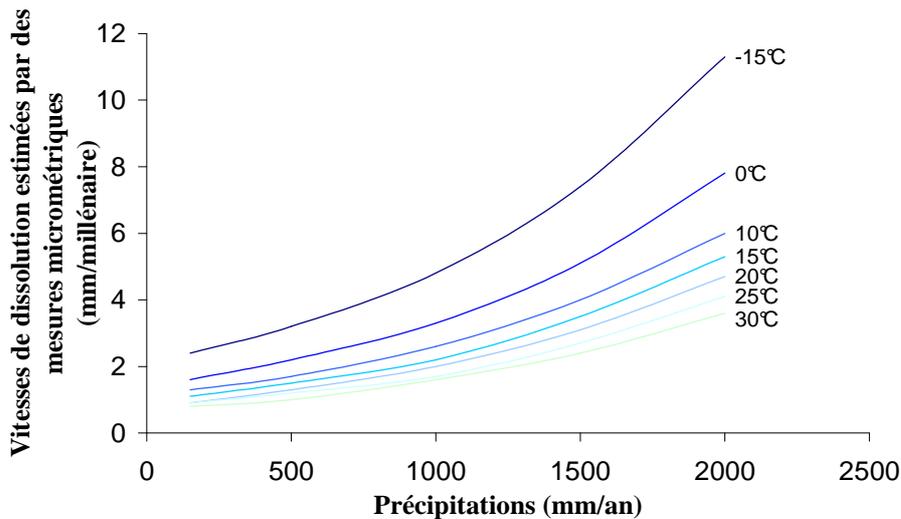


Figure 1-6 Evaluation du lien entre les précipitations annuelles et la vitesse de dissolution sur des plaquettes de calcaire du Paléozoïque (Tournaisien) belge. A droite des courbes sont notées les moyennes annuelles de températures (d'après Gérôme-Kupper (1980)).

La teneur de l'eau de ruissellement en carbonates, après avoir coulé sur quelques mètres, vaut en zone tempérée (SWEETING, 1972 in Salomon and Pulina (2005)):

- de 20 à 30 mg/L sur un massif rocheux nu ;
- de 60 à 80 mg/L en zone tempérée après un petit parcours dans une fracture remplie d'humus.

Enfin, la présence d'un manteau neigeux va augmenter le temps de contact entre l'eau et le massif ce qui favorise aussi la dissolution (Salomon, 2006).

L'apport d'eau par les précipitations favorise le développement des organismes, microorganismes et plantes en tant qu'élément nécessaire à leur développement. Donc les précipitations doivent jouer un rôle dans l'altération liée à l'**activité biologique**. De la même manière, l'humidité influence la distribution spatiale des microorganismes tels que les lichens (Longton, 1988) ce qui conditionne les zones touchées par l'altération liée à l'activité biologique.

Altération physico-mécanique

Température et ensoleillement

La température extérieure agit sur l'altération par **gélivation** tout d'abord en tant que responsable du gel de l'eau contenue dans la roche. De plus, elle influence les trois caractéristiques suivantes (Letavernier, 1984; Bost, 2008) : la vitesse de refroidissement, la durée de gel, la température minimale atteinte. Par ailleurs, l'ensoleillement va, d'une part, favoriser les variations de température importantes entre le jour et la nuit et donc augmenter le nombre de cycles de gel-dégel journaliers dans les zones ensoleillées où il fait froid (zone montagnaise ou en période hivernale). D'autre part, il va diminuer le degré de saturation du massif par évaporation et donc diminuer les effets de la gélivation.

La température joue aussi un rôle dans la **dilatation thermique** de la roche, en effet, des variations de température élevées peuvent être à l'origine de ce phénomène d'altération. L'ensoleillement augmente l'amplitude des cycles de dilatation thermique. L'ensoleillement et la température vont aussi diminuer le degré de saturation du massif par évaporation et donc

diminuer la conductivité thermique du massif et ainsi les effets de la dilatation thermique (Bousquie, 1979).

La température conditionne, par ailleurs, la solubilité des sels (Prick, 1996) et donc les conditions de **crystallisation des sels**. En plus, la cristallisation des sels est liée à l'évaporation. Angeli (2007), en faisant varier la surface d'évaporation, a montré expérimentalement que les faces isolées (c'est-à-dire sans évaporation) ne sont pas altérées contrairement aux faces exposées à l'évaporation. L'ensoleillement accentue l'évaporation.

Enfin, la température est intrinsèquement liée à l'humidité relative de l'air, elle va donc avoir une influence sur la **dilatation hydrique** du massif. De plus, la dilatation hydrique a lieu principalement dans les zones propices à l'évaporation (Coque, 1993) dans la mesure où il y a un nombre plus important de cycles humidification-séchage dans ces zones. L'exposition au soleil est donc un facteur d'altération du massif par dilatation hydrique.

Précipitations et humidité

Les précipitations considérées sont, ici, plutôt liées aux précipitations faibles, dans la mesure où nous considérons que celles-ci s'infiltrent mieux dans le réseau poreux. Ce facteur va accentuer les effets de la **gélivation**. D'ailleurs, Bousquie (1979) a étudié le nombre de cycles de gel-dégel avant rupture en fonction du degré de saturation. Il a étudié 17 calcaires différents. Et il leur a fait subir des cycles de gel-dégel à deux états de saturation différents : par saturation sous vide et par saturation par imbibition. 11 (sur 17) de ces calcaires cassent au bout de moins de 5 cycles après saturation sous vide alors que 16 (sur 17) mettent plus de 60 cycles à casser après saturation par imbibition. Cette expérience montre très bien que plus une roche est saturée moins elle résistera longtemps à la gélivation. Par ailleurs, l'humidité de l'air participe au maintien du degré de saturation du massif, elle joue donc un rôle dans l'altération par gélivation, dans la mesure où celle-ci dépend du degré de saturation (Bousquie, 1979).

Les précipitations ont un rôle sur le degré de saturation du massif, elles participent donc à l'altération par **dilatation hydrique** de celui-ci. Une augmentation de l'humidité relative de l'air est suffisante pour réhydrater la roche (Hames et al., 1987). L'humidité participe donc à la dilatation hydrique du massif. Cette valeur de l'humidité relative est intrinsèquement liée à la température, ce sont donc les deux valeurs qui conditionnent la dilatation hydrique par l'humidité du massif.

Les précipitations jouent un rôle indirect dans la **dilatation thermique**. En effet, les précipitations conditionnent en grande partie le degré de saturation du massif, or la conductivité thermique du massif varie avec le degré de saturation (Bousquie, 1979) donc les variations de températures vont être influencées par les précipitations. L'humidité participe au maintien du degré de saturation du massif, elle joue donc un rôle dans l'altération par dilatation thermique.

Les précipitations peuvent apporter des sels dans le massif, particulièrement en zone polluée ou côtière. Elles peuvent donc être à l'origine de l'altération par **crystallisation des sels**. De plus, elles participent à la valeur du degré d'humidité ce qui conditionne la solubilité des sels. La solubilité des sels dépend de l'humidité relative et de la température. Donc, de l'humidité dépend l'état du sel (dissout ou cristallisé). Elle a ainsi une influence sur l'altération par cristallisation des sels.

1.2.3. Liens entre facteurs d'altération climatiques et paramètres en jeu

L'étude des facteurs d'altération climatique met en évidence l'existence de liens entre ces facteurs. Les différents rôles des facteurs d'altération mentionnés dans le paragraphe 1.2.2

font ressortir des paramètres particuliers qui constituent le lien entre les facteurs d'altération climatiques et les phénomènes d'altération. Le Tableau 1-2 résume l'ensemble de ces points. Ce tableau montre les paramètres, contrôlables en laboratoire, que nous devons faire varier pour simuler ces facteurs d'altération.

Facteurs d'altération climatiques Phénomènes d'altération	Température et ensoleillement	Précipitations et humidité	Vent
Gélivation	Température (roche); Degré de saturation	Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation
Dilatation thermique	Température (roche); Degré de saturation	Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation
Cristallisation des sels	Température (roche); Degré de saturation	Degré de saturation	Température (roche); Présence de sels
Dilatation hydrique	Température (roche); Degré de saturation	Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation
Dissolution	Température (roche)	Qualité de l'eau avant percolation; Temps de percolation; Débit de l'apport en eau	Température (roche)
Activité biologique	Température (roche); Degré de saturation	Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation

Tableau 1-2 Résumé des rôles joués par les facteurs d'altération climatiques dans les phénomènes d'altération. Les paramètres se situent à chaque jonction d'un facteur climatique et d'un phénomène d'altération

1.2.4. Conclusion

Les facteurs d'altération climatiques sont reliés à des paramètres mesurables et contrôlables en laboratoire. Le climat est le point central de cette étude, néanmoins les facteurs d'altération climatiques sont indissociables des facteurs d'altération de site. Il est donc nécessaire de les étudier pour connaître l'ensemble des paramètres en jeu pour l'étude du processus d'altération des calcaires en climat tempéré.

1.3. Les facteurs d'altération de site

Les facteurs de site constituent l'ensemble des facteurs d'altération qui sont liés au terrain. Ainsi, on a listé les facteurs suivants : l'altitude, l'orientation du massif, les caractéristiques de la roche et des fractures, la conductivité thermique du massif, la présence de végétation ou d'une circulation d'eau. Nous allons donc décrire ces facteurs et établir leurs influences sur les différents phénomènes d'altération.

1.3.1. Définition

1.3.1.1. Altitude

L'altitude correspond à l'élévation verticale d'un site par rapport au niveau de la mer. Certains champs physiques varient en fonction de l'altitude : diminution de la pression atmosphérique, de la température et de l'humidité, augmentation de l'ensoleillement notamment (Durand-Dastès, 2008).

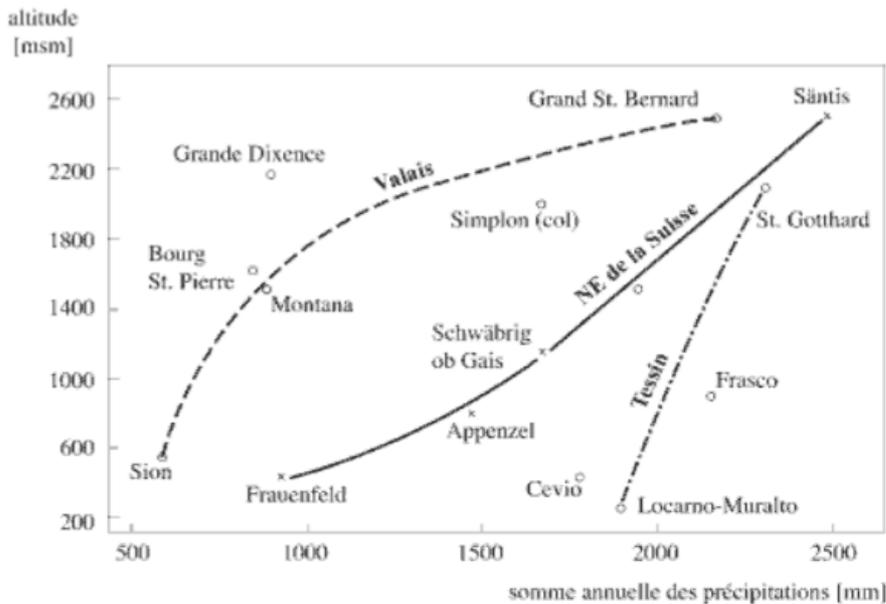


Figure 1-7 Somme annuelle des précipitations en fonction de l'altitude dans les différentes régions de Suisse (Parriaux, 2006)

L'altitude peut provoquer une hausse de la somme annuelle de précipitations, comme illustré sur la Figure 1-7. Sur cette figure, on voit que, dans une même région, lorsque l'altitude augmente, la somme annuelle de précipitations augmente. Ainsi, l'altitude va avoir les mêmes effets que ceux liés à la température (et à l'ensoleillement) et aux précipitations (et à l'humidité) décrits dans le paragraphe 1.2.2.

Par ailleurs, l'altitude va avoir un impact certain sur la végétation : elle se raréfie lorsque l'élévation augmente.

1.3.1.2. Orientation

L'orientation du massif, associée à l'ensoleillement, engendre des zones d'ombre (ubacs) et des zones ensoleillées (adrets). Elle favorise donc les gradients de température, les variations de température et l'évaporation.

Par exemple, Hall et al. (2005) ont réalisé des mesures sur un massif du plateau tibétain à 4830 m d'altitude composé de schistes et ardoises avec un affleurement rocheux en roches granitiques (Figure 1-8). Des mesures de température avec des thermocouples à 5 cm de profondeur sur des faces de roche inclinées entre 75° et 90° (faces verticales). Le résultat principal de ces données est que l'ordre décroissant de températures donne les orientations suivantes : ouest>sud>nord>est pour la journée et nord>ouest>sud>est pour la nuit. Le moment de la journée et donc l'angle d'inclinaison du soleil a un impact net sur les maxima de température à la surface du massif.

L'orientation et l'ensoleillement sont liés. Ils vont avoir une influence sur les mêmes phénomènes d'altération. Nous renvoyons donc au paragraphe 1.2.2 pour les détails de ces influences.

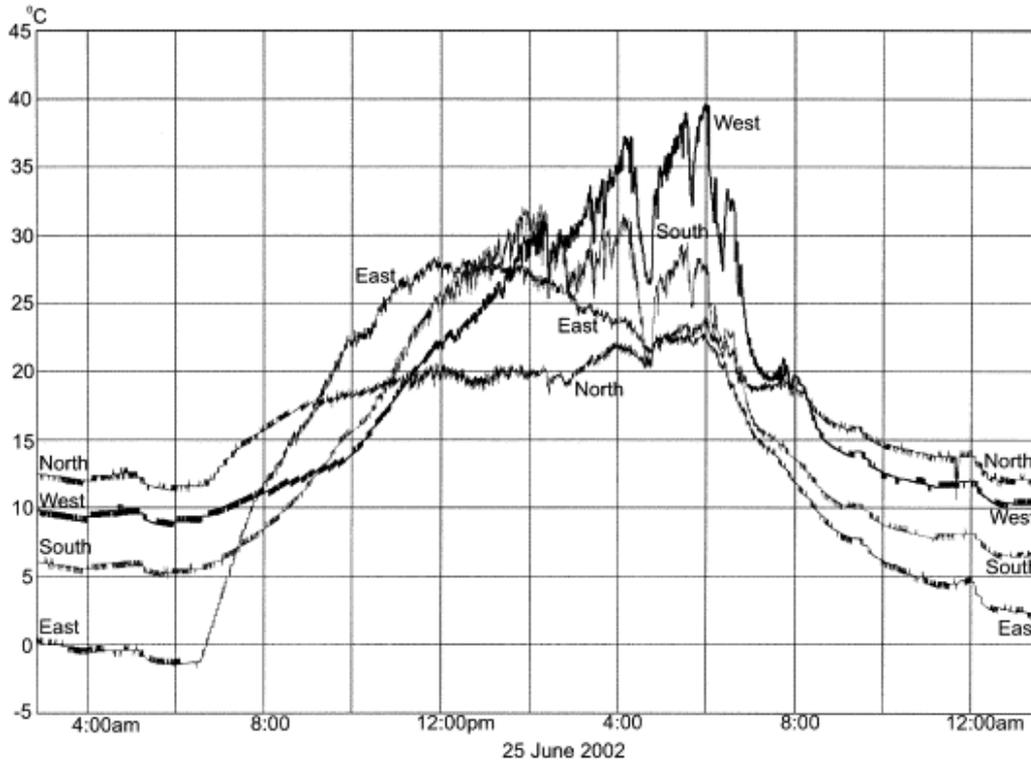


Figure 1-8 Température en surface du massif en fonction de l'orientation du versant (Hall et al., 2005)

1.3.1.3. Caractéristiques de la roche

Les caractéristiques de la roche sont multiples : composition minéralogique, présence d'argiles, propriétés hydrauliques, propriétés thermiques, résistance mécanique, propriétés physiques, etc.

Concernant ses propriétés hydrauliques, elles ont un impact sur le degré de saturation du massif (Parriaux, 2006).

Concernant les propriétés thermiques, elles peuvent se résumer par la conductivité thermique. Elle décrit la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température. Elle caractérise le comportement du massif lors du transfert thermique par conduction. Un calcaire de masse volumique 2 g/cm^3 a une conductivité thermique de 1 W/m/K à 20°C (Handbook of chemistry and physics, 2009). Le degré de saturation a une influence sur la valeur de la conductivité thermique. D'ailleurs, Griggs (1936) a constaté que des variations de température dans l'air sec étaient 100 fois moins efficaces que lorsque les échantillons sont aspergés d'eau pour élever la température dans l'échantillon. Globalement, la conductivité thermique a un impact sur la température à l'intérieur du massif rocheux et donc sur les phénomènes d'altération qui sont liés à la température (cf. 1.2.2).

1.3.1.4. Caractéristiques des fractures

Les caractéristiques des fractures comprennent leurs propriétés hydrauliques et leur résistance mécanique. Les fractures ont des propriétés hydrauliques bien plus élevées que celles de la roche (Homand et Duffaut, 2000). Ces propriétés vont créer des gradients au niveau du degré de saturation du massif entre les zones fracturées et les zones non fracturées. Les caractéristiques des fractures vont donc influencer les phénomènes d'altération pour lesquels le degré de saturation joue un rôle (cf. 1.2.3).

1.3.1.5. Présence de végétation

La végétation se compose d'arbres et de plantes mais également de microorganismes tels que les lichens. La présence de végétation va jouer un rôle dans la qualité de l'eau percolant dans le massif.

On peut également noter qu'une forêt constitue une protection contre les radiations solaires (et donc l'évaporation) et aussi contre les précipitations tout comme une couverture biologique participe à la protection de la surface du massif (Wierzchos et al., 2003). D'ailleurs, les observations statistiques d'André et al. (2008) sur les grès du temple d'Angkor (Cambodge) montrent que la présence d'un film biologique de lichens à la surface de la pierre diminue son altération par rapport aux pierres qui n'en ont pas.

1.3.1.6. Présence d'une circulation d'eau

La présence d'un cours d'eau souterrain ou d'une fracture saturée en eau va influencer le degré de saturation du massif (Encyclopedia Britannica, 2009) par gravité (eau en surface et eau souterraine) ou imbibition capillaire (eau souterraine) sur une certaine zone. Elle va donc influencer les phénomènes d'altération pour lesquels le degré de saturation joue un rôle (cf. 1.2.3).

1.3.2. Rôles dans le processus d'altération

Altération chimique

Caractéristiques de la roche

La composition minéralogique de la roche va avoir un rôle dans l'altération par **dissolution**. En effet, la solubilité des minéraux est variable. Ainsi, la solubilité du quartz est très faible (6 ppm dans les eaux de surface); la réaction de mise en solution est la suivante: $\text{SiO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$ alors que la calcite est beaucoup plus soluble. L'eau de pluie chargée en CO_2 agit comme un acide faible lors de sa mise en contact avec la calcite (environ 2000 ppm), selon la réaction : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$. Donc, comme précisé dans le paragraphe 1.1.1.1, la dissolution concerne principalement les roches carbonatées. D'un point de vue pétrographique, il ressort de différentes études sur l'analyse de surfaces exposées au passage d'un fluide acide (Horoi, 2001; Rauch et White, 1977; Roques et Ek, 1973) que plusieurs caractéristiques lithologiques sont susceptibles de favoriser ou de défavoriser la dissolution. L'observation récurrente est que les calcaires micritiques (formés de grains de taille micrométrique) se dissolvent plus vite que les calcaires sparitiques (formés de gros cristaux, qui résultent en général de phénomènes de recristallisation secondaires). La cristallinité des minéraux composants la roche et la valeur de la surface accessible au fluide (qui est proportionnelle à la surface réactive) sont donc deux caractéristiques importantes qui contrôlent la réactivité de la roche vis-à-vis de la dissolution (Noiriel, 2005). On peut également noter que la désagrégation qui accompagne la dissolution peut contribuer majoritairement au bilan global de perte de matière de la roche. Ainsi la présence de lits argileux ou de grains insolubles (comme le quartz) peut accélérer le phénomène de dissolution (Roques et Ek, 1973). Une fois la roche attaquée, Roques et Ek (1973) ont également observé que les insolubles, qui surplombent les régions les plus solubles de la roche ralentissent le phénomène de dissolution en jouant un rôle protecteur.

L'**activité biologique** et notamment les racines ont besoin d'eau pour se développer. Or, les propriétés hydrauliques de la roche vont conditionner l'eau disponible en surface pour le

développement des organismes. Cette caractéristique va donc jouer un rôle important dans l'altération par l'activité biologique.

Caractéristiques des fractures

Concernant l'altération par **dissolution**, il faut tenir compte du temps pendant lequel le CO₂ contenu dans l'eau est en contact avec le calcaire. Ainsi, des fractures larges permettent une infiltration rapide des eaux en profondeur, tandis que des fractures très fines vont conduire à une eau qui va se charger très vite au départ et, une fois saturée, poursuivre son chemin, mais avec une bien moindre efficacité (Salomon, 2006).

La présence de fractures suffisamment larges permet le développement de la végétation. Les fractures ont donc aussi un rôle sur l'**activité biologique**.

Présence de végétation

L'activité végétale et microbiologique engendre l'acidification de l'eau contenue dans le massif (respiration des racines, décomposition de la matière organique morte dans les sols, activité microbiologique), c'est ce qu'on appelle le CO₂ biogénique (Vanara, 1998) et les acides organiques. La pression partielle de CO₂ augmente dans les sols, une partie se dissout et l'autre part dans l'atmosphère (IPGP, 2008a).

Zone climatique	Haute montagne et régions périglaciaires	Régions tempérées océaniques	Régions méditerranéennes
Agents			
A CO ₂ atmosphérique	45	7	4
B CO ₂ d'origine atmosphérique	5	9	8
C CO₂ d'origine biogénique	30	54	55
D Acides inorganiques	5	5	8
E Acides organiques	15	25	25
Total	100	100	100
C + E	45	79	80

Tableau 1-3 Contribution (en %) des principaux types d'acides à la karstification selon les grandes zones climatiques du climat tempéré (Salomon et Pulina, 2005)

Ainsi, l'eau devient plus acide, ce qui accentue l'altération par **dissolution** (Besnard, 2000). On observe même une production massive de CO₂ par les végétaux et microorganismes. Elle est, en quantité, jusqu'à 100 fois plus importante que celle du CO₂ atmosphérique (Salomon et Pulina, 2005), ce qui va avoir un rôle important dans les phénomènes de dissolution. Le Tableau 1-3 présente la contribution des différents types d'acide à la karstification des massifs.

Altération physico-mécanique

Caractéristiques de la roche

L'influence des propriétés hydrauliques de la roche sur l'altération par **gélivation** a fait l'objet récemment de différentes expérimentations. Au niveau de la microgélivation, nous avons montré (Saad et al., 2010) que la gélivité de la roche était liée à sa perméabilité (sensibilité à la microgélivation) par des mesures expérimentales de perméabilité à l'eau sur des éprouvettes de calcaire et de grès avec des gélivités et des perméabilités très différentes. Concernant la macrogélivation, Bost (2008), par l'analyse des résultats de ses expérimentations de gel-dégel sur des éprouvettes de calcaire entaillées a mis en évidence l'importance des migrations de fluides possibles entre le réseau poreux de la roche et

l'entaille. En effet, avant que le gel ne soit effectif dans la roche et/ou l'entaille, il y a un risque de perte d'eau de l'entaille. Or la diminution de la quantité d'eau diminuerait très certainement la valeur de la contrainte générée par le gel dans l'entaille. Ainsi, les propriétés hydrauliques de la roche jouent un rôle dans la macrogélivation (gélivation dans les fractures). Par ailleurs, la résistance mécanique joue également un rôle dans la gélivation (Bost, 2008; Thomachot, 2002). Elle ne suffit pourtant pas à la détermination de la résistance au phénomène de gélivation, ce point est sûrement à rattacher au fait que la résistance mécanique de la roche diminue avec le degré de saturation (Vicol, 1987). Par ailleurs, les mesures de contraintes en fond d'entaille d'un cube d'aluminium de Bost (2008) ont mis en évidence une contrainte plus forte pour un gel à -10°C qu'à -5°C . Par contre, les mêmes mesures sur un cube en PVC ont montré un comportement inverse : la contrainte est plus faible à -10°C qu'à -5°C . Ceci s'explique par la différence de conductivité thermique entre les deux matériaux. Ainsi, alors que l'aluminium qui est un bon conducteur thermique permet à la température de varier rapidement en tout point de l'entaille, le PVC qui est un matériau isolant induit un gradient de température marqué au sein de l'entaille si bien que l'eau gèle d'abord en haut de l'entaille et forme ensuite un « bouchon » qui confine l'eau encore liquide sous-jacente. La baisse de la contrainte générée à -10°C s'explique par le fait que l'enceinte climatique est descendue à cette température plus rapidement qu'à -5°C et donc le front de gel a moins eu le temps de progresser dans l'entaille si bien que le bouchon de glace est moins important et la contrainte à -10°C est plus faible.

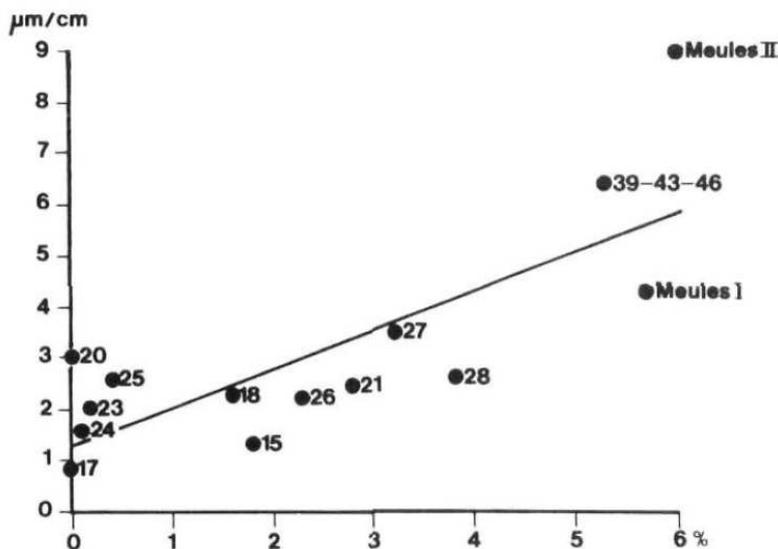


Figure 1-9 Corrélation entre la teneur en argile en abscisse et l'augmentation de la longueur des échantillons en ordonnée (Hames et al., 1987)

La **dilatation hydrique** est particulièrement effective dans les roches contenant une partie argileuse (Hames et al., 1987) dans la mesure où la dilatation hydrique des argiles est très importante (Figure 1-9). Par contre, l'analyse du type d'argiles contenu dans les roches, qu'ils ont réalisé, n'a donné aucun résultat satisfaisant.

D'après les mesures de porosimétrie au mercure de Hames et al. (1987), la corrélation entre la dilatation maximale obtenue et le rayon moyen des pores est relativement bonne (Figure 1-10). De plus, par la mise en relation de la dilatation obtenue de l'immersion dans l'eau avec le volume des pores de rayon r inférieur à une dimension donnée, le coefficient de corrélation augmente pour r très petit ($<0,050\mu\text{m}$), ils montrent l'importance des pores les plus fins dans la dilatation des éprouvettes.

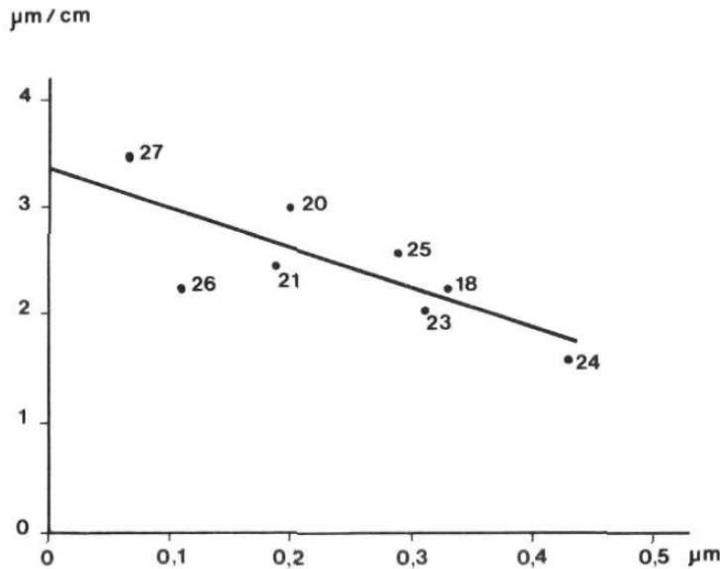


Figure 1-10 Corrélation entre le rayon moyen de la principale famille de pores (mesuré par porosimétrie au mercure) en abscisse et l'augmentation de longueur des échantillons en ordonnée. 27 : Beauvais-sur-Matha, 26 : Fouqueure, 21 : Le Breuil, 20 : Vilhonneur, 25 : Sireuil, 18 : Verger, 23 : Lavoux, 24 : Charentenay (Hames et al., 1987)

La composition minéralogique de la roche va influencer la conductivité thermique du massif et la valeur du coefficient de dilatation du massif. De plus le coefficient de dilatation thermique des roches voit sa valeur varier en fonction de la température (Klimis, 1987). Donc, indirectement, elle va avoir un rôle dans les effets de la **dilatation thermique**.

Facteurs climatiques	Température	Précipitations	Humidité	Ensoleillement	Vent
Facteurs de site					
Altitude	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Orientation	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Roche	Non	Non	Non	Non	Non
Fractures	Non	Non	Non	Non	Non
Présence de végétation	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Présence d'une circulation d'eau	Non	Non	Oui	Non	Non

Tableau 1-4 Liens entre les facteurs d'altération climatiques et les facteurs d'altération de site (oui=facteurs liés; non=facteurs non liés)

Caractéristiques des fractures

Concernant la **gélivation**, Bost (2008), par différentes mesures sur des éprouvettes avec une entaille, a montré que concernant les caractéristiques de la fracture, celui qui peut influencer la génération de contrainte lors du gel dans une fracture est sa géométrie.

L'altération des massifs par la **crystallisation des sels**, comme les alvéoles, naît dans les zones de faiblesse (Angeli, 2007)..

1.3.3. Liens avec les facteurs d'altération climatiques

Facteurs d'altération de site	Altitude	Orientation	Caractéristiques de la roche	Caractéristiques des fractures	Présence de végétation	Présence d'une circulation d'eau
Phénomènes d'altération						
Gélivation	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation;	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques;	R.A.S.	Degré de saturation

			Propriétés hydrauliques; Résistance mécanique ; Conductivité thermique; Distribution et taille de pores	Géométrie des fractures		
Dilatation thermique	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation; Propriétés hydrauliques; Conductivité thermique	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques	R.A.S.	Degré de saturation
Cristallisation des sels	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation; Propriétés hydrauliques	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques; Géométrie des fractures	R.A.S.	Degré de saturation
Dilatation hydrique	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche); Degré de saturation; Propriétés hydrauliques; Présence d'argiles; Distribution et taille de pores	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques;	R.A.S.	Degré de saturation
Dissolution	Température (roche)	Température (roche)	Température (roche); Composition minéralogique; Agencement et taille de grains; Présence d'argiles; Distribution et taille de pores; Temps de percolation	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques; Géométrie des fractures; Temps de percolation	Qualité de l'eau avant percolation	R.A.S.
Activité biologique	Température (roche); Degré de saturation	Température (roche)	Température (roche); Degré de saturation; Propriétés hydrauliques	Degré de saturation; Propriétés hydrauliques; Géométrie des fractures	<i>Intrinsèquement liés</i>	Degré de saturation

Tableau 1-5 Résumé des rôles joués par les facteurs d'altération de site dans les phénomènes d'altération

L'étude des facteurs d'altération de site met en évidence les liens qu'ils ont avec les facteurs d'altération climatiques. Ces liens sont résumés dans le Tableau 1-4.

Comme pour les facteurs d'altération climatiques, les différents rôles des facteurs d'altération mentionnés dans le paragraphe 1.3.2 font ressortir des paramètres particuliers qui relient les facteurs d'altération de site et les phénomènes d'altération. Le Tableau 1-5 résume l'ensemble de ces points.

Ce tableau montre les paramètres, contrôlables en laboratoire, que nous devons faire varier pour simuler ces facteurs d'altération.

1.3.4. Conclusion

Les facteurs d'altération de site sont désormais reliés aux facteurs d'altération climatiques et également à des paramètres mesurables et contrôlables en laboratoire. Nous pouvons donc passer à l'étude des paramètres issus des facteurs d'altération climatiques et des facteurs d'altération de site.

1.4. Paramètres

Cette partie concerne les paramètres issus des facteurs d'altération que l'on est capable de mesurer ou d'observer.

1.4.1. Récapitulatif des liens avec les facteurs d'altération

D'après les études des facteurs d'altération, les paramètres de cette étude sont les suivants : la température de la roche, le degré de saturation, la qualité de l'eau avant percolation, le temps de percolation, le débit d'apport en eau, la présence de sels, la présence d'argiles, les caractéristiques de la roche et les caractéristiques des fractures.

Pour déterminer les paramètres pertinents pour notre étude, revenons sur l'ensemble des liens entre les facteurs d'altération et les paramètres définis ci-dessous. Ces informations proviennent du Tableau 1-2 et du Tableau 1-5 qui donnent les liens entre les facteurs d'altération (climatiques et de site, respectivement) avec les paramètres, mesurables et observables. L'ensemble des liens est repris dans le Tableau 1-6.

Paramètres	Température de la roche	Degré de saturation	Qualité de l'eau avant percolation	Temps de percolation	Débit de l'apport en eau	Présence de sels	Présence d'argiles	Caractéristiques de la roche	Caractéristiques des fractures
Facteurs d'altération									
Température et ensoleillement	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Précipitations et humidité	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Vent	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
Altitude	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Orientation	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Caractéristiques de la roche	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non
Caractéristiques des fractures	Non	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui
Présence de végétation	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Présence d'une circulation d'eau	Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non

Tableau 1-6 Liens entre les paramètres et les facteurs d'altération climatiques (en rouge) et de site (en noir). Oui=paramètre et facteur liés ; Non=paramètre et facteur non lié.

Si l'on regarde le Tableau 1-6, on peut voir que certains paramètres ne sont liés qu'à des facteurs qui ont un lien avec le massif proprement dit.

Les paramètres peuvent donc être décomposés en deux catégories :

- les paramètres propres au site. Il s'agit des paramètres qui ne sont liés qu'au site, sans prendre en compte les conditions climatiques. Ils comprennent donc la présence d'argiles, les caractéristiques de la roche et les caractéristiques des fractures.
- les paramètres dépendant également du climat. Ces paramètres sont ceux qui, en plus des caractéristiques du massif, intègrent ceux de l'environnement climatique du massif. Il s'agit

donc de la température de la roche, le degré de saturation, la qualité de l'eau avant percolation, le temps de percolation, le débit d'apport en eau, la présence de sels.

Nous allons donc présenter ces différents paramètres et ensuite déterminer ceux qui sont intéressants pour notre étude.

1.4.2. Définition

1.4.2.1. Paramètres propres au site

Présence d'argiles

La présence d'argiles se caractérise par :

- la détermination du (ou des) types(s) d'argiles présent(s) dans la roche ;
- la détermination de la teneur en argiles présents dans la roche.

Caractéristiques de la roche

Les caractéristiques de la roche se décomposent en plusieurs paramètres mesurables ou observables :

- les propriétés hydrauliques de la roche telles que la perméabilité ;
- la résistance mécanique de la roche telle que la résistance à la compression simple ;
- la conductivité thermique de la roche mesurable à l'aide d'un appareil dédié ;
- la distribution et taille de pores de la roche déterminées par essai de porosimétrie au mercure par exemple ;
- la composition minéralogique de la roche déterminée par DRX, analyse pétrographique et analyse chimique ;
- l'agencement et taille de grains de la roche observables aux microscopes électronique ou optique.

Caractéristiques des fractures

Les caractéristiques des fractures se décomposent en plusieurs paramètres mesurables ou observables :

- les propriétés hydrauliques des fractures telles que la perméabilité ;
- la géométrie des fractures (largeur, rugosité, profondeur, orientation).

1.4.2.2. Paramètres liés également au climat

Température de la roche

La température de la roche signifie la température que l'on a à l'intérieur de la roche. Il est possible de la mesurer à l'aide de thermocouples.

Degré de saturation

Le degré de saturation représente le pourcentage d'eau présent dans les pores de la roche. Il ne dépend pas de la porosité de la roche, contrairement à la teneur en eau. Pour une roche à l'état sec, il vaut 0% et pour une roche entièrement saturée en eau, il vaut 100%.

Sa valeur est obtenue par un calcul de rapport de masse :

$$S_r = \frac{m_t - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}$$

Avec

S_r le degré de saturation de la roche

m_t la masse du volume considéré à un temps t

m_{sec} la masse du volume considéré à l'état sec

m_{sat} la masse du volume considéré entièrement saturé

Qualité de l'eau avant percolation

La qualité de l'eau (issue des précipitations) avant percolation comprend les indicateurs suivant :

- le pH ;
- les espèces ioniques présentes dans l'eau et la conductivité électrique qui en résulte.

Ces valeurs sont mesurables à l'aide de sondes.

Temps de percolation

Le temps de percolation correspond au temps durant lequel l'eau des précipitations va rester en contact avec la roche.

Débit de l'apport en eau

Le débit d'apport en eau correspond à la vitesse de renouvellement de l'eau issue des précipitations.

Présence de sels

La présence de sels est liée à un apport de sels par les embruns marins ou le salage des chaussées par exemple. Des analyses chimiques permettent de connaître la teneur en sels dans une roche.

1.4.3. Choix des paramètres de l'étude

Dans le cadre de notre étude, nous désirons obtenir des **cinétiques d'altération en fonction du climat**. L'analyse des paramètres liés aux facteurs d'altération montre que certains paramètres sont uniquement liés au site. Nous allons donc dissocier ces paramètres de ceux que nous ferons varier pour **reproduire des conditions climatiques en laboratoire**. Nous nous intéressons donc aux paramètres qui dépendent du climat. Par ailleurs, la présence de sels (un des paramètres qui dépend du climat) concerne des cas très spécifiques : salage de chaussées ou embruns marins. Or nous cherchons à obtenir des résultats pour des **cas plus généraux**. Donc nous avons choisi de ne pas prendre en compte ce paramètre particulier.

Ainsi, pour notre étude de cinétique d'altération en fonction du climat, nous allons déterminer les paramètres suivant :

- la température de la roche;
- le degré de saturation;
- la qualité de l'eau avant percolation;
- le temps de percolation;
- le débit d'apport en eau.

Si l'on regarde ces cinq paramètres, les quatre derniers sont **directement liés à l'eau**. Et pour le premier, on peut considérer qu'il dépend indirectement du degré de saturation car la conductivité thermique d'une roche dépend de son degré de saturation et donc sa température aussi (cf. 1.3.1.3).

Cette analyse met en évidence **le rôle essentiel de l'eau dans le processus d'altération** et donc l'intérêt de ce travail, dans la mesure où si l'on s'intéresse aux conditions climatiques, tous les paramètres concernés sont directement ou indirectement liés à l'eau présente dans le massif.

1.5. Conclusion : cadre de l'étude

Ce chapitre a permis d'établir les paramètres en jeu lors du processus d'altération des massifs calcaires en climat tempéré. Ces paramètres sont au nombre de neuf. Certains se rapportent uniquement au site.

Dans la mesure où nous cherchons à obtenir des cinétiques d'altération sous différentes conditions climatiques, nous avons choisi de nous intéresser aux paramètres qui vont varier en fonction du climat. Ainsi, le Tableau 1-7 résume les 5 paramètres retenus pour l'étude.

Nous nous baserons sur ces paramètres pour reproduire en laboratoire des conditions climatiques particulières (Chapitre 2, 2.3).

Paramètres Facteurs d'altération climatiques	Température de la roche	Degré de saturation	Qualité de l'eau avant percolation	Temps de percolation	Débit de l'apport en eau
Température et ensoleillement	Oui	Oui	Non	Non	Non
Précipitations et humidité	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Vent	Oui	Oui	Non	Non	Non

Tableau 1-7 Paramètres et facteurs d'altération retenus pour l'étude

Ainsi, le travail qui suit va consister en :

- choisir les calcaires et les sites étudiés (Chapitre 2, 2.2);
- établir un cycle de vieillissement en laboratoire à partir de données climatiques (Chapitre 2, 2.3);
- déterminer les mesures pertinentes pour caractériser l'endommagement (Chapitres 3 et 4);
- analyser les résultats obtenus par vieillissement accéléré (Chapitres 5, 5.2.1 et 5.3.1 et 6);
- comparer ces vieillissements accélérés avec des vieillissements réels (Chapitre 5, 5.2.2 et 5.3.2);
- valider les résultats obtenus (Chapitre 7).

Ces paramètres et leurs liens avec les facteurs d'altération climatiques seront alors repris au Chapitre 8 pour évaluer l'influence des changements climatiques sur le processus d'altération des calcaires.

Bibliographie

André M.-F., Etienne S., Mercier D., Vautier F., Voltaire O. « Assessment of sandstone deterioration at Ta Keo temple (Angkor): first results and future prospects ». *Environmental Geology*. 2008. Vol. 56, n°3-4, p. 677-688.

Angeli M. *Multiscale study of stone decay by salt crystallization in porous networks*. Cergy : Université de Cergy-Pontoise, 2007. 239 p.

Besnard K. *Evolution physico-chimique des matériaux carbonatés en milieu triphasique*. Paris : Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 2000.

Bost M. *Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 281 p.

Bousquie P. *Texture et porosité de roches calcaires*. Thèse. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1979. 191 p.

Coque R. *Relief karstique*. *Encyclopedia Universalis*. 2008.

Coque R. *Géomorphologie*. 5^e éd. Paris : Armand Colin collection U, 1993. 503 p.

Dévigne J.-P. *Geomicrobiologie*. *Encyclopaedia Universalis*. 2008.

Durand-Dastès F. *Climatologie*. *Encyclopaedia Universalis*. 2008. p. 10.

Encyclopedia Britannica. *Karst* [En ligne]. *Encyclopedia Britannica*. 2009. < <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/312718/karst> >

Flori J.-P. *Analyse statistique pour la France du risque de gel sur une pierre calcaire saturée en eau*. Nantes : Centre Scientifique & Technique du Batiment, 1989.

Frayssines M. *Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux*. Thèse. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2005. 224 p.

Gérôme-Kupper M. *Les vitesses d'érosion du calcaire. Etude de processus actuels sous différents climats*. Thèse. Liège : Université de Liège, 1980. 239 p.

Griggs D. T. « The factor of fatigue in rock exfoliation ». *Journal of Geology*. 1936. Vol. 44, p. 783-796.

Hall K., Arocena J. M., Boelhouwers J., Liping Z. « The influence of aspect on the biological weathering of granites: observations from the Kunlun Mountains, China ». *Geomorphology*. 1 avril 2005. Vol. 67, n°1-2, p. 171-188.

Hames V., Lautridou J.-P., Ozer A., Pissart A. « Variations dilatométriques de roches soumises à des cycles « humidification-séchage » ». *Géographie physique et Quaternaire*. 1987. Vol. XLI, n°3, p. 345-354.

Hirschwald J. *Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung*. Berlin : Borntraeger, 1912.

Homand F., Duffaut P. *Manuel de mécanique des roches*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. Paris : Comité Français de Mécanique des Roches, 2000. 265 p. (Tome 1 Fondements). ISBN : 2-911762-23-1.

Horoï V. *L'influence de la géologie sur la karstification. Etude comparative entre le massif d'Obarsia Closani - Piatra Mare (Roumanie) et le massif d'Arbas (France)*. Thèse. Toulouse : Université de Toulouse III, 2001. 165 p.

IPGP. *Climat et surfaces continentales*. 2008, a.

IPGP. *Géophysique de l'Environnement*. 2008, b.

Ishikawa M., Kurashige Y., Hirakawa K. « Analysis of crack movements observed in an alpine bedrock cliff ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 2004. Vol. 28, p. 883-891.

Klimis N. *Etude en laboratoire de l'atténuation des ondes longitudinales: application à la caractérisation géotechnique des roches*. Thèse. Paris : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1987. 196 p.

Letavernier G. *La gélivité des roches calcaires. Relations avec la morphologie du milieu poreux*. Thèse. Caen : Université de Caen, 1984. 181 p.

Longton R. E. *The biology of polar bryophytes and lichens*. Cambridge : Cambridge University Press, 1988. 391 p.

Massonnet C., Cescotto S. *Mécanique des matériaux*. 3^e éd.: De Boeck Université, 1994. 408 p. ISBN : 9782804120214.

Matsuoka N. « Direct observation of frost wedging in alpine bedrock ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26, p. 601-6014.

Matsuoka Norikazu, Sakai H. « Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods ». *Geomorphology*. juillet 1999. Vol. 28, n°3-4, p. 309-328.

Merrill G. P. « Desintegration of granitic rocks of the District of Columbia ». *Bulletin of Geological Society of America*. 1895. Vol. 6, p. 321-332.

Miserez J.-J. *Géochimie des eaux du karst jurassien (Contribution physico-chimique à l'étude des altérations)*. Thèse. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, 1973. 319 p.

Noetzi J., Gruber S. « Alpiner Permafrost - ein Überblick ». In : *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt*. München : Lintzmeyer, K., 2005. p. 111-121.

Noiriel C. *Contribution à la détermination expérimentale et à la modélisation des différents processus contrôlant l'évolution géochimique, structurale et hydrodynamique des roches fissurées carbonatées*. Paris : Ecole des Mines de Paris, 2005. 341 p.

Parriaux A. *Géologie: bases pour l'ingénieur*. 1^{er} éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006. 516 p. ISBN : 2-88074-555-1.

Pissart A., Lautridou J.-P. « Variations de longueur de cylindres en pierre de Caen (calcaire bathonien) sous l'effet de séchage et d'humidification ». In : *Zeitschrift für Geomorphologie Neues Folge*. Berlin - Stuttgart, 1983. p. 111-116.

Plummer L. N., Busenberg E. « The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982. Vol. 46, n°6, p. 1011-1040.

Prick A. *Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique*. Thèse. Liège : Université de Liège, 1996. 311 p.

Rauch H. W., White W. B. « Dissolution kinetics of carbonates rocks. 1. Effects of lithology on dissolution rate ». *Water Resources Research*. 1977. Vol. 13, n°2, p. 381-394.

Remy J.-M., Bellanger M., Homand-Etienne F. « Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles ». *Geophysics*. février 1994. Vol. 59, n°2, p. 245-251.

Roques H., Ek C. « Etude expérimentale de la dissolution de calcaires par une eau chargée en CO₂ ». *Annales Spéléologie*. 1973. Vol. 28, n°4, p. 549-563.

Saad A., Guédon S., Martineau F. « Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters ». *Comptes Rendus Geoscience*. mars 2010. Vol. 342, n°3, p. 197-203.

Salomon J.-N., Pulina M. *Les karsts des régions climatiques extrêmes*. Presses Universitaires de Bordeaux., 2005. 222 p. ISBN : 2867813808, 9782867813801.

Salomon J.-N. *Précis de Karstologie*. 2^e éd. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux, 2006. 285 p. ISBN : 2-86781-411-1.

Société Suisse de Géomorphologie. *Géomorphologie de la montagne* [En ligne]. juillet 2007. < <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/cryo/ssgmfiches/> >

Thomachot C. *Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts « d'encroûtements noirs vernissés »*. Strasbourg : Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002. 346 p.

Thomas W. N. « Experiments on the freezing of certain buildings materials ». *Building Research*. 1938. Vol. Technical Paper, n°17.

Turner E. « Report on a lecture on the chemistry of geology ». *London and Edimburgh Philosophical magazine, Journal of Science*. 1833. Vol. 3, n°21.

Vanara N. *Le karst des Arbailles (Pyrénées occidentales, France). Contrôles tectonique, climatique, hydrogéologique et anthropique de la morphogénèse*. Thèse. Bordeaux : Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 1998.

Vicol T. *Problèmes posés par un calcaire hétérogène dans l'étude de la stabilité d'une carrière souterraine*. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1987. (D.E.A de Mécanique Appliquée à la Construction, Option Génie Civil et Industriel).

Wierzchos J., De Los Rios A., Sancho L. G., Green A., Ascaso C. « The integrated microscopical study of Antarctic endolithic microorganisms and their microhabitats ». In : *Antarctic Biology in a Global Context*. Leiden : Huiskes, A.H.L., Gieskes, W.W.C., Rozema, J., Schorno, R.M.L., van der Vries, S.M., Wolff, W.J., 2003. p. 152-156.

Handbook of chemistry and physics. 90^e éd.: Taylor and Francis Group, 2009.

2. Des données de site au laboratoire

INTRODUCTION

L'obtention de cinétique d'altération des calcaires en fonction du climat implique une connaissance du temps d'exposition et des conditions d'altération. Or, il est difficile de maîtriser ces deux variables in situ. Pour pouvoir les contrôler, nous devons donc reproduire en laboratoire un processus d'altération se rapprochant du processus d'altération réelle.

Ce chapitre vise à déterminer un moyen de reproduire les phénomènes d'altération les plus représentatifs de la réalité par vieillissement accéléré en laboratoire, à partir d'un climat donné. Ce vieillissement se base sur les paramètres définis dans le Chapitre 1 (1.4) et est appelé « cycle annuel d'altération accéléré ».

2. DES DONNEES DE SITE AU LABORATOIRE	41
2.1. Choix des zones géographiques et des calcaires de référence	43
2.1.1. Zones géographiques et climat	43
2.1.2. Calcaires de référence	44
2.1.3. Conclusion	45
2.2. Description des sites étudiés	45
2.2.1. Site en Côte d'Or	45
2.2.1.1. Description générale	45
2.2.1.2. Données climatiques	45
2.2.1.3. Faciès témoin	45
2.2.1.4. Faciès altérés	47
2.2.2. Site dans le Gard	48
2.2.2.1. Description générale	48
2.2.2.2. Données climatiques	49
2.2.2.3. Faciès témoin	50
2.2.2.4. Faciès altérés	51
2.2.3. Conclusion	53
2.3. Cycles annuel d'altération accélérés retenus en laboratoire	53
2.3.1. Degré de saturation	54
2.3.1.1. Cinétique de saturation par précipitations	54
2.3.1.2. Cinétique de désaturation par séchage naturel	56
2.3.1.3. Cinétique de désaturation forcée par prise en compte de la température et de l'ensoleillement	56
2.3.1.4. Précipitations et séchage naturel : cycle de saturation-désaturation	58
2.3.2. Gel-dégel	61
2.3.2.1. Valeur critique du degré de saturation vis-à-vis du gel	61
2.3.2.2. Température de gel dans le massif	64
2.3.3. Dissolution	66
2.3.3.1. Degré de saturation	66
2.3.3.2. Température de la roche	67
2.3.3.3. Qualité de l'eau avant percolation : pH de l'eau	67
2.3.3.4. Temps de percolation : durée d'exposition	68
2.3.3.5. Débit de l'apport en eau	68
2.3.4. Constitution du cycle annuel d'altération accéléré	69
2.3.4.1. Récapitulatif	69
2.3.4.2. Généralisation	69
2.3.5. Déroulement du cycle annuel d'altération accéléré	70
2.3.5.1. Procédures d'essais (saturation, gélivation, dissolution)	70
2.3.5.2. Procédures d'évaluation de l'endommagement	71
2.3.6. Conclusion	72
2.4. Conclusion	72

2.1. Choix des zones géographiques et des calcaires de référence

2.1.1. Zones géographiques et climat

La France métropolitaine est située dans la zone tempérée. Il est néanmoins possible de la découper en régions climatiques différentes (délimitées par département pour plus de clarté sur la Figure 2-1) :

- A l'ouest : le climat océanique (en bleu sur la Figure 2-1).
- En allant vers l'est : le climat à dominante océanique se continentalise (en bleu clair et vert sur la Figure 2-1).
- Au Sud-Est : le climat méditerranéen (en orange sur la Figure 2-1).
- En altitude (les Alpes, les Pyrénées, le Massif central, les Vosges et le Jura) : le climat montagnard (en marron sur la Figure 2-1).



Figure 2-1 Carte des climats en France par département (source: www.cartesfrance.fr)

Ce travail vise à mettre en évidence le rôle du climat dans l'altération. Il est donc pertinent de choisir des zones géographiques françaises très contrastées afin de bien cerner l'influence des conditions climatiques. Nous avons donc choisi deux zones :

- une zone de climat océanique à tendance continentale (en vert sur la Figure 2-1);
- une zone de climat méditerranéen (en orange sur la Figure 2-1).

De plus, sachant qu'un des phénomènes d'altération majeurs est la gélivation, il est intéressant de choisir les zones géographiques en fonction de la fréquence et de l'intensité des températures négatives. Il existe une norme (NF B10-601, 2006) qui définit des zones géographiques en fonction de l'intensité des températures de gel. Cette norme s'applique aux produits de pierre naturelle, destinés aux éléments de maçonnerie, mais c'est actuellement la seule norme faisant état des zones de gel en France. Nous allons donc baser notre choix sur cette classification. Elle définit 4 zones géographiques de gel en France en tenant compte de l'altitude (Figure 2-2).

Ces zones correspondent à des classes de gel (sévère, modéré, faible et très faible). Ces classes sont définies par les conditions suivantes (mesurées en moyenne annuelle sur les 30 dernières années) :

- La classe A « gel très faible » ne compte pas plus de 2 jours par an ayant atteint une température inférieure à -5°C
- La classe B « gel faible » ne compte pas plus de 4 jours par an ayant atteint une température inférieure à -6°C
- La zone C « gel modéré » ne compte pas plus de 10 jours par an ayant atteint une température inférieure à -10°C
- La zone D « gel sévère » compte au moins 10 jours par an ayant atteint une température inférieure à -10°C

Pour que les effets de la gélivation ne soient pas inexistants ou trop radicaux, nous choisissons un site en Côte-d'Or (gel modéré (C)) et un site dans le Gard (gel faible (B)).

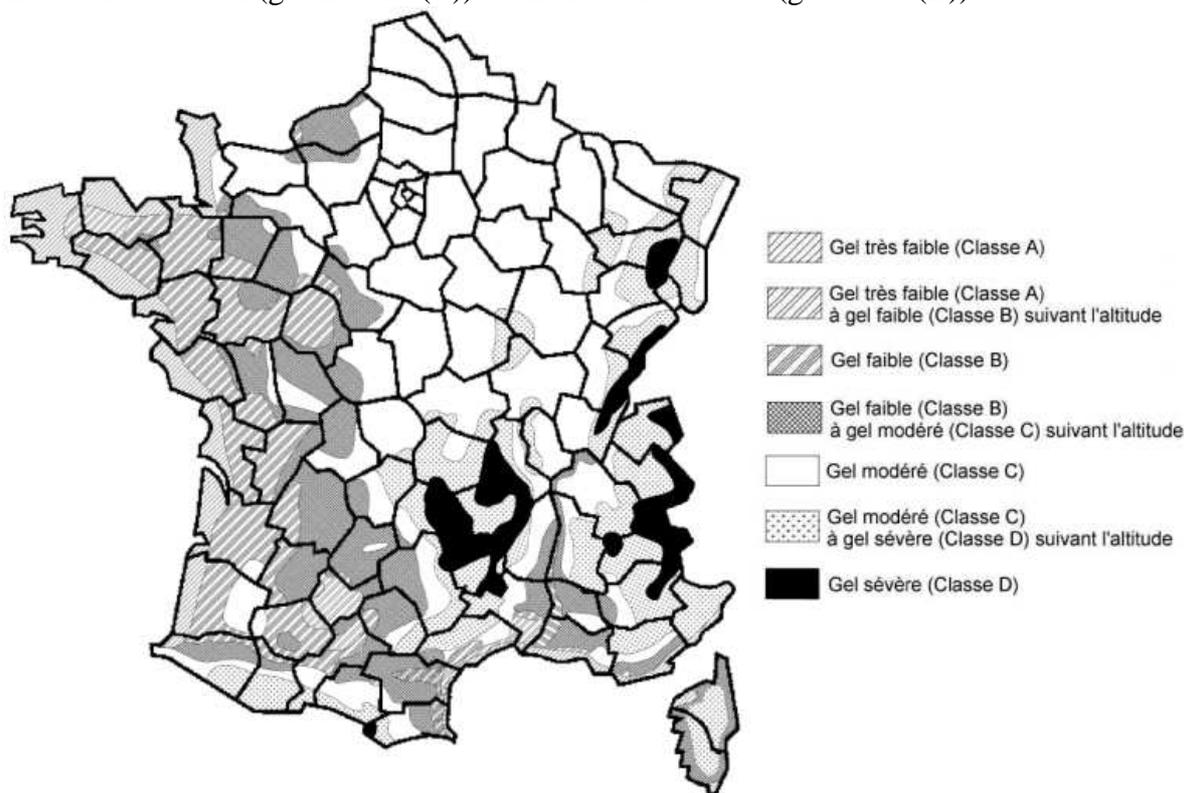


Figure 2-2 Répartition des zones de gel en France (NF B10-601, 2006)

2.1.2. Calcaires de référence

Le critère qui a guidé le choix des calcaires de référence a été d'avoir des roches :

- dans lesquelles l'eau puisse être en quantité suffisante pour qu'elle puisse avoir des effets altérants donc avec une porosité moyenne. Cependant il faut aussi que la proportion d'eau dans le calcaire reste modérée pour éviter que les effets altérants de l'eau ne soient trop rapides, il ne faut donc pas une porosité trop élevée. Nous avons donc choisi des valeurs de porosité comprises entre 10 et 20% ;
- avec une composition et une microstructure proche pour ne pas multiplier les variables.

Calcaire	Commune où se situe la carrière	Département (Région)	Classe de gel (NF B10-601, 2006)	Station Météo France la plus proche	Climat
Chamesson	Chamesson	Côte d'Or (Bourgogne)	C	Troyes-Barberey	Océanique à tendance continentale
Pierre de Lens	Moulézan	Gard (Languedoc-Roussillon)	B	Nîmes-Courbessac	Méditerranéen

Tableau 2-1 Caractéristiques géographiques des calcaires de référence

Nous avons donc choisi des calcaires oolithiques. Les oolithes sont des petites sphères de diamètres de 0,5 à 2 mm en moyenne, dont le centre (nucléus) est un débris et dont l'enveloppe (cortex) est formée de minces couches donnant une structure concentrique à laquelle peut se superposer une structure radiaire affectant toutes les enveloppes ou quelques unes seulement (Foucault et Raoult, 2005) ;

- avec des sensibilités à la gélivation définies par la norme NF EN 12371 (2010) différentes.

Ainsi, pour la Côte-d'Or, nous avons opté pour le calcaire de Chamesson et pour le Gard, nous avons choisi la Pierre de Lens (Tableau 2-1). Les descriptions de ces calcaires sont données dans les paragraphes 2.2.1.3 et 2.2.2.3.

2.1.3. Conclusion

Nous avons choisi deux sites d'étude avec des climats et des conditions de gel différenciés. Les calcaires associés à ces sites d'étude ont été choisis pour leurs caractéristiques similaires au niveau de leur microstructure (oolithique), leur composition minéralogique et leur porosité mais aussi parce qu'ils présentent une sensibilité à la gélivation différentes.

Nous allons donc étudier le processus d'altération du calcaire de Chamesson en Côte d'Or et le processus d'altération de la Pierre de Lens dans le Gard. La prochaine partie concerne la description de ces deux sites et de leur calcaire respectif.

2.2. Description des sites étudiés

2.2.1. Site en Côte d'Or

2.2.1.1. Description générale

Le site étudié en Côte d'Or se situe dans la commune de Chamesson (Figure 2-3). La carrière de Chamesson est toujours en exploitation.

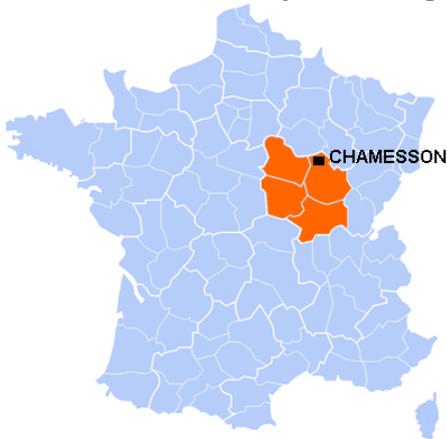


Figure 2-3 Localisation de la commune où se trouve le calcaire de référence en Côte d'Or

2.2.1.2. Données climatiques

La station météorologique la plus proche de la commune de Chamesson est la station de Troyes-Barbery qui nous a permis d'obtenir des données climatiques. Nous présentons, ici, les valeurs de températures (Figure 2-4) et de précipitations (Figure 2-5) mensuelles moyennes fournies par Météo France (2009a) calculées sur la période de 1971-2000.

2.2.1.3. Faciès témoin

Le calcaire de Chamesson date du Bathonien moyen, de texture oolithique (Figure 2-6), il a une patine de couleur beige clair, légèrement grisée et une couleur beige clair à blanchâtre à la cassure. Il s'agit d'un calcaire relativement homogène présentant des grains fins (taille inférieure au millimètre) et par endroit des débris de coquilles (de l'ordre du millimètre).

En lames minces avec une lumière polarisée (Figure 2-7), on observe des cristaux de calcite sparitique qui cimentent les oolithes.

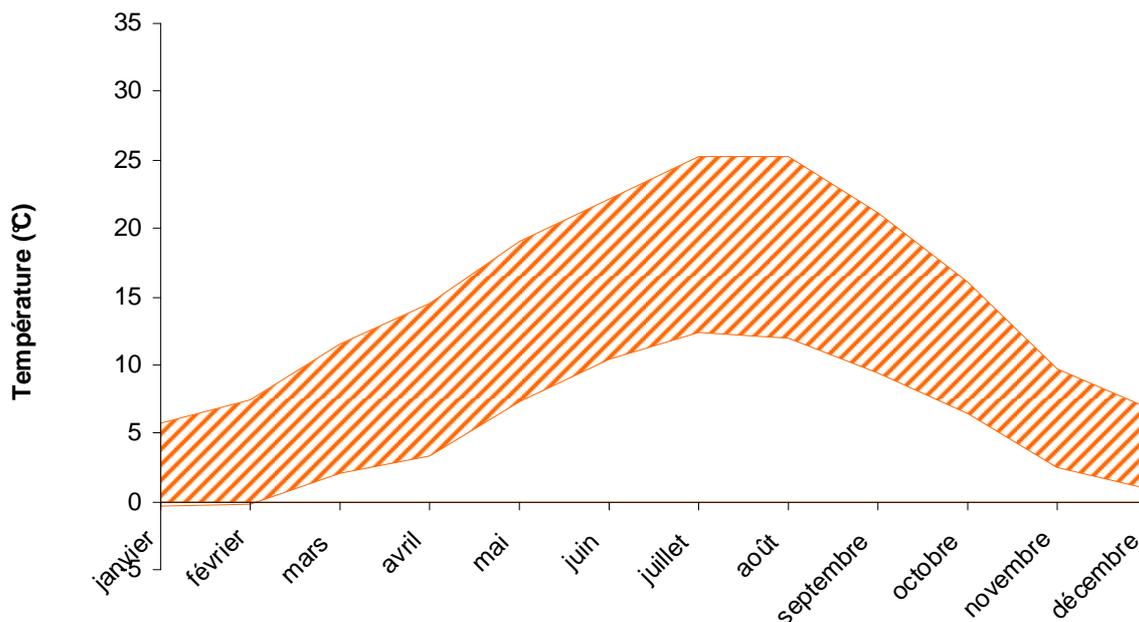


Figure 2-4 Températures mensuelles moyennes minimales et maximales calculées sur la période 1971-2000 pour la station Troyes-Barbercy (Météo France, 2009a)

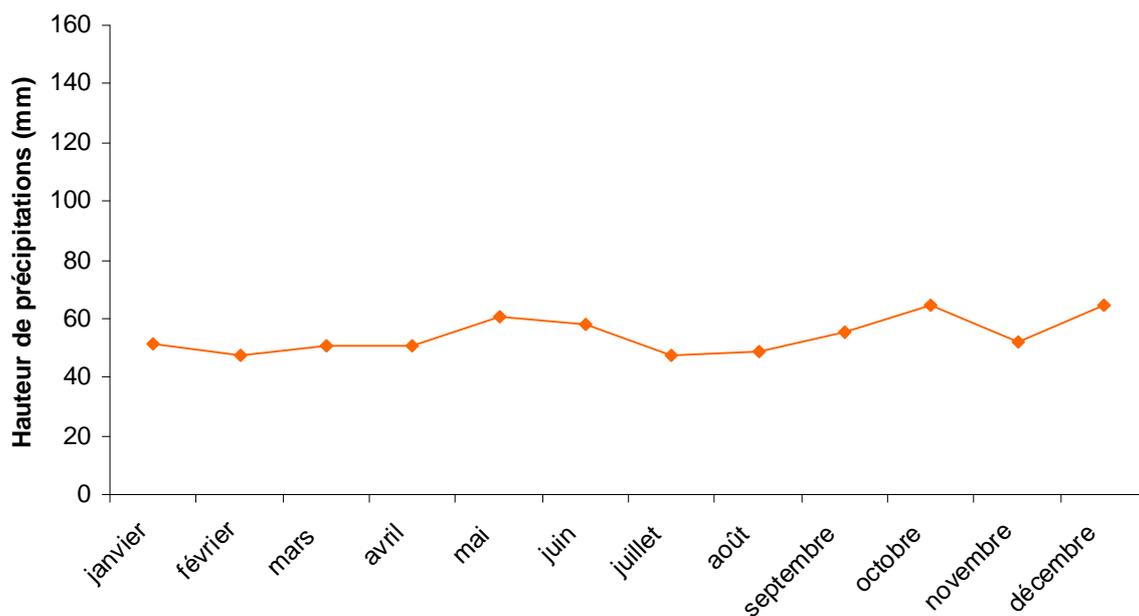


Figure 2-5 Cumuls mensuels moyens des précipitations calculés sur la période 1971-2000 pour la station Troyes-Barbercy (Météo France, 2009a)

Au niveau des caractéristiques physico-mécaniques, le calcaire de Chamesson a :

- une vitesse du son de 3950 ± 160 m/s ;
- un module d'élasticité dynamique de 33 ± 1 GPa ;
- une fréquence de résonance de $23,9 \pm 0,4$ kHz ;
- une résistance en compression simple de 79 ± 1 MPa ;
- une porosité totale moyenne de $17,4 \pm 0,5$ % ;
- une perméabilité à l'eau moyenne de 88 ± 26 μ D (1μ D = 10^{-18} m²).

De plus, selon la norme permettant d'évaluer la résistance au gel d'une pierre mise en œuvre (NF EN 12371, 2010), le calcaire de Chamesson résiste à 16 cycles de gel-dégel. Il est donc sensible à la gélivation.

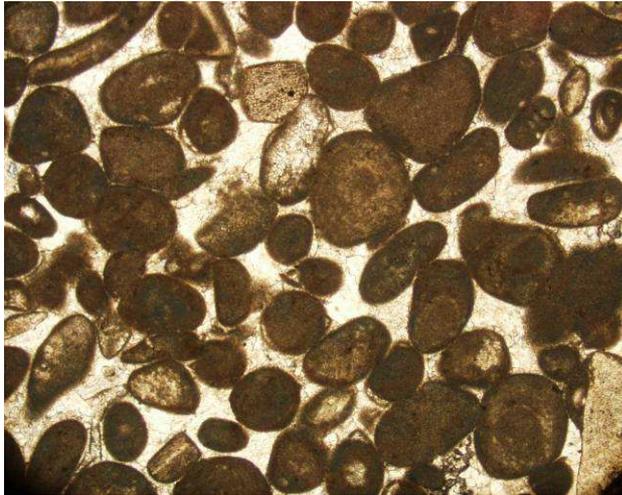


Figure 2-6 Structure oolithique du calcaire de Chamesson, microscope optique, lumière polarisée (LN,x25)

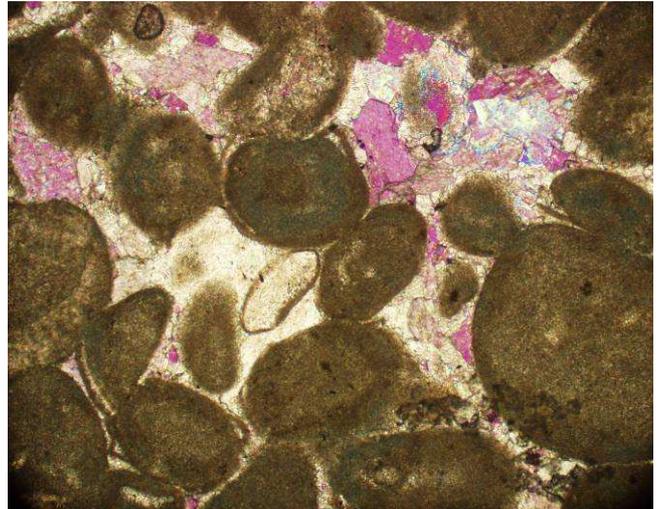


Figure 2-7 Cristaux de calcite sparitique cimentant les oolithes (cristaux colorés sur l'image), microscope optique, lumière polarisée et analysée (LPA+ λ , x50).

2.2.1.4. Faciès altérés

Nous sommes allés sur des sites proches de la zone d'étude pour observer les faciès altérés du calcaire de Chamesson. En plus des observations visuelles sur ces sites, nous avons prélevé des échantillons de calcaire présentant des faciès à différents stades d'altération pour les étudier en laboratoire. Ces mesures seront détaillées dans le Chapitre 5 (5.2.2).

Tout d'abord, dans la carrière de Chamesson, des blocs jugés non exploitables et stockés présentent une désagrégation en surface en disques due aux conditions climatiques (Figure 2-8). On peut considérer qu'il s'agit d'un **état d'altération peu avancé**. Pour le Chapitre 5 (5.2.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès peu altéré* ».



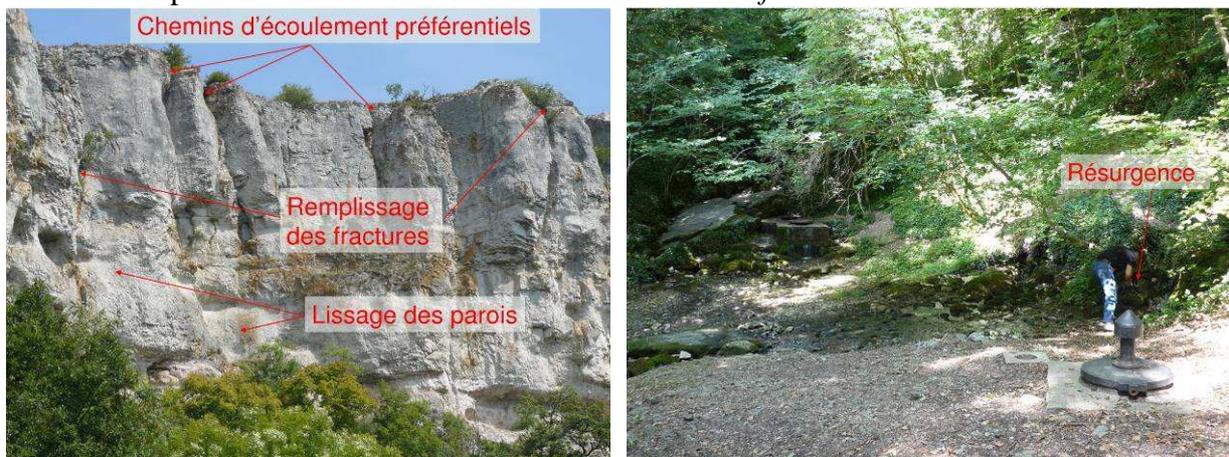
Figure 2-8 Chamesson – Carrière

Pour compléter ces observations visuelles, nous avons cherché un site présentant un **état d'altération plus avancée dans le temps**. Nous nous sommes donc rendus sur un site proche de la carrière de Chamesson, situé à la Roche Béron. Nous avons ainsi pu y observer la dégradation naturelle du calcaire (Figure 2-9). Pour le Chapitre 5 (5.2.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès altéré* ».



Figure 2-9 La Roche Béron – calcaire altéré

Enfin, dans cette même zone géographique, nous nous sommes attardés sur un site présentant un **état d'altération très avancé**. Ce site se situe dans la commune de Baulme-la-Roche, nous avons pu observer un paysage typique d'une altération karstique (Figure 2-10) où les effets de la dissolution et de l'écoulement de l'eau sont visibles macroscopiquement : creusement de chemins d'écoulement préférentiels, lissage des parois rocheuses ou encore remplissage des fissures par de la végétation ou des argiles mais aussi la présence d'une résurgence en bas de la falaise rocheuse. Nous avons prélevé de l'eau provenant de cette résurgence pour des analyses de pH, repris dans le Tableau 2-8. Pour le Chapitre 5 (5.2.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès très altéré* ».



Vue d'ensemble

Résurgence en bas de la falaise

Figure 2-10 Baulme-la-Roche – Paysage karstique

2.2.2. Site dans le Gard

2.2.2.1. Description générale

Le site étudié dans le Gard se situe dans la commune de Moulezan (Figure 2-11). Le calcaire étudié ici sera qualifié dans l'ensemble du mémoire par le terme employé par les carriers : la Pierre de Lens. La carrière de la Pierre de Lens est une ancienne carrière romaine (Bessac, 2002), toujours en exploitation. L'affleurement de la Pierre de Lens se situe à l'étage du Barrémien supérieur (Bessac, 2002).

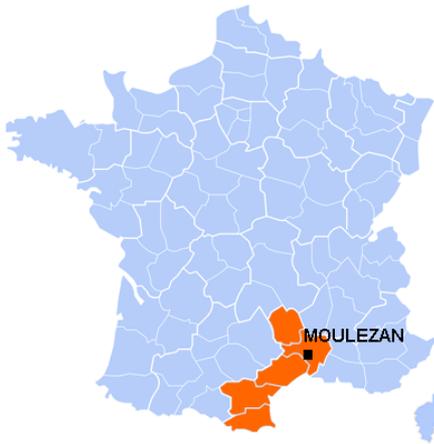


Figure 2-11 Localisation de la commune où se trouve le calcaire de référence dans le Gard

2.2.2.2. Données climatiques

La station météorologique la plus proche de la commune de Moulézan est la station de Nîmes-Courbessac. C'est donc celle qui a servi pour obtenir des données climatiques. Nous présentons, ici, les valeurs de températures (Figure 2-12) et de précipitations (Figure 2-13) mensuelles moyennes fournies par Météo France (2009a) calculées sur la période de 1971-2000.

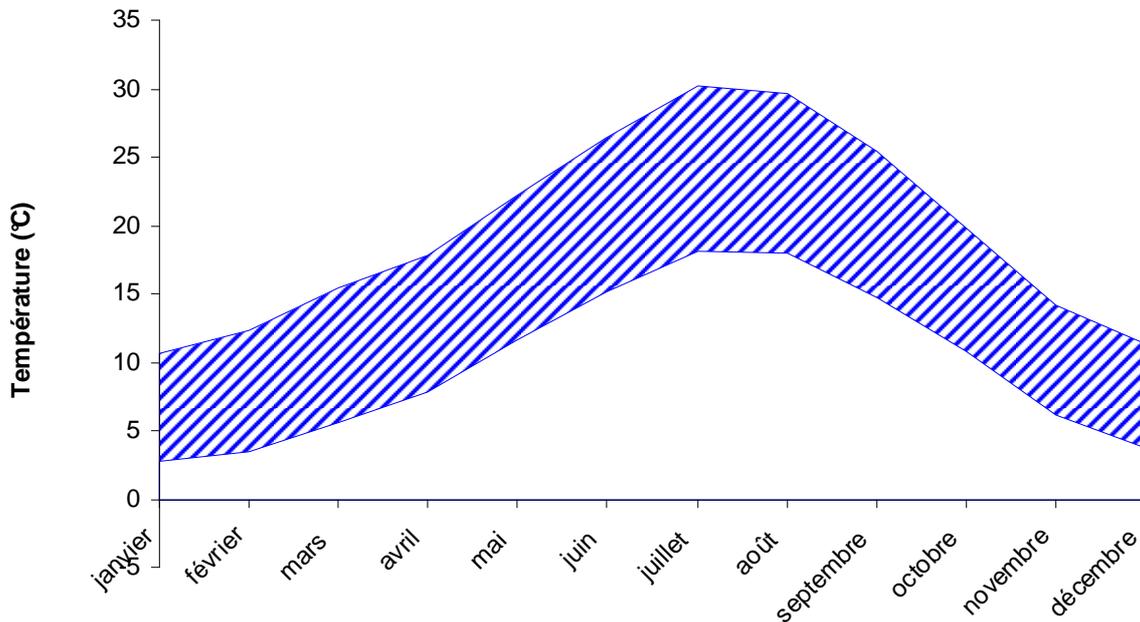


Figure 2-12 Températures mensuelles moyennes minimales et maximales calculées sur la période 1971-2000 pour la station Nîmes-Courbessac (Météo France, 2009a)

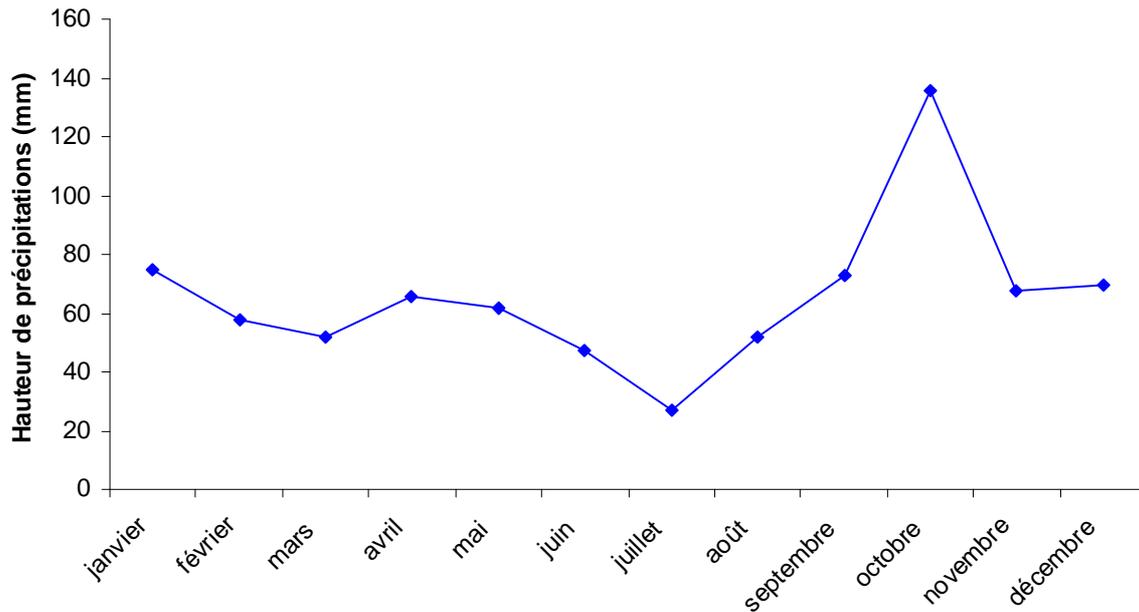


Figure 2-13 Cumuls mensuels moyens des précipitations calculés sur la période 1971-2000 pour la station Nîmes-Courbessac (Météo France, 2009a)

2.2.2.3. Faciès témoin

La Pierre de Lens est un calcaire du Barrémien supérieur, homogène et oolithique (Figure 2-14) avec une patine de couleur blanche et de couleur blanc ou beige-orangé à la cassure. Il s'agit d'un calcaire homogène à grains fins (taille inférieure au millimètre).

En lames minces (Figure 2-15), on observe que son ciment se compose de sparite et que ses oolithiques sont entourés de vides (en bleu).

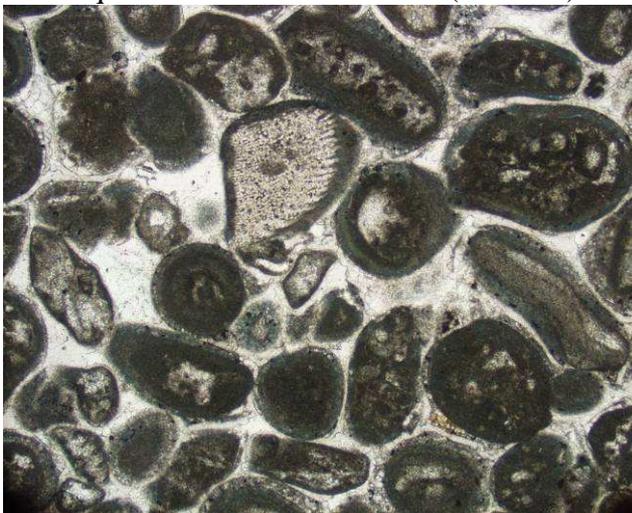


Figure 2-14 Structure oolithique de la Pierre de Lens, microscope optique, lumière polarisée (LPA, x25).

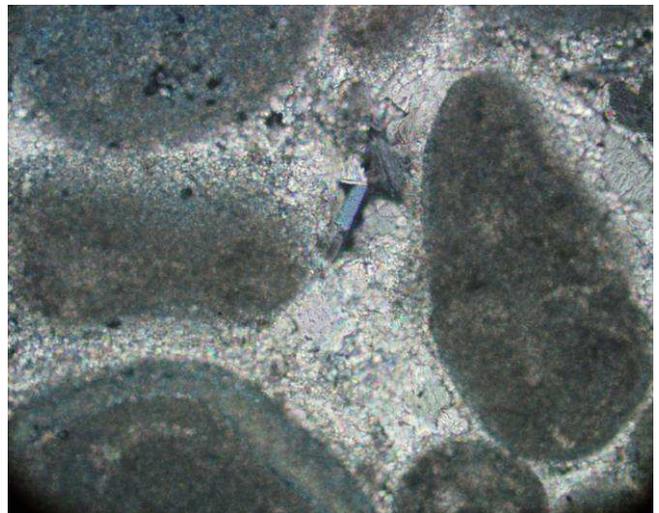


Figure 2-15 Le ciment est composé de sparite, microscope optique, lumière polarisée et analysée (LPA, x50). La résine bleue indique les vides autour des oolithes.

Au niveau des caractéristiques physico-mécaniques, la Pierre de Lens a :

- une vitesse du son de 4160 ± 180 m/s ;
- un module d'élasticité dynamique de 37 ± 2 GPa ;
- une fréquence de résonance de $24,9 \pm 0,9$ kHz ;
- une résistance en compression simple de 54 ± 11 MPa ;

- une porosité totale moyenne de $13,9 \pm 0,9 \%$;
- une perméabilité à l'eau moyenne de $409 \pm 197 \mu\text{D}$ ($1 \mu\text{D} = 10^{-18} \text{ m}^2$).

De plus, selon la norme permettant d'évaluer la résistance au gel d'une pierre (NF EN 12371, 2010), la Pierre de Lens résiste à 240 cycles de gel-dégel. Elle n'est donc pas sensible à la gélivation.

2.2.2.4. Faciès altérés

Nous sommes allés sur des sites proches de la zone d'étude pour observer les faciès altérés de la Pierre de Lens. En plus des observations visuelles sur ces sites, nous avons prélevé des échantillons de calcaire présentant des faciès à différents stades d'altération pour les étudier en laboratoire. Ces mesures seront détaillées dans le Chapitre 5 (5.3.2).



Figure 2-16 Vue d'ensemble de la carrière de Moulézan encore en exploitation



Figure 2-17 Zone de discontinuité dans la carrière de Moulézan encore en exploitation

Tout d'abord, nous nous sommes rendus dans la carrière encore en exploitation (Figure 2-16).

D'après le carrier, une zone impropre à l'exploitation est abandonnée depuis une dizaine d'années ce qui permet de donner un ordre de grandeur du temps d'exposition de la zone à l'altération climatique. L'affleurement est humide mais pas d'écoulement apparent. Cette zone présente une patine beige-orangée. Il s'agit d'un **état d'altération avancé**. Des échantillons ont été prélevés dans une zone de discontinuité (Figure 2-17). Pour le Chapitre 5 (5.3.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès peu altéré* ».

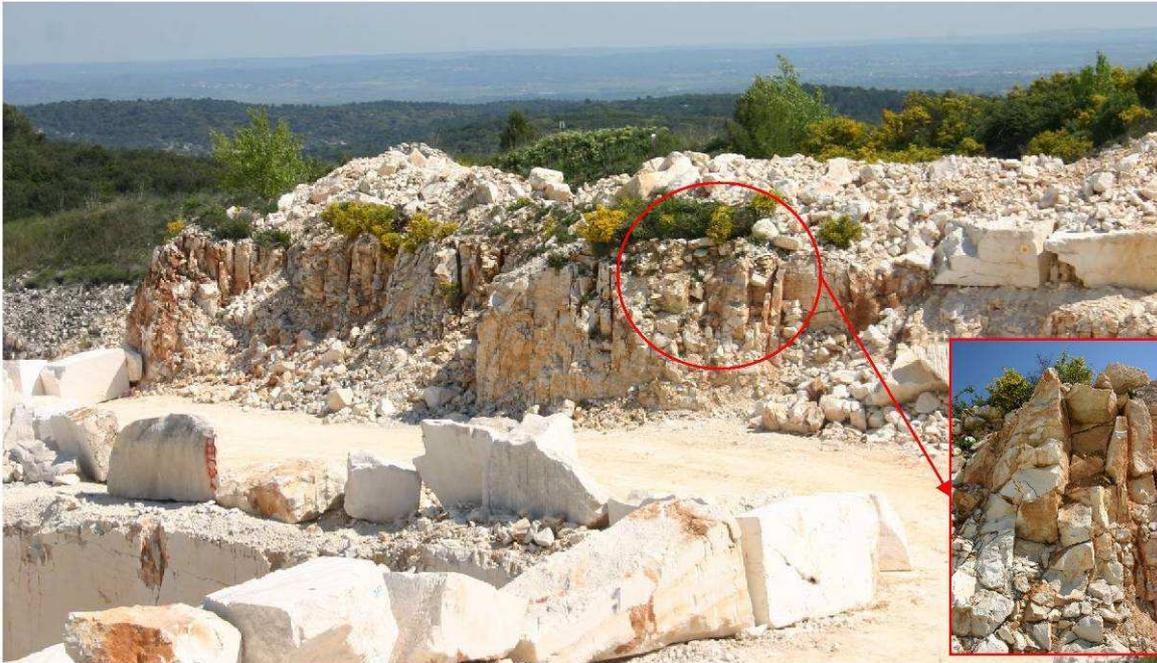


Figure 2-18 Partie sommitale de la carrière de Moulézan encore en exploitation

Des échantillons ont également été prélevés dans une zone en partie sommitale de la carrière en exploitation de Moulézan (Figure 2-18). Cette zone se situe juste en-dessous d'une végétation de type genêt/buis. On peut noter la présence d'argile de décomposition dans les zones fracturées de l'affleurement. Il n'y a pas d'écoulement visible à proximité. La patine est beige-orangée dans cette zone. Il semble que l'**état d'altération soit plus avancé** que dans la zone précédente. Pour le Chapitre 5 (5.3.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès altéré CE* ».



Figure 2-19 Carrière abandonnée de Bone

Pour compléter ces prélèvements issus de la carrière en exploitation de Moulézan, nous nous sommes rendus dans une carrière abandonnée proche de celle-ci à Bone. Nous avons récupéré des échantillons provenant d'un éperon rocheux laissé par l'exploitation, largement fracturé et

recouvert d'une végétation. L'observation de la fracturation indique des circulations d'eau. La patine est aussi grise (Figure 2-19). Cette zone correspond donc a priori à un **état d'altération très avancé**. Pour le Chapitre 5 (5.3.2), nous appellerons les échantillons prélevés dans cette zone « *les échantillons de faciès altéré CA* ».

Enfin, nous avons récupéré de l'eau d'une résurgence à proximité de la D124. La résurgence consistait en un réservoir d'eau peu profond à l'affleurement à flanc de colline et à proximité de la route (Figure 2-20). Nous avons mesuré le pH de l'eau provenant de cette résurgence, sa valeur est donnée dans le Tableau 2-8.



Figure 2-20 Résurgence à proximité de la D124

2.2.3. Conclusion

Les sites d'étude et les calcaires de référence sont maintenant déterminés et présentés.

Concernant les deux calcaires de référence de cette étude, ils présentent une différence microstructurale remarquable sur laquelle nous reviendrons dans les prochains Chapitres : la Pierre de Lens présente des vides autour de ses oolithes alors que le calcaire de Chamesson n'en a pas.

Nous avons vu que, sur site, différents faciès d'altération sont observables, ceci nous permettra de comparer les endommagements obtenus en laboratoire avec ceux observés sur site.

Le but de l'étude est d'obtenir les cinétiques d'altération, nous allons donc, à partir des données climatiques des sites, tenter de reproduire en laboratoire des cycles d'altération représentant au mieux la réalité et de façon accélérée. L'établissement de ces cycles constitue la partie suivante.

2.3. Cycles annuel d'altération accélérés retenus en laboratoire

Pour établir des cycles climatiques, il est dans un premier temps nécessaire de reprendre les paramètres présentés dans le Chapitre 1 (1.4) comme étant les variables permettant de relier les facteurs d'altération aux phénomènes d'altération. Nous nous intéressons ici aux paramètres reliés aux facteurs d'altération climatiques :

- le degré de saturation ;
- la température de la roche ;
- la qualité de l'eau avant percolation ;
- le temps de percolation ;
- le débit d'apport en eau.

Par ailleurs, l'étude bibliographique du Chapitre 1 (1.1) nous montre que les phénomènes d'altération majeurs sont la gélivation et la dissolution, sauf dans des cas bien précis (lorsqu'il

y a présence de sel par exemple). Nous allons donc réduire et diviser nos cycles d'altération en deux parties : la reproduction de l'altération par gélivation et de l'altération par dissolution. Avant de décrire ces deux étapes, il est nécessaire de connaître le degré de saturation des calcaires dans leur environnement climatique. Nous déterminerons donc ce paramètre indépendamment des deux étapes puis nous décrirons comment nous reproduisons l'altération par gélivation et par dissolution en laboratoire à partir des trois autres paramètres.

2.3.1. Degré de saturation

D'après la synthèse bibliographique du Chapitre 1 (Tableau 1-7), le degré de saturation dépend de facteurs d'altération de site et de facteurs d'altération climatique. Comme les sites observés sont fixés, nous laissons les facteurs d'altération de site de côté car invariants et nous regardons ici l'impact des facteurs d'altération climatiques sur le degré de saturation : les précipitations, la température et l'ensoleillement. Nous cherchons ici à déterminer l'évolution du degré de saturation en fonction du mois de l'année.

2.3.1.1. Cinétique de saturation par précipitations

Des simulations de saturation de la roche en laboratoire par précipitations pluviales (Figure 2-21) et nivales (Figure 2-22) ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques pour les deux calcaires de référence.

Pour reproduire le cas d'une roche affleurant, les parois latérales des éprouvettes sont isolées de l'extérieur par une membrane en latex. Les membranes empêchent l'eau de couler sur les bords de l'éprouvette. La face supérieure (où sont simulées les précipitations) et la face inférieure des éprouvettes sont laissées à l'air pour permettre la circulation verticale de l'eau dans l'éprouvette. Pendant la saturation, les éprouvettes sont placées dans une enceinte climatique à température constante de 5°C, pour limiter l'évaporation (cf. Figure 2-34).

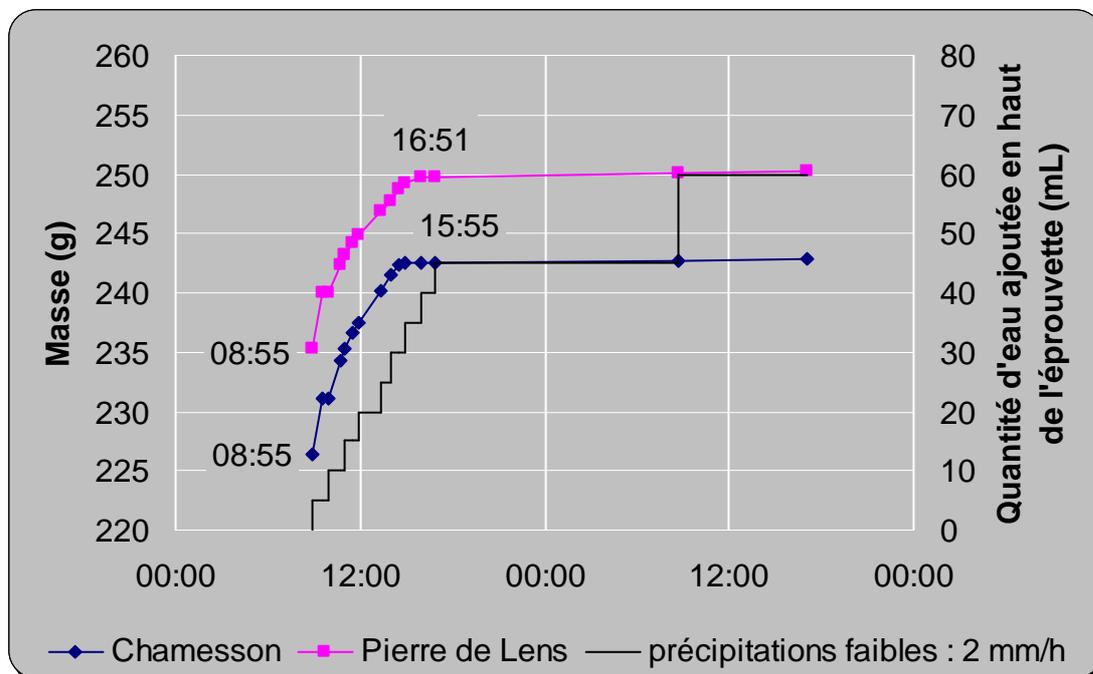


Figure 2-21 Simulation de saturation par pluie (50 mm sur une journée) sur des éprouvettes cylindriques 40*80 mm à 5°C

Pour la simulation de précipitations par pluie, nous avons procédé de la façon suivante :

- 1 : étude des données de **conditions de pluies faibles** en France métropolitaine ; 2 mm de précipitations par heure (Météo France, 2009b), pour être dans le cas de saturation minimale ;

- 2 : calcul de l'équivalence de 2 mm d'eau de pluie par heure en mL d'eau à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette (1 mm de précipitations correspond à 1 L d'eau/m², or la surface de nos éprouvettes est de 0,001256 m², donc, dans ce cas, 2 mm de précipitations correspond à 2,5 mL d'eau par heure) ;

- 3 : application toutes les heures de la quantité d'eau calculée pendant une journée sur la surface supérieure des éprouvettes avec leurs membranes, avec une quantité plus importante appliquée le soir (pour des raisons pratiques).

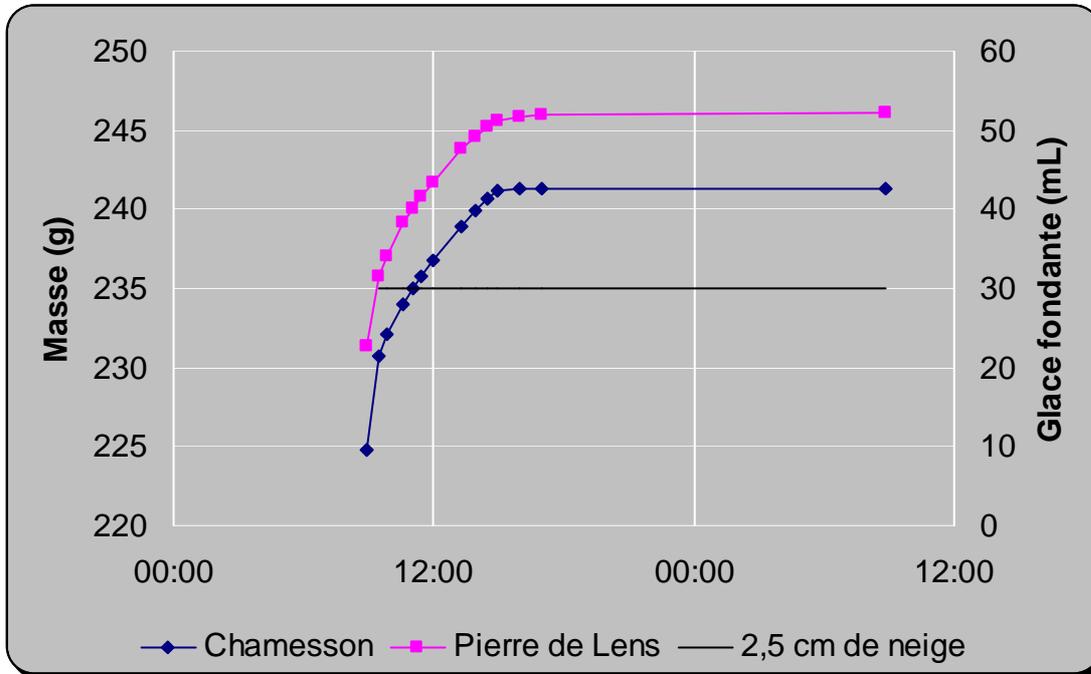


Figure 2-22 Simulation de saturation par neige fondante (2,5 cm d'épaisseur) sur des éprouvettes 40*80 mm à 5°C

Pour la simulation de précipitations par neige fondante, nous avons procédé en utilisant le rapport neige-précipitations courant (Dubé, 2003) : 1 cm de neige équivaut à 10 mm de précipitations. Nous devons donc déterminer la quantité d'eau à appliquer en surface des échantillons pour qu'elle corresponde à la quantité de précipitations précédente. Or sur les résultats de la Figure 2-21, nous voyons que les éprouvettes sont saturées en moins de 12 heures. Nous appliquons donc la quantité de précipitations pour 12 heures uniquement, soit 2 mm/h * 12 h = 24 mm de précipitations. Nous arrondissons cette valeur à 25 mm, ce qui correspond à 2,5 cm de neige. Or 25 mm de précipitations vaut 30 mL d'eau, donc nous plaçons 30 mL d'eau gelée en surface des éprouvettes et réalisons des mesures pendant 12 heures.

Le même principe que pour la reproduction de la pluie a été appliqué.

Les mesures de prise en eau par pesée ont été réalisées toutes les 30 min pendant les premières heures puis de façon plus espacée du fait de l'évolution plus lente.

Au sujet des mesures réalisées, on remarque que :

- Le calcaire de Chamesson atteint son niveau de saturation maximal en 7 heures pour la simulation de neige (Figure 2-22) et pour la simulation de pluie (Figure 2-21) ;
- La Pierre de Lens atteint son niveau de saturation maximal en 8 heures pour la simulation de neige (Figure 2-22) et pour la simulation de pluie (Figure 2-21).

Notons que des simulations de précipitations dans la littérature donnent des résultats similaires : Mamillan et Cuendet (1988) ont obtenu un degré de saturation élevé sur du calcaire de Vassens après 6 heures de précipitations simulées.

Ainsi, en moins d'une journée, la saturation maximale est atteinte pour les deux échantillons de calcaire et quel que soit le type de précipitations (neige ou pluie).

Nous pouvons donc conclure qu'une journée de pluie ou de neige normale permet de saturer nos échantillons à leur valeur maximale. Sur le terrain, cette saturation correspond à une saturation en surface (sur les 8 premiers centimètres).

2.3.1.2. Cinétique de désaturation par séchage naturel

Des simulations de désaturation naturelle ont ensuite été réalisées.

Les éprouvettes préalablement saturées par simulation de pluie ou de neige, sont, dans leur membrane, laissées dans l'enceinte climatique à 5°C et des mesures de leur masse sont faites régulièrement.

On obtient ainsi une cinétique de désaturation par séchage naturel des deux échantillons de calcaire (Figure 2-23).

Ensuite, pour une évaluation de la perte de masse en fonction du temps à maxima, nous avons extrapolé, de façon très approximative, par une droite pour atteindre la valeur de la masse des éprouvettes à l'état sec. De cette façon, pour la Pierre de Lens, la masse à l'état sec est atteinte en 28 jours. Pour le calcaire de Chamesson, la masse à l'état sec est atteinte entre 33 et 37 jours.

On peut donc dire que, à 5°C (i.e. sans évaporation), la Pierre de Lens sèche en 1 mois et le calcaire de Chamesson en 1 mois et 1 semaine.

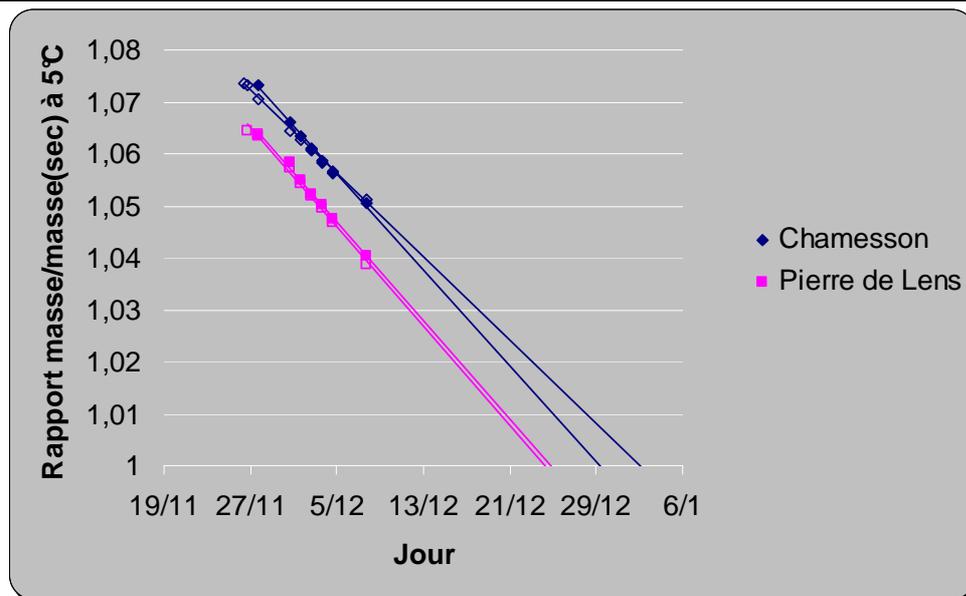


Figure 2-23 Mesure de la cinétique de désaturation des échantillons à 5°C et estimation par courbe de tendance du temps de retour à la masse correspondant à l'état sec

2.3.1.3. Cinétique de désaturation forcée par prise en compte de la température et de l'ensoleillement

L'ensoleillement et la température ont une influence sur le degré de saturation dans la mesure où ils engendrent l'évaporation de l'eau. Il faut donc les prendre en compte pour l'établissement du degré de saturation réelle. Nous parlerons de la température uniquement, considérant que l'ensoleillement peut s'y ramener.

Nous devons déterminer à partir de quelle température il y a une évaporation suffisamment importante pour qu'elle soit prise en compte. Or, la quantité d'eau que peut contenir l'air augmente avec la température (Çengel et al., 2009). C'est la pression de vapeur saturante qui régit cette quantité. La formule de Clapeyron donne sa valeur en fonction de la température.

DIAGRAMME DE L'AIR HUMIDE

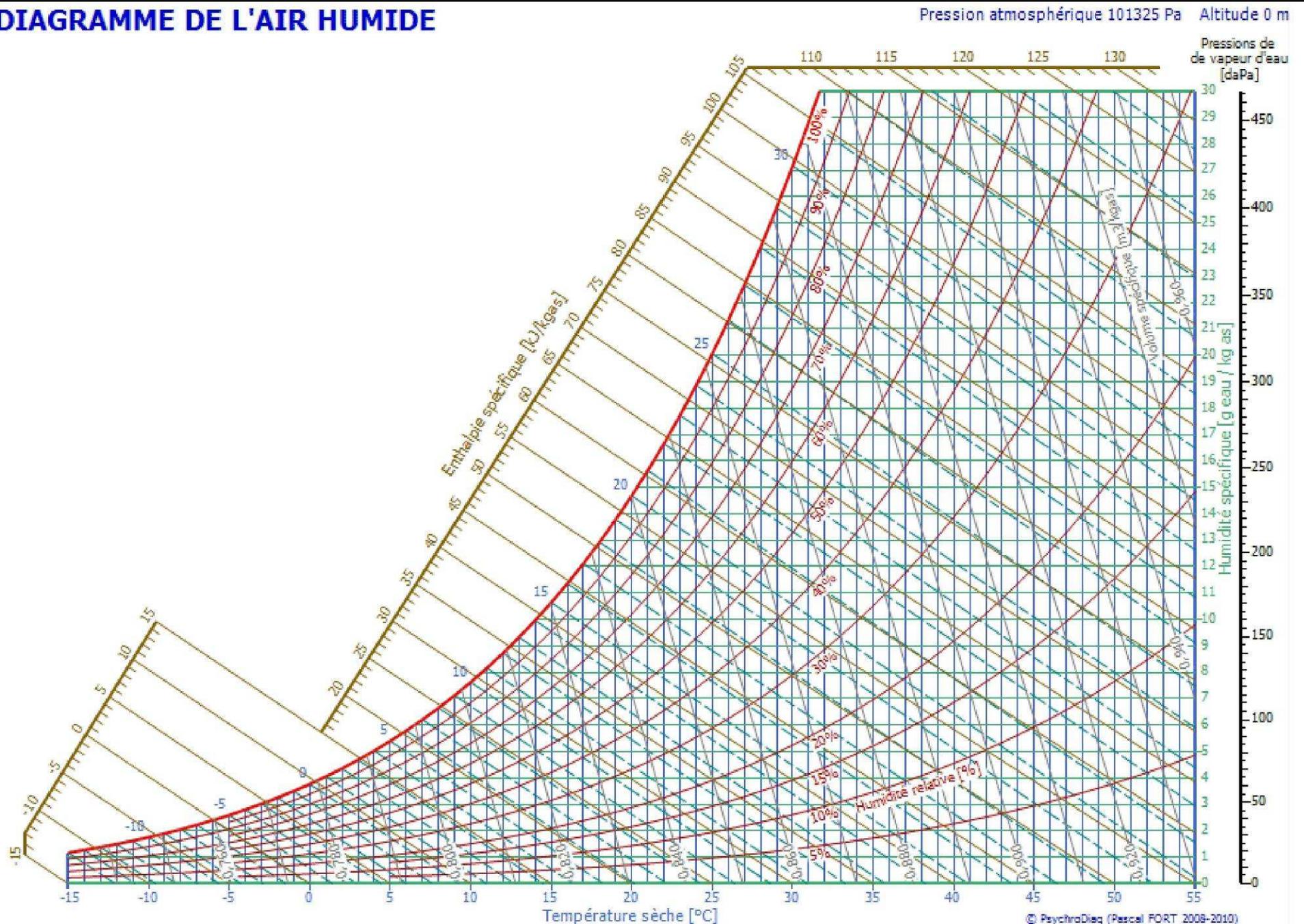


Figure 2-24 Diagramme de l'air humide (Fort, 2011)

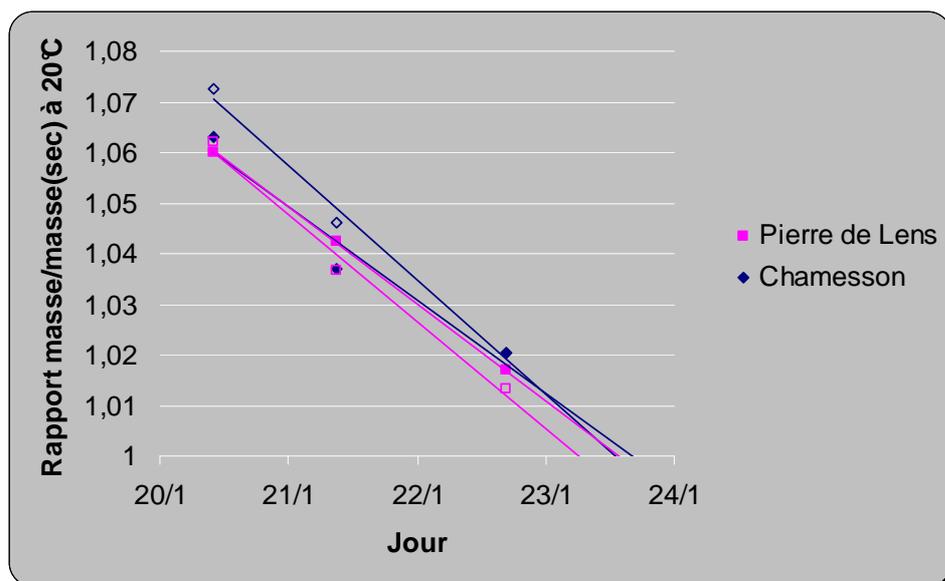


Figure 2-25 Mesure de la cinétique de désaturation des échantillons à 20°C et estimation par courbe de tendance du temps de retour à la masse correspondant à l'état sec

Or, d'après la Figure 2-24, la température implique une forte augmentation de la quantité d'eau contenue dans l'air à partir de 20°C. Nous choisissons donc de ne considérer, pour la prise en compte de l'évaporation, que les températures supérieures à 20°C. **L'évaporation doit donc être prise en compte pour les mois où la valeur moyenne maximale de la température est supérieure à 20°C.** La Figure 2-4 et la Figure 2-12 donnent les données mensuelles de température pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens. Ainsi, pour la Pierre de Lens, la période où les températures moyennes maximales sont supérieures à 20°C est de mai à octobre et pour le calcaire de Chamesson, elle est de juin à septembre. L'évaluation de l'influence de la température sur le degré de saturation va être effectué selon le même principe que les essais de désaturation précédents (2.3.1.2) mais en passant la température de 5°C (sans évaporation de l'eau) à 20°C (avec évaporation de l'eau).

D'après la Figure 2-25, en prenant en compte l'évaporation et donc la hausse de température associée, on peut dire que la Pierre de Lens et le calcaire de Chamesson sèchent en 3 jours à 20°C.

2.3.1.4. Précipitations et séchage naturel : cycle de saturation-désaturation

Cette partie vise à établir l'évolution du degré de saturation des échantillons de calcaire au cours d'une année complète. Pour ce faire, nous avons utilisé les données sur les précipitations des stations météorologiques les plus proches des carrières des calcaires étudiés obtenues par le biais de Météo France (2009a). Ces données sont regroupées dans le Tableau 2-2.

Les valeurs du Tableau 2-2 permettent de connaître la fréquence et la quantité d'apport en eau par les précipitations sur les deux sites. Ces valeurs sont nécessaires pour établir l'évolution du degré de saturation en fonction du mois de l'année :

- à Troyes Barberey (Chamesson), le nombre de jours avec précipitations par mois est relativement constant et vaut **10 ± 1 jours**. Nous considérons que le nombre de jours avec précipitations est réparti de façon homogène sur le mois, ce qui fait qu'il pleut en moyenne tous les 3 jours. De plus, la hauteur de précipitations mesurée mensuellement est également assez stable et vaut $54,3 \pm 6,2$ mm. L'apport en eau est donc, en moyenne, de **7 mL tous les 3 jours**, en considérant que les 10 jours de précipitations sont bien répartis sur le mois.

- à Nîmes-Courbessac (Pierre de Lens), le nombre de jours avec précipitations par mois est relativement constant et vaut **6 ± 1 jours**. Nous considérons donc là aussi que le nombre de précipitations est bien réparti sur le mois, soit des précipitations tous les 5 jours. En revanche, la hauteur de précipitations mesurée mensuellement est très variable : elle vaut $65,2 \pm 25,9$ mm. La quantité d'eau doit donc être considérée de façon plus détaillée tout au long de l'année. Il existe en fait trois périodes :

+ une période avec des précipitations semblables à celles du site de Chamesson (de novembre à juin et août et septembre) avec une moyenne de $62,0 \pm 9,6$ mm de précipitations, soit un apport en eau de **14 mL tous les 5 jours**;

+ une période sèche en juillet (26,9 mm de précipitations, soit un apport en eau de **6 mL tous les 5 jours**);

+ une période très arrosée en octobre (135,7 mm de précipitations, soit un apport en eau de **29 mL tous les 5 jours**).

Station Météo France (calcaire concerné)	Troyes Barberey (Chamesson)		Nîmes Courbessac (Pierre de Lens)	
	Quantité : Hauteur de précipitations (mm)	Fréquence : Nombre de jours avec précipitations (j)	Quantité : Hauteur de précipitations (mm)	Fréquence : Nombre de jours avec précipitations (j)
1971-2000	Cumul mensuel moyen	Total mensuel moyen	Cumul mensuel moyen	Total mensuel moyen
janvier	51,3	11	74,5	7
février	47,4	10	57,9	6
mars	51	11	51,5	6
avril	50,8	10	65,9	7
mai	60,7	11	61,7	6
juin	58,1	10	47	5
juillet	47,6	7	26,9	3
août	48,6	7	51,8	4
septembre	55	8	72,7	5
octobre	64,4	10	135,7	7
novembre	52,1	10	67,4	6
décembre	64,4	11	69,6	6
Moyenne	54,3	10	65,2	6
Ecart type	6,2	1	25,9	1

Tableau 2-2 Données sur les précipitations (Météo France, 2009a) des stations météorologiques les plus proches des calcaires étudiés, valeurs mensuelles.

Le Tableau 2-3 donne, à partir des informations du Tableau 2-2, les cinétiques d'apport en eau à prendre en compte expérimentalement pour la détermination du degré de saturation en fonction du mois de l'année.

Précipitations	Chamesson	Pierre de Lens		
Période	toute l'année	de novembre à juin et août et septembre	juillet	octobre
Quantité mensuelle	54 mm	65 mm	27 mm	136 mm
Fréquence	10 jours/mois	6 jours/mois		
Sur la surface des éprouvettes 40*80				
Quantité mensuelle	65 mL	82 mL	37 mL	171 mL
Cinétique	7 mL/3jours	14 mL/5jours	6 mL/5jours	29 mL/5jours

Tableau 2-3 Résumé des données météorologiques et calcul de la cinétique d'apport d'eau pour des éprouvettes cylindriques 40*80 mm

On a choisi arbitrairement de commencer l'apport en eau le 1^{er} juillet, période où l'échantillon contient peu d'eau. Ce choix arbitraire ne change rien à l'interprétation et l'exploitation des résultats faites dans la suite de ce paragraphe.

De plus, pour des éprouvettes cylindriques 40*80 mm, des mesures du volume des vides ont été réalisées sur un nombre conséquent d'éprouvettes pour estimer le volume d'eau accessible dans les échantillons des deux calcaires.

Par ailleurs, les cinétiques de saturation et de désaturation des éprouvettes du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens ont été établies aux paragraphes 2.3.1.1 et 2.3.1.2.

Un récapitulatif de ces informations est donné dans le Tableau 2-4.

L'ensemble des informations (apport en eau par les précipitations et cinétiques de saturation et de désaturation des deux calcaires) permet, par calcul, d'établir les variations du degré de saturation des éprouvettes du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens au cours d'une année simulée.

Apport en eau		Volume des vides par échantillon		Cinétique de saturation	Cinétique de désaturation	
Période de l'année concernée		Quantité	moyenne (mL)	Valeur (mL/jour)	Période de l'année	Valeur (mL/jour)
Chamesson	Toute l'année	7 mL/3jours	16	16	d'octobre à mai	0,4
					de juin à septembre	5,3
Pierre de Lens	juillet	6 mL/5jours	17	17	de novembre à avril	0,6
	août et septembre	14 mL/5jours				
	octobre	29 mL/5jours			de mai à octobre	5,7
	de novembre à juin	14 mL/5jours				

Tableau 2-4 Récapitulatif de l'ensemble des informations obtenues pour l'établissement du cycle de saturation/désaturation

Ce calcul a été effectué de la façon suivante :

- pour chaque jour de l'année, on donne **l'apport en eau** (tous les 3 jours pour le calcaire de Chamesson et tous les 5 jours pour la Pierre de Lens) en commençant le 1^{er} juillet;
- le calcul **commence pendant la période la plus chaude de l'année** (1^{er} juillet), c'est-à-dire en été, de cette façon, il est raisonnable de partir d'un état sec (0% du degré de saturation);
- le jour d'apport en eau est considéré comme **un jour de saturation en eau** pour le calcaire considéré (sachant que cet apport ne peut pas dépasser le volume total de vides que peut contenir un échantillon);
- les jours qui suivent, avant le prochain jour d'apport en eau, correspondent à **des jours de désaturation** (la cinétique de désaturation dépend de la période de l'année, avec ou sans évaporation).

On obtient ainsi un volume d'eau contenu dans le calcaire pour chaque jour de l'année, le rapport de ce volume d'eau sur le volume d'eau total que peut contenir un échantillon donne le degré de saturation du calcaire pour chaque jour de l'année. On aboutit ainsi au cycle de saturation-désaturation expérimental des deux calcaires.

La Figure 2-26 donne l'évolution du degré de saturation en fonction des mois de l'année. Ce graphique ne fait pas apparaître les oscillations entre chaque apport en eau (baisse du degré de saturation lors de la désaturation puis augmentation lors de la saturation) pour une meilleure lisibilité et représentativité. Ainsi, c'est la valeur moyenne du degré de saturation qui est donnée. Elle est calculée entre deux jours d'apport en eau (moyenne sur 3 jours pour le calcaire de Chamesson et sur 5 jours pour la Pierre de Lens). Nous avons ainsi obtenu une **courbe d'évolution sur une année du degré de saturation** des deux calcaires en fonction de leurs conditions climatiques respectives.

Ce diagramme permet donc de fixer l'évolution du degré de saturation des calcaires au cours des cycles d'altération expérimentaux envisagés.

Le degré de saturation maximal (situé à plus de 90%) est proche du degré de saturation obtenu par imbibition des éprouvettes selon la norme NF B 10-504 (1973) (Tableau 2-5). Cette norme décrit une méthode de mesure du coefficient d'absorption d'eau pour des pierres calcaires. **On peut donc considérer que cette méthode est satisfaisante pour préparer les échantillons.**

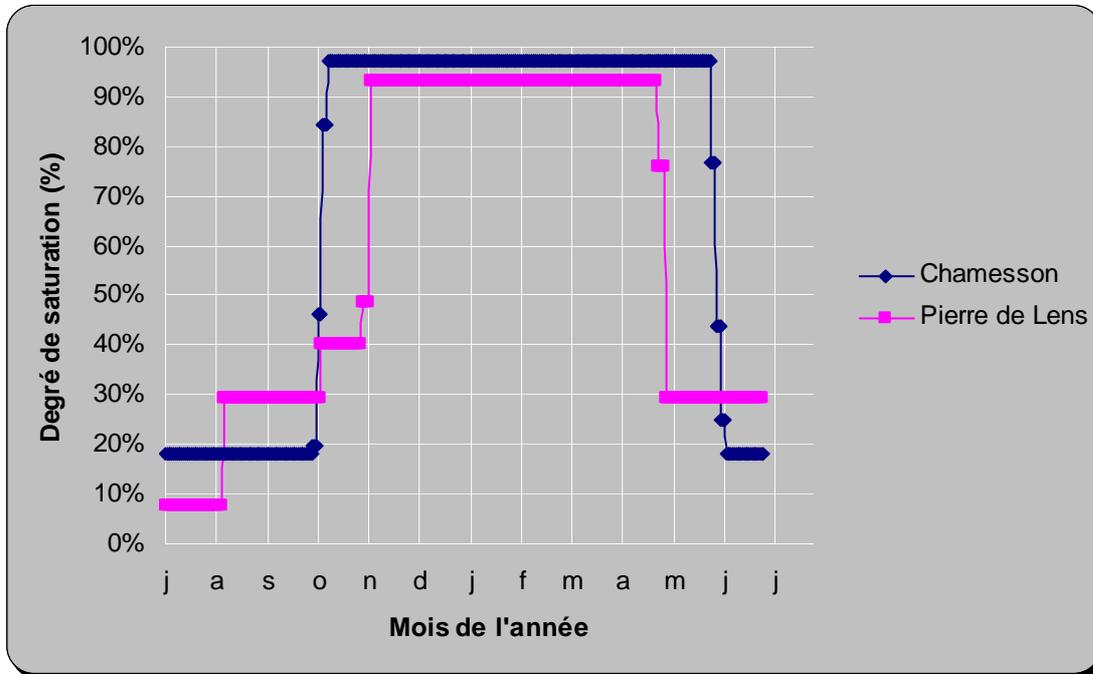


Figure 2-26 Degré de saturation (en valeurs moyennes) des éprouvettes en fonction de la quantité d'eau apportée par les précipitations sur une année et de la température (avec ou sans évaporation), en commençant d'un état sec au 1er juillet

2.3.2. Gel-dégel

2.3.2.1. Valeur critique du degré de saturation vis-à-vis du gel

Détermination d'un état de saturation critique pour différents calcaires

On peut définir pour chaque matériau un degré de saturation critique S_{cr} au-dessus duquel le gel causera des dommages (Fagerlund, 1971). Nous allons donc considérer les cycles de gel-dégel uniquement pour lesquels ce degré critique est atteint.

La procédure classique pour déterminer le degré de saturation critique est décrite ici.

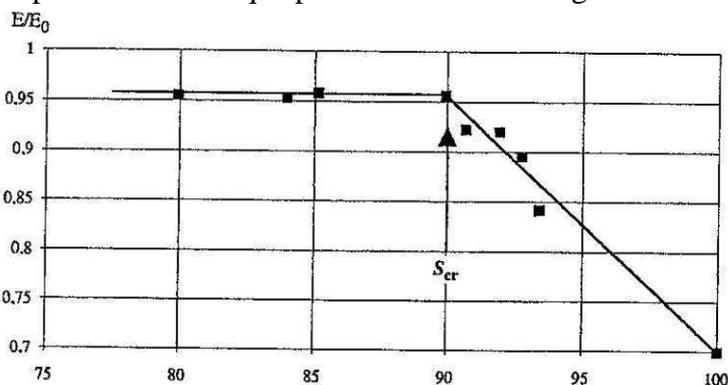


Figure 2-27 Exemple de détermination du degré de saturation critique S_{cr} pour un calcaire avec en abscisse : degré de saturation de l'échantillon durant l'essai. Le point de rupture du diagramme définit le degré de saturation critique (Prick, 1997)

L'échantillon cylindrique (110*40mm) est gelé rapidement et dégelé pendant 8 cycles successifs suivant les conditions adoptées par Weiss (1992 *in* Prick (1997)) : des cycles de 6 heures entre 20°C et -30°C, avec une vitesse maximale de refroidissement de 0,8°C/min entre plusieurs plateaux de température d'une durée de 30 min (20, 10, -1, -10, -20, -30, -10, 20°C). La saturation des échantillons est maintenue constante durant l'expérimentation : les échantillons sont scellés dans un film plastique après une immersion simple à pression atmosphérique. Des mesures de module d'élasticité dynamique sont faites après les 8 cycles et pour différents degrés de saturation initiale. Une représentation du module d'élasticité dynamique en fonction du degré de saturation fait apparaître une rupture de pente. C'est à cet endroit que se situe le degré de saturation critique (Figure 2-27).

Le but de l'étude de Prick (1997) est de déterminer une mesure plus facile à obtenir que l'on pourrait corréliser avec le degré de saturation critique. Elle s'intéresse à 10 calcaires dont elle mesure le degré de saturation critique S_{cr} obtenu d'après l'essai illustré dans la Figure 2-27. Pour ce faire, un certain nombre de paramètres a été mesuré sur ces calcaires, dont :

- Cd le coefficient de dispersion (Remy, 1993);
- H le coefficient d'Hirschwald (partie de la porosité accessible à l'eau en immersion pendant 48 heures (NF B10-504, 1973)).

Extrapolation des données pour estimer le degré de saturation critique du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens

Nous avons cherché à voir s'il était possible d'extrapoler cette valeur à partir des résultats de Prick (1997) pour les deux calcaires de notre étude.

La meilleure corrélation avec la saturation critique se fait avec le coefficient d'Hirschwald. La Figure 2-28 montre la droite de régression linéaire obtenue à partir des mesures de Prick (1997). On voit sur la Figure 2-28 que certains échantillons sont très éloignés de la droite de régression (points rouges). Il s'agit d'échantillons de calcaire avec une distribution des rayons d'accès au pore multimodale ou bimodale et avec un coefficient d'Hirschwald élevé (84%) : le calcaire de Lavoux, le calcaire de Caen et le tuffeau de Brézé.

Une distribution des rayons d'accès au pore unimodale correspond à un réseau poreux qui ne contient qu'une seule gamme de pores. Sinon, on parle de distribution bimodale ou multimodale (Remy, 1993). On détermine cette caractéristique à partir d'essais de porosimétrie.

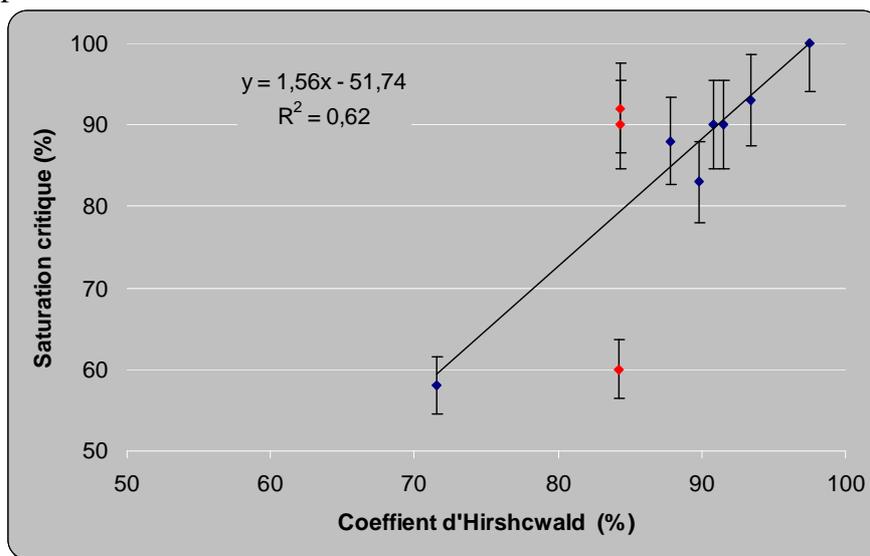


Figure 2-28 Régression linéaire sur les échantillons de Prick (1997) d'après Tableau 2-5. En rouge : échantillons avec des écarts importants à la droite de régression.

Dans la mesure où nous cherchons à déterminer les valeurs de saturation critique du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens qui ont une distribution unimodale ou unimodale étalée,

nous avons choisi, pour affiner l'estimation, d'écartier les trois échantillons avec une distribution multimodale ou bimodale qui ne coïncident pas avec la droite de régression de la Figure 2-28.

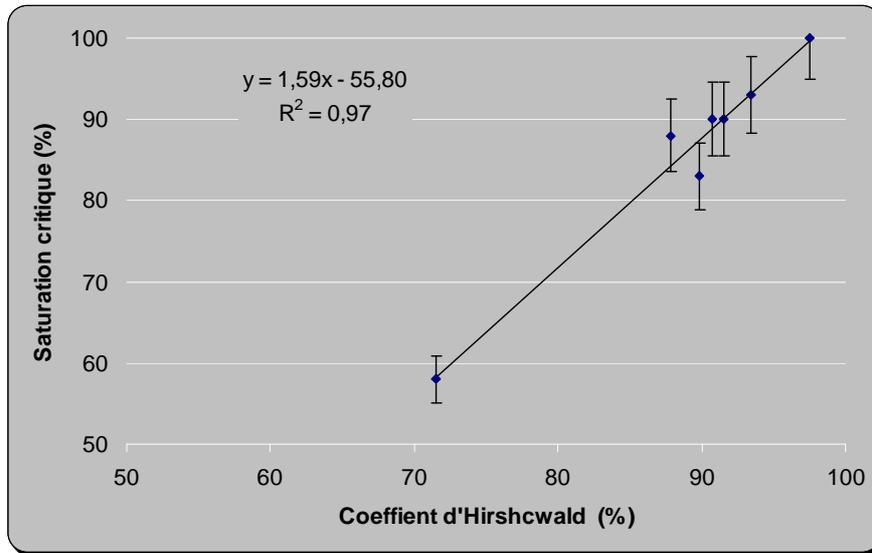


Figure 2-29 Régression linéaire sur les échantillons de distribution unimodale (Tableau 2-5) pour estimer la valeur de saturation critique du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens dont la distribution des pores est aussi unimodale

Nous procédons donc à une nouvelle régression linéaire avec les échantillons de calcaire restants représentée dans la Figure 2-29. La corrélation obtenue est bien meilleure (0,97).

Des mesures du coefficient d'Hirschwald ont été faites sur 10 échantillons du calcaire de Chamesson et 10 échantillons de la Pierre de Lens.

Ainsi nous pouvons utiliser l'équation obtenue pour estimer les degrés de saturation critiques du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens (Tableau 2-5) avec une incertitude de 5% (cette incertitude est déterminée d'après la visualisation graphique des résultats : les points les plus éloignés de la droite de corrélation se situe à 5% de leur valeur expérimentale).

Ainsi, d'après le Tableau 2-5, la Pierre de Lens sera affecté par les cycles de gel-dégel à partir d'un degré de saturation de 75 ± 5 % et le calcaire de Chamesson sera affecté par les cycles de gel-dégel à partir d'un degré de saturation de 84 ± 5 %. **Ces valeurs sont en-dessous des valeurs du degré de saturation des calcaires obtenues dans le paragraphe 2.3.1 pour les périodes concernées par les cycles de gel-dégel.** Les calcaires sont donc bien dans des conditions de saturation propices aux effets des cycles de gel-dégel.

Roche	Distribution	Cd	H	Scr	Régression linéaire		
					Scr	Ecart	Incertitude
Vilhonneur	unimodal étalé	1,56	90	83	87	4	5%
Pierre de Lens	unimodal étalé	1,95	82		75	4	5%
Chamesson	unimodal	0,65	88		84	4	5%
Charentay	unimodal étalé	1,07	88	88	84	-4	-4%
Tervoux	unimodal étalé	1,51	91	90	89	-1	-1%
Tercé	unimodal étalé	1,7	91	90	90	0	0%
Larrys	unimodal étalé	1,15	93	93	93	0	0%
Comblanchien	unimodal	0,89	98	100	100	0	0%
Sireuil	bimodal	23,89	72	58	58	0	0%
Caen	multimodal	4,08	84	60	78	18	24%
Lavoux	bimodal	2,22	84	90	79	-11	-14%
Brézé (tuffeau)	bimodal	29,6	84	92	79	-13	-17%

Tableau 2-5 Calcaires de l'étude de Prick (1997) auxquels sont ajoutés le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens. Les échantillons sont divisés en deux parties suivant leur distribution de pores (unimodale ou multimodale) puis classés en fonction de leur degré de saturation critique. La régression linéaire est

faite à partir des données des échantillons avec une distribution unimodale de la saturation critique en fonction du coefficient d'Hirschwald (Figure 2-29)

Le degré de saturation évalué pendant les périodes de cycles de gel-dégel pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens est supérieur à leur degré de saturation critique. Tous les cycles de gel-dégel sont donc à prendre en compte dans le cycle annuel d'altération accéléré.

Or le degré de saturation calculé pour les périodes concernées par les cycles de gel-dégel (2.3.1) est proche du degré de saturation obtenu par la procédure de saturation par imbibition pendant 48 heures (coefficient d'Hirschwald). Nous retiendrons donc cette procédure de saturation pour l'étape de gélivation des cycles annuels d'altération accélérés.

2.3.2.2. Température de gel dans le massif

Phénomène de surfusion

Selon le diagramme de phase, le changement de phase de l'eau en glace se produit à 0°C sous pression atmosphérique (Figure 2-30) : il s'agit de la congélation.

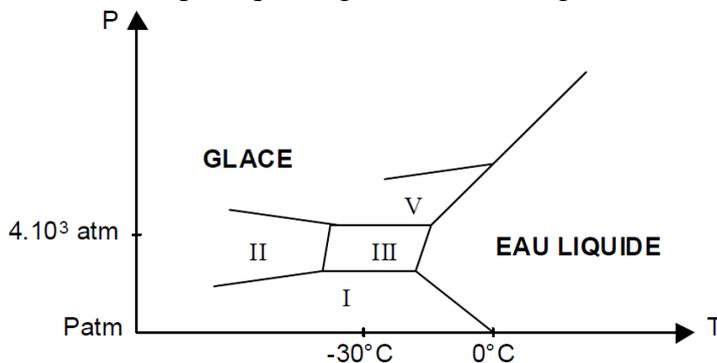


Figure 2-30 Diagramme de phase eau liquide-glace et domaines des types de structure cristalline de la glace I, II, III et V.

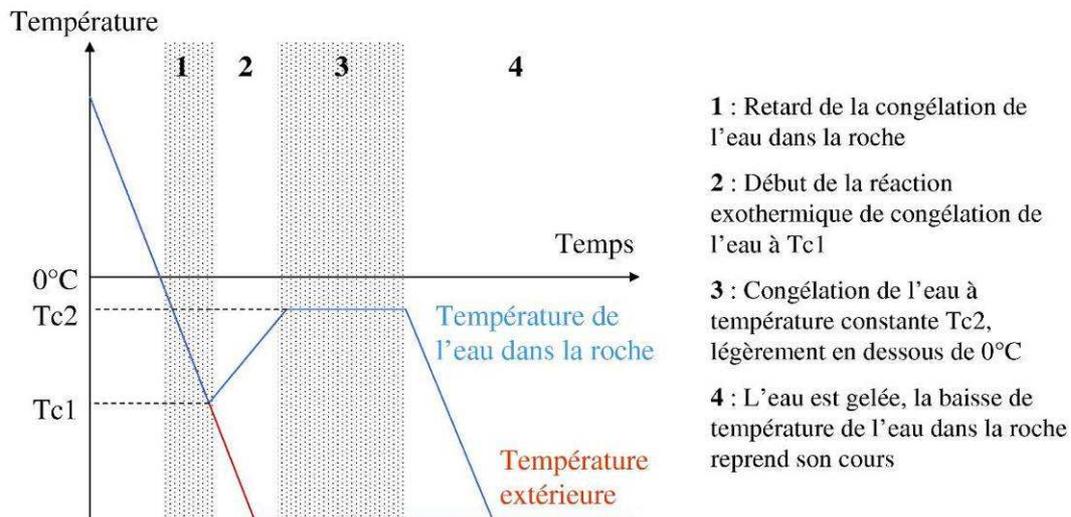


Figure 2-31 Température de l'eau dans la roche lorsque la température extérieure est négative (modifié d'après Thomachot (2002))

En pratique, la congélation d'un volume d'eau libre à pression atmosphérique ne peut débuter que pour des températures inférieures à 0°C (Figure 2-31). Ce phénomène est souvent considéré comme du à la surfusion (Thomachot, 2002). Les récents travaux de Bost (2008) ont en fait montré que ce retard de la congélation de l'eau dans la roche s'explique par 3 hypothèses :

- l'eau encore liquide contenue dans la roche se retrouve sous pression lorsque l'eau avoisinante gèle et donc sa température de congélation diminue selon le diagramme de phase de la Figure 2-30 ;
- les migrations d'eau générées par la congélation apportent vers les sites gelés de l'eau non gelée. Les sites gelés sont donc alimentés en eau encore liquide et donc énergétiquement parlant la température de congélation ne peut être atteinte ;
- la dissolution de la calcite dans l'eau de la roche contribue à la présence d'une grande quantité d'impuretés dans l'eau ce qui contribue également à abaisser la température de congélation.

Prise en compte du retard de congélation de l'eau pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens

Tourenq (1970) obtient des températures de Tc1 - Tc2 (cf. Figure 2-31) comprises entre -2°C et -4°C pour des roches dont la majorité des pores a un diamètre supérieur à $0,03\ \mu\text{m}$ et entre -10 à -20°C pour des roches dont la majorité des pores a des rayons inférieurs à $0,007\ \mu\text{m}$.

En effet, la température de gel de l'eau dans les pores est liée au rayon du capillaire (Fagerlund, 1971). Le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens ont un diamètre de pore moyen bien supérieur à $0,03\ \mu\text{m}$. D'après les mesures de Tourenq, **leurs températures de gel sont donc comprises entre -2°C et -4°C** . Nous avons vérifié ce résultat par des mesures de température à l'aide de thermocouples introduits au cœur d'échantillons cylindriques $40*80\ \text{mm}$ (Figure 2-32).

Les résultats des mesures sont reportés dans le Tableau 2-6. Pour la température Tc1 (cf. Figure 2-31), la valeur moyenne du calcaire de Chamesson est de $-3,1 \pm 0,4\ ^{\circ}\text{C}$ et pour la Pierre de Lens $-4,0 \pm 0,7\ ^{\circ}\text{C}$. Pour la température Tc2 (cf. Figure 2-31), elle est légèrement en-dessous de 0°C . Dans ce cas, l'écart entre Tc1 et Tc2 est de $2,4 \pm 0,4\ ^{\circ}\text{C}$ pour le calcaire de Chamesson et de $2,6 \pm 0,6\ ^{\circ}\text{C}$ pour la Pierre de Lens **ce qui est compris dans les valeurs mesurées par Tourenq (1970)**.



Figure 2-32 Mesure de la température de surfusion et de la température de gel à l'aide de thermocouples placés dans les échantillons du calcaire de Chamesson (à droite) et de la Pierre de Lens (à gauche).

Essai	Chamesson			Pierre de Lens		
	Tc1 ($^{\circ}\text{C}$)	Tc2 ($^{\circ}\text{C}$)	Tc1 - Tc2 ($^{\circ}\text{C}$)	Tc1 ($^{\circ}\text{C}$)	Tc2 ($^{\circ}\text{C}$)	Tc1 - Tc2 ($^{\circ}\text{C}$)
1	-3,8	-0,7	3,1	-4,7	-1,6	3,1
2	-3	-0,7	2,3	-4,6	-1,4	3,2
3	-3,2	-0,6	2,6	-2,8	-1,2	1,6
4	-2,8	-0,6	2,2	-3,9	-1,2	2,7
5	-2,7	-0,8	1,9	-4,5	-1,8	2,7
6	-3,2	-0,7	2,5	-3,6	-1,4	2,2
moyenne	-3,1	-0,7	2,4	-4,0	-1,4	2,6
écart type	0,4	0,1	0,4	0,7	0,2	0,6

Tableau 2-6 Températures de congélation Tc1 et Tc2 pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens au cours de passage de 20°C à -5°C en 2 heures environ. Valeurs mesurées à l'aide de thermocouples introduits au centre d'échantillons cylindriques $40*80\ \text{mm}$.

La température de surfusion est inférieure à -2°C , il est inutile de considérer les températures négatives comprises entre 0°C et -2°C .

Application en fonction des données climatiques des stations météorologiques

Les stations météorologiques de Troyes Barberey et de Nîmes Courbessac sont respectivement les plus proches de la carrière de Chamesson et de celle de Moulézan (Pierre de Lens). Elles sont donc utilisées pour avoir les données météorologiques de ces sites. Les données quotidiennes de températures minimales et maximales pour les années 2008 et 2009 ont été récupérées (Météo France, 2009a).

	Chamesson			Pierre de Lens		
	Nombre de cycles*	Tmin	Tmax	Nombre de cycles*	Tmin	Tmax
Janvier	7	-4	6	3	-3	10
Février	11	-4	8	0		
Mars	3	-4	9	1	-2	11
Avril	1	-2	11	0		
Mai	0			0		
Juin	0			0		
Juillet	0			0		
Août	0			0		
Septembre	0			0		
Octobre	2	-3	11	0		
Novembre	2	-3	4	0		
Décembre	6	-6	4	4	-4	6
Moyenne	32 (total)	-4	8	8 (total)	-3	9
Ecart type		1	3		1	3

* Nombre de jours par mois avec une température minimale inférieure à -2°C et une température maximale positive

Tableau 2-7 Données de température des stations météorologiques les plus proches des carrières de Chamesson et de Moulézan (Pierre de Lens) pour la détermination du nombre de cycles de gel-dégel et des températures de gel et de dégel. Valeurs moyennes de 2008 et 2009 (Météo France, 2009a).

On a ainsi déterminé **le nombre de jours par mois où la température maximale est positive et la température minimale est inférieure à -2°C** . Ce nombre de jours correspondra au nombre de cycles de gel-dégel que nous allons reproduire en laboratoire. On obtient les données du Tableau 2-7.

Par ailleurs, les valeurs de gel provenant de ces données météorologiques servent à déterminer à quelle température de gel les cycles de gel-dégel vont se dérouler. Nous avons regardé la valeur moyenne de l'ensemble des températures de gel relevées. Pour le calcaire de Chamesson, la température moyenne de gel est de $-4^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et pour la Pierre de Lens, cette température vaut $-3^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Nous avons de même regardé les températures de dégel. Pour le calcaire de Chamesson, la température moyenne de dégel vaut $8^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ et pour la Pierre de Lens, elle vaut $9^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$.

Le Tableau 2-7 fournit enfin le nombre de cycles de gel-dégel moyen pour chacun des deux calcaires.

Ainsi, une année de cycles de gel-dégel correspond à :

- 32 cycles de gel-dégel à -4°C et $+8^{\circ}\text{C}$ pour le calcaire de Chamesson ;
- 8 cycles de gel-dégel à -3°C et $+9^{\circ}\text{C}$ pour la Pierre de Lens.

2.3.3. Dissolution

2.3.3.1. Degré de saturation

L'évolution des degrés de saturation du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens a été étudiée au paragraphe 2.3.1 et il a été choisi de les tester avec une saturation par immersion dans l'eau pendant 48 heures.

Par ailleurs, d'après des mesures faites sur le terrain (Tableau 2-8), l'eau acide, en contact avec la calcite présente dans les calcaires, est neutre aux résurgences (cf. réaction de dissolution du Chapitre 1, 1.1.2.1) et est même légèrement basique. L'eau contenue dans les calcaires est donc neutre.

Les échantillons seront donc saturés par imbibition à 48 heures avec de l'eau du robinet (i.e. pH neutre).

Référence	Site (nombre de prélèvements)	pH à l'exutoire
(Charmoille, 2002)	Vallée du Doubs (9)	De 7,17 à 7,5
(Talour, 1978)	Massif de la Vanoise (3)	De 8,6 à 8,4
(Miserez, 1973)	Karst jurassien (6)	De 7,0 à 8,0
(Djebbar, 2006)	Sources et forages (9)	De 7,5 à 8,0
Dans le cadre de notre étude	Calcaire – Baulme la Roche (3) - Résurgence en bas de falaise, le 18/08/09	De 6,8 à 6,9
	Calcaire – D124 (1) - Résurgence à flanc de colline, le 18/04/11	6,9

Tableau 2-8 Mesures de pH réalisées aux exutoires de karsts

2.3.3.2. Température de la roche

La température peut influencer la dissolution (Salomon, 2006). Les diverses constantes de réaction impliquées dans la dissolution vont, en effet, varier avec la température. Ces constantes sont :

- la constante de Henry K_H , impliquée dans la dissolution du dioxyde de carbone de l'atmosphère de pression partielle pCO_2 dans l'eau pour donner de l'acide carbonique
- la constante K_1 qui régit la décomposition de l'acide carbonique en HCO_3^- et H^+
- la constante K_2 qui régit la décomposition de HCO_3^- en CO_3^{2-} et H^+
- la constante de solubilité K_S de la calcite dans l'eau

Avec les valeurs de ces constantes en fonction de la température (Dorange et al., 1990), il est possible de connaître l'impact de la température de l'eau sur l'acidité de l'eau et sur les produits de réaction et donc d'estimer le taux de dissolution en fonction de la température. D'après les réactions liées à la dissolution décrites dans le Chapitre 1 (1.1.2.1), on a les relations suivantes :

$$pH = \frac{pK_1 - \log(pCO_2 \times K_H)}{2} \text{ et } [Ca^{2+}] = \sqrt[3]{\frac{K_1 \times K_S \times pCO_2 \times K_H}{4 \times K_2}}$$

Par ces considérations thermodynamiques, on trouve qu'entre 0 et 30 °C, la température fait varier le pH de moins de 0,1 et la quantité de calcite dissoute est multipliée par 1,5 à 0°C par rapport à 30°C. L'effet de la température est donc léger mais tout de même présent.

Pour éviter une quelconque influence thermique, on décide donc de se placer à une température constante de 20°C pendant les périodes de dissolution.

2.3.3.3. Qualité de l'eau avant percolation : pH de l'eau

Gérôme-Kupper (1980) a mesuré la diminution d'épaisseur sur des plaquettes de calcaires plongées dans une eau avec un débit variable. Ces résultats permettent d'estimer l'influence de différents paramètres (vitesse d'écoulement de l'eau et pH de l'eau notamment). Pour ces mesures, la vitesse d'écoulement de l'eau et son pH expliquent à eux deux les 83% des variations de la « vitesse d'érosion » en mm/millénaire. D'après ses mesures, elle donne la loi de variation moyenne de la vitesse de l'érosion sous la forme d'une équation de régression :

$$X1 = 5,103 + 0,423 X2 + 0,442 \text{ pH}$$

où $X1 = \log$ vitesse de l'érosion (mm/millénaire)

$X2 = \log$ vitesse de l'eau (cm/sec)

Ainsi d'après l'équation ci-dessus, quelle que soit la vitesse d'écoulement, le passage d'une eau de pH 5 à une eau de pH 3 va multiplier la vitesse d'érosion par 7,7. De même, le passage d'une eau de pH 4 à une eau de pH 3 entraîne la multiplication de la vitesse d'érosion par 2,8. Si l'on considère une roche affleurante qui reçoit directement de l'eau de pluie dont le pH est de 5 au plus bas, on peut diviser expérimentalement le temps d'exposition aux précipitations par 7,7 et avoir les mêmes effets, en diminuant le pH à 3.

On peut donc utiliser un pH 3 pour accélérer le phénomène de dissolution.

2.3.3.4. Temps de percolation : durée d'exposition

D'après le paragraphe précédent, le passage d'un pH 5 (eau de pluie) à un pH 3 permet d'accélérer le phénomène de dissolution en multipliant la vitesse d'érosion par 7,7. Cette accélération permet de réduire les temps réels d'exposition à l'eau de pluie en des temps expérimentaux d'exposition accélérés. Ainsi, on divise les temps d'exposition (en nombre de jours de précipitations) par 7,7 pour obtenir des temps d'exposition accélérés. Cette manipulation est résumée dans le Tableau 2-9.

pH	Equivalence en eau de pluie	Nombre de jours avec précipitations dans une année	
		Somme des totaux mensuels moyens (1971-2000)	
		Chamesson	Pierre de Lens
5	Réelle	116	68
3	Accélérée	15	9

Tableau 2-9 Nombre de jours avec précipitations par an sur la période 1971-2000 dans les stations météorologiques les plus proches des sites de Chamesson et de Moulézan (Pierre de Lens) (respectivement Troyes-Barberey et Nîmes-Courbessac) et équivalence en jours par diminution du pH de 5 à 3 d'après l'équation $X1 = 5,103 + 0,423 X2 + 0,442 \text{ pH}$ ($X1 = \log$ vitesse de l'érosion (mm/millénaire) et $X2 = \log$ vitesse de l'eau (cm/sec)).

Ainsi, le phénomène de dissolution sur une année se résume à :

- une exposition pendant 15 jours à une eau de pH 3 pour le calcaire de Chamesson ;
- une exposition pendant 9 jours à une eau de pH 3 pour la Pierre de Lens.

2.3.3.5. Débit de l'apport en eau

Le débit de l'apport en eau a une influence sur les effets de la dissolution d'après le Chapitre 1. Il faut donc déterminer la quantité de solution acide appliquée en surface des éprouvettes et à quelle fréquence rajouter de la solution acide en surface.

Sachant que, lorsqu'il pleut, pour une roche peu perméable, une grande partie de l'eau des précipitations circule à la surface de la roche mais ne percole pas dans celle-ci (Parriaux, 2006), **la quantité à appliquer est inférieure à la quantité d'eau de pluie tombée**. Or, le rapport entre l'eau de pluie et l'eau infiltrée dépend de nombreux paramètres (climat, pente du terrain, exposition, occupation du sol, perméabilité du massif), il est donc délicat à déterminer. Nous avons donc choisi de procéder de la façon suivante :

- application de 5 mL de solution acide en surface de chaque éprouvette
- attente que la totalité de l'eau en surface se soit infiltrée dans l'éprouvette et évaporée
- ré-application de 5 mL de solution acide en surface de chaque éprouvette
- etc.

Nous appliquerons donc 5 mL de solution acide dès que la quantité appliquée a entièrement percolé, c'est-à-dire qu'il n'y a plus d'eau en surface.

2.3.4. Constitution du cycle annuel d'altération accéléré

2.3.4.1. Récapitulatif

Pour reproduire une année de gel-dégel, le calcaire de Chamesson subit 32 cycles de gel-dégel à -4°C et $+8^{\circ}\text{C}$ et la Pierre de Lens subit 8 cycles de gel-dégel à -3°C et $+9^{\circ}\text{C}$ avec une saturation par imbibition à 48 heures à l'eau du robinet. Pour obtenir des valeurs comparables à d'autres essais de la littérature, nous avons choisis d'**arrondir ces valeurs à -5°C pour la température de gel et $+10^{\circ}\text{C}$ pour la température de dégel pour les deux calcaires**. De même pour des raisons d'organisation, **le nombre de cycles de gel-dégel est arrondi au multiple de 14 le plus proche** (14 cycles de gel-dégel correspondent à 1 semaine d'essai), sauf si celui-ci est inférieur à 14. On obtient donc 28 cycles pour le calcaire de Chamesson et 8 cycles pour la Pierre de Lens.

Pour simuler une année de dissolution, le calcaire de Chamesson est exposé à de l'eau à pH 3 pendant 15 jours et la Pierre de Lens est exposé à de l'eau à pH 3 pendant 9 jours avec une saturation initiale par imbibition à l'eau du robinet. Pour des raisons d'organisation, **la durée de chaque cycle a été légèrement modifiée pour avoir des valeurs multiples de 7**.

On aboutit donc au Tableau 2-10.

Etape du cycle	Variable	Valeur	
		Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens
Tout le cycle	Degré de saturation	S48	S48
Dissolution	pH	3	3
	Durée	14 jours	7 jours
	Débit	5 mL jusqu'à percolation de la solution	
Gel-dégel	Nombre de cycles	28 cycles de 12 heures	8 cycles de 12 heures
	Températures	$-5/10^{\circ}\text{C}$	$-5/10^{\circ}\text{C}$

Tableau 2-10 Cycle annuel d'altération accélérée à réaliser pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens qui reprend les conclusions obtenues pour le degré de saturation, la gélivation et la dissolution.

Donc un cycle annuel d'altération accélérée pour le calcaire de Chamesson comprend 14 jours de dissolution et 28 cycles de gel-dégel et pour la Pierre de Lens, il comprend 7 jours de dissolution et 8 cycles de gel-dégel.

2.3.4.2. Généralisation

A partir de l'ensemble des considérations exposées dans cette partie, il est possible d'établir le cycle annuel d'altération accélérée pour n'importe quel calcaire en déterminant les quatre valeurs suivantes :

- le degré de saturation sur une année, noté S. A défaut, on peut choisir le degré de saturation par imbibition à 48 heures, noté S48 (NF B10-504, 1973). Il faut noter que si le degré de saturation S est inférieur au degré de saturation critique de Prick (1997), on peut considérer que l'échantillon n'est pas sensible aux effets de la gélivation ;
- le nombre de jours par an avec une température minimale inférieure à la température de surfusion (à défaut prendre -2°C), noté N1;
- la moyenne des températures de gel associées au nombre de jours précédent, notée T;
- le nombre de jours avec précipitations par an, noté N2.

Puis, ces quatre valeurs sont à reporter dans le Tableau 2-11.

Etape du cycle	Variable	Valeur
Tout le cycle	Degré de saturation	S ou S48
Dissolution	pH	3
	Durée (jours)	Multiple de 7 le plus proche de $N2/7,7$
	Débit	5 mL jusqu'à percolation de la solution

Gélivation	Nombre de cycles de 12 heures	Multiple de 14 le plus proche de N1 (sauf si $N1 < 14$, dans ce cas, prendre N1 directement)
	Température de gel (°C)	Multiple de -5 le plus proche de T
	Température de dégel (°C)	10

Tableau 2-11 Tableau récapitulatif pour déterminer le cycle d'altération accéléré d'un calcaire et de son site respectif

Ainsi, si on choisit un autre site pour lequel on peut obtenir les valeurs de $N1$, $N2$ et T , il est alors possible d'avoir le cycle annuel d'altération accéléré qui lui correspond. Nous allons d'ailleurs y revenir pour l'étude d'un troisième calcaire, au Chapitre 7.

2.3.5. Déroulement du cycle annuel d'altération accéléré

2.3.5.1. Procédures d'essais (saturation, gélivation, dissolution)

Pour la procédure de saturation à 48 heures, nous nous sommes basés sur la procédure décrite dans la norme NF B10-504 (1973). Pour conserver le degré de saturation d'une manipulation à l'autre constant dans l'échantillon, nous avons choisi de les placer chacun dans une membrane en latex (Figure 2-33).



Figure 2-33 Epruvette placée dans sa membrane en latex

La procédure de gélivation consiste en des cycles de gel-dégel qui se déroulent de la façon suivante, inspirée de la norme NF EN 12371 (2010):

- 6 heures de gel à -5°C à l'air
- 6 heures de dégel à 10°C dans l'eau.

Le dégel s'effectue dans l'eau pour assurer une mise à la température de dégel de l'échantillon homogène et efficace.

Ces cycles sont programmés grâce au programmeur de l'enceinte climatique (Figure 2-34).



Programmeur



Enceinte climatique

Échantillons dans le bac de l'enceinte

Figure 2-34 Les différents éléments de l'enceinte climatique utilisée pour réaliser les cycles de gel-dégel

Pour la procédure de dissolution, nous n'avons pas pu nous baser sur une norme, car il n'existe pas de procédure d'évaluation de la sensibilité d'un échantillon de calcaire à la dissolution. Nous avons donc mis au point une procédure :

- représentative des conditions *in situ*
- permettant d'effectuer l'étape de dissolution sur un grand nombre d'échantillons (2*40, cf. paragraphe 2.3.5.2)

Or, sur le terrain, **l'eau acide arrive en surface des échantillons et percole par gravité et capillarité**, nous avons donc choisi de reproduire ce phénomène en appliquant la solution acide sur la face supérieure des échantillons, leur membrane en latex obligeant l'eau à percoler dans l'échantillon par gravité. Cette méthode permet également de pouvoir **réaliser l'étape de dissolution sur l'ensemble des échantillons simultanément**.

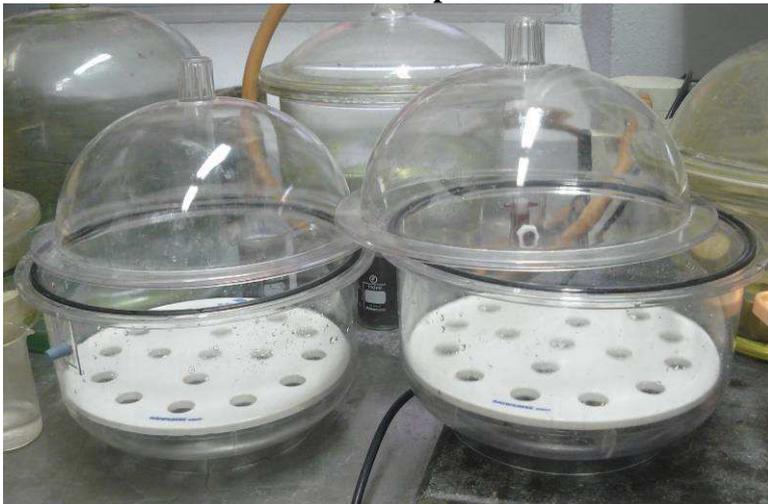


Figure 2-35 Dessiccateurs utilisés pour réaliser l'étape de dissolution

Pour limiter au maximum l'évaporation de l'eau acide présente sur la surface des échantillons, et donc maximiser son infiltration, les échantillons sont placés **dans un dessiccateur avec un couvercle** (Figure 2-35), dans une salle climatisée à 20°C.

La solution acide de pH 3 est obtenue en mélangeant de l'eau distillée avec une solution de HCl à 37%.

2.3.5.2. Procédures d'évaluation de l'endommagement

Le choix des mesures réalisées sur les échantillons au cours de ces cycles annuels d'altération accélérés fait l'objet du Chapitre 3.

Néanmoins, nous savons d'ores et déjà qu'il sera nécessaire de réaliser des mesures issues d'essais non destructifs et destructifs pour évaluer l'endommagement des échantillons au fur et à mesure des cycles.

Une mesure mécanique non destructive judicieusement choisie sera donc faite sur toutes les éprouvettes entre chaque étape de chaque cycle. Cette mesure est déterminée dans le Chapitre 6 (6.2).

Et, après chaque cycle, certaines éprouvettes seront prélevées de l'ensemble des éprouvettes pour la réalisation de mesures issues d'essais destructifs et non destructifs pour une étude approfondie. Ces mesures, et observations, sont décrites dans le Chapitre 5 (5.2 et 5.3).

La capacité de l'enceinte climatique utilisée pour les cycles de gel-dégel limite le nombre d'éprouvettes à 40 par calcaire (Figure 2-34). Nous adaptons donc le programme de mesures à cette contrainte pratique.

2.3.6. Conclusion

Un cycle annuel d'altération accéléré représentatif des conditions réelles d'altération a été obtenu par la modélisation de la variation du degré de saturation au cours d'une année, des conditions de gélivation et des conditions de dissolution.

Il se base sur des données Météo France de températures et de précipitations. Diverses simplifications ont été opérées et justifiées par des références bibliographiques ou des expériences.

Ce modèle de cycle a été établi de manière à être applicable pour un autre calcaire sur un autre site.

Un cycle annuel d'altération accéléré correspond à :

- 14 jours de dissolution et 28 cycles de gel-dégel pour le calcaire de Chamesson en Côte d'Or, soit 28 jours de vieillissement accéléré ;
- 7 jours de dissolution et 8 cycles de gel-dégel pour la Pierre de Lens dans le Gard, soit 11 jours de vieillissement accéléré.

2.4. Conclusion

Ce Chapitre a permis de choisir les calcaires de référence et les sites d'étude : le calcaire de Chamesson en Côte d'Or et la Pierre de Lens dans le Gard. Ces sites ont été choisis pour leurs différences climatiques. Les calcaires ont été choisis pour les similitudes (texture et porosité) mais aussi parce qu'ils présentent une différence majeure : ils n'ont pas la même sensibilité à la gélivation. Ces critères de choix vont permettre une analyse fine des résultats obtenus dès le Chapitre 5.

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle de cycle annuel d'altération accéléré constituant la base des expérimentations qui vont suivre. Ce modèle est applicable à l'ensemble des conditions climatiques présentes en France métropolitaine mais aussi à d'autres calcaires oolithiques.

Avant de commencer à opérer des cycles annuels d'altération accélérés sur les calcaires de référence, le prochain chapitre sera consacré à la détermination des mesures adaptées pour caractériser l'endommagement que nous étudions.

Bibliographie

Bessac J.-C. « Les carrières du Bois des Lens (Gard) ». *Gallia*. 2002. p. 29-51.

Bost M. *Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 281 p.

Çengel Y. A., Boles M. A., Lacroix M. *Thermodynamique: Une approche pragmatique*. 6^e éd. Montréal : Mc Graw Hill, 2009. 784 p. ISBN : 9782804101251.

Charmoille A. *Etude du karst profond de la vallée du Doubs*. Besançon : DIREN Franche-Comté, 2002.

Djebbar M. « Le système karstique hydrothermal constantinois (Algérie nord orientale): structure et fonctionnement. ». In : *Proceedings of the 8th conference on limestone hydrogeology*. Neuchâtel : Nico Goldscheider, Jacques Mudry, Ludovic Savoy & Francois Zwahlen, 2006. p. 105-108.

Dorange G., Marchand A., Le Guyader M. « Produit de solubilité de la calcite et constantes de dissociation de CaHCO_3^+ et CaCO_3 entre 5 et 75 °C ». *Revue des Sciences de l'Eau*. 1990. Vol. 3, n°3, p. 261-275.

Dubé I. *De mm à cm ... Etude des rapports neige/eau liquide au Québec*. SMC - Région du Québec : BSME Rimouski, 2003.

Fagerlund G. « Degré critique de saturation un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction ». *Materials and Structures*. 1971. Vol. 4, n°5, p. 271-285.

Fort P. « Propriétés et caractéristiques de l'air humide ». In : *Techniques de climatisation et de conditionnement de l'air humide* [En ligne]. Web : Pascal Fort, 2011. < <http://www.dimclim.fr/> >

Foucault A., Raoult J. P. *Dictionnaire de géologie*. 6^e éd. Paris : Dunod, 2005. 382 p.

Gérôme-Kupper M. *Les vitesses d'érosion du calcaire. Etude de processus actuels sous différents climats*. Thèse. Liège : Université de Liège, 1980. 239 p.

Mamillan, Cuendet. *Etude du comportement au gel d'une pierre tendre de 0,15 cm (Vassens) soumise à une pluie artificielle sur 1 face*. Saint-Rémy-Lès-Chevreuses : Centre d'Etude du Batiment et des Travaux Publics - Service Central Matériaux, 1988. (Recherche effectuée en coopération entre le CSTB (station climatique de Nantes) et le CEBTP (service de recherche sur les matériaux)).

Météo France. *Bulletins météorologiques* [En ligne]. Web : Météo France, 2009a. < www.meteofrance.com >

Météo France. *La mesure de la hauteur des précipitations*. Web : Météo France, 2009b. (Les mesures).

Miserez J.-J. *Géochimie des eaux du karst jurassien (Contribution physico-chimique à l'étude des altérations)*. Thèse. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, 1973. 319 p.

NF B10-504. *Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau*. août 1973.

NF B10-601. *Produit de carrières - Pierres naturelles - Prescription générale d'emploi des pierres naturelles*. 2006.

NF EN 12371. *Méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel des éléments en pierre naturelle*. 2010.

Parriaux A. *Géologie: bases pour l'ingénieur*. 1^{er} éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006. 516 p. ISBN : 2-88074-555-1.

Prick A. « Critical Degree of Saturation as a Threshold Moisture Level in Frost Weathering of Limestones ». *Permafrost and Periglacial Processes*. 1997. Vol. 8, n°1, p. 91-99.

Remy J.-M. *Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace. Application à la durabilité au gel des roches calcaires de Lorraine*. Thèse. Nancy : Institut National Polytechnique de Lorraine, 1993. 355 p.

Salomon J.-N. *Précis de Karstologie*. 2^e éd. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux, 2006. 285 p. ISBN : 2-86781-411-1.

Talour B. « Un karst d'altitude dans le massif de la Vanoise ». *Revue de géographie alpine*. 1978. Vol. 66, n°2, p. 201-207.

Thomachot C. *Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts « d'encroûtements noirs vernissés »*. Strasbourg : Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002. 346 p.

Tourenq C. *La gélivité des roches*. Paris : LCPC, 1970.

3. Choix des méthodes de mesure de l'endommagement et d'observations de l'altération en laboratoire

INTRODUCTION

L'endommagement se traduit par une modification du squelette rocheux. Nous verrons que cette modification correspond à la déstructuration du squelette rocheux et/ou à l'apparition d'une fissuration. Cela se traduit à l'échelle macroscopique par une évolution des compétences mécaniques du matériau rocheux.

Après des considérations de métrologie, nous regarderons comment évaluer les propriétés mécaniques des deux calcaires de l'étude et leur pertinence pour la quantification de l'endommagement. Nous présenterons ensuite les méthodes utilisées pour évaluer les propriétés physiques et aussi pour observer l'altération.

Il a été choisi de travailler avec des échantillons cylindriques (diamètre = 40 mm, longueur = 80 mm) car ces dimensions conviennent à l'ensemble des méthodes de mesure utilisées.

3. CHOIX DES METHODES DE MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT ET D'OBSERVATIONS DE L'ALTERATION EN LABORATOIRE	75
3.1. Considérations métrologiques	77
3.2. Mesure des propriétés mécaniques	78
3.2.1. Vitesse du son	78
3.2.1.1. Description	78
3.2.1.2. Quantification mécanique et physique de l'endommagement	79
3.2.2. Fréquence de résonance	80
3.2.2.1. Description	80
3.2.2.2. Quantification de l'endommagement : différences entre la vitesse du son et la fréquence de résonance	82
3.2.3. Résistance en compression uniaxiale	83
3.2.3.1. Description	83
3.2.3.2. Quantification de l'endommagement : influence du degré de saturation	84
3.2.4. Conclusion	85
3.3. Mesure des propriétés physiques	85
3.3.1. Porosité totale et porosité à l'eau	86
3.3.2. Perméabilité	86
3.3.3. Conclusion	87
3.4. Observations de l'altération	88
3.4.1. A l'échelle de l'échantillon	88
3.4.2. A l'échelle de la microstructure	89
3.4.2.1. Courbes de distribution des rayons d'accès au pore	89
3.4.2.2. Microscope Electronique à Balayage	94
3.4.3. Conclusion	95
3.5. Conclusion	95

3.1. Considérations métrologiques

La norme NF ISO 5725-1 (1994) sur l'exactitude des résultats et les méthodes de mesure définit la précision pour un instrument de mesure comme l'aptitude de cet instrument à fournir des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée. La notion inverse est également définie : l'imprécision s'exprime par l'ensemble des erreurs globales limites de mesurage comprenant toutes les erreurs systématiques ainsi que les erreurs fortuites limites. Les erreurs systématiques sont les erreurs dues à la justesse de la mesure, c'est-à-dire l'écart entre le résultat de la mesure et la valeur vraie. Les erreurs fortuites constituent l'ensemble des erreurs dues à la fidélité de la mesure, c'est-à-dire la dispersion des résultats (Figure 3-1).

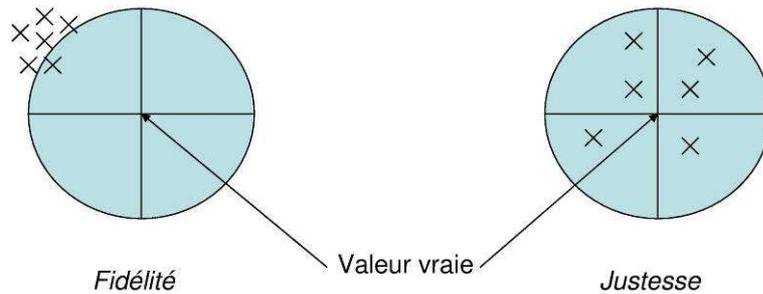


Figure 3-1 Représentation symbolique de la fidélité et de la justesse en fonction de la valeur vraie de la mesure

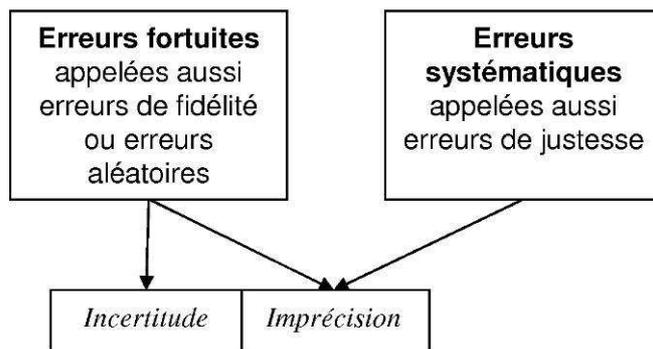


Figure 3-2 Origine de l'incertitude et de l'imprécision (Moreau, 1982)

L'ensemble des erreurs fortuites constitue l'incertitude, les erreurs fortuites et les erreurs systématiques définissent l'imprécision (Figure 3-2).

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons principalement aux valeurs relatives des mesures, il est donc nécessaire de connaître uniquement l'incertitude liée à ces mesures. Nous devons donc regarder les erreurs de fidélité.

Cette même norme donne la définition de la fidélité, il s'agit de l'étroitesse de l'accord entre les valeurs expérimentales obtenues au cours d'un ensemble d'expériences dans des conditions déterminées.

Ces conditions sont des conditions de répétabilité ou alors des conditions de reproductibilité.

Ces deux termes sont définis de la manière suivante (Tableau 3-1):

- Répétabilité : fidélité dans le cas d'un seul opérateur travaillant dans un laboratoire donné et obtenant des résultats successifs avec le même appareil, la même méthode sur un produit identique soumis à l'essai.
- Reproductibilité : fidélité dans le cas d'opérateurs travaillant dans des laboratoires différents ou dans un même laboratoire, mais avec des équipements différents, chacun d'eux obtenant avec la même méthode des résultats individuels sur un produit identique soumis à l'essai.

Dans la mesure où ce travail sera toujours réalisé sur les mêmes appareils, nous ne nous préoccupons donc que de **déterminer l'incertitude se rapportant à des conditions de répétabilité**, c'est-à-dire l'écart-type sur les mesures.

Conditions	Répétabilité	Reproductibilité
Opérateur	Identique	Différent
Appareil	Identique	Différent
Méthode	Identique	Identique
Produit	Identique	Identique

Tableau 3-1 Conditions de répétabilité et de reproductibilité

3.2. *Mesure des propriétés mécaniques*

Les propriétés mécaniques des roches se divisent en deux catégories (Homand et Duffaut, 2000) :

- les déformabilités sous l'effet des sollicitations mécaniques ;
- les résistances à des sollicitations mécaniques, définissant des seuils ou critères de rupture.

Les propriétés mécaniques mesurées dans l'étude doivent donc se rapporter à chacune de ces catégories pour avoir une évaluation complète. Nous cherchons également à utiliser autant que possible des mesures non destructives qui permettent de réaliser plusieurs mesures sur le même échantillon, mais aussi de diminuer l'incertitude sur la valeur relative.

Pour évaluer les déformabilités sous l'effet des sollicitations mécaniques, nous avons donc choisi deux méthodes de mesure non destructives : la vitesse du son et la fréquence de résonance.

Pour évaluer les résistances à des sollicitations mécaniques, aucune mesure non destructive n'est possible, nous avons donc choisi de mesurer la résistance à la compression uniaxiale (Tableau 3-2).

Déformabilité sous l'effet des sollicitations mécaniques	Résistance à des sollicitations mécaniques
Vitesse du son	Résistance à la compression uniaxiale
Fréquence de résonance	

Tableau 3-2 Choix des propriétés mécaniques mesurées dans l'étude

3.2.1. Vitesse du son

3.2.1.1. Description

La mesure de la vitesse du son des roches constitue une des méthodes de mesure non destructives les plus utilisées pour caractériser leurs propriétés mécaniques (Bourbié et al., 1986) et suivre l'évolution de l'endommagement des roches (Couvreur et al., 2001; Klimis et al., 1989; Remy et al., 1994). Elle est sensible aux modifications de squelette rocheux.

Il s'agit donc d'une méthode de mesures incontournable si l'on veut que nos résultats soient **comparables avec ceux figurant dans la bibliographie**.

L'appareillage est composé d'un générateur d'impulsions électriques, d'une paire de transducteurs, d'un amplificateur et d'un appareil électronique permettant de mesurer l'intervalle de temps qui s'écoule entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et la détection de son arrivée par le transducteur-récepteur, comme le préconise la norme de mesure de la vitesse du son sur les pierres naturelles NF EN 14579 (2005). Les mesures sont réalisées par transmission directe, c'est-à-dire avec les transducteurs placés aux deux extrémités de l'échantillon.

Pour assurer une bonne transmission du signal, nous avons utilisé un produit couplant. Nous avons de la graisse à disposition, mais ce produit, non soluble dans l'eau, pouvait boucher

certains pores du calcaire et gêner la mesure des propriétés physiques de la même éprouvette. Nous avons donc trouvé un produit couplant soluble dans l'eau : le miel.

Des essais de répétabilité ont été réalisés sur des échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens pour déterminer l'incertitude liée à la mesure de la vitesse du son (Tableau 3-3). **L'incertitude est de 1 %** pour les deux calcaires. La mesure est donc très satisfaisante.

Calcaire	Nombre de mesures	Incertainude	
			m/s
Pierre de Lens	5	1 %	45
Calcaire de Chamesson	5	1 %	55

Tableau 3-3 Essais de répétabilité effectués pour déterminer l'incertitude de la mesure de la vitesse du son des deux calcaires de l'étude

3.2.1.2. Quantification mécanique et physique de l'endommagement

La vitesse du son permet de traduire la déformabilité des roches et donc, avec l'endommagement, la perte de déformabilité.

Par ailleurs, **elle permet, lorsqu'elle est associée à la mesure de la porosité, de quantifier une autre propriété qui n'est plus mécanique mais physique** : Tourenq et al. (1971) ont mis au point une méthode qui permet, à partir des mesures de la vitesse du son et de la porosité totale n_{tot} (décrite en page 86), d'estimer la part de la porosité qui est liée aux pores n_p et la part qui est liée aux fissures n_f (Figure 3-3).

Cette estimation passe par le calcul de l'indice de continuité I_C . Il s'agit d'un indice qui compare la vitesse du son de l'échantillon considéré à la vitesse du son théorique d'un matériau avec la même composition minéralogique. On le calcule à partir de la mesure de la vitesse du son :

$$I_C = \frac{V_p}{V_t} \times 100$$

avec V_p la vitesse du son mesurée et V_t la vitesse du son théorique des minéraux purs correspondant à la composition minéralogique de la roche étudiée.

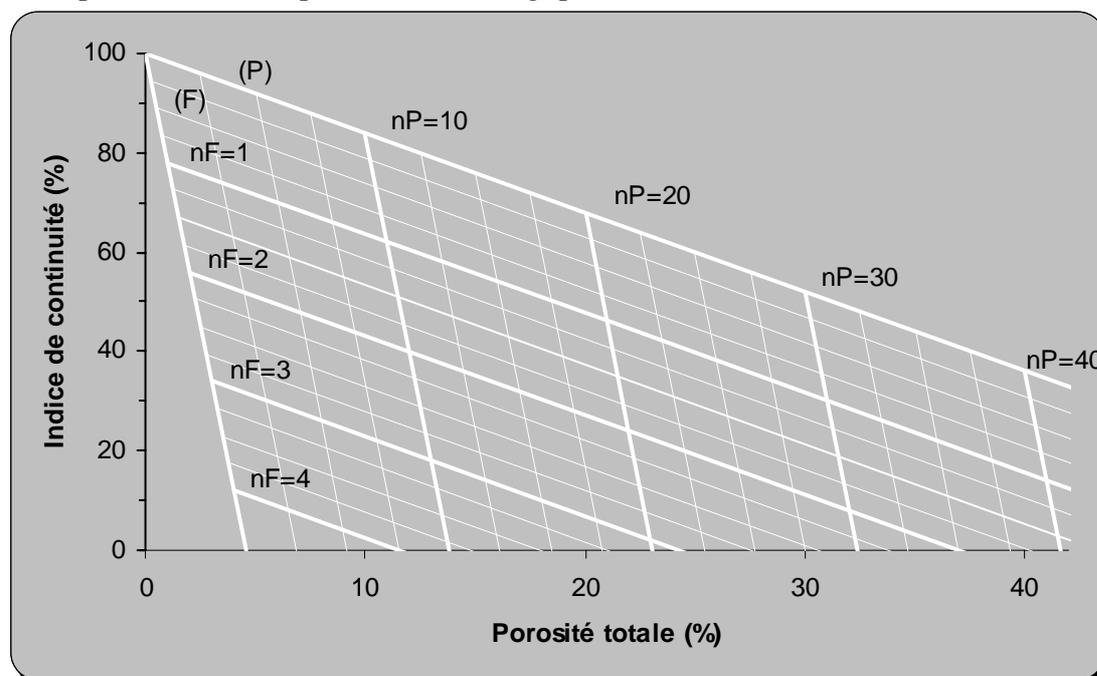


Figure 3-3 Evaluation de la porosité liée aux pores (nP) et celle liée aux fissures (nF) à partir du calcul de l'indice de continuité et de la porosité totale (Tourenq et al., 1971)

Dans le cas général, $V_i = \sum_i c_i v_i$, avec c_i le pourcentage correspondant à la part qu'occupe la composante minéralogique i de la roche et v_i la vitesse du son de la composante minéralogique i . Les calcaires étudiés (le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens) sont constitués à plus de 99% de calcite, nous prendrons donc la vitesse du son de la calcite comme valeur théorique, soit 6320 m/s (Homand et Duffaut, 2000).

Or, l'indice de continuité peut être relié à la porosité liée aux pores et à celle liée aux fissures par la relation suivante (Homand et Duffaut, 2000) :

$$I_C = 1 - A \times n_p - B \times n_f$$

Avec A et B des constantes telles que $A = 1,6$ et $B = 22$ (Tourenq et al., 1971)

Ainsi, la porosité liée aux pores vaut :

$$n_p = \frac{I_C - 1 + B \times n_{tot}}{B - A}$$

Et la porosité liée aux fissures vaut :

$$n_f = n_{tot} - n_p$$

3.2.2. Fréquence de résonance

(Saad et Bost, 2009)

3.2.2.1. Description

Une autre méthode de mesure des propriétés mécaniques choisie pour le suivi de l'endommagement des roches est la mesure de la fréquence de résonance (Christaras et al., 1994; Allison, 1988; Hamdi et du Mouza, 2005). Cette méthode reste moins utilisée que la mesure de la vitesse du son. Ceci s'explique probablement par le fait que la mesure de la vitesse du son est une méthode plus ancienne et permet une mesure directe.

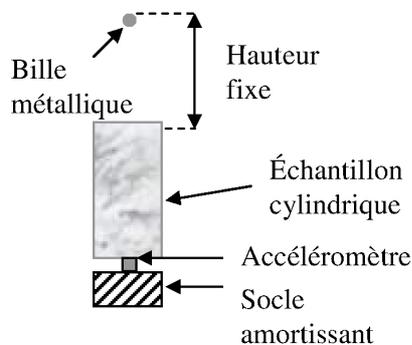


Figure 3-4 Procédure de mesure de la fréquence de résonance

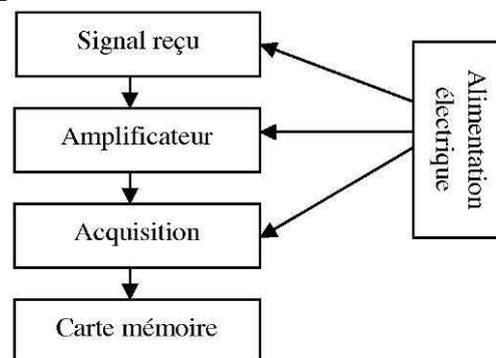


Figure 3-5 Schéma général de l'appareil de mesure de la fréquence de résonance

En physique, la résonance correspond à la tendance d'un système à osciller à son amplitude maximale à une fréquence particulière appelée fréquence de résonance du système.

La procédure pour mesurer la fréquence de résonance consiste à exciter un échantillon au moyen d'une légère impulsion mécanique externe (ici, le lâcher d'une bille, Figure 3-4) et à analyser la vibration transitoire naturelle de l'échantillon.

Un accéléromètre est utilisé pour mesurer cette vibration mécanique (Figure 3-5) (Perrier, 1996; Christaras et al., 1994).

La fréquence de résonance est sensible aux modifications du squelette rocheux. La fréquence de résonance d'une roche est généralement utilisée pour avoir des informations sur le comportement dynamique de cette roche grâce au module d'élasticité

dynamique $E_d = \sqrt{2.L.f./\rho}$, avec ρ la masse volumique de la roche, L la longueur de l'échantillon et f la fréquence de résonance.

Selon le théorème de Shannon, la fréquence maximale enregistrée doit être au plus égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage, soit 50 kHz ici. Cette valeur est au-dessus des fréquences mesurées sur les roches de cette étude qui sont inférieures à 35 kHz. Les mesures peuvent donc être réalisées.

Le résultat des données enregistrées est une courbe sinusoïdale amortie dans le domaine du temps (Figure 3-6). Il est nécessaire de faire une analyse spectrale pour se retrouver dans le domaine des fréquences et ainsi obtenir la fréquence de résonance (Figure 3-7). La transformée de Fourier, souvent utilisée, a été choisie pour calculer le spectre des fréquences du signal (Smith, 1997; Mari et al., 2001).

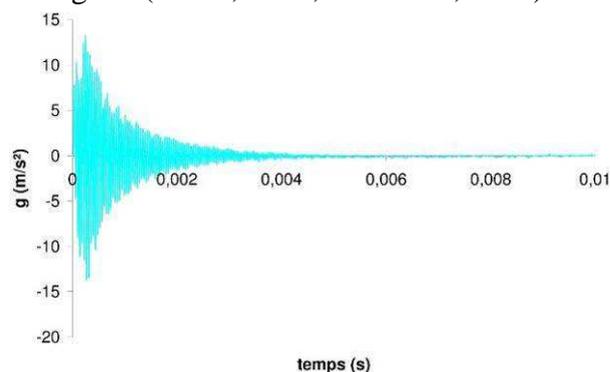


Figure 3-6 Exemple d'un signal obtenu par excitation impulsionnelle d'une éprouvette du calcaire de Chamesson

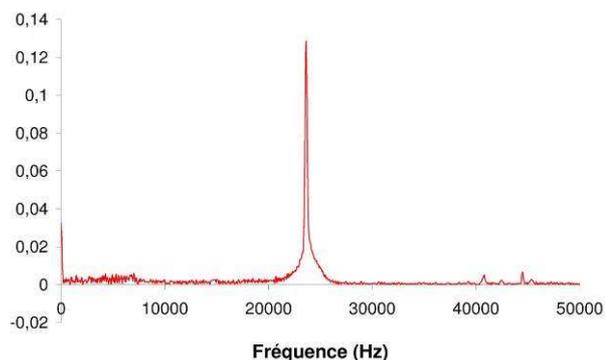


Figure 3-7 Spectre des fréquences associé à la courbe de la Figure 3-6, calculé par la méthode de la transformée de Fourier

Compte-tenu de la fréquence d'échantillonnage à 100 kHz et dans la mesure où nous avons choisi de calculer la transformée de Fourier à partir des 2048 premières valeurs, on obtient une incertitude de :

$$\frac{\text{Fréquence d'échantillonnage}}{2 \times \text{Nombre de valeurs}} = \frac{100000}{2 \times 2048} = 24 \text{ Hz}$$

Donc, de façon inhérente au calcul, la fréquence de résonance évaluée est valable à ± 24 Hz.

Calcaire	Nombre de mesures	Incertitude
		Hz
Pierre de Lens	5	0 %
Calcaire de Chamesson	5	0 %

Tableau 3-4 Essais de répétabilité effectués pour déterminer l'incertitude de la mesure de la fréquence de résonance des deux calcaires de l'étude

Par ailleurs, pour caractériser la mesure de fréquence de résonance, nous avons réalisé des mesures de répétabilité. Ainsi, l'incertitude est quasi-nulle (Tableau 3-4).

De plus, nous avons cherché à savoir comment cette incertitude augmente lorsque la fréquence est mesurée sur une éprouvette altérée, car une roche altérée présente une plus grande hétérogénéité. Nous avons donc réalisé les mêmes essais de répétabilité sur des éprouvettes altérées par les cycles d'altération décrits dans le Chapitre 5 (5.2.1.1 et 5.3.1.1). Les résultats de ces mesures de répétabilité sur des éprouvettes altérées sont représentés dans la Figure 3-8.

Ces mesures nous montrent que l'incertitude croît de façon exponentielle avec la baisse de la fréquence de résonance donc avec l'altération. Cette dispersion des mesures avec l'altération peut s'expliquer par le fait qu'un matériau altéré est plus hétérogène à cause de la fissuration. On atteint, pour l'échantillon le plus altéré (rapport $f(\text{altéré})/f(\text{initial}) = 3\%$), une incertitude maximale proche de 8 %. Cette évolution de l'incertitude en fonction de la

baisse de fréquence de résonance reste acceptable mais doit être prise en compte dans l'interprétation des résultats.

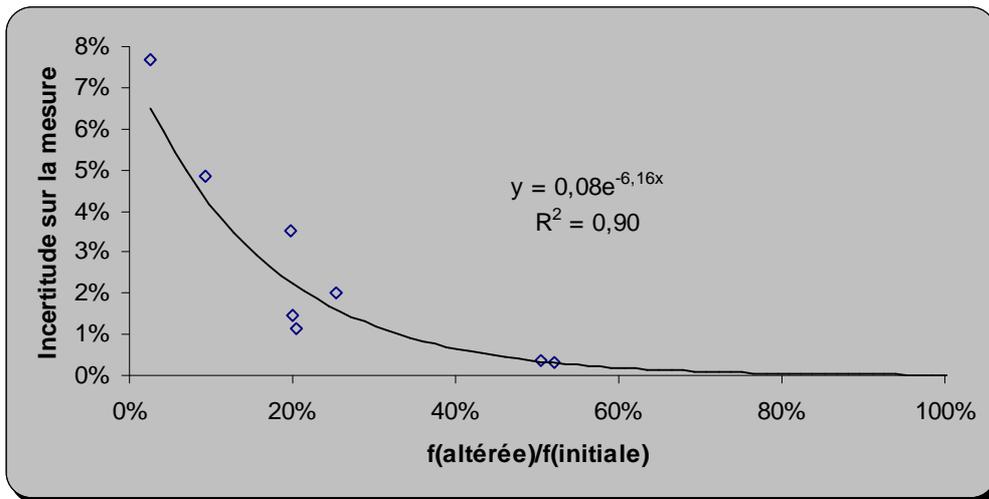


Figure 3-8 Evolution de l'incertitude liée à la répétabilité (5 mesures sur la même éprouvette) de la mesure pour des éprouvettes altérées de Calcaire de Chamesson et Pierre de Lens ($f(\text{altérée})$ = fréquence de résonance de l'éprouvette altérée ; $f(\text{initiale})$ = fréquence de résonance de l'éprouvette à l'état initial)

3.2.2.2. Quantification de l'endommagement : différences entre la vitesse du son et la fréquence de résonance

La mesure de la vitesse du son et celle de la fréquence de résonance semblent physiquement proches puisqu'elles traduisent la déformabilité du squelette rocheux. Nous avons donc regardé si il y a un intérêt de mesurer ces deux valeurs pour la caractérisation des échantillons mais aussi pour le suivi de leur endommagement.

Corrélation pour la caractérisation des éprouvettes

Les mesures de vitesse du son et de la fréquence de résonance ont été réalisées sur 14 éprouvettes de roches grenues et 38 éprouvettes de roches sédimentaires (Figure 3-9). Il y a une bonne corrélation entre les deux moyens de mesure. En effet, pour chaque catégorie de roches (grenue ou sédimentaire), il est possible d'obtenir un alignement des points de mesure. Ces deux méthodes sont donc **équivalentes pour caractériser l'état initial d'une roche**.

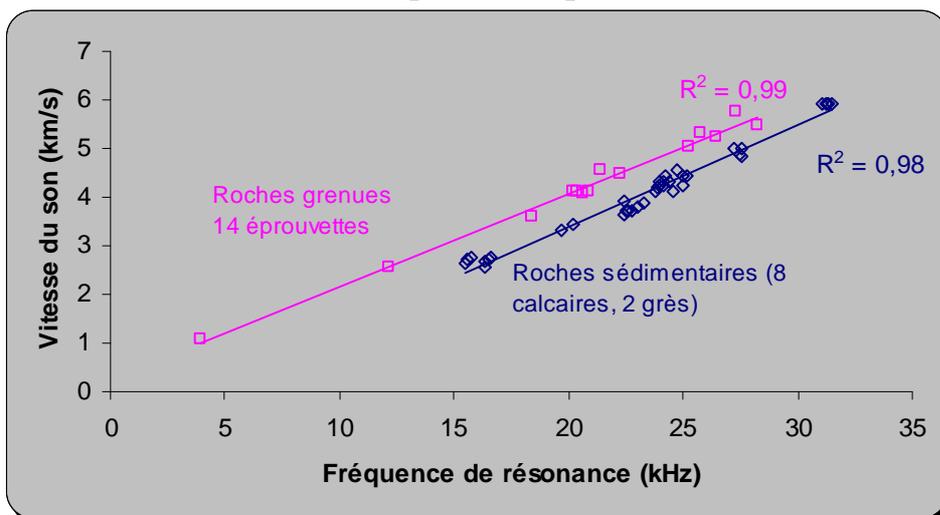


Figure 3-9 Corrélation entre les mesures de la vitesse du son et de la fréquence de résonance sur des éprouvettes de roches grenues et de roches sédimentaires

Comparaison pour le suivi de l'altération

Pour comparer les variations de la vitesse du son et de la fréquence de résonance sur des échantillons altérés, nous avons utilisé les éprouvettes qui ont subi le cycle d'altération par étapes successives décrit dans le Chapitre 4 (4.2). A chaque étape de ce cycle, nous avons mesuré la vitesse du son et la fréquence de résonance et nous avons reporté ces valeurs sur la Figure 3-10.

Déjà, comme vu précédemment, quelque soit la méthode de mesure, la tendance est la même : quand la vitesse du son diminue, la fréquence de résonance diminue aussi. Ces échantillons présentent donc ces modifications au niveau de leur squelette rocheux.

Mais, le point important qui ressort de ce graphique (Figure 3-10) est la grande plage de variations des valeurs de la fréquence de résonance comparée à celle des valeurs de la vitesse du son. En effet, la fréquence de résonance, au cours du cycle d'altération, varie de 3500 à 24800 Hz, alors que la vitesse du son ne varie que de 3000 à 4200 m/s. Ceci montre que **la fréquence de résonance semble être une méthode de mesure non destructive plus sensible aux modifications du squelette rocheux que la vitesse du son et donc à l'endommagement des échantillons. Cette observation est confirmée par les mesures présentées dans le Chapitre 5.**

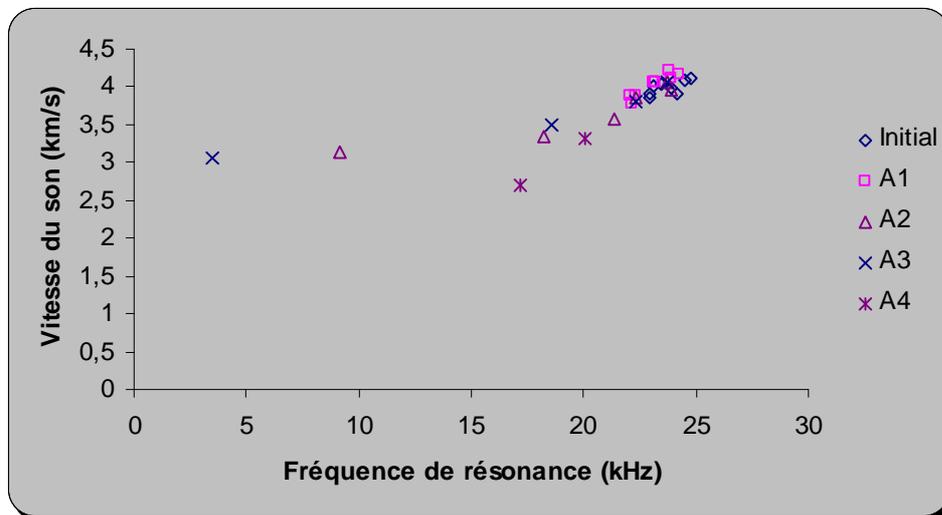


Figure 3-10 Mesures de la fréquence de résonance et de la vitesse du son sur les deux calcaires étudiés (Calcaire de Chamesson et Pierre de Lens) au cours de l'essai de faisabilité (Chapitre 4, 4.2)

Conclusion

La fréquence de résonance et la vitesse du son sont des méthodes de mesure équivalentes pour caractériser les éprouvettes en laboratoire. Par contre, pour l'évaluation et le suivi de l'endommagement, la fréquence de résonance s'avère être une méthode de mesure plus sensible que la vitesse du son.

3.2.3. Résistance en compression uniaxiale

3.2.3.1. Description

La résistance en compression uniaxiale correspond à la contrainte maximale supportée par un échantillon lors d'un chargement en compression selon un axe (Homand et Duffaut, 2000). L'essai de résistance en compression uniaxiale a été effectué en respectant la norme NF P 94-420 (2000).

Répétabilité

Calcaire	Nombre de mesures	Incertitude
		MPa
Pierre de Lens	5	23 %
Calcaire de Chamesson	5	3 %

Tableau 3-5 Essais de répétabilité effectués pour déterminer l'incertitude de la mesure de la résistance en compression des deux calcaires de l'étude

Des essais de répétabilité ont permis de déterminer les incertitudes liées à la mesure de la résistance en compression (Tableau 3-5). L'essai étant destructif, l'incertitude a été obtenue en utilisant des éprouvettes différentes, et est donc plus importante.

L'incertitude liée à la mesure de la résistance en compression pour la Pierre de Lens est élevée : 23 %. **Le comportement mécanique de ce calcaire semble donc plus hétérogène que celui du calcaire de Chamesson.**

L'inconvénient de cet essai réside dans le fait qu'il est **destructif**. Il empêche, d'une part, un suivi de l'endommagement sur une même éprouvette et, donc entraîne une plus grande dispersion des résultats.

3.2.3.2. Quantification de l'endommagement : influence du degré de saturation

Nous savons que la présence d'eau dans une roche en diminue sa résistance mécanique (Bourbié et al., 1986). Plus qu'une quantification de l'endommagement, nous allons donc, dans ce paragraphe, regarder le lien entre degré de saturation et baisse de la résistance mécanique par le biais d'essais de résistance en compression uniaxiale.

Pour ce faire, nous avons réalisé des mesures de résistance en compression sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 40 mm et de longueur 80 mm à différents degrés de saturation.

Degré de saturation	1) Sec	2) 10 % 3) 50%	4) Par imbibition	5) Saturé
Procédure de saturation	Séchage dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante entre deux pesées quotidiennes	Saturation par imbibition (cf. degré de saturation 3) puis échantillons placés dans une salle climatisée à 20°C et pesée quotidienne jusqu'au degré de saturation proche de 50% et 10 %*.	Saturation par imbibition, selon la procédure de saturation "à 48 heures" décrite dans la norme NF B 10-504 (1973)	Saturation sous vide

*Pour éviter que le séchage ne se fasse qu'en surface et donc pour assurer une répartition assez homogène de l'eau dans les échantillons, des membranes en plastique ajustées ont été mises autour de chaque échantillon. Pour que cette perte en eau soit encore plus homogène, à chaque pesée quotidienne, l'échantillon est retourné et la face supérieure d'évaporation devient la face inférieure d'évacuation.

Tableau 3-6 Degrés de saturation choisis pour l'étude de l'influence du degré de saturation sur la résistance à la compression

Nous avons choisi les degrés de saturation suivants (Tableau 3-6):

- 1) 0% pour avoir la valeur à l'état sec, c'est-à-dire sans présence d'eau ;
- 2) 10% correspondant à un état avec une très faible présence d'eau ;
- 3) 50% correspondant à un état avec autant de vides remplis d'eau que remplis d'air ;
- 4) le degré de saturation obtenu par imbibition (NF B10-504, 1973) et correspondant au degré de saturation proche du degré de saturation naturel (Chapitre 2, 2.3.1) ;
- 5) 100% pour une roche entièrement saturée en eau.

Pour chaque degré de saturation et pour chaque calcaire, on mesure 5 résistances en compression sur 5 éprouvettes différentes.

Les résultats obtenus (moyennes et écarts-types) sont reportés dans la Figure 3-11. L'écart-type pour la Pierre de Lens est plus élevé que celui du Calcaire de Chamesson car les porosités des échantillons de la Pierre de Lens sont plus dispersées que celles des échantillons du calcaire de Chamesson.

On remarque que :

- que la résistance diminue progressivement lorsque le degré de saturation augmente ;
 - les points correspondant à chacun des deux calcaires sont superposables ;
 - la résistance à la compression augmente légèrement pour le calcaire de Chamesson entre le degré de saturation obtenu par imbibition (autour de 90%) et le degré de saturation à 100%.
- Bourbié et al. (1986) donnent une explication à partir de mesures acoustiques : à saturation totale, la compressibilité de l'eau entre en jeu et rigidifie le matériau et donc la résistance en compression augmente.

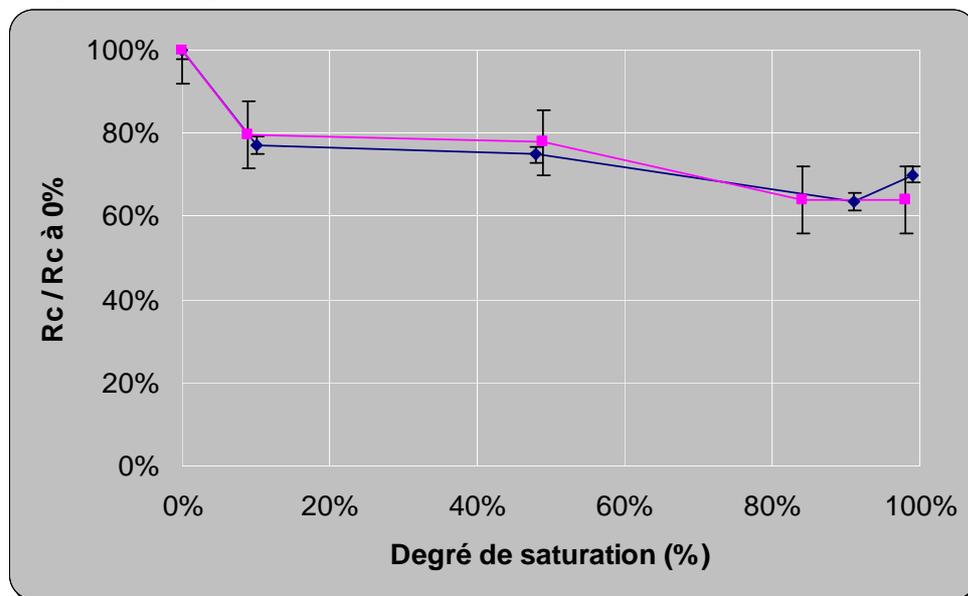


Figure 3-11 Résultats des mesures de résistance en compression en fonction du degré de saturation des deux calcaires de l'étude. En bleu : calcaire de Chamesson ; en rose : Pierre de Lens. Pour rappel (cf. Chapitre 2, 2.2.1.3 et 2.2.2.3), le calcaire de Chamesson a une résistance en compression à l'état sec de 79 MPa et la Pierre de Lens de 54 MPa.

Le degré de saturation a une **influence négligeable** sur la résistance à la compression pour les degrés de saturation qui nous intéressent (supérieures à 80%). Par contre, nous prendrons en compte son influence dans le Chapitre 5 **en mesurant la résistance à la compression à l'état sec (degré de saturation de 0%) et à l'état saturé (degré de saturation de 100%)**.

3.2.4. Conclusion

L'évaluation des propriétés mécaniques met en évidence le fait que :

- la mesure de la vitesse du son et celle de la fréquence de résonance présentent une très bonne répétabilité (<1%) ;
- la vitesse du son, associée à la mesure de porosité, permet également de déterminer la part de porosité liée aux pores et la part de porosité liée aux fissures ;
- la fréquence de résonance est plus sensible aux modifications du squelette rocheux que la vitesse du son ;
- la résistance en compression met en évidence l'hétérogénéité du comportement de la Pierre de Lens.
- la mesure de la résistance en compression à l'état sec et à l'état saturé permet de qualifier les variations de la résistance en compression en fonction du degré de saturation.

3.3. Mesure des propriétés physiques

Les propriétés physiques concernent ici les propriétés décrivant le milieu poreux (squelette rocheux, pores et fissures). Comme pour les propriétés mécaniques, nous cherchons des

méthodes de mesure non destructives qui permettent de réaliser plusieurs mesures sur un même échantillon. Par ailleurs, nous cherchons **des propriétés physiques qui ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques** : la porosité et la perméabilité (Homand et Duffaut, 2000). Ainsi, pour caractériser la porosité, nous avons choisi les mesures de la porosité totale et de la porosité à l'eau et les mesures issues de l'essai de porosimétrie au mercure et pour caractériser la perméabilité, nous avons choisi la mesure de la perméabilité à l'eau.

3.3.1. Porosité totale et porosité à l'eau

La porosité n correspond à la proportion de vides dans le milieu poreux.

Il s'agit du rapport du volume des vides V_v au volume total V_t : $n = \frac{V_v}{V_t}$ ou par rapport au

volume du squelette rocheux V_s : $n = 1 - \frac{V_s}{V_t}$.

Les résultats donnés par ces deux expressions peuvent différer car les techniques de mesures de V_v et V_s ne sont pas équivalentes.

Ici, nous avons mesuré le volume total directement avec les dimensions de l'éprouvette. Pour le volume des vides, nous l'avons obtenu par saturation sous vide de l'éprouvette (NF EN 1936, 2007). Enfin, le volume du squelette a été obtenu à partir de la masse volumique calculée au pycnomètre à hélium.

Dans la suite du propos, pour qualifier la porosité calculée à partir du volume des vides, nous parlerons de porosité à l'eau et pour qualifier la porosité calculée à partir du volume du squelette rocheux, nous parlerons de porosité totale.

Pour le calcaire de Chamesson, la porosité à l'eau est, en moyenne, de 17,2% et la porosité totale de 17,4%. Pour la Pierre de Lens, la porosité à l'eau est, en moyenne, de 13,5% et la porosité totale de 13,9%.

Associée à la vitesse du son, la porosité permet de **déterminer la part de porosité liée aux pores et celle liée aux fissures** (3.2.1).

L'incertitude de ces mesures est liée à la pesée des échantillons. Nous avons donc réalisé 5 pesées successives sur des échantillons préalablement saturés en eau. Les résultats de ces mesures sont donnés dans le Tableau 3-7. On voit que **cette mesure est précise**.

Calcaire	Nombre de mesures	Incertitude	
			%
Pierre de Lens	5	0 %	0,04
Calcaire de Chamesson	5	0 %	0,04

Tableau 3-7 Essais de répétabilité effectués pour déterminer l'incertitude de la mesure de la porosité à l'eau des deux calcaires de l'étude

3.3.2. Perméabilité

(Saad et al., 2010)

La perméabilité est définie comme la capacité d'un matériau à se laisser traverser par un fluide. Dans ce travail, nous nous intéressons à l'altération générée en partie par des transports d'eau sous différents états. C'est donc avec ce fluide que nous déterminerons la perméabilité des calcaires testés.

L'essai, mis en place lors de ce travail, se déroule dans une cellule triaxiale. Le montage est représenté dans le schéma de la Figure 3-12.

Le principe est le suivant : après saturation à l'eau totale sous vide, les éprouvettes d'essai sont placées verticalement dans une enceinte étanche (membrane) entre deux disques poreux. L'échantillon étudié, isolé par cette membrane du fluide de confinement, est soumis à une pression de confinement P_c (pour empêcher toute fuite) et une pression axiale (pour avoir des

conditions isotropes) dont on contrôle les variations. Un volume de fluide donné est injecté en amont de l'échantillon étudié, en activant un premier générateur de pression à une pression P_i (pression d'entrée). Le fluide circule à travers l'échantillon. En sortie de l'échantillon, la pression P_s (pression de sortie) du fluide qui a traversé l'échantillon est également contrôlée par un générateur de pression, et mesurée. Pour assurer une bonne étanchéité du montage expérimental, la pression de confinement a toujours été fixée de telle sorte qu'elle soit supérieure de 2 MPa à P_i (Ghabezloo et al., 2009).

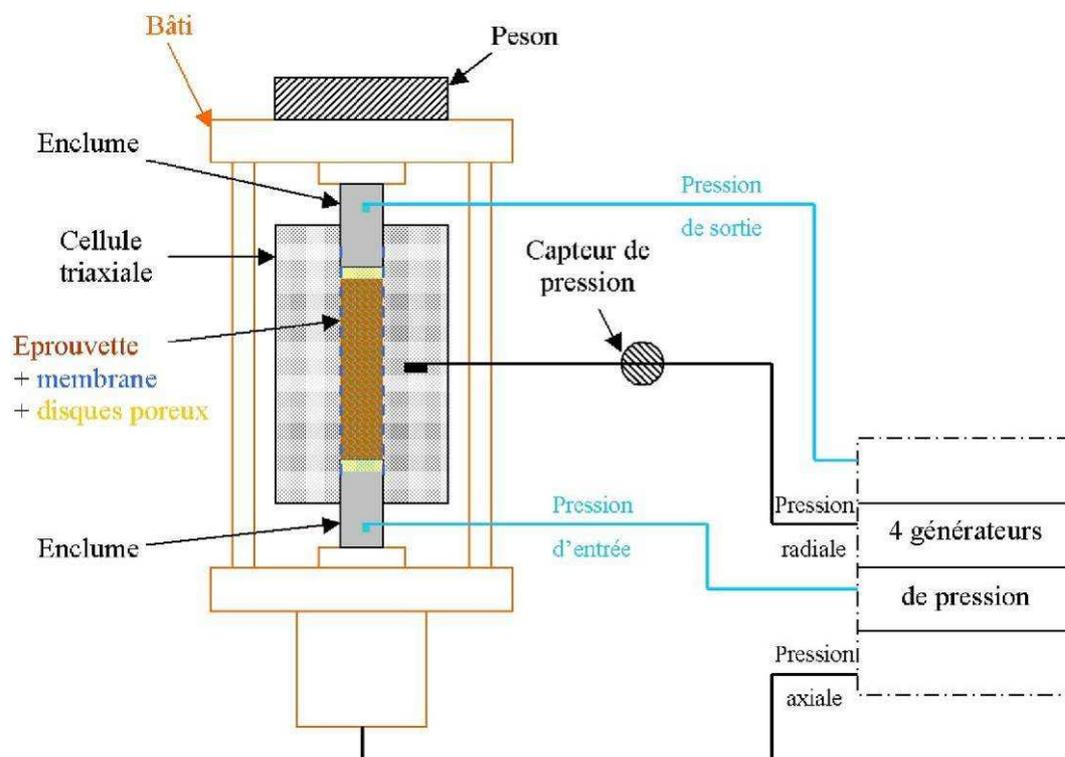


Figure 3-12 Schéma du montage de l'essai de mesure de la perméabilité

On obtient la perméabilité en effectuant les mesures suivant la méthode par écoulement stationnaire et à l'aide de la loi de Darcy exposée : $Q = \frac{k}{\eta} \times S \times \frac{\Delta P}{\Delta L}$. Au préalable, par le

calcul du nombre de Reynolds, il est vérifié que l'écoulement est laminaire, c'est-à-dire si l'énergie cinétique du fluide est négligeable par rapport à son énergie visqueuse. Les nombres de Reynolds sont donc très inférieurs à 1 (Yale, 1984; Guéguen et Palciauskas, 1992).

Des essais de répétabilité ont permis de connaître l'incertitude liée à la mesure de la perméabilité (Tableau 3-8).

Calcaire	Perméabilité		Nombre de mesures	Incertitude	
	μD	m/s		μD ($1 \mu D = 10^{-18} \text{ m}^2$)	
Pierre de Lens	409	$4,0 \cdot 10^{-9}$	5	1 %	3,9
Calcaire de Chamesson	88	$8,6 \cdot 10^{-10}$	5	1 %	0,6

Tableau 3-8 Essais de répétabilité effectués pour déterminer l'incertitude de la mesure de la perméabilité des deux calcaires de l'étude

On peut noter que cette **incertitude est faible** et donc l'essai est d'autant plus intéressant pour un suivi de l'évolution de l'endommagement.

3.3.3. Conclusion

L'évaluation des propriétés physiques ayant une incidence sur les propriétés mécaniques met en évidence le fait que :

- la mesure de la porosité totale, de la porosité à l'eau et de la perméabilité à l'eau présente une très bonne répétabilité (<1%) ;
- l'essai de porosimétrie au mercure étant destructif, il ne présente pas de résultat assez satisfaisant au niveau de l'incertitude pour permettre de quantifier l'endommagement.

3.4. Observations de l'altération

Pour observer l'altération des échantillons en laboratoire, nous souhaitons utiliser les différentes échelles d'observation possibles : à l'échelle de l'échantillon et à l'échelle de la microstructure.

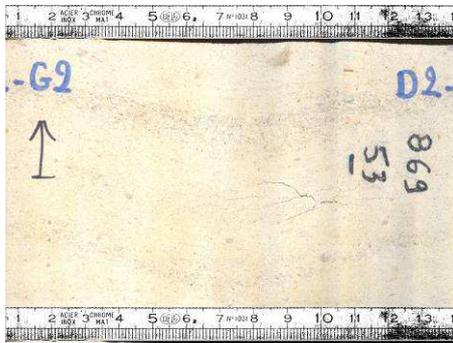
3.4.1. A l'échelle de l'échantillon

La méthode de mesure consiste en une numérisation de la surface des éprouvettes et le traitement des images obtenues.

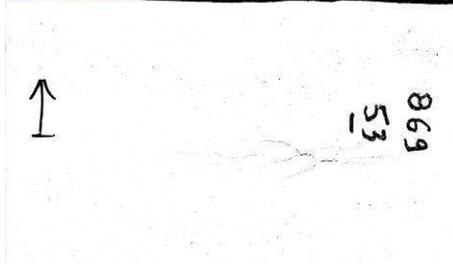
Le but de cette technique est de **mesurer l'orientation et la longueur des fissures observables à l'œil nu sur les échantillons fissurés**. Elle a été mise au point au cours de ce travail et consiste à faire une image de la surface latérale d'un échantillon cylindrique en le « roulant » sur un scanner d'ordinateur à la vitesse à laquelle se déplace la lumière du scanner (Figure 3-14).

Les fissures présentes en surface sont traitées informatiquement pour qu'elles soient représentées en une courbe discontinue linéaire par morceaux d'épaisseur constante. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires avant de passer l'image dans un logiciel d'analyse d'images, comme illustré sur la Figure 3-13.

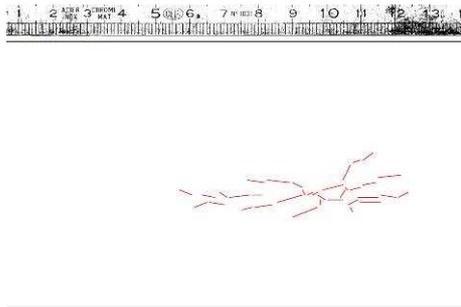
Ensuite, les segments de droites sont traités par un logiciel d'analyse d'image (National Instruments IMAQ Vision Builder) afin d'obtenir, par analyse de ces « particules », l'orientation et la longueur des segments de droites composant les fissures pour chaque échantillon.



- Obtention d'une image brute après passage sur le scanner d'après la procédure de la Figure 3-14



- Seuillage de l'image brute par un logiciel de traitement d'images pour ne faire apparaître que les fissures



- Décomposition manuelle des fissures présentes en surface de l'échantillon en segments discontinus d'épaisseur constante

Figure 3-13 Exemple des traitements opérés sur l'image brute obtenue par scanner pour pouvoir faire une analyse d'image

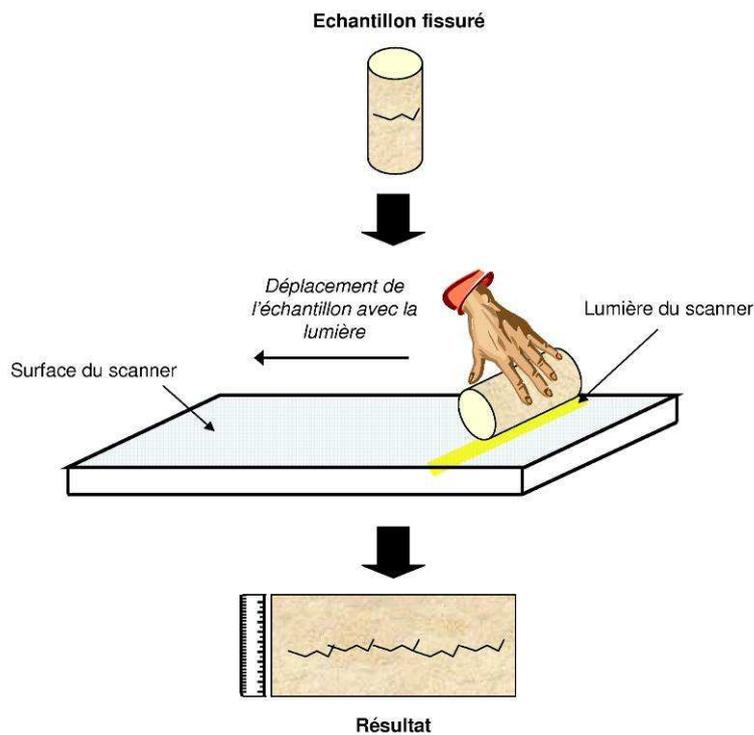


Figure 3-14 Schéma expliquant la technique mise au point pour obtenir une image des fissures présentes sur la surface latérale des échantillons fissurés de calcaire

3.4.2. A l'échelle de la microstructure

3.4.2.1. Courbes de distribution des rayons d'accès au pore

Pour les milieux poreux, la porosimétrie au mercure est une des méthodes les plus utilisées pour déterminer **la distribution de la porosité en termes de taille de pores**. Elle permet d'**avoir une cartographie du squelette rocheux**. La porosimétrie au mercure repose sur l'injection de mercure à une pression donnée dans une cellule initialement sous vide contenant un solide poreux. La saturation en mercure liquide du milieu poreux est d'autant plus grande que la pression est forte.

A température ambiante, le mercure est un fluide non mouillant pour la majorité des matériaux (Robert, 2004). Cette réalité a conduit Washburn (1921) à proposer que l'injection de mercure dans un milieu poreux soit utilisée pour connaître la distribution de la taille des pores. Il a formulé un modèle qui relie la pression nécessaire à l'intrusion de mercure dans un pore cylindrique à son rayon R . La force F_I nécessaire pour expulser le mercure et la F_E nécessaire pour pénétrer dans le pore sous une pression externe P s'écrivent :

$F_I = 2\pi R\sigma \cos \theta$ et $F_E = \pi R^2 P$, avec θ l'angle de contact du mercure sur le matériau et σ la tension superficielle du mercure. Ainsi, sous la pression d'équilibre P , l'équilibre des forces F_I et F_E conduit à l'expression suivante reliant le rayon R d'un pore cylindrique rempli de mercure à P :

$$R = -\frac{2\sigma \cos \theta}{P}$$

On peut déjà remarquer qu'un pore sera ainsi caractérisé par son rayon d'accès et non pas par son propre rayon (Bousquie, 1979).

Pratiquement, l'essai consiste à injecter du mercure dans un échantillon poreux, préalablement désaéré, en appliquant des pressions progressives. Le volume de mercure introduit est mesuré à chaque niveau de pression. Le graphique du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore donne les informations sur la distribution de la taille des rayons d'accès pour la roche étudiée.

La mesure s'opère en deux temps : la mesure basse pression (0,0035-0,200 MPa) et la mesure haute pression (0,150-206 MPa).

Les échantillons sont des carottes cylindriques de diamètre de 10 mm et de hauteur comprise entre 10 et 20 mm, séchés à 60 °C (température ne déstructurant pas la calcite) pendant 24 heures.

Lors de l'injection de mercure, la pression monte progressivement et se traduit par un déplacement et un remplacement du fluide mouillant (vapeur de mercure) par le fluide non-mouillant (mercure liquide), d'abord par remplissage des pores aux accès les plus larges, puis de ceux ayant des accès de plus en plus petits.

Les mesures ont été réalisées sur un porosimètre Autopore IV 9500 de Micromeritics. Chaque échantillon a été placé dans un pénétromètre (cellule dans laquelle on place l'échantillon) en fonction de sa porosité. La tension superficielle du mercure vaut 485 dynes/cm. La valeur de l'angle de contact entre le mercure et la surface du solide dépend de la composition chimique de la surface du solide, de sa propreté et de sa rugosité et de la pureté du mercure (Robert, 2004). Pour un calcaire, nous prenons l'angle de contact entre le mercure et la calcite, soit 146° (Robert, 2004).

Les mesures de volume et de pression lors de cet essai permettent d'établir de nombreux paramètres. Dans la suite de l'étude, nous avons utilisé uniquement les courbes de distribution des rayons d'accès au pore.

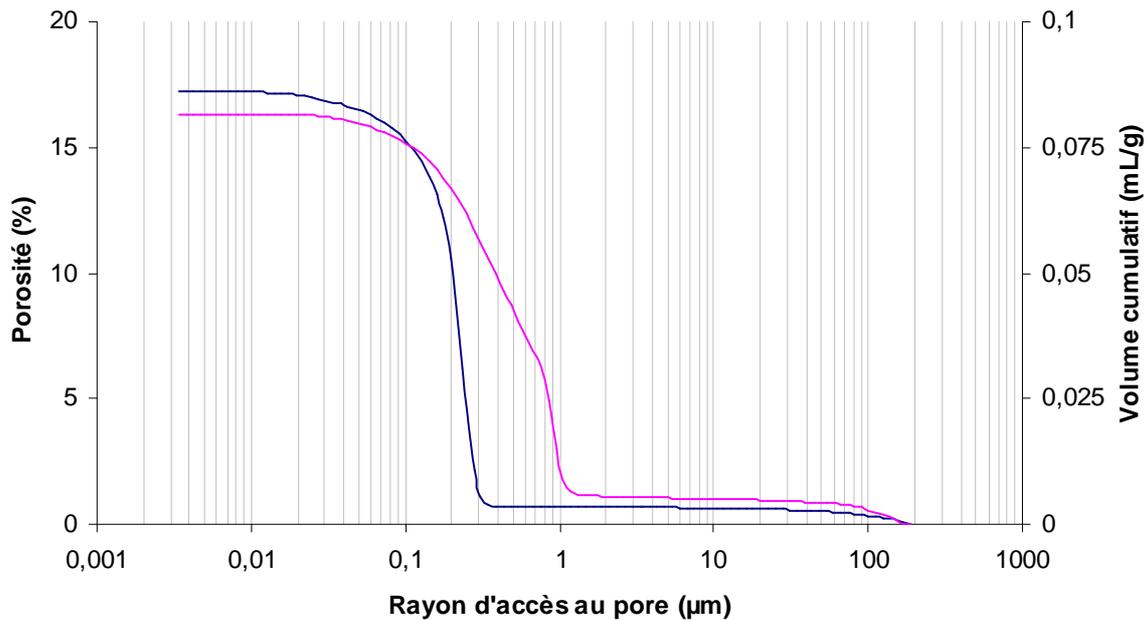


Figure 3-15 Représentation logarithmique de la distribution des rayons d'accès au pore par rapport à la porosité. En bleu : Calcaire de Chamesson ; en rose : Pierre de Lens.

Il existe plusieurs façons de représenter graphiquement cette relation. Pour illustrer ces différentes représentations, nous allons prendre l'exemple des essais de porosimétrie obtenus pour les échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens. La représentation courante issue de l'essai de porosimétrie au mercure est la porosité (ou le volume cumulé) en fonction du rayon d'accès au pore (Figure 3-15). Le volume cumulé correspond au volume de mercure introduit dans l'échantillon à chaque palier de pression rapporté à la masse de l'échantillon. Il s'agit d'une mesure directe. La représentation en fonction de la porosité se fait en divisant ce volume par le volume total introduit dans l'échantillon puis en multipliant par la porosité de l'échantillon mesurée avec cet essai. Cette représentation permet de visualiser la porosité correspondant aux pores de rayons supérieurs à une valeur donnée. Elle peut, par exemple, être utile pour distinguer la macroporosité de la microporosité.

Par ailleurs, pour nos analyses, d'autres représentations ont été plus utiles et pertinentes. Il s'agit de la représentation du :

- **Pourcentage du volume total en fonction du rayon d'accès au pore** (Figure 3-16)

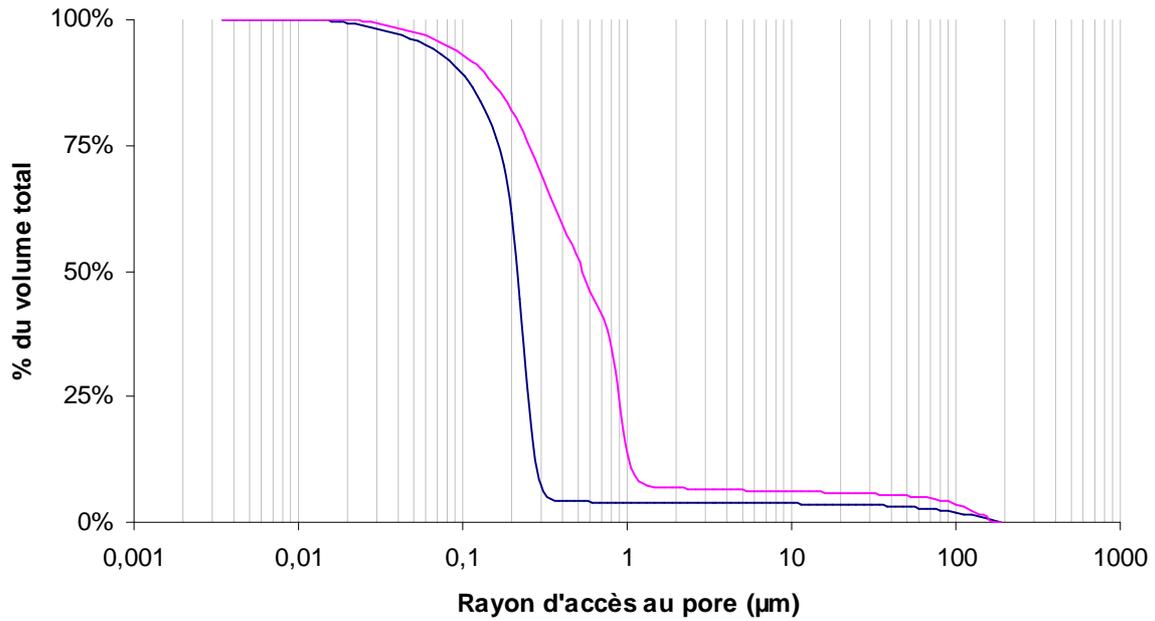


Figure 3-16 Représentation logarithmique de la distribution des rayons d'accès au pore par rapport au pourcentage du volume total. En bleu : Calcaire de Chamesson ; en rose : Pierre de Lens.

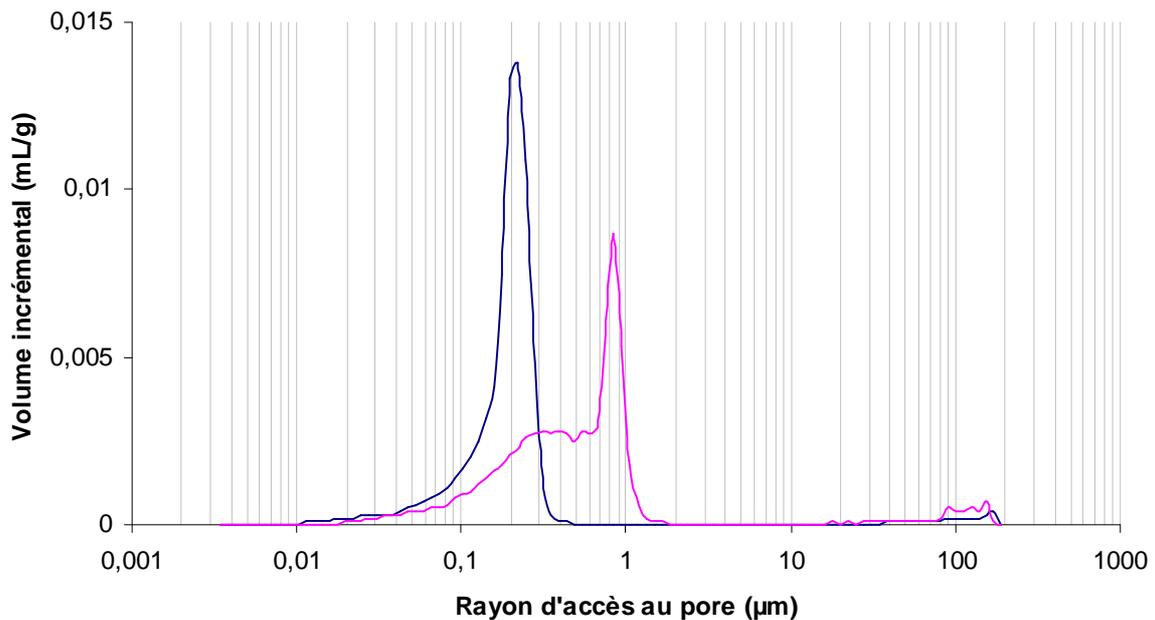


Figure 3-17 Représentation logarithmique de la distribution des rayons d'accès au pore par rapport au volume incrémental. En bleu : Calcaire de Chamesson ; en rose : Pierre de Lens.

Le pourcentage du volume total correspond au rapport entre le volume total introduit à un rayon donné et le volume total de mercure introduit dans l'échantillon au cours de l'essai. Il s'agit donc à un facteur près de la représentation de la Figure 3-15. Cette représentation permet de visualiser graphiquement le rayon médian (défini dans le Chapitre 4 (4.1.1)). Ce dernier se situe à 50% du volume total. Pour cette valeur, la moitié de l'espace poreux est remplie de mercure. Nous reviendrons sur l'intérêt de cette représentation au Chapitre 4 (4.1.1.3).

- **Volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore** (Figure 3-17)

Le volume incrémental pour un rayon R_i correspond au volume introduit dans l'échantillon entre le rayon R_i et le rayon R_{i-1} . **Cette représentation est très utile pour interpréter les modifications qui ont lieu dans la répartition du réseau poreux.** En effet, elle permet de visualiser la (ou les) gamme(s) de pores principale(s), c'est-à-dire les rayons d'accès au pore pour lesquels le volume incrémental est le plus élevé. Le volume incrémental correspond en fait à la dérivée du volume cumulatif.

On peut remarquer sur la Figure 3-17 que le réseau poreux du calcaire de Chamesson ne présente qu'une seule gamme de pore (autour de $0,2 \mu\text{m}$), alors que celui de la Pierre de Lens en présente deux (autour de $0,22 \mu\text{m}$ et autour de $0,9 \mu\text{m}$). La gamme de pore du calcaire de Chamesson est proche de la gamme de pore secondaire (la plus petite) de la Pierre de Lens. Les images MEB de la partie suivante vont permettre d'attribuer ces deux gammes de pores à des emplacements différents dans le réseau poreux.

L'écart-type associé au volume incrémental en fonction de la taille de pore a été mesuré pour chaque rayon à partir de courbes porosimétriques associées à 3 essais de répétabilité pour le calcaire de Chamesson et 5 pour la Pierre de Lens. Les résultats sont reportés dans la Figure 3-18.

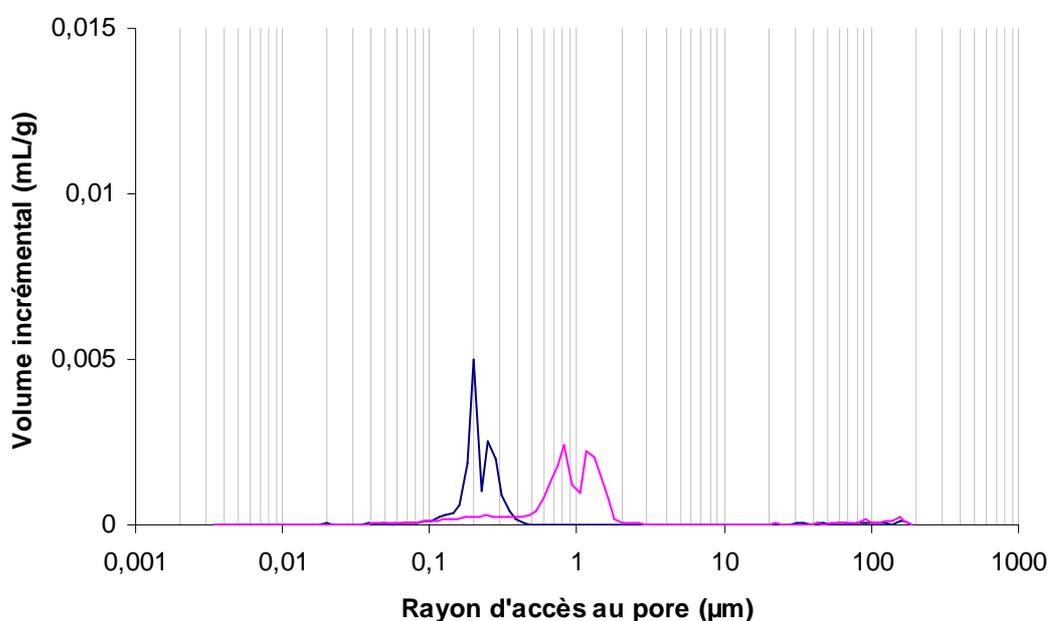


Figure 3-18 Représentation logarithmique de l'écart-type associé au volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore. En bleu : Calcaire de Chamesson ; en rose : Pierre de Lens.

Les courbes porosimétriques représentant le volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore vont servir à déterminer les modifications microstructurales des deux calcaires de référence au cours du processus d'altération.

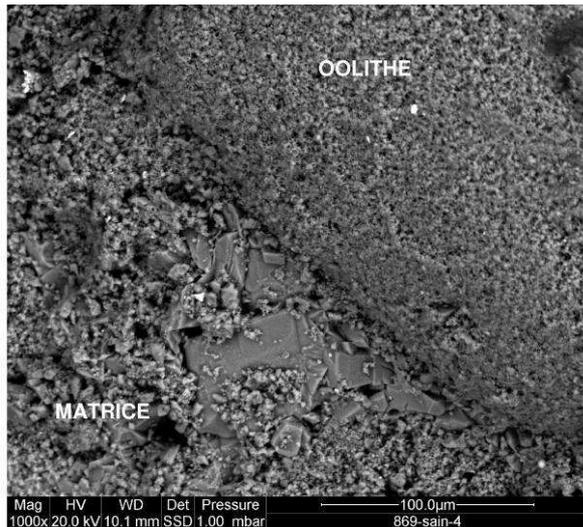


Figure 3-19 Image MEB de la matrice et d'un oolithe pour le calcaire de Chamesson

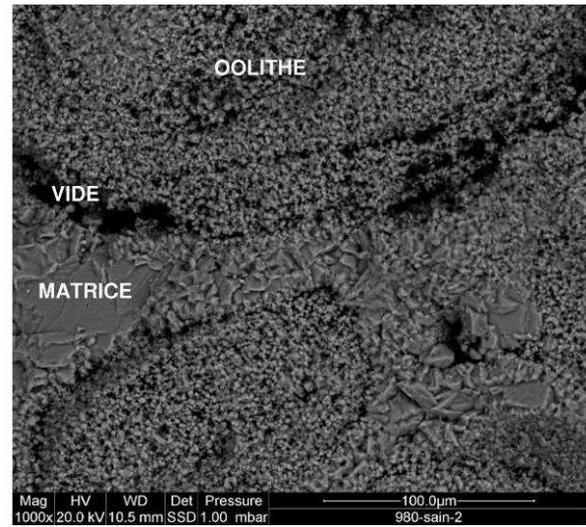


Figure 3-20 Image MEB de la matrice et d'un oolithe pour la Pierre de Lens

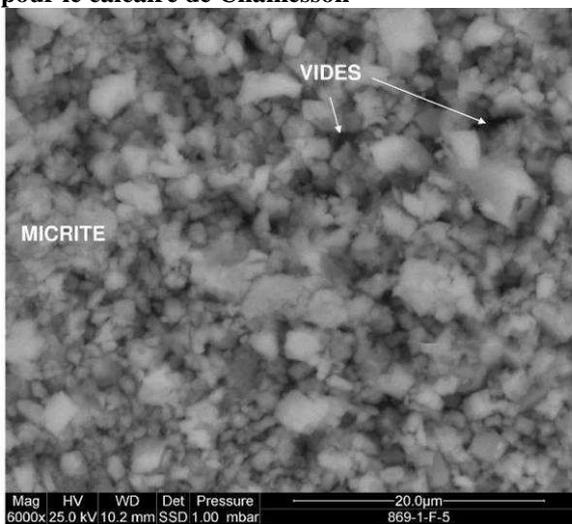


Figure 3-21 Image MEB de la micrite pour le calcaire de Chamesson

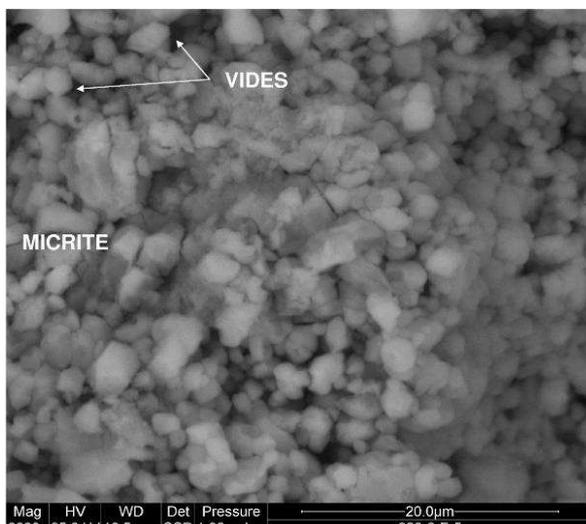


Figure 3-22 Image MEB de la micrite pour la Pierre de Lens

3.4.2.2. Microscope Electronique à Balayage

Cette méthode d'imagerie permet de **visualiser la microstructure** des échantillons en deux dimensions.

Le principe général de ce dispositif est le suivant : l'échantillon à observer est balayé par un faisceau électronique. Les électrons secondaires produits et les électrons rétrodiffusés suite au bombardement de l'échantillon sont détectés.

L'imagerie en électrons secondaires, de très faible énergie, correspond aux électrons de la première couche de l'échantillon. Elle permet de donner des indications de topographie. L'imagerie en électrons rétrodiffusés correspond aux électrons primaires qui entrent dans le matériau et sont déviés par les atomes du matériau. Elle permet de distinguer les éléments lourds, c'est-à-dire de numéro atomique élevé, en blanc, des éléments légers, c'est-à-dire de numéro atomique petit, en noir.

Les différences au niveau des rayons d'accès au pore déterminées à partir des courbes de la Figure 3-17 vont pouvoir être interprétés avec les images MEB (Figure 3-19 à Figure 3-22).

Ces dernières montrent que **la gamme de pores la plus petite (autour de 0,2 µm) correspond à la porosité dans la phase de liaison et dans le cortex des oolithes elles-**

mêmes (Figure 3-21 et Figure 3-22) alors que **la gamme de pores uniquement présente dans le réseau poreux de la Pierre de Lens, aux alentours de 0,9 µm, correspond à une porosité entre les oolithes** (Figure 3-19 et Figure 3-20). Ces remarques ont également été faites sur un autre calcaire oolithique très semblable à la Pierre de Lens : le calcaire de Vilhonneur par Iskandar (1990) sur lequel nous reviendrons dans le Chapitre 7.

3.4.3. Conclusion

L'observation de l'altération des échantillons à deux échelles (échantillon et microstructure) permet de :

- quantifier la longueur et l'orientation des fissures à l'aide d'une méthode mise en place ici se basant sur une image de la surface de l'échantillon obtenue au scanner ;
- visualiser les modifications du réseau poreux à l'aide de la représentation du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore issue de l'essai de porosimétrie au mercure ;
- relier les modifications observées grâce à cette représentation aux images MEB de la microstructure.

3.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de déterminer les mesures mécaniques et physiques et les méthodes d'observation utiles pour la quantification de l'endommagement et l'observation de l'altération suite à une gélivation ou une dissolution.

	Type de propriété	Type de méthode	Répétabilité	Type de mesure	Particularités
Vitesse du son	Mécanique et physique	Quantitative	Bonne	Non destructive	Traduit la création de porosité liée aux pores et aux fissures
Fréquence de résonance	Mécanique	Quantitative	Bonne, même pour des échantillons altérés	Non destructive	Très sensible à toute modification du squelette rocheux
Résistance à la compression uniaxiale	Mécanique	Quantitative	Incertitude élevée	Destructive	Influence du degré de saturation négligeable pour les degrés supérieurs à 80%
Porosité	Physique	Quantitative	Bonne	Non destructive	Incidence sur les propriétés mécaniques Traduit la création de porosité liée aux pores et aux fissures
Perméabilité	Physique	Quantitative	Bonne	Non destructive	Incidence sur les propriétés mécaniques
Courbes porosimétriques	- Physique - Observations microscopiques	Quantitative et qualitative	Incertitude élevée	Destructive	Visualisation et quantification de la modification du squelette rocheux en termes de taille de pores
MEB	Observations microscopiques	Qualitative	Non mesurable	Non destructive	Visualisation de la modification du squelette rocheux en termes de composants minéralogiques (oolithe, matrice)
Parois latérales des éprouvettes	Observations à l'échelle de l'éprouvette	Quantitative et qualitative	Non déterminée	Non destructive	Visualisation et quantification (longueur et orientation) des fissures visibles à l'œil nu présentes en surface des éprouvettes

Tableau 3-9 Critères de choix des méthodes de mesure de l'endommagement

Les descriptions précédentes donnent les caractéristiques qui ont permis de choisir ces méthodes de mesure de l'endommagement. Le Tableau 3-9 regroupe l'ensemble des critères de choix de ces méthodes qui sont :

- le type de propriété mesurée ;
- le type de méthode d'évaluation ;
- le résultat de l'essai de répétabilité ;
- le type de mesure ;
- les particularités.

Les analyses de ce Chapitre mettent en évidence que :

- la Pierre de Lens présente des incertitudes plus élevées sur les mesures destructives que le calcaire de Chamesson ;
- la présence de vides autour des oolithes pour la Pierre de Lens se traduit par la présence d'un 2^{ème} pic au niveau des courbes porosimétriques traduisant la présence d'une gamme de pores de rayon plus élevé par rapport au calcaire de Chamesson.

Les essais de faisabilité du Chapitre 4 vont permettre de déterminer dans quelle mesure les méthodes choisies dans ce Chapitre permettent de quantifier ou qualifier l'endommagement.

Les résultats de répétabilité serviront à interpréter les résultats du Chapitre 5.

Bibliographie

Allison R. J. « A non-destructive method of determining rock strength ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 1988. Vol. 13.

Bourbié T., Coussy O., Zinszner B. *Acoustique des milieux poreux*. Paris : Technip, 1986. 339 p.

Bousquie P. *Texture et porosité de roches calcaires*. Thèse. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1979. 191 p.

Christaras B., Auger F., Mosse E. « Determination of the moduli of elasticity of rocks, comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods ». *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27, p. 222-228.

Couvreur J. E., Vervoort A., King M. S., Lousberg E., Thimus J. E. « Successive cracking steps of a limestone highlighted by ultrasonic wave propagation ». *GEOPHYSICAL PROSPECTING*. janvier 2001. Vol. 49, n°1, p. 71-78.

Ghabezloo S., Sulem J., Saint-Marc J. « Evaluation of a permeability-porosity relationship in a low-permeability creeping material using a single transient test ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009. Vol. 46, n°4, p. 761-768.

Guéguen Y., Palciauskas V. *Introduction à la physique des roches*. Hermann, 1992. 299 p.

Hamdi E., Du Mouza J. « A methodology for rock mass characterisation and classification to improve blast results ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. février 2005. Vol. 42, n°2, p. 177-194.

Homand F., Duffaut P. *Manuel de mécanique des roches*. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. Paris : Comité Français de Mécanique des Roches, 2000. 265 p.(Tome 1 Fondements). ISBN : 2-911762-23-1.

Iskandar A. *Caractérisation de l'espace poreux de roches sédimentaires par l'étude d'équilibres capillaires*. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990. 240 p.

Klimis N., Durville J.-L., Ehrlich J. « Influence de la taille des grains et de l'altération des roches sur les mesures de l'atténuation des ondes ultrasonores ». *Revue Française de Géotechnique*. 1989. Vol. 47, p. 29-38.

Mari J.-L., Glangeaud F., Coppens F. *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*. TECHNIP. 2001. ISBN : 2710807866,9782710807865.

Moreau M. R. *Essais et moyens d'essais au laboratoire et dans l'industrie*. Technique et documentation Lavoisier. 1982. 730 p.

NF B10-504. *Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau*. août 1973.

NF EN 14579. *Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la vitesse de propagation du son*. 2005.

NF EN 1936. *Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale*. mai 2007.

NF ISO 5725-1. *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure Partie 1: Principes généraux et définitions*. 1994.

NF P 94-420. *Roches - Détermination de la résistance en compression uniaxiale*. 2000.

Perrier R. « La résonance longitudinale des roches ». In : *Mines et Carrières*. 1996. p. 67-73.

Remy J.-M., Bellanger M., Homand-Etienne F. « Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles ». *Geophysics*. février 1994. Vol. 59, n°2, p. 245-251.

Robert R. *Analytical characterization of porous geomaterials. Reference assessment in some sedimentary rocks*. PhD Thesis. Berlin : Hulboldt-Universität, 2004. 249 p.

Saad A., Bost M. « The resonant frequency measurement and cracking evolution in rocks ». In: *Proceedings of EUROCK2009. European Rock Mechanics Symposium*. Dubrovnik (Croatia): CRC Press/Balkema, 2009. p. 345-350. ISBN : 978-0-415-80481-3.

Saad A., Guédon S., Martineau F. « Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters ». *Comptes Rendus Geoscience*. mars 2010. Vol. 342, n°3, p. 197-203.

Smith S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Hard Cover. 1997. ISBN : 0-9660176-3-3.

Tourenq C., Fourmaintraux D., Denis A. « Propagation des ondes et discontinuités des roches ». In : *Proceedings Symposium ISRM. Rock fracture*. Nancy, France : ISRM, 1971. p. I-1.

Washburn E. « Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material ». *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1921. Vol. 7, p. 115-116.

Yale D. P. *Network modelling of flow, storage and deformation in porous rocks*. Stanford University, 1984. 177 p.

4. Essais de faisabilité pour la mesure de l'endommagement et l'observation de l'altération en laboratoire

INTRODUCTION

Pour connaître la façon dont les méthodes décrites au Chapitre 3 permettent de quantifier l'endommagement ou de qualifier l'altération générés par gélivation d'une part et par dissolution d'autre part, des essais de faisabilité ont été réalisés. Dans ces essais, nous utilisons les méthodes mécaniques pour attester de l'endommagement effectif, et nous regardons comment évoluent les mesures physiques sur les calcaires de l'étude pour comprendre le mécanisme d'endommagement. L'endommagement généré par la succession de gélivation et de dissolution a été également regardé pour voir si les effets des deux phénomènes d'altération regardés indépendamment se cumulent ou non.

Cette étude permet, d'une part, de vérifier la sensibilité des méthodes choisies au Chapitre 3 pour caractériser le processus d'altération que nous souhaitons reproduire en laboratoire et d'autre part, d'évaluer la sensibilité à la gélivation et la sensibilité à la dissolution des calcaires étudiés.

4. ESSAIS DE FAISABILITE POUR LA MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT ET L'OBSERVATION DE L'ALTERATION EN LABORATOIRE	99
4.1. Endommagement et altération en fonction de chacun des phénomènes d'altération étudiés	101
4.1.1. Evaluation de la sensibilité des mesures et des calcaires à la gélivation	101
4.1.1.1. Procédure	101
4.1.1.2. Résultats et analyse	101
4.1.1.3. Remarque : classification de la sensibilité à la gélivation des calcaires en fonction de leurs tailles de pores	102
4.1.1.4. Conclusion	107
4.1.2. Evaluation de la sensibilité des mesures et des calcaires à la dissolution	108
4.1.2.1. Procédure	108
4.1.2.2. Résultats et analyse	109
4.1.2.3. Conclusion	113
4.2. Endommagement par étapes successives	114
4.2.1. Procédure	114
4.2.2. Résultats et analyse	114
4.2.3. Conclusion	116
4.3. Conclusion	116

4.1. Endommagement et altération en fonction de chacun des phénomènes d'altération étudiés

4.1.1. Evaluation de la sensibilité des mesures et des calcaires à la gélivation

(Saad et al., 2010a; Saad et al., 2010b)

4.1.1.1. Procédure

Les cycles de gel-dégel ont été définis pour être proches des conditions *in situ*. Ils sont basés sur la procédure définie par Bost (2008). Chaque cycle de gel-dégel consiste en une phase de gel dans l'air à -5°C pendant 6 heures suivie d'une phase de dégel dans l'eau à 20°C pendant 6 heures, programmé dans une enceinte climatique. La température de chaque cycle est contrôlée à l'aide de thermocouples de type T (précision : 0,5°C).

Des travaux antérieurs ont montré que les effets des cycles de gel-dégel sont accentués par un degré de saturation en eau important (Hirschwald, 1912; Tourenq, 1970). Ainsi, nous avons choisi d'effectuer, ici, les cycles de gel-dégel sur des échantillons saturés sous vide pour s'assurer une observation effective des effets de l'altération en amplifiant les effets de la gélivation. Une éprouvette de chaque calcaire de référence a subi 8 cycles de gel-dégel successifs.

4.1.1.2. Résultats et analyse

Les résultats des mesures de fréquence de résonance, porosité à l'eau et perméabilité sont reportés dans le Tableau 4-1 en valeurs relatives. Les variations associées à ces mesures sont toutes significatives (au-dessus de l'incertitude liée aux essais de répétabilité du Chapitre 3).

D'un point de vue mécanique, au bout de 8 cycles de gel-dégel sur des éprouvettes saturées sous vide, les échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens voient leur fréquence de résonance baisser, **l'endommagement mécanique des échantillons est donc mis en évidence**.

L'éprouvette pour laquelle la fréquence de résonance a la plus baissée (calcaire de Chamesson) correspond à l'éprouvette pour laquelle la perméabilité a la plus augmentée. Or l'endommagement mécanique peut se traduire par :

- de la fissuration ;
- une déstructuration du squelette rocheux.

Or la faible variation de porosité pour le calcaire de Chamesson confirme la première hypothèse : l'augmentation de la perméabilité est liée à une augmentation de la **fissuration**.

De la même façon, l'augmentation beaucoup plus atténuée de la perméabilité de la Pierre de Lens, associée à une baisse plus atténuée de la fréquence de résonance et à une légère augmentation de la porosité serait plutôt le résultat d'une **déstructuration du squelette rocheux ou une fissuration moins importante**.

	Fréquence de résonance (0%)	Porosité à l'eau (0%)	Perméabilité (1%)
Calcaire de Chamesson	-28%	+1%	+98%
Pierre de Lens	-17%	+1%	+13%

Tableau 4-1 Evolution des valeurs associées aux mesures physiques et mécanique après 8 cycles de gel-dégel sur des échantillons saturés sous vide. Chaque valeur correspond à une éprouvette. La répétabilité calculée dans le Chapitre 3, est rappelée entre parenthèses pour chaque mesure.

Par ailleurs, regardons les courbes de distribution des pores en fonction du volume incrémental (Figure 4-1) pour la porosimétrie au mercure, les échantillons utilisés ont été carottés au cœur de chaque éprouvette pour avoir un volume homogène.

Pour le calcaire de Chamesson, le pic correspondant à la gamme de pores principale se décale très légèrement vers les pores les plus grands et la quantité de pores de la gamme principale augmente. Le calcaire de Chamesson présente des variations resserrées autour de sa gamme de pores principale.

Pour la Pierre de Lens, le pic principal après gélivation est associé à des rayons d'accès au pore nettement plus petits. Les variations importantes au niveau de la taille des pores traduisent la **forte déstructuration du squelette rocheux** de la Pierre de Lens.

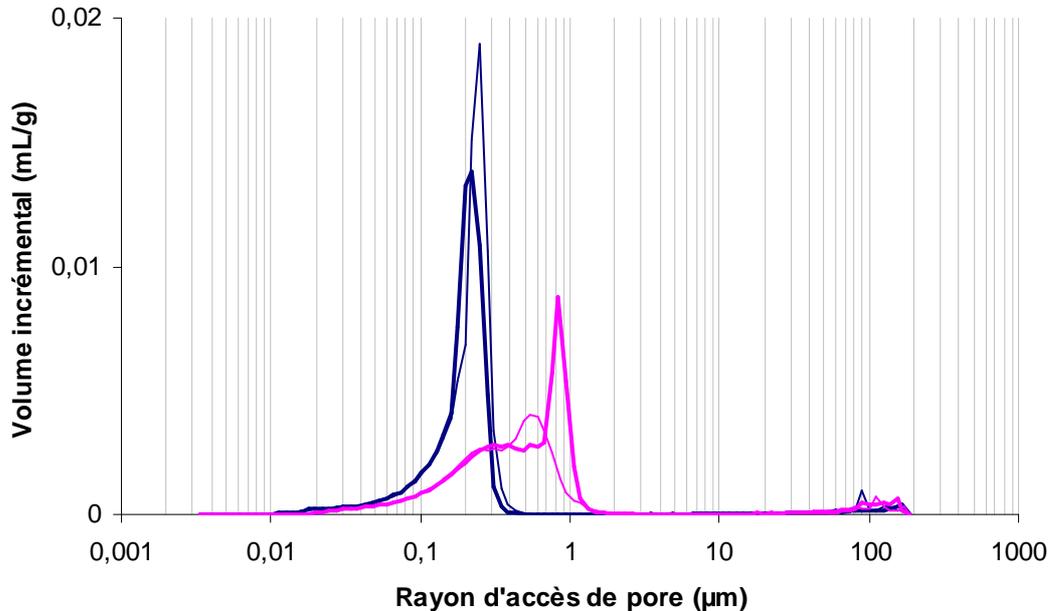


Figure 4-1 Courbes de distribution des rayons d'accès au pore en fonction du volume incrémental. En rose : Pierre de Lens; en bleu : Calcaire de Chamesson. Trait épais : état initial; trait fin : après 8 cycles de gel-dégel sur des échantillons saturés sous vide.

Au niveau des observations au microscope électronique à balayage, le calcaire de Chamesson présente (Figure 4-2) :

- l'apparition de vides autour des oolithes ;
- l'éclatement de la matrice.

Pour la Pierre de Lens (Figure 4-3), on observe :

- des vides autour des oolithes plus marqués ;
- une déstructuration de la matrice.

4.1.1.3. Remarque : classification de la sensibilité à la gélivation des calcaires en fonction de leurs tailles de pores

Nous venons d'observer des différences entre les comportements du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens vis-à-vis de la gélivation. Pourtant ces deux calcaires oolithiques ont des caractéristiques similaires au niveau de leur texture et de leur porosité (Chapitre 2, 2.2.1.3 et 2.2.2.3).

Pour déceler l'origine de cette différence de comportement, revenons sur deux points de théorie concernant le gel dans les milieux poreux et le lien entre la taille des pores et :

- la température de gel ;
- les pressions générées par le gel de l'eau et les propriétés de transport du milieu poreux.

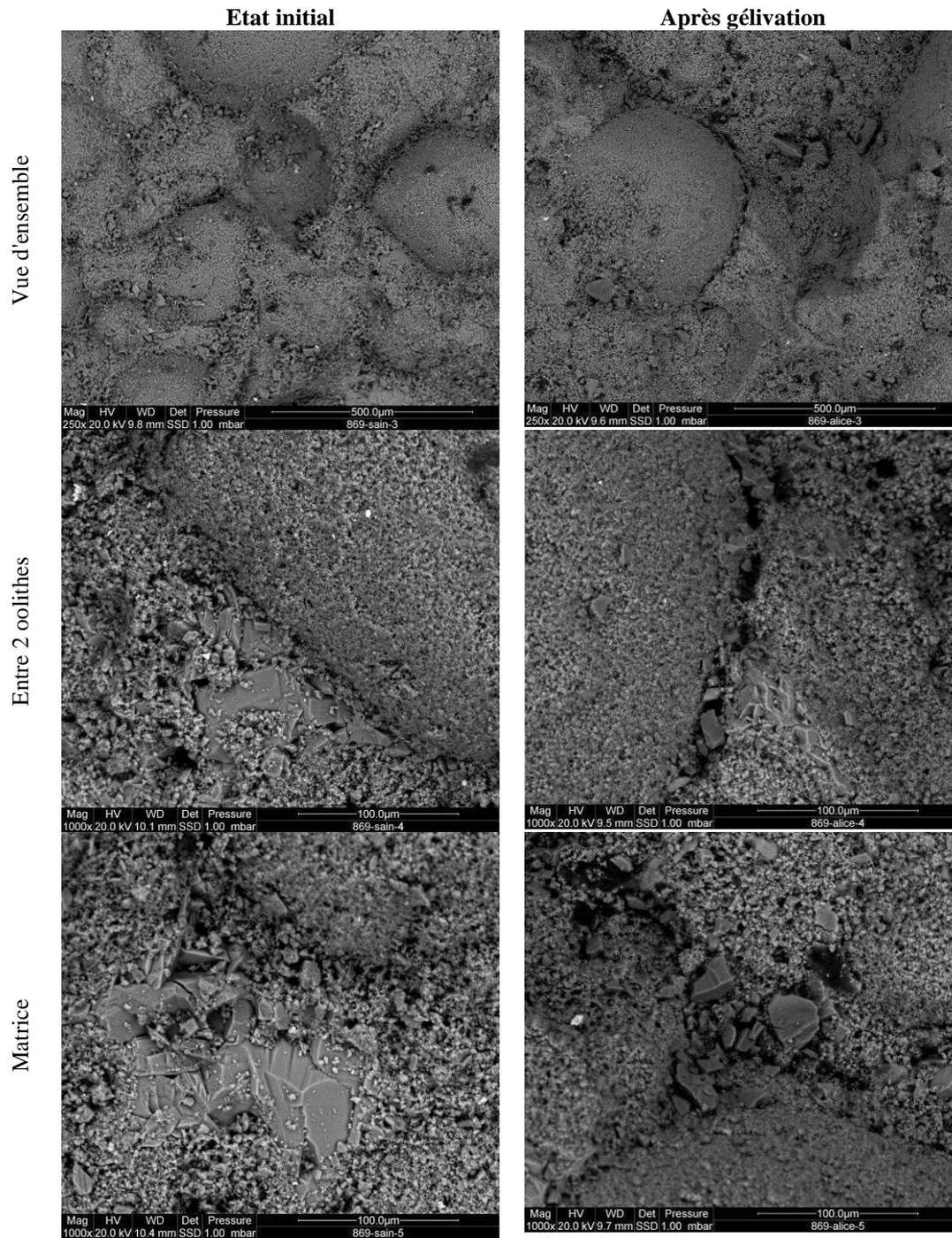


Figure 4-2 Observations réalisées au MEB des effets de la gélivation sur le calcaire de Chamesson. A gauche : calcaire sain ; à droite : calcaire après gélivation.

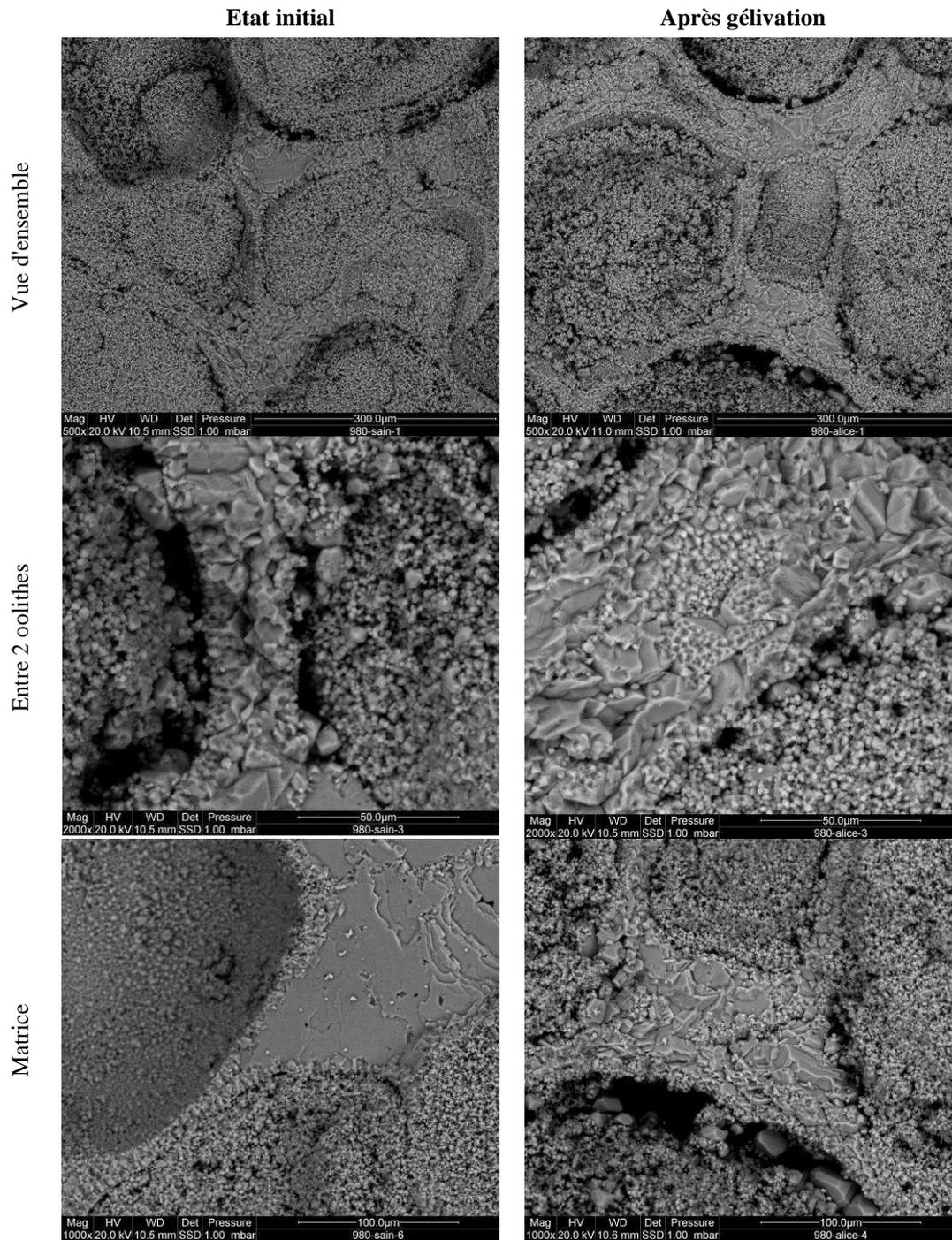


Figure 4-3 Observations réalisées au MEB des effets de la gélivation sur La Pierre de Lens. A gauche : calcaire sain ; à droite : calcaire après gélivation.

En ce qui concerne le lien entre la température de gel et la taille des pores, la littérature montre que **la température de gel de l'eau diminue lorsque l'eau est présente dans des pores plus petits**. Ce phénomène semble s'expliquer par plusieurs théories (Chahal et Miller, 1965; Everett, 1961; Blachere, 1979).

Au niveau des pressions générées par le gel de l'eau dans un milieu poreux, deux théories, en plus de l'augmentation volumique due au changement de l'eau en glace, sont le plus communément acceptées :

- la première prend en compte les pressions développées dans l'eau non gelée (il s'agit des pressions hydrauliques et osmotiques) par la formation de glace (Fagerlund, 1979; Powers, 1949) ;

- la deuxième favorise les pressions capillaires développées à l'interface eau-glace lors de la progression du front de glace (Aguirre-Puente et Bernard, 1978; Blachere, 1979; Everett, 1961).

Ces deux théories ont donc un lien avec les propriétés de transport du milieu poreux :

- pour les pressions hydrauliques et osmotiques, l'eau non gelée circule à cause des pressions générées par la formation de glace ;

- pour les pressions capillaires, c'est le front de glace qui se propage.

Donc, dans les deux cas, **l'évacuation des pressions générées par le gel dépend des propriétés de transport du milieu.**

Or, Katz et Thompson (1987;1986) ont établi une relation, basée sur la théorie de percolation, pour estimer les conductivités hydraulique et électrique en fonction de la taille des pores. Ces calculs ont été vérifiés par Remy (1993) et également dans le paragraphe 4.2.2. **La taille des pores influence donc la conductivité hydraulique et donc les propriétés de transport du milieu.**

En conséquence, il semble exister **un lien entre l'évacuation des pressions générées par le gel dans un milieu poreux et la taille de ses pores.**

La taille des pores du calcaire a donc une influence sur :

- la température de gel ;

- l'évacuation des pressions générées par le gel.

Regardons donc si la répartition de la taille des pores permettrait de différencier la sensibilité à la gélivation des calcaires oolithiques.

Calcaire oolithique	Porosité au mercure	Sensible à la gélivation (NF EN 12371, 2010)
Larrys perlé	6,2	Oui
Ampilly	10,3	Non
Massangis faciès jaune 2	11,1	Non
Vilhonneur faciès NG	11,8	Non
Massangis faciès jaune 1	13,3	Non
Massangis faciès clair	13,3	Oui
Pierre de Lens	16,3	Non
Chamesson	17,2	Oui
Anstrude	17,3	Oui

Tableau 4-2 Description des 9 calcaires oolithiques étudiés

Pour ce faire, nous avons choisi des calcaires oolithiques représentant une gamme de porosité large (de 6 à 17 %), sensibles et non sensibles à la gélivation, selon la norme NF EN 12371 (2010). Cette norme définit la sensibilité à la gélivation en fonction du nombre de cycles avant l'apparition de fissures ou avant une diminution de module d'élasticité dynamique supérieure à 30%. Nous avons réalisé des essais de porosimétrie au mercure (procédure décrite dans le Chapitre 3, 3.3.3) pour caractériser le réseau poreux de chacun de ces calcaires. Le Tableau 4-2 décrit les calcaires oolithiques choisis et donne leur sensibilité à la gélivation et leurs porosités obtenues par essai de porosimétrie au mercure. On peut déjà remarquer qu'il n'y a pas de lien entre la sensibilité à la gélivation et la porosité.

Concernant l'influence de la taille des pores sur la température de gel, nous avons essayé de connaître la taille des pores qui ne sont pas touchés par les effets de la gélivation étant trop petits. Pour cela, nous avons regardé l'évolution des courbes porosimétriques associées aux échantillons du calcaire de Chamesson ayant subis les cycles annuels d'altération accélérés (cf. Chapitre 5, 5.2.1). Les pores non touchés sont ceux qui ne présentent aucune variation au niveau de leur quantité. Pour comparer les courbes, prenons l'écart-type associé au volume

incrémental mesuré dans le Chapitre 3 (3.3.3) et comparons cet écart avec les écarts observés entre la courbe à l'état initial et la courbe obtenue pour chaque cycle annuel d'altération accéléré. Ces écarts sont reportés dans la Figure 4-4.

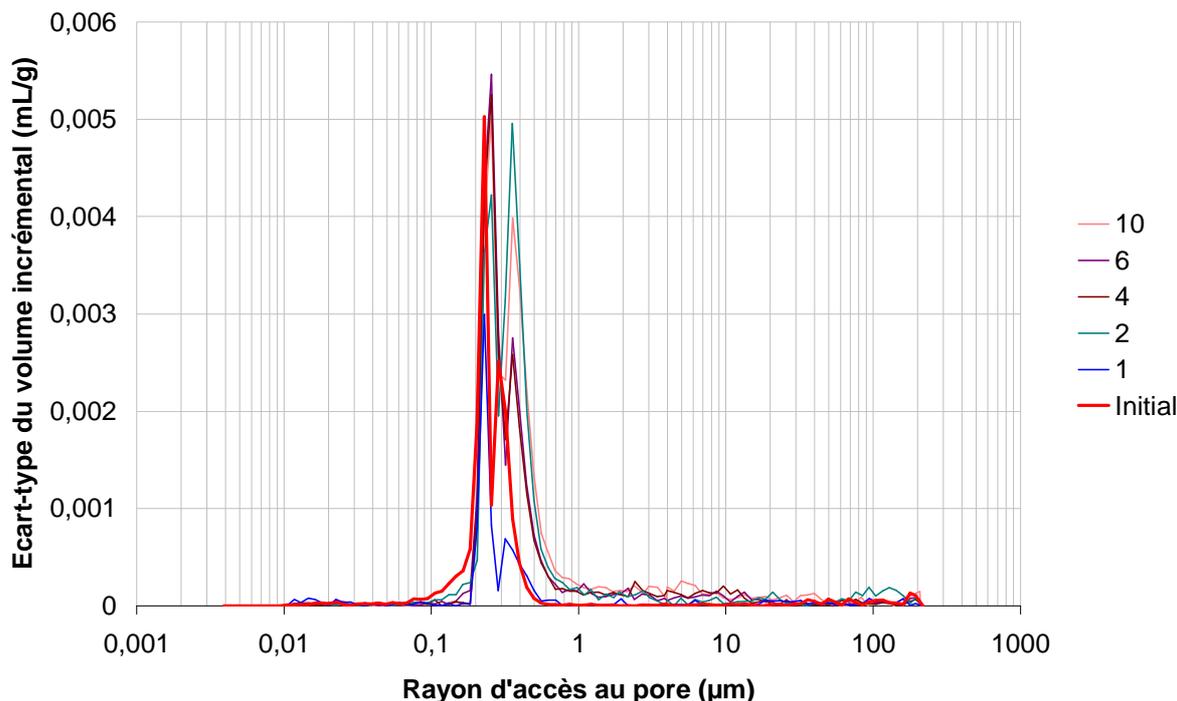


Figure 4-4 Evolution de l'écart-type associé au volume incrémental pour les cycles annuels d'altération accélérés 1, 2, 4, 6 et 10 pour le calcaire de Chamesson (Chapitre 5, 5.2.1).

On voit que les écarts à chaque cycle sont inférieurs à l'écart-type initial pour des pores de rayon inférieur à 0,23 µm (pic rouge sur la Figure 4-4). Cette observation signifie qu'il n'y a pas de variation significative des pores de rayon inférieure à 0,23 µm liée aux cycles annuels d'altération accélérés et donc aux cycles de gel-dégel. Donc il apparaît que la gélivation n'a pas d'effet sur les pores de rayon inférieur à 0,23 µm, dans les conditions de gel déterminées au Chapitre 2 (2.3.4), c'est-à-dire pour un gel de -5 °C pendant 6 heures. Ainsi, les calcaires oolithiques dont les pores ont un rayon inférieur à 0,23 µm ne sont pas sensibles à la gélivation, car ses effets de les atteignent pas. C'est le cas des calcaires d'Ampilly, de Massangis faciès jaune 2 et de Vilhonneur faciès NG. En effet, leurs rayons médians (le rayon

médian est défini par : $R_{50} = -\frac{2\sigma \cos \theta}{P_{50}}$ avec P_{50} la pression correspondant à l'injection de

50% du volume total de mercure) valent respectivement 0,12 µm, 0,13 µm et 0,22 µm (Tableau 4-3), c'est-à-dire que plus de la majorité de leurs pores ont un rayon d'accès inférieur à ces tailles.

Concernant l'influence de la taille des pores sur l'évacuation des pressions générées par le gel, regardons les rayons médians d'accès au pore des calcaires oolithiques du Tableau 4-3. Le rayon d'accès au pore médian correspond au rayon pour lequel 50% du volume total des vides est rempli de mercure (Robert, 2004). Ce tableau montre deux transitions :

- la première transition a été décrite précédemment et se situe pour un rayon médian de 0,23 µm ;

- la deuxième transition se situe entre 0,36 et 0,62 µm. En-dessous de 0,36 µm, les calcaires sont sensibles à la gélivation et au-dessus de 0,62 µm, les calcaires ne le sont plus.

Or, la conductivité hydraulique est liée au rayon d'accès au pore (Katz et Thompson, 1987; 1986). Donc, on peut conclure que les conductivités hydrauliques liées à des rayons d'accès

au pore supérieurs à $0,62 \mu\text{m}$, sont assez élevées pour dissiper les pressions générées par le gel et donc **les calcaires dont plus de la majorité des pores ont un rayon d'accès supérieur à $0,62 \mu\text{m}$, c'est-à-dire pour un rayon médian d'au moins $0,62 \mu\text{m}$, ne sont pas sensibles à la gélivation.**

Il y a néanmoins dans ce tableau un calcaire qui a un faible rayon médian ($0,06 \mu\text{m}$) et qui pourtant est sensible à la gélivation, alors que la majorité de ses pores ne sont pas touchés par les effets de la gélivation. Il s'agit du Larrys perlé. Regardons plus attentivement sa courbe de distribution de la taille des pores en fonction du volume incrémental (Figure 4-5).

Calcaire oolithique	Sensible à la gélivation (NF EN 12371, 2010)	Rayon médian d'accès au pore (μm)
Larrys perlé	Oui	0,06
Ampilly	Non	0,12
Massangis faciès jaune 2	Non	0,13
Vilhonneur faciès NG	Non	0,22
Chamesson	Oui	0,25
Massangis faciès clair	Oui	0,26
Anstrude	Oui	0,36
Pierre de Lens	Non	0,62
Massangis faciès jaune 1	Non	1,73

Tableau 4-3 Rayon médian d'accès au pore des calcaires oolithiques étudiés. Les calcaires en rouge correspondent aux calcaires sensibles à la gélivation.

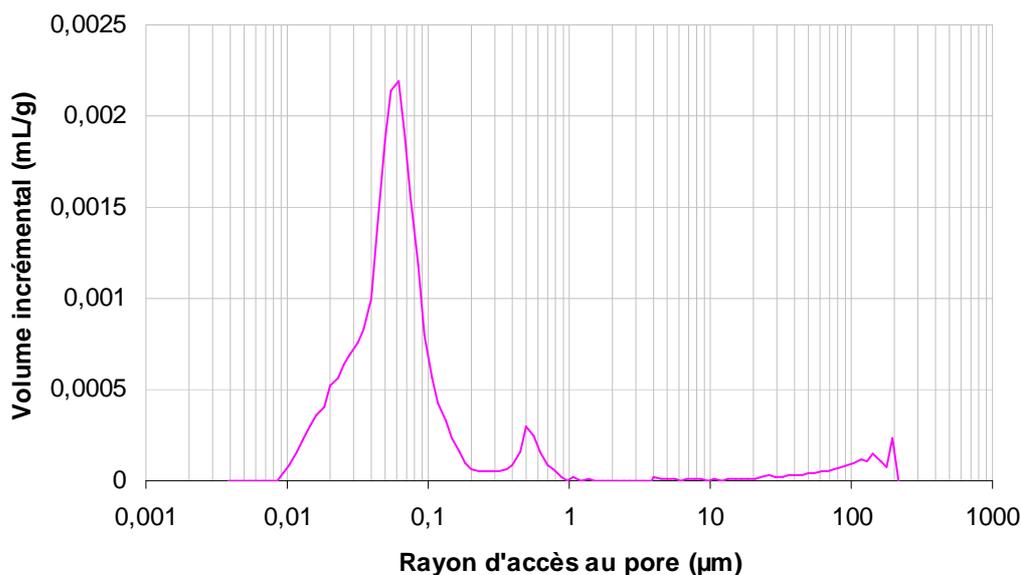


Figure 4-5 Représentation logarithmique des rayons d'accès au pore par rapport au volume incrémental pour le Larrys perlé

Bien que le Larrys perlé soit composé de pores de très petits rayons d'accès, on observe la présence, en faible quantité de pore de rayon d'accès à $0,50 \mu\text{m}$. Ces pores, contrairement aux plus petits, sont touchés par les effets de la gélivation. Or, le calcaire étant composé majoritairement de très petits pores, sa conductivité hydraulique est très faible, **donc il n'est pas capable de dissiper les pressions générées par le gel de l'eau dans les pores de rayon d'accès $0,50 \mu\text{m}$.** Ceci explique le fait que ce calcaire soit sensible à la gélivation.

4.1.1.4. Conclusion

La mesure de la fréquence de résonance et les mesures physiques (porosité, perméabilité), présentent des variations significatives suite à l'altération par gélivation. De même, des différences sont visibles sur les courbes porosimétriques et les observations au MEB.

Ces mesures et observations mettent en évidence deux types de modifications du réseau poreux suite à un endommagement par gélivation :

- la fissuration, plus présente pour le calcaire de Chamesson ;
- la déstructuration du squelette rocheux, plus visible pour la Pierre de Lens.

L'analyse de la distribution de la taille des pores des calcaires oolithiques permet de comprendre et de justifier leur sensibilité à la gélivation :

- les calcaires qui ne sont composés que de très petits pores ne sont pas touchés par les effets de la gélivation ;
- les calcaires qui ont une majorité de grands pores ont une conductivité hydraulique suffisamment élevée pour dissiper les pressions générées par le gel de l'eau dans les pores et sont donc non sensibles à la gélivation.

4.1.2. Evaluation de la sensibilité des mesures et des calcaires à la dissolution

(Saad et al., 2010b)

4.1.2.1. Procédure

Le but de cette expérimentation est de faire percoler une eau acide d'une extrémité à l'autre de l'éprouvette sans passer par les parois latérales de l'échantillon afin de reproduire le phénomène de percolation de l'eau dans un massif rocheux.

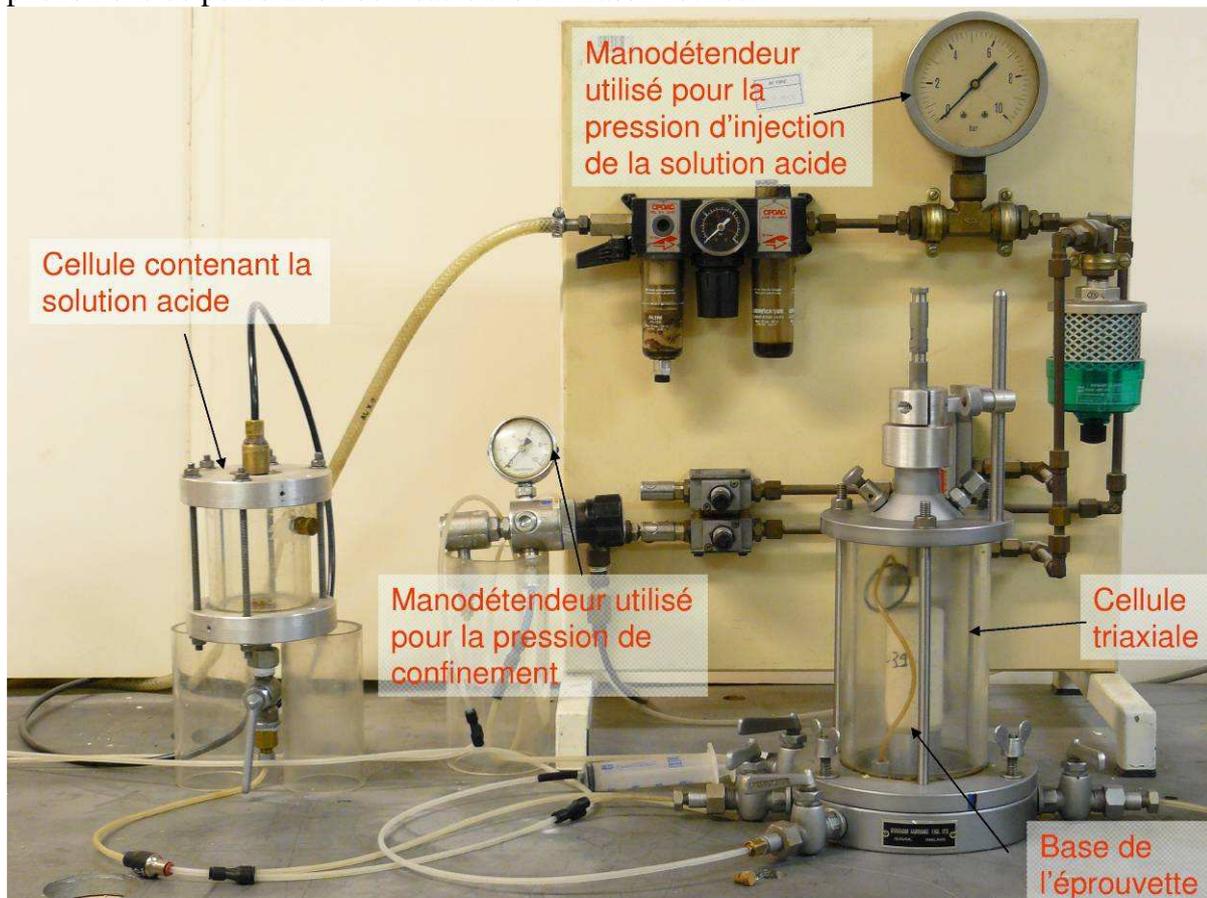


Figure 4-6 Montage utilisé pour réaliser l'essai de dissolution en cellule triaxiale

La méthode consiste en une injection forcée de solution acide par la base de l'éprouvette. L'échantillon, entouré d'une membrane, est placé dans une cellule triaxiale. La pression de confinement est assurée par de l'air comprimé sous une pression de 5 bars (fournie par le réseau du laboratoire) De même, pour la pression d'injection de la solution acide, l'air

comprimé du laboratoire permet une surpression de 4 bars dans le réservoir contenant la solution acide (une pellicule d'huile en surface de la solution acide permet d'éviter toute interaction entre l'air comprimé et la solution acide). La pression d'injection est inférieure à la pression de confinement pour assurer une bonne étanchéité du montage. En sortie, le montage est à pression atmosphérique. Enfin, le contrôle des pressions de confinement et d'injection se fait à l'aide de manodétendeurs (Figure 4-6).

Pour accélérer la dissolution et nous mettre dans les conditions des cycles d'altération définis dans le Chapitre 2 (2.3.4), nous avons choisi de prendre une solution à pH 3 et dans une salle climatisée à 20°C.

La perméabilité du calcaire de Chamesson vaut 0,22 fois celle de la Pierre de Lens (cf. 2.2.1.3 et 2.2.2.3). Pour garder ce rapport, nous avons adapté les temps d'essai pour chacun des calcaires. L'éprouvette de la Pierre de Lens a donc 84 heures de dissolution en cellule triaxiale et celle de Calcaire de Chamesson 287 heures (Tableau 4-4), soit un rapport de 0,29 proche de celui des perméabilités.

	Pression de confinement	Pression d'injection	Pression en sortie	Temps de percolation
Calcaire de Chamesson	5 bars	4 bars	P _{atm}	287 heures
Pierre de Lens	5 bars	4 bars	P _{atm}	84 heures

Tableau 4-4 Conditions de l'essai de dissolution en cellule triaxiale pour les deux calcaires de l'étude

4.1.2.2. Résultats et analyse

Les résultats des mesures de fréquence de résonance, porosité à l'eau et perméabilité sont reportés dans le Tableau 4-5. Les variations associées à ces mesures sont toutes significatives (au-dessus de l'incertitude liée à l'essai de répétabilité).

	Fréquence de résonance (0%)	Porosité à l'eau (0%)	Perméabilité (1%)
Calcaire de Chamesson	-0,4%	+1%	-43%
Pierre de Lens	-2%	+1%	-4%

Tableau 4-5 Evolution des valeurs associées aux mesures physiques et mécanique après dissolution sur des échantillons initialement secs. Chaque valeur correspond à une éprouvette. La répétabilité calculée dans le Chapitre 3, est rappelée entre parenthèses pour chaque mesure.

La fréquence de résonance et la perméabilité des échantillons baissent pour les deux calcaires et la porosité augmente. Ces mesures montrent une absence de corrélation entre perméabilité et porosité concernant les effets de la dissolution.

Deux différences apparaissent néanmoins entre les deux calcaires :

- d'un point de vue mécanique, la diminution de la fréquence de résonance est plus importante pour la Pierre de Lens ;
- au niveau des mesures physiques, la perméabilité diminue plus particulièrement pour le calcaire de Chamesson.

Or la Pierre de Lens a une plus grande perméabilité que le calcaire de Chamesson, donc :

- l'eau acide circule plus facilement dans l'ensemble de l'échantillon et l'endommagement y est plus prononcé ;
- la calcite dissoute est difficilement évacuée de l'échantillon et vient boucher les pores de l'échantillon en reprecipitant.

Les courbes de la distribution de la taille des pores en fonction du volume incrémental (Figure 4-7) montrent que :

- les effets de la dissolution **ne semblent pas toucher la gamme de pores principale** mais les pores de rayons plus petits ;
- les effets les plus visibles de la dissolution se situent au niveau des courbes de la Pierre de Lens.

Une différence apparaît entre les deux calcaires : pour la Pierre de Lens, la quantité de **pores de rayons plus petits que la gamme de pores principale** augmente et pour le calcaire de Chamesson, les pores de rayons d'accès plus petits que le celui de la gamme de pores principale s'élargissent.

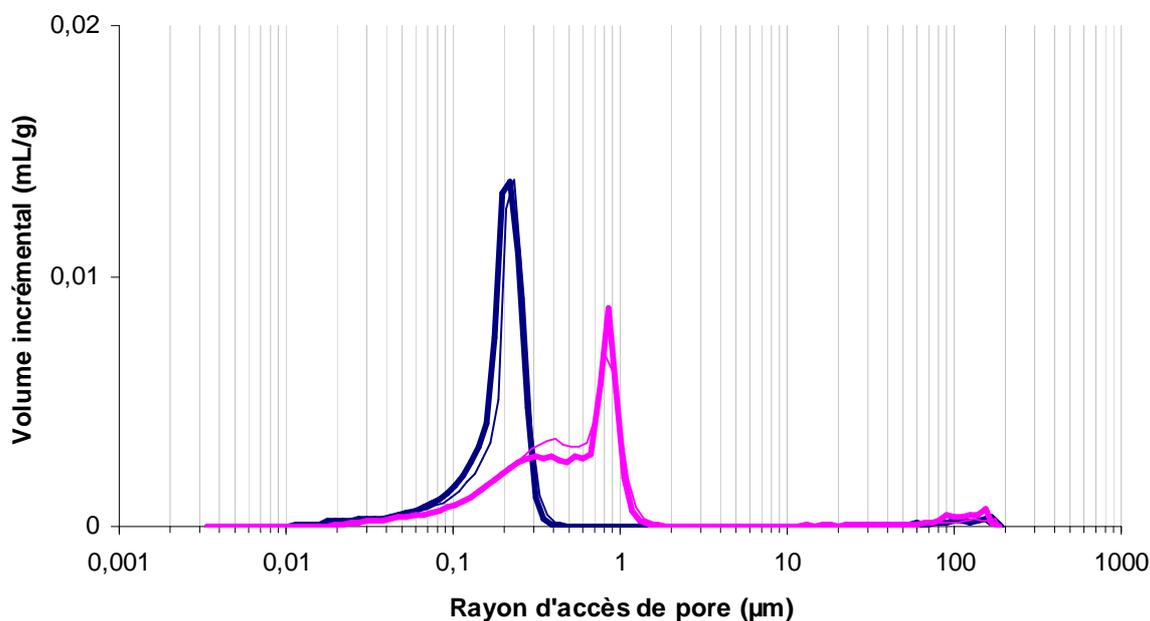


Figure 4-7 Courbes de distribution des rayons d'accès au pore en fonction du volume incrémental. En rose : Pierre de Lens; en bleu : Calcaire de Chamesson. Trait épais : état initial; trait fin : après dissolution sur des échantillons initialement secs.

Concernant les observations au microscope électronique à balayage, on voit pour le calcaire de Chamesson (Figure 4-8) :

- l'apparition de vides localisés dans la matrice créés par la dissolution ;
- aucun changement au niveau des oolithes.

Pour la Pierre de Lens (Figure 4-9), on observe :

- un aspect « rongé » des oolithes ;
- une matrice progressivement dégradée, mettant en évidence les macles de la calcite.

La Pierre de Lens apparaît comme plus sensible aux effets de la dissolution que le calcaire de Chamesson.

Or, ces deux calcaires ont des perméabilités qui diffèrent d'un ordre de grandeur. Les résultats précédents semblent donc lier les effets de la dissolution aux propriétés hydrauliques des calcaires. Nous avons donc voulu vérifier cette relation en effectuant des essais de dissolution sur des calcaires oolithiques de perméabilités différentes.

Pour caractériser les effets de la dissolution, nous avons mesuré l'indice de continuité. Cet indice permet de mettre en évidence les variations de la quantité de vides (Chapitre 3, 3.2.1.2).

Pour caractériser les propriétés hydrauliques des calcaires, nous avons choisi la mesure la plus évidente : la perméabilité à l'eau (Chapitre 3, 3.3.2).

Les essais de dissolution se sont déroulés en reprenant l'essai de dissolution en cellule triaxiale (Figure 4-6). La procédure est la même que celle détaillée dans le paragraphe 4.1.2.1. Les échantillons étudiés ont été choisis en fonction de leurs perméabilités. Ainsi, nous avons quatre calcaires oolithiques différents dont les perméabilités représentent chacune un ordre de grandeur différent. Le Tableau 4-6 donne l'origine et la perméabilité initiale de ces calcaires. Un échantillon par calcaire a été étudié. La durée de l'essai de dissolution en cellule triaxiale y est également reportée.

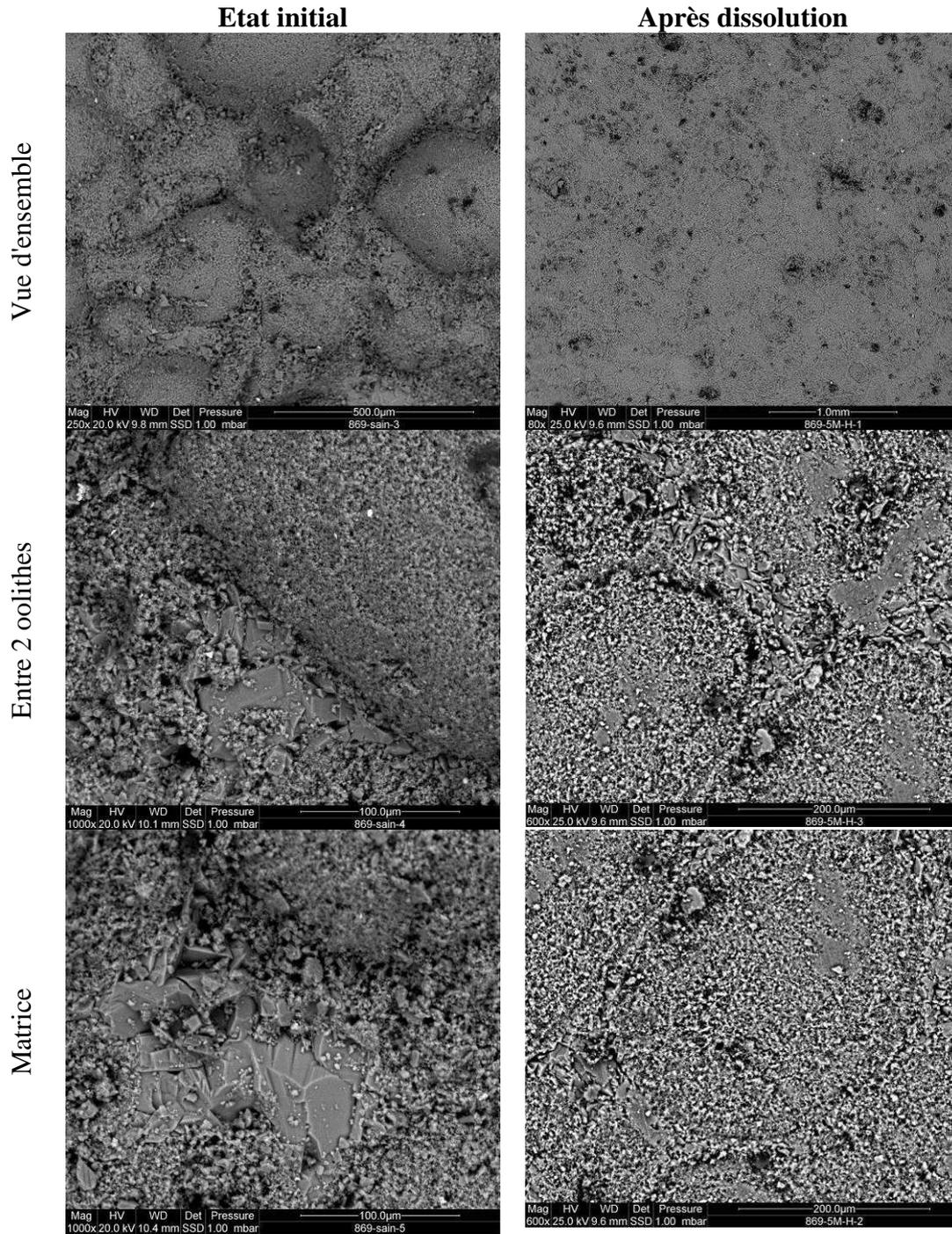


Figure 4-8 Observations réalisées au MEB des effets de la dissolution sur le calcaire de Chamesson. A gauche : calcaire sain ; à droite : calcaire après dissolution.

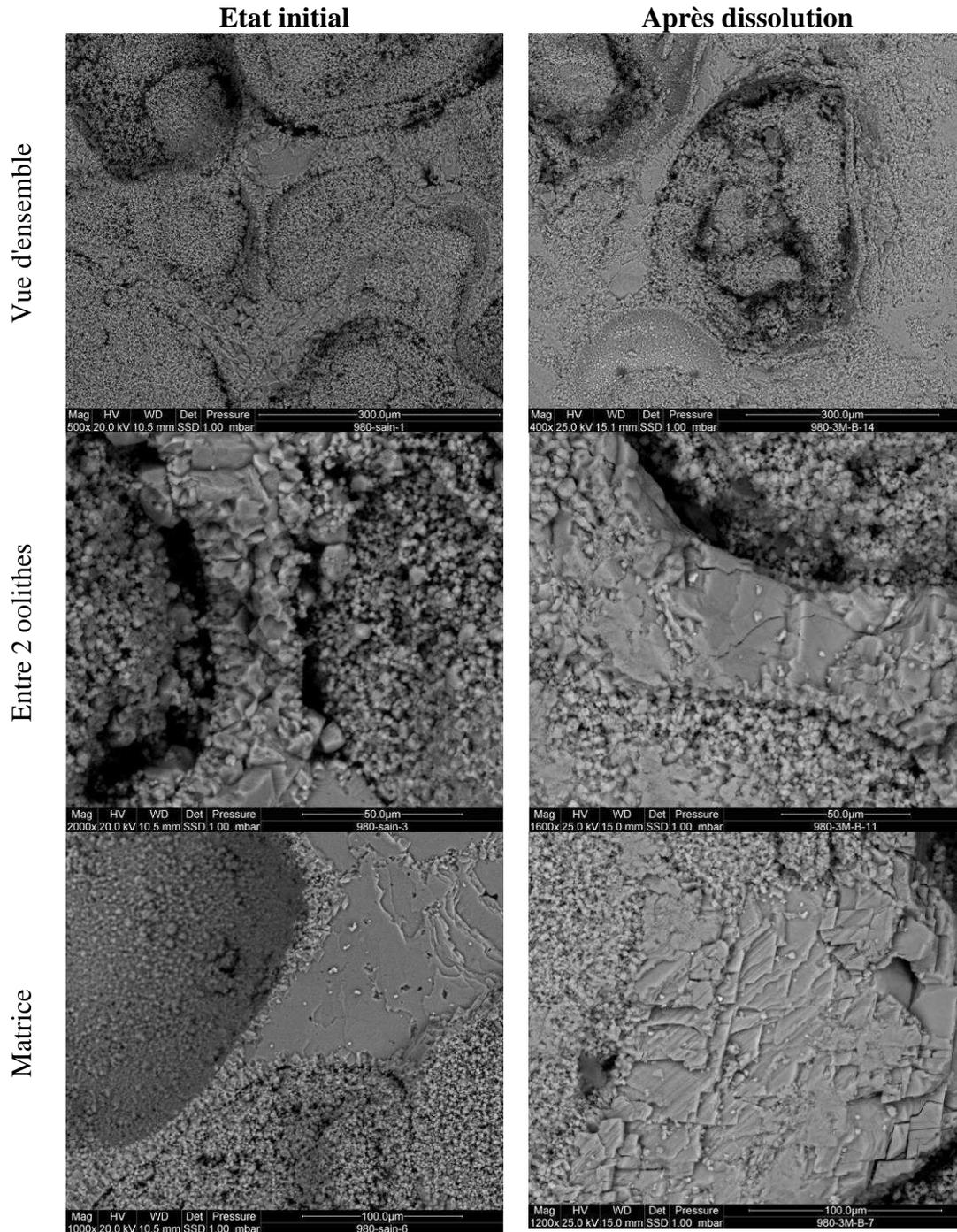


Figure 4-9 Observations réalisées au MEB des effets de la dissolution sur la Pierre de Lens. A gauche : calcaire sain ; à droite : calcaire après dissolution.

Origine du calcaire	Perméabilité initiale ($\mu\text{D} = 10^{-18} \text{ m}^2$)	Temps de l'essai de dissolution en cellule triaxiale (heures)
Massangis	0,3	360
Chamesson	6	287
Ampilly	10	360
Anstrude	200	55

Tableau 4-6 Caractéristiques des calcaires oolithiques soumis à l'essai de dissolution en cellule triaxiale

Après l'essai de dissolution en cellule triaxiale, les échantillons sont séchés à 60°C et la vitesse du son est mesurée. Nous mesurons ensuite les variations de l'indice de continuité %IC par le calcul suivant :

$$\%IC = \frac{IC_D}{IC_{initial}} - 1$$

Avec IC_D l'indice de continuité mesuré après l'essai de dissolution en cellule triaxiale sur l'échantillon.

Et $IC_{initial}$ l'indice de continuité initial mesuré sur le même échantillon.

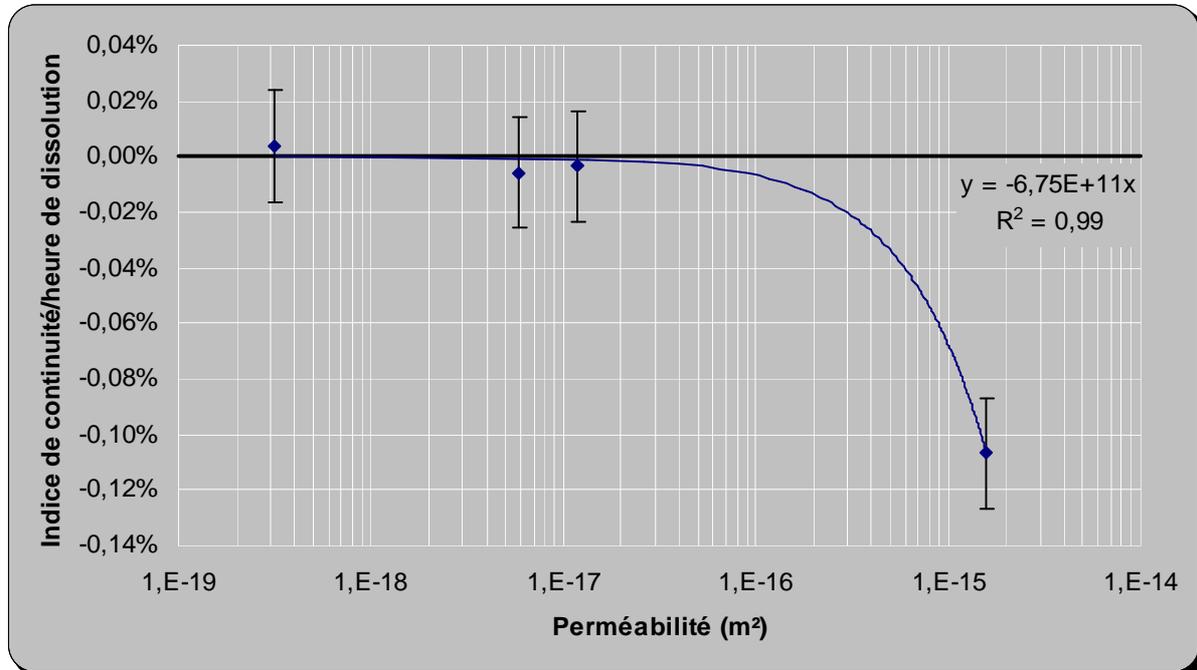


Figure 4-10 Variations de l'indice de continuité par heure de dissolution en fonction de la perméabilité initiale de différents échantillons de calcaires oolithiques

Comme les temps d'essai de dissolution en cellule triaxiale sont différents pour chaque échantillon (Tableau 4-6). Les valeurs de $\%IC$ sont pondérées par le nombre d'heures d'essai. Ce calcul donne l'évolution de l'indice de continuité relatif par heure d'essai. Les résultats sont reportés dans la Figure 4-10 en échelle logarithmique pour une meilleure lisibilité des résultats.

Les résultats montrent qu'il existe une relation entre les variations de l'indice de continuité et la valeur de la perméabilité initiale des calcaires oolithiques. Cette tendance montre que plus la perméabilité du calcaire est élevée, plus l'indice de continuité diminue. En d'autres termes, **plus l'eau circule facilement dans le réseau poreux, plus la quantité de vides créés par dissolution est élevée**. La relation linéaire mériterait d'être validée par des valeurs intermédiaires.

4.1.2.3. Conclusion

La mesure de la fréquence de résonance et les mesures physiques (porosité, perméabilité), présentent des variations significatives suite à l'altération par dissolution. De même, des différences sont visibles sur les courbes porosimétriques et les observations au MEB.

Au niveau mécanique, les effets de la dissolution sont plus prononcés pour la Pierre de Lens. Ce calcaire semble donc plus touché par la dissolution que le calcaire de Chamesson.

L'analyse des courbes porosimétriques montre que les pores les plus petits des deux calcaires sont ceux qui sont touchés par la dissolution :

- ils s'élargissent pour le calcaire de Chamesson ;
- ils voient leur quantité augmenter pour la Pierre de Lens.

Les observations microscopiques soulignent les effets sur la dissolution pour la Pierre de Lens sur la matrice sparitique et sur le contour des oolithes.

La perméabilité initiale des calcaires oolithiques est corrélée à l'apparition de vides au cours de la dissolution.

4.2. Endommagement par étapes successives

4.2.1. Procédure

Nous venons de qualifier et quantifier les effets de la gélivation d'une part et de la dissolution d'autre part. Il s'agit dans cette partie de voir si l'enchaînement de ces phénomènes d'altération conduit aux mêmes effets ou pas. Pour ce faire, nous choisissons de commencer par fissurer mécaniquement les échantillons par compression simple. Cette fissuration s'opère par compression à environ 65% de la résistance en compression des échantillons, dans le début de la zone de fissuration stable, d'après la courbe de contrainte-déformation (cf. Chapitre 6, 6.2.2.1). Ensuite ces étapes successives se composent, par ordre chronologique, de :

- 5 cycles avec gel à -5°C pendant 6h à l'air et dégel à +20°C pendant 6h dans l'eau, saturation par imbibition (S48) ;
- 5 jours de dissolution en cellule triaxiale avec une eau à pH 4, saturation nulle ;
- 5 cycles avec gel à -5°C pendant 6h à l'air et dégel à +20°C pendant 6h dans l'eau, saturation par imbibition (S48).

Ce cycle sera effectué sur 4 échantillons du calcaire de Chamesson et 4 de la Pierre de Lens. A chaque étape (fissuration, gel-dégel n°1, dissolution et gel-dégel n°2), un échantillon est sorti du cycle pour subir l'ensemble des mesures et observations décrites précédemment : fréquence de résonance, porosité, perméabilité, porosimétrie au mercure et observations au MEB.

4.2.2. Résultats et analyse

Les valeurs relatives de fréquence de résonance, porosité à l'eau et perméabilité sont données dans le Tableau 4-7. Les valeurs de perméabilité après dissolution et gel-dégel n°2 n'ont pas été obtenues à cause d'opérations de maintenance sur les générateurs de pression utilisés pour le montage de la perméabilité et les échantillons ont été carottés pour les essais de porosimétrie au mercure, il n'était donc plus possible de réaliser ces mesures. Ce manque de données est signifié dans le Tableau 4-7 par le terme "n.d", qui signifie non disponible.

	Fréquence de résonance (0%)		Porosité à l'eau (0%)		Perméabilité (1%)	
	Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens	Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens	Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens
Fissuration	-1%	-2%	-4%	-2%	2%	-7%
Gel-dégel n°1	-1%	0%	-5%	1%	-12%	-3%
Dissolution	0%	0%	-2%	4%	n.d.	n.d.
Gel-dégel n°2	-27%	-10%	-1%	-2%	n.d.	n.d.

Tableau 4-7 Evolution des valeurs associées aux mesures physiques et mécanique après chaque étape du cycle. Chaque valeur correspond à une éprouvette et est calculée en valeur relative d'une étape à l'autre. La répétabilité est rappelée entre parenthèses pour chaque mesure. Le terme "n.d." signifie "non disponible".

On note déjà que la fréquence de résonance diminue après fissuration pour les deux calcaires. Nous partons donc bien d'un état mécaniquement endommagé.

Concernant le gel-dégel n°1, après fissuration, les évolutions diffèrent de celles observées pour un endommagement par gélivation seule (4.1.1.2) :

- la fréquence de résonance ne diminue pas ou peu au lieu de diminuer beaucoup ;
- la porosité diminue pour le calcaire de Chamesson au lieu d'augmenter légèrement ;

- la perméabilité diminue au lieu d'augmenter.

La fissuration par compression semble avoir atténué les effets de la gélivation en opérant comme une consolidation (diminution de la porosité).

Par contre, comme pour l'endommagement par gélivation seule, le calcaire de Chamesson semble plus touché par les effets de la gélivation.

Concernant la dissolution, après fissuration et gel-dégel n°1, les résultats sont proches de ceux faits après un endommagement par dissolution seule (4.1.2.2) avec quelques nuances :

- la fréquence de résonance ne varie pas au lieu de diminuer légèrement ;
- la porosité augmente plus pour la Pierre de Lens ;
- la porosité diminue pour le calcaire de Chamesson au lieu d'augmenter légèrement.

On observe l'effet plus prononcé de la dissolution sur la Pierre de Lens au niveau de la porosité.

La fissuration et le gel-dégel n°1 semblent avoir atténué l'effet mécanique de la dissolution et accentué les différences de comportement des deux calcaires au niveau de la porosité.

Enfin, concernant le gel-dégel n°2, après fissuration, gel-dégel n°1 et dissolution, la fréquence diminue autant qu'après un endommagement par gélivation seul. Par contre, la porosité diminue pour les deux calcaires au lieu d'augmenter. **Les étapes précédant le gel-dégel n°2 semblent donc avoir modifié les effets de la gélivation au niveau de la porosité.**

Pour palier le manque de données sur la perméabilité, nous avons tenté d'utiliser une méthode de calcul permettant d'obtenir une valeur de perméabilité à partir des courbes de distribution de la taille des pores issues de l'essai de porosimétrie au mercure : le calcul de Katz & Thompson (1987) :

$$k = \frac{1}{89} \times r_{\max}^h \times r_{\max}^2 \times \frac{r_{\max}^h}{r_c} \times n \times S(r_{\max}^h)$$

avec

r_{\max}^h = rayon correspondant au maximum de $r^3 \times S(r)$,

$S(r)$ = fraction de volume correspond au rayon r , avec $r \geq r_{\max}$,

r_{\max} = rayon correspondant à la valeur maximale de $\frac{dV}{d \log r}$,

V = volume cumulatif mesuré lors de l'essai de porosimétrie au mercure,

r_c = rayon correspondant au maximum de $r \times S(r)$,

$S(r_{\max}^h)$ = fraction de volume correspondant aux pores de rayons supérieures à r_{\max}^h ,

n = porosité issue de l'essai de porosimétrie au mercure.

Pour valider cette utilisation, nous avons comparé des mesures de perméabilité à l'eau et des valeurs de perméabilité déterminées par ce calcul (Tableau 4-8).

	Perméabilité à l'eau k(eau) (10 ⁻¹⁶ m ²)	Perméabilité calculée k(calc) (10 ⁻¹⁶ m ²)	Rapport k(eau)/k(calc)
Pierre de Lens	2,5	2,3	1,11
Calcaire de Chamesson	0,31	0,23	1,31

Tableau 4-8 Comparaison des valeurs de perméabilité obtenues par mesure de la perméabilité à l'eau et par le calcul selon la méthode de Katz & Thompson (1986;1987)

Cette méthode de calcul a **tendance à sous-estimer** la valeur de la perméabilité : pour la Pierre de Lens, elle sous-estime de 11% et pour le calcaire de Chamesson de 31%.

De plus, ce calcul se fait à une échelle locale (échantillon centimétrique) alors que la mesure de perméabilité à l'eau se fait à l'échelle de l'échantillon cylindrique de 8 cm de hauteur. Ce point met en évidence la préoccupation liée à l'échelle de mesure : **une échelle centimétrique**

n'est pas adaptée pour étudier l'évolution de la perméabilité sur un échantillon de 8 cm de hauteur. Nous arrêterons donc l'analyse de la perméabilité suite à ces deux considérations.

Au niveau de la porosimétrie au mercure (Figure 4-11 et Figure 4-12), les changements sont plus limités pour le calcaire de Chamesson que pour la Pierre de Lens, comme pour les endommagements par gélivation seule ou par dissolution seule.

Concernant les observations par microscopie électronique à balayage (Figure 4-13 et Figure 4-14), la vue d'ensemble de la surface des échantillons met en valeur les effets suite à l'étape de dissolution :

- des vides localisés dans la matrice apparaissent sur la surface du calcaire de Chamesson ;
- les contours des oolithes de la Pierre de Lens se creusent.

Si l'on regarde de plus près ces **oolithes** :

- rien n'est identifiable pour le calcaire de Chamesson ;
- pour la Pierre de Lens, le contour de l'oolithe s'élargit au fur et à mesure des étapes du cycle.

Enfin, au niveau de la **matrice**, les observations sont moins contrastées. On constate néanmoins :

- l'éclatement de la matrice après les étapes de gel-dégel pour le calcaire de Chamesson ;
- la dégradation progressive de la matrice après l'étape de dissolution pour la Pierre de Lens.

Ces observations rejoignent celles faites pour les endommagements par gélivation seule ou par dissolution seule.

4.2.3. Conclusion

Les effets cumulés de la dissolution et de la gélivation confirment les résultats obtenus pour des effets regardés indépendamment, à savoir :

- les effets de la dissolution sont plus prononcés pour la Pierre de Lens ;
- les effets de la gélivation montrent que le calcaire de Chamesson se fissure plus et que le squelette rocheux de la Pierre de Lens se déstructure.

Les résultats des mesures des propriétés mécaniques et physiques suite aux étapes successives montrent des différences avec les mesures faites pour la gélivation et la dissolution seules. Ceci confirme l'intérêt d'une étude d'un processus d'altération globale, qui fait l'objet de ce travail.

4.3. Conclusion

Le Tableau 4-9 rassemble l'ensemble des observations faites suite aux résultats obtenus avec les différentes mesures pour un endommagement après gélivation, après dissolution et après étapes successives pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens.

Nous voyons que les méthodes choisies au Chapitre 3 permettent de mesurer l'endommagement et d'observer l'altération générée par la gélivation, la dissolution et les étapes successives.

Les essais de faisabilité ont permis de mettre en évidence les effets de la gélivation d'une part et les effets de la dissolution d'autre part sur les deux calcaires mais également de voir que les effets cumulés de ces deux phénomènes d'altération ne se manifestent pas de la même façon que lorsqu'ils sont regardés indépendamment. Cette observation majeure confirme l'intérêt d'une étude d'un processus d'altération globale, objet de cette étude.

Les analyses ont souligné le rôle majeur de la taille des pores dans l'altération par gélivation et celui de la perméabilité dans l'altération par dissolution.

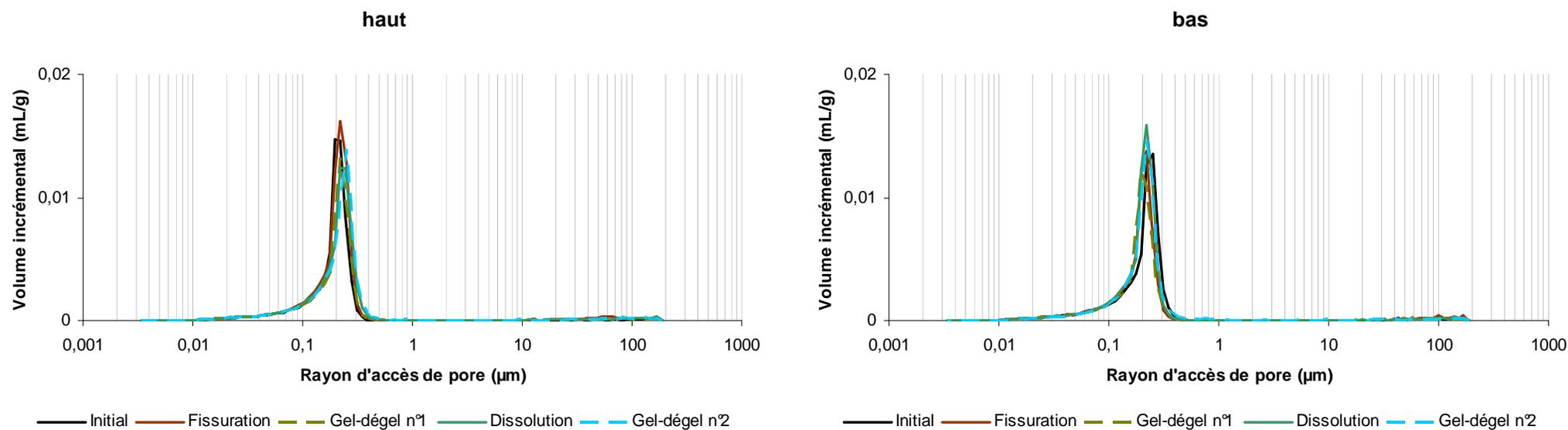


Figure 4-11 Courbes de distribution des rayons d'accès au pore en fonction du volume incrémental pour Calcaire de Chamesson aux différentes étapes du cycle. Echantillons prélevés au haut et en bas de l'éprouvette.

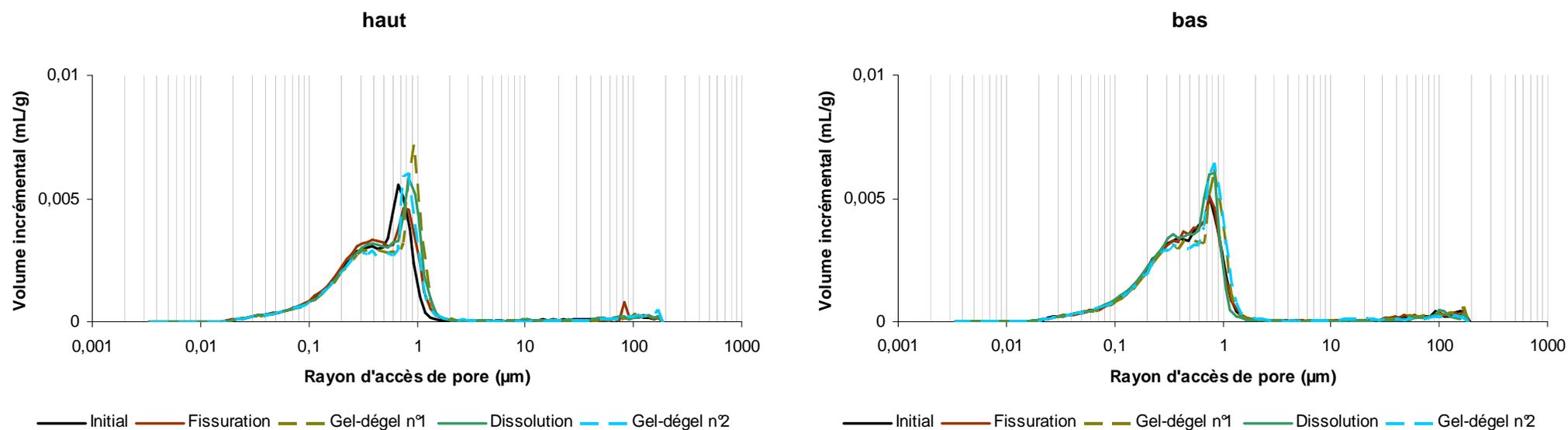


Figure 4-12 Courbes de distribution des rayons d'accès au pore en fonction du volume incrémental pour La Pierre de Lens aux différentes étapes du cycle. Echantillons prélevés au haut et en bas de l'éprouvette.

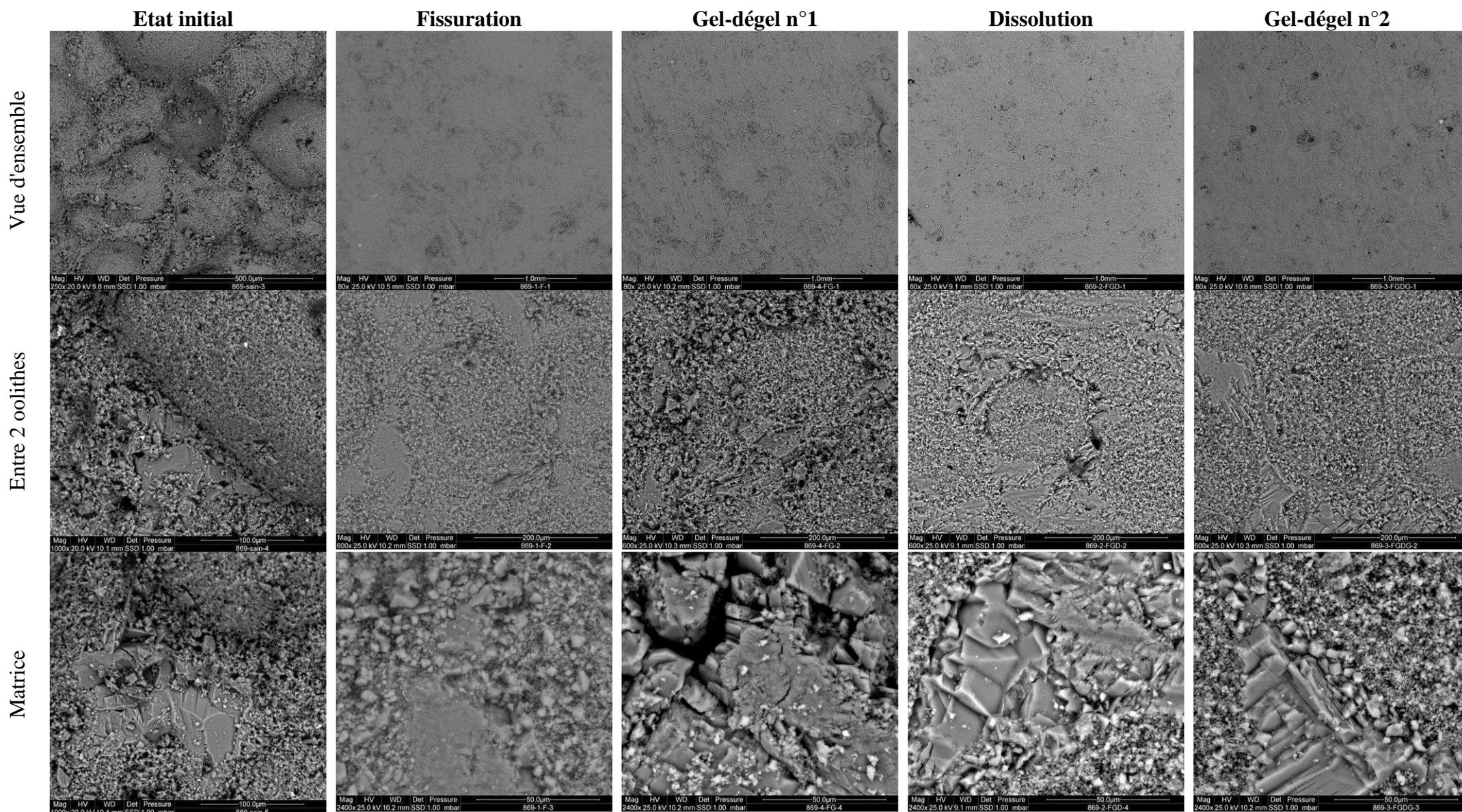


Figure 4-13 Observations réalisées au MEB des effets des différentes étapes du cycle sur le calcaire de Chamesson

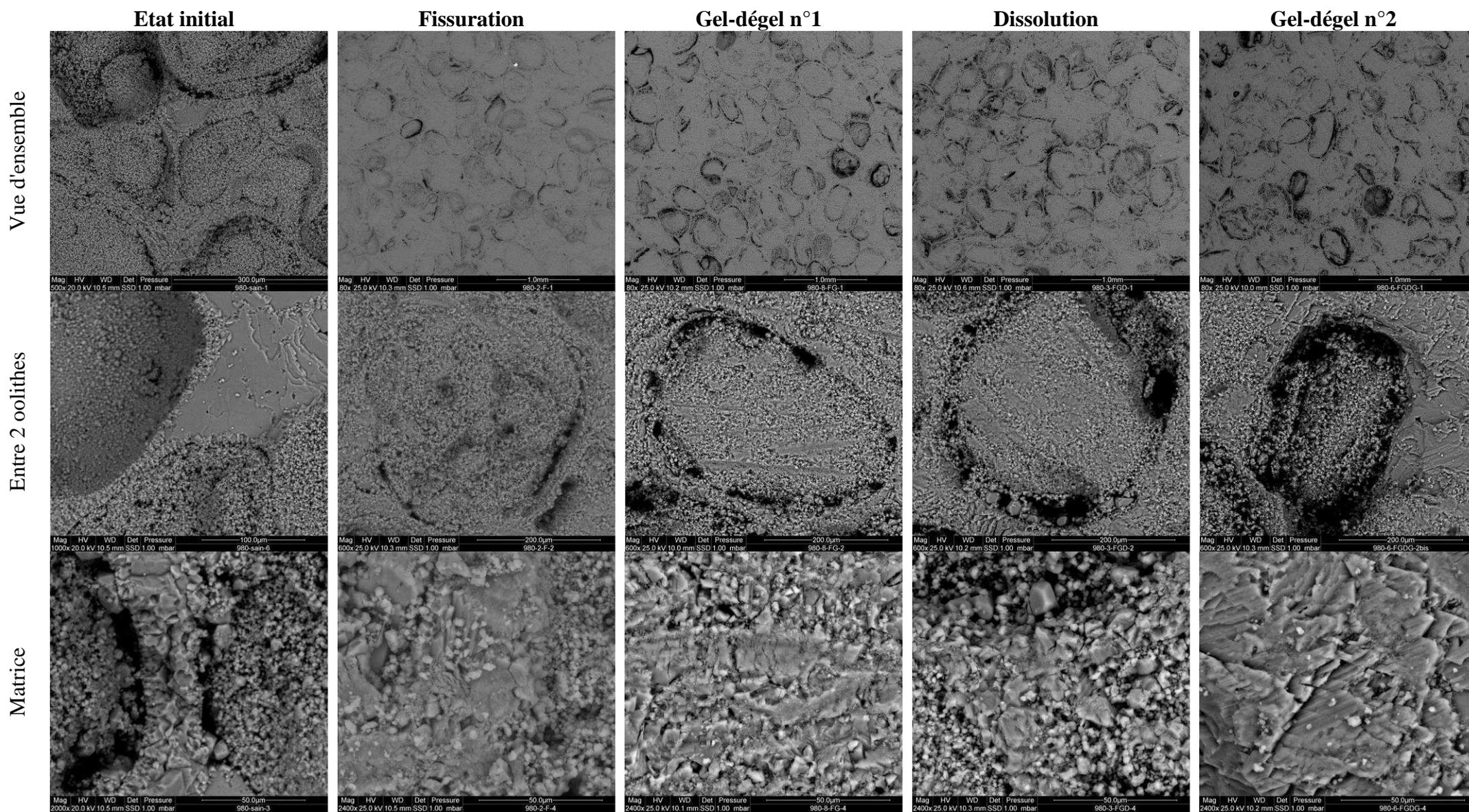


Figure 4-14 Observations réalisées au MEB des effets des différentes étapes du cycle sur la Pierre de Le

		Fréquence de résonance	Porosité	Perméabilité	Courbes porosimétriques	Images MEB	Observations générales
Gélivation	calcaire de Chamesson	Baisse conséquente plus importante que pour la Pierre de Lens	Augmentation très légère	Forte augmentation	Modification très limitée	- Porosité secondaire autour des oolithes - Eclatement de la matrice - Fissuration de la matrice	Augmentation de la fissuration
	Pierre de Lens	Baisse conséquente	Idem	Légère augmentation	Variations significatives	- Porosité secondaire autour des oolithes - Eclatement de la matrice - Réorganisation de la matrice	Réorganisation du réseau poreux
Dissolution	calcaire de Chamesson	Baisse légère	Augmentation très légère	Forte baisse	Diminution de la quantité de pores de rayons d'accès les plus petits	Peu observable, sauf des vides localisés dans la matrice	Circulation de l'eau plus difficile
	Pierre de Lens	Baisse légère plus importante que pour le calcaire de Chamesson	Idem	Très légère baisse	Augmentation de la quantité de pores de rayons d'accès les plus petits	- Oolithes rongées - Matrice dégradée	Déstructuration de la microstructure
Etapes successives	calcaire de Chamesson	- Baisse très légère à la fissuration et au gel-dégel n°1 - Baisse importante au gel-dégel n°2	Baisse à chaque étape	- Augmentation légère à la fissuration - Baisse au gel-dégel n°1	Modification limitée	- Vides localisés dans la matrice plus larges - Eclatement de la matrice	- Sensibilité à la gélivation confirmée - Altération différente de celle observée pour les phénomènes d'altération seuls
	Pierre de Lens	- Baisse très légère au gel-dégel n°1 - Baisse au gel-dégel n°2	- Baisse à la fissuration et au gel-dégel n°2 - Augmentation au gel-dégel n°1 et à la dissolution	Baisse légère à la fissuration et au gel-dégel n°1	Variations plus significatives	- Vides autour des oolithes s'élargissent - Matrice dégradée	- Sensibilité à la dissolution confirmée - Altération différente de celle observée pour les phénomènes d'altération seuls

Tableau 4-9 Résumé des observations faites par mesure pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens après altération par gélivation, dissolution et étapes successives

Enfin, cette première analyse a fait ressortir des comportements différents des deux calcaires vis-à-vis des phénomènes d'altération :

- au niveau macroscopique, le calcaire de Chamesson présente un endommagement mécanique plus prononcé que la Pierre de Lens après gélivation alors que la Pierre de Lens présente un endommagement mécanique plus prononcé que le calcaire de Chamesson après dissolution. Les propriétés hydrauliques de la Pierre de Lens le rendent peu sensible à la gélivation mais sensible à la dissolution. C'est l'inverse pour le calcaire de Chamesson ;
- au niveau microscopique, après gélivation, le calcaire de Chamesson présente de nombreuses fissures au niveau de la sparite et la Pierre de Lens présente une déstructuration de son squelette rocheux et après dissolution, le calcaire de Chamesson présente des vides localisés dans la matrice et la Pierre de Lens montre de nombreux vides entourant ses oolithes.

Nous développerons ces deux remarques avec les résultats des Chapitres 5 à 7.

Bibliographie

Aguirre-Puente J., Bernard J. J. « Comportement au gel des matériaux de construction ». In : *Le comportement thermique des matériaux dans la construction*. Paris : 1978. p. 29-72.

Blachere J. R. « Le gel de l'eau dans les matériaux poreux ». In : *6th Congr. Int. F.F.E.N.* Le Havre : Aguirre-Puente, 1979. p. 295-303.

Bost M. *Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 281 p.

Chahal R. S., Miller R. D. « Supercooling of water in glass capillaries ». *British Journal of Applied Physics*. 1965. Vol. 16, n°2, p. 231-239.

Everett D. H. « Thermodynamics of frost damage to porous solid ». *Trans. Faraday Soc.* 1961. Vol. 57, p. 1541-1551.

Fagerlund G. « Studies of the destruction mechanism at freezing of porous materials ». In : *Proceedings. 6th International Congress of The Fondation Francaise d'Etudes Nordiques*. Le Havre : 1979. p. 167-196.

Hirschwald J. *Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung*. Berlin : Borntraeger, 1912.

Katz A. J., Thompson A. H. « Prediction of Rock Electrical Conductivity From Mercury Injection Measurements ». *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92, n°B1, p. 599-607.

Katz A. J., Thompson A. H. « Quantitative prediction of permeability in porous rock ». *Physical Review*. 1986. Vol. 34, n°7, p. 8179-8181.

NF EN 12371. *Méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel des éléments en pierre naturelle*. 2010.

Powers T. C. « The air requirement of frost-resistant concrete ». *Proc. Highway Rese. Board*. 1949. Vol. 32, p. 184-211.

Remy J.-M. *Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace. Application à la durabilité au gel des roches calcaires de Lorraine*. Thèse. Nancy : Institut National Polytechnique de Lorraine, 1993. 355 p.

Robert R. *Analytical characterization of porous geomaterials. Reference assessment in some sedimentary rocks*. PhD Thesis. Berlin : Hulboldt-Universität, 2004. 249 p.

Saad A., Guedon S., Bost M., Mertz J.-D., Martineau F. « Comparaison en laboratoire de l'altération par gélivation et par dissolution d'une roche calcaire ». In : *Actes JNGG2010. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur*. Grenoble, France : Grenoble INP, 2010b. p. 891-898.

Saad A., Guédon S., Martineau F. « Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters ». *Comptes Rendus Geoscience*. mars 2010a. Vol. 342, n°3, p. 197-203.

Tourenq C. *La gélivité des roches*. Paris : LCPC, 1970.

5. Processus d'altération des calcaires de référence

INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but d'établir les processus d'altération des calcaires de référence. Pour ce faire, nous allons :

- présenter et analyser les résultats des mesures des propriétés mécaniques, physiques et des observations de l'altération du Chapitre 3 pour les deux calcaires de référence ayant subi les cycles annuels d'altération accélérés déterminés dans le Chapitre 2 (2.3.4) ;
 - en déduire un processus d'altération pour chacun des 2 calcaires ;
 - comparer ces observations avec des échantillons prélevés in situ (Chapitre 2, 2.2.1.4 et 2.2.2.4) et présentant une altération « naturelle ».
-

5. PROCESSUS D'ALTERATION DES CALCAIRES DE REFERENCE	123
5.1. Technique d'obtention des résultats	125
5.1.1. Mesures entre chaque cycle sur des « échantillons sacrifiés »	125
5.1.2. Procédure	125
5.1.2.1. Mesures	125
5.1.2.2. Calcul des évolutions	126
5.2. Processus d'altération du calcaire de Chamesson en Bourgogne	126
5.2.1. Endommagement par cycles annuels d'altération accélérés	126
5.2.1.1. Propriétés mécaniques	126
5.2.1.2. Propriétés physiques	131
5.2.1.3. Observations	133
5.2.1.4. Synthèse des phases du processus d'altération	139
5.2.2. Degrés d'altération des échantillons provenant de blocs prélevés sur site	140
5.2.2.1. Obtention des échantillons à partir des blocs prélevés sur site	140
5.2.2.2. Observations de l'altération	140
5.2.2.3. Synthèse des degrés d'altération	144
5.2.3. Conclusion	145
5.3. Processus d'altération de la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon	145
5.3.1. Endommagement par cycles annuels d'altération accélérés	145
5.3.1.1. Propriétés mécaniques	145
5.3.1.2. Propriétés physiques	151
5.3.1.3. Observations de l'altération	153
5.3.1.4. Synthèse des phases du processus d'altération	161
5.3.2. Comparaison avec des échantillons provenant de blocs prélevés sur site	161
5.3.2.1. Obtention des échantillons à partir des blocs prélevés sur site	161
5.3.2.2. Observations de l'altération	162
5.3.2.3. Synthèse des degrés d'altération	166
5.3.3. Conclusion	166
5.4. Conclusion	167

5.1. *Technique d'obtention des résultats*

5.1.1. Mesures entre chaque cycle sur des « échantillons sacrifiés »

L'ensemble des mesures adaptées pour le suivi de l'endommagement définies dans le Chapitre 3 nécessite d'extraire des échantillons du lot à chaque cycle annuel d'altération accéléré. En effet certaines mesures étant destructives, les échantillons sur lesquels sont effectuées les mesures ne peuvent poursuivre les cycles annuels d'altération accélérés : on les nommera par la suite les « échantillons sacrifiés ».

Le nombre et le choix des échantillons sacrifiés a été défini en fonction de trois critères :

- avoir un **nombre suffisant** d'échantillons pour connaître la dispersion des résultats ;
- considérer le **cas le plus défavorable**, c'est-à-dire pour lequel l'endommagement est le plus important ;
- **optimiser** le nombre d'échantillons mesurés en fonction du nombre limite d'échantillons que peut recevoir l'enceinte climatique, c'est-à-dire 40, pour faire le plus grand nombre de cycles annuels d'altération accélérés.

Ainsi, nous avons choisi d'extraire du lot d'échantillons :

- 4 échantillons (pour connaître la dispersion des résultats) ;
- ceux dont la fréquence de résonance a la plus diminué à chaque cycle (cas le plus défavorable) ;

Comme la durée d'un cycle est d'un mois pour le calcaire de Chamesson et de moins de 2 semaines pour la Pierre de Lens, nous avons donc choisi, pour avoir le plus grand nombre de cycles possibles, d'effectuer ce prélèvement de 4 échantillons à chaque cycle pour le calcaire de Chamesson et tous les 2 cycles pour la Pierre de Lens.

Enfin, lorsque nous sommes arrivés aux 8 dernières éprouvettes, nous avons décidé d'espacer encore plus les prélèvements pour les deux calcaires et ainsi prolonger l'altération.

5.1.2. Procédure

5.1.2.1. Mesures

Nous décrivons ici la procédure suivie pour effectuer les différentes mesures sur les échantillons.

Avant d'effectuer toute mesure des propriétés mécaniques et physiques sur les échantillons sacrifiés, les images « déroulées » de la paroi latérale des échantillons sont enregistrées au scanner : on évite ainsi toute modification structurale parasite due aux essais de caractérisation (notamment pour mesurer la perméabilité). Ensuite, les mesures sont toujours faites dans le même ordre pour éviter toute erreur d'interprétation. Nous commençons donc par effectuer l'ensemble des mesures non destructives. Les premières mesures non destructives réalisées sont celles obtenues sur des échantillons secs : dimensions des échantillons, masse (sec), fréquence de résonance et vitesse du son. Les échantillons sont ensuite saturés sous vide (selon la procédure de la norme NF EN 1936 (2007)) et les mesures suivantes sont réalisées : masse (saturé) et perméabilité. Enfin, nous passons aux mesures destructives. Sur les 4 échantillons sacrifiés, un servira pour mesurer la résistance mécanique à l'état sec, un autre servira pour la mesure de la résistance mécanique à l'état saturé, un autre sera carotté pour l'essai de porosimétrie au mercure et les chutes seront regardées au microscope électronique à balayage. La dernière des 4 éprouvettes est mise de côté, au cas où une des mesures destructives n'aurait pas bien fonctionné.

5.1.2.2. Calcul des évolutions

Toutes les évolutions sont calculées par rapport à la valeur initiale mesurée sur l'échantillon (sauf pour la perméabilité). Soient X la valeur mesurée dont on veut obtenir l'évolution, i le numéro de l'échantillon sacrifié au cycle n (i est un entier compris entre 1 et 4 inclus et n est un entier) et $\%X$ la valeur relative de X , ainsi :

$$\% X_{i,n} = \frac{X_{i,n}}{X_{i,0}} - 1$$

Avec $X_{i,0}$ la valeur mesurée à l'état initial pour l'échantillon i sacrifié au cycle n

La moyenne sur les 4 échantillons sacrifiés au cycle n vaut donc : $\sum_{i=1}^4 \frac{\% X_{i,n}}{4}$

La valeur minimale (ou maximale) des 4 échantillons sacrifiés au cycle n correspond à la valeur la plus petite (la plus grande respectivement) des $\% X_{i,n}$, i allant de 1 à 4.

La mesure de toutes les perméabilités initiales des échantillons aurait retardé le début des cycles annuels d'altération accélérés d'au moins un mois, nous avons donc regardé s'il était possible de l'estimer avec une bonne précision à partir de la mesure d'un autre paramètre : la porosité à l'eau, pour chaque roche. Ainsi, nous avons mesuré la perméabilité et la porosité de 20 éprouvettes de Pierre de Lens et de 20 éprouvettes de Chamesson. Les résultats de ces mesures ont permis d'aboutir à des relations, données dans le Tableau 5-1, avec une très bonne corrélation. Nous calculerons donc la perméabilité initiale de chacun des échantillons à partir de la mesure de leur porosité et en utilisant les relations établies ici.

	Gamme de porosité mesurée	Relation entre la perméabilité k et la porosité à l'eau n d'un échantillon	Corrélation de la relation
Calcaire de Chamesson	De 15,3 à 17,9 %	$k = 3 \times 10^{-19} \times e^{0,3438 \times n}$	0,95
Pierre de Lens	De 12,3 à 17,2 %	$k = 2 \times 10^{-18} \times e^{0,3525 \times n}$	0,97

Tableau 5-1 Relation empirique entre la perméabilité et la porosité de chaque calcaire obtenue par la mesure de la perméabilité et la porosité de 20 échantillons de chaque calcaire

5.2. Processus d'altération du calcaire de Chamesson en Bourgogne

5.2.1. Endommagement par cycles annuels d'altération accélérés

Le cycle annuel d'altération accéléré déterminé pour le calcaire de Chamesson est donné dans le Tableau 2-11. Il est constitué de 14 jours de dissolution et de 28 cycles de gel-dégel.

5.2.1.1. Propriétés mécaniques

Dans cette partie, nous présentons l'évolution des propriétés mécaniques des échantillons sacrifiés après chaque cycle annuel d'altération accéléré.

La Figure 5-1 présente l'évolution de la fréquence de résonance relative pour les 4 échantillons sacrifiés à chaque cycle en valeurs moyenne, minimale et maximale.

Avant toute analyse, il est important de préciser que les valeurs obtenues, malgré une importante évolution au cours des cycles, présentent une faible dispersion. Par ailleurs, l'étude de la fréquence de résonance au Chapitre 3 (3.2.2.2) permet de conclure que cette mesure est très sensible à toute modification microstructurale. Donc la faible dispersion des valeurs au cours de cycles traduit un comportement homogène entre les différentes éprouvettes du calcaire de Chamesson.

Concernant l'analyse de l'évolution de la fréquence de résonance, on voit déjà qu'elle se décompose en **deux phases** :

- phase 1 : jusqu'au cycle 3, il y a une **franche diminution** de la fréquence de résonance ;
- phase 2 : à partir du cycle 4, la fréquence de résonance **diminue très légèrement** voire se stabilise aux alentours de 80% de diminution par rapport à la valeur initiale.

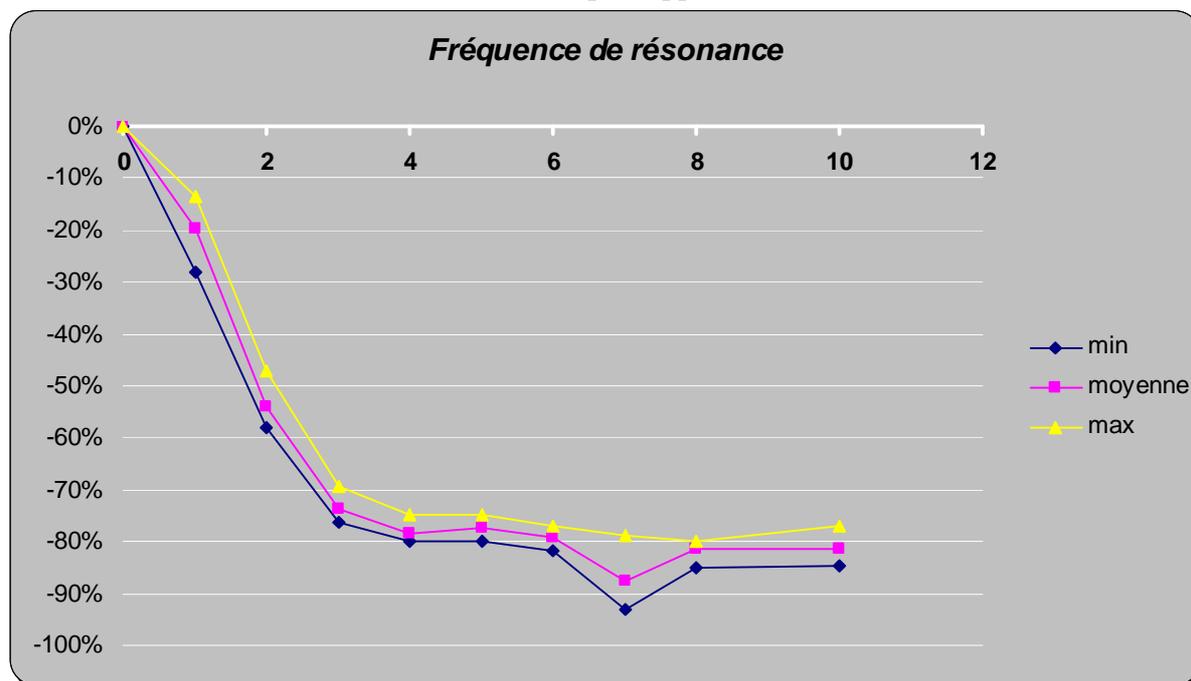


Figure 5-1 Evolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Or, la diminution de la fréquence de résonance résulte de la **déstructuration du squelette rocheux** (Prick, 1997;Goudie et al., 1992), **c'est-à-dire une modification du squelette rocheux distincte d'une modification au niveau des vides (pores et/ou fissures)**. Donc lors de la phase 1, premier stade de l'endommagement, le squelette rocheux se déstructure de façon importante. Ensuite, lors de la phase 2 : la baisse est très limitée par rapport à la baisse observée lors de la phase 1. La déstructuration du squelette rocheux est donc plus limitée. La phase 2 correspond donc à une phase où le squelette rocheux a atteint une déstructuration maximale. Une limite inférieure apparaît sur la Figure 5-1, proche de -80 %. Cette valeur semble marquer la limite avant la rupture des échantillons. Nous y reviendrons dans le Chapitre 6 (6.3.2.2).

Par ailleurs, au cycle 7, 2 échantillons sur 4 ont leur fréquence de résonance qui a baissé de plus de 90%, ce qui explique l'écart avec la tendance observée pour les cycles avant et après ce cycle. Or, la dispersion des valeurs augmente avec l'endommagement (Chapitre 3, 3.2.2.2) et est accentuée à cause du comportement aléatoire de la rupture pour les matériaux fragiles (Grange, 2007;Weibull, 1939). Nous pouvons donc considérer que **ces deux échantillons sont compris dans la phase 2**.

Les informations données par la fréquence de résonance mettent en évidence deux phases (avant et après le cycle 3) qui traduisent l'évolution de la déstructuration du squelette rocheux.

Regardons maintenant l'évolution des mesures de vitesse du son (Figure 5-2).

Comme pour la fréquence de résonance, les faibles écarts entre la valeur moyenne et les valeurs minimale et maximale et la sensibilité de la mesure déduite du Chapitre 3 (3.2.2.1) prouvent que les éprouvettes ont un comportement homogène. A partir de l'allure de la courbe, il est possible de distinguer **deux phases** :

- phase 1 : jusqu'au cycle 3, comme pour l'évolution de la fréquence de résonance, la vitesse du son **chute linéairement** pour atteindre -45% de sa valeur initiale au cycle 3 ;

- phase 2 : à partir du cycle 4, la baisse de la vitesse du son est plus atténuée et semble se faire **par palier**.

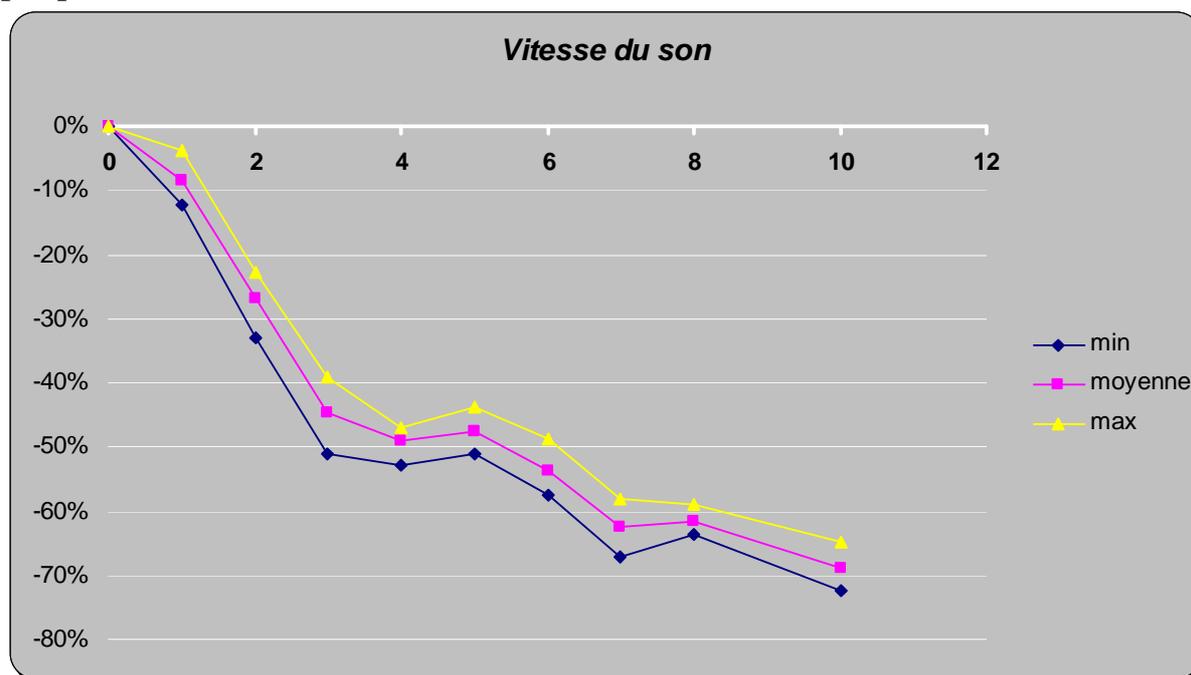


Figure 5-2 Evolution de la vitesse du son en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Il est intéressant de voir que la phase 1 décrite pour la vitesse du son coïncide avec la phase 1 décrite pour la fréquence de résonance : elle concerne les mêmes cycles et correspond à une baisse importante par rapport à la valeur initiale. On peut donc dire que cette diminution de la vitesse du son est à attribuer à la **déstructuration du squelette rocheux**.

Concernant la phase 2, la diminution de la vitesse du son se fait par palier, alors que la fréquence de résonance dans cette phase semble atteindre une valeur basse limite. Ainsi, il n'y a presque plus de déstructuration du squelette rocheux au cours de cette phase. Par contre, la diminution par palier de la vitesse du son résulte d'une modification de la roche. Or, contrairement à la fréquence de résonance qui ne peut pas être mesurée dans l'air, la vitesse du son se propage dans l'air. Donc, lors de la phase 2, il n'y a pas (ou peu) de modification du squelette rocheux mais il y a un **élargissement des vides (pores et/ou fissures)** présents dans la roche. Le fait que l'élargissement des vides se fasse par palier peut être attribué au phénomène de fatigue des fissures : jusqu'à un certain nombre de cycles, les vides s'écartent de manière réversible sous sollicitations et la vitesse du son ne change pas. Mais à partir d'un nombre de cycles critique, l'élargissement des vides augmente de façon irréversible et donc la vitesse du son diminue.

Les informations données par la vitesse du son mettent en évidence les deux mêmes phases que la fréquence de résonance (avant et après le cycle 3). En plus de traduire l'évolution de la structure du squelette rocheux, la vitesse du son informe sur l'élargissement des vides.

La vitesse du son permet également de calculer l'indice de continuité de la roche (cf. Chapitre 3, 3.2.1.2). Cet indice, combiné à la valeur de la porosité à l'eau, permet de connaître la part de porosité liée aux pores et celle liée aux fissures. Les valeurs obtenues à chaque cycle sont reportées dans la Figure 5-3 pour la porosité liée aux pores et dans la Figure 5-4 pour la porosité liée aux fissures.

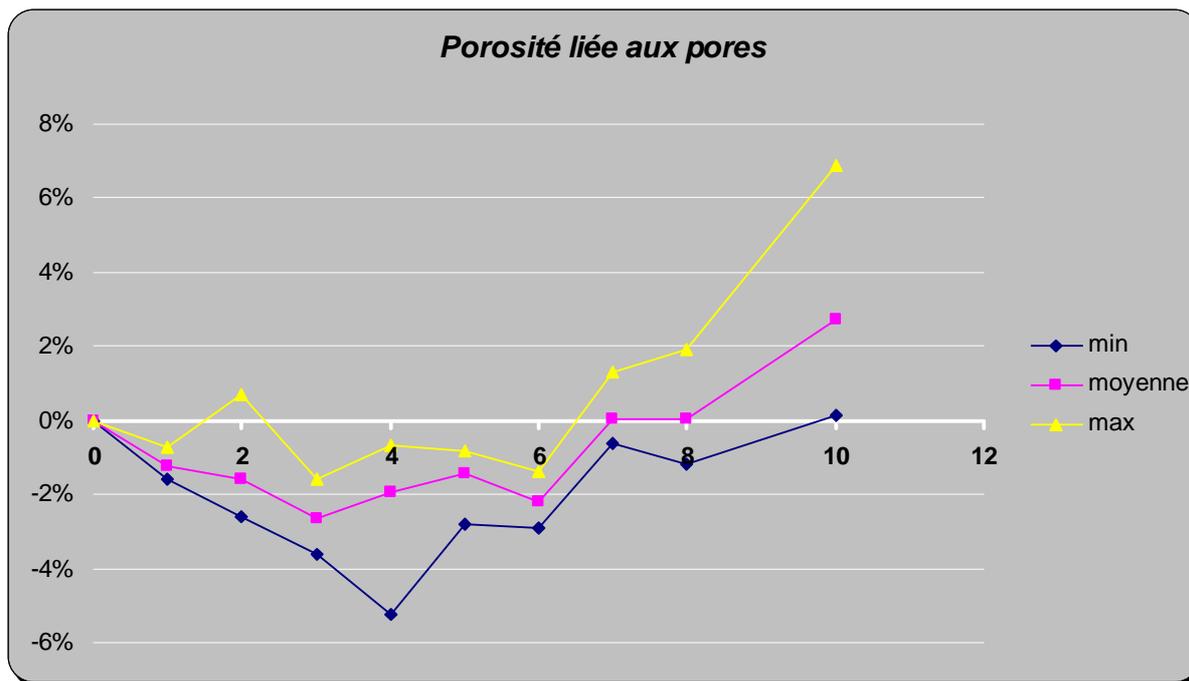


Figure 5-3 Evolution de la porosité liée aux pores (Tourenq et al., 1971) en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

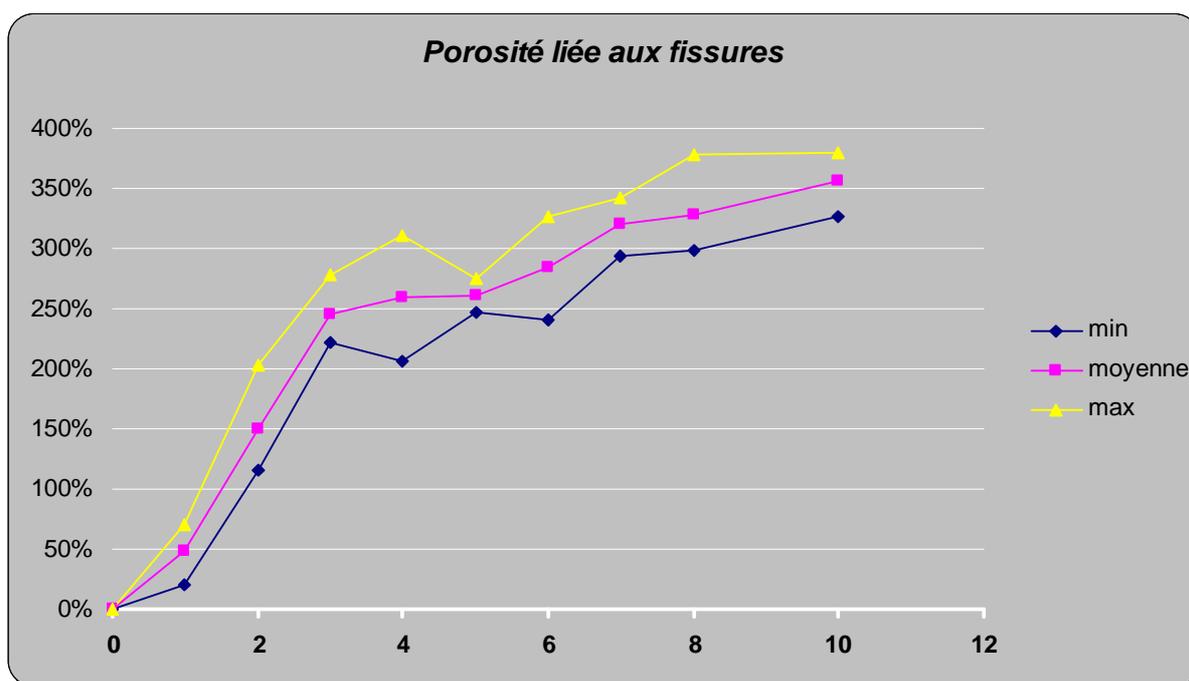


Figure 5-4 Evolution de la porosité liée aux fissures (Tourenq et al., 1971) en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Au niveau de la porosité liée aux pores (Figure 5-3), son évolution est plus hétérogène que pour les courbes précédentes, il est néanmoins possible de raisonner en regardant la valeur moyenne obtenue pour chaque cycle sur les 4 échantillons sacrifiés. **Jusqu'au cycle 3, la porosité liée aux pores diminue de quelques pourcents**, il s'agit de la phase 1 décrite pour les évolutions de la fréquence de résonance et de la vitesse du son. **A partir du cycle 4, elle augmente par palier** (avec une légère baisse au cycle 6), il s'agit de la phase 2 décrite pour

les évolutions de la fréquence de résonance et de la vitesse du son. Notons que cette augmentation débute pour des évolutions négatives de la porosité par rapport à la porosité initiale puis elle atteint des évolutions positives à partir du cycle 7.

Concernant la porosité liée aux fissures (Figure 5-4), elle augmente fortement jusqu'au cycle 3 (+ 250 %), c'est-à-dire pour la phase 1 décrite pour les évolutions de la fréquence de résonance et de la vitesse du son. **Puis l'augmentation se fait de façon plus douce** pour atteindre + 350 % au cycle 10, c'est-à-dire pour la phase 2 décrite pour les évolutions de la fréquence de résonance et de la vitesse du son.

Donc, au cours de la phase 1, la porosité liée aux fissures augmente fortement, ce qui fait chuter la valeur de la fréquence de résonance et celle de la vitesse du son. Il apparaît aussi une relation entre l'augmentation de la porosité liée aux fissures et celle liée aux pores : quand la porosité liée aux fissures augmentent fortement, la porosité liée aux pores diminue. **La propagation des fissures se fait donc au détriment des pores existants lors de la phase 1.**

Au cours de la phase 2, l'augmentation de la porosité liée aux fissures est plus atténuée. Cette augmentation n'a plus d'effet marqué sur l'évolution de la fréquence de résonance. A cette augmentation s'ajoute une augmentation par palier de la porosité liée aux pores. Cette augmentation rejoint la diminution par palier de la vitesse du son. **Pendant la phase 2, la fissuration se stabilise et la porosité liée aux pores augmente.**

Lors de la phase 1, c'est l'augmentation de la porosité liée aux fissures qui provoque une forte diminution de la fréquence de résonance et de la vitesse du son. Pendant la phase 2, l'augmentation par palier de la porosité liée aux pores provoque une diminution par palier de la vitesse du son sans affecter la fréquence de résonance, ce qui confirme l'hypothèse d'un élargissement des vides.

Intéressons nous, enfin, à la dernière propriété mécanique de cette étude : la résistance à la compression uniaxiale. Nous avons mesuré la résistance en compression à chaque cycle sur un échantillon à l'état sec et un échantillon à l'état saturé à 100%. Ces deux états permettent d'estimer la gamme de variations de la résistance en compression en fonction du degré de saturation : à l'état sec, la roche a une résistance maximale ; à l'état saturé à 100%, elle a une résistance quasi-minimale (cf. Chapitre 3, 3.2.3.2). Les incertitudes pour ces mesures sont présentées dans le Chapitre 3 (3.2.3.2). Notons également que les résultats ne sont pas donnés en valeur relative car il s'agit d'un essai destructif et il n'y a donc pas de valeur initiale.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5-5.

Les valeurs de résistance en compression font apparaître deux phases :

- jusqu'au cycle 3, la résistance en compression **diminue fortement** ;
- à partir du cycle 4, la résistance en compression **diminue de façon plus modérée**.

Ces deux phases coïncident avec les phases décrites précédemment. Donc, au cours de la phase 1, **l'augmentation importante de la porosité liée aux fissures entraîne une forte baisse de la fréquence de résonance, de la vitesse du son et de la résistance à la compression.**

Et, au cours de la phase 2, l'augmentation par palier de la porosité liée aux pores a un impact sur la baisse par palier de la vitesse du son, mais elle n'a pas d'impact sur la fréquence de résonance ni sur la résistance à la compression. **La résistance à la compression continue à diminuer, de façon plus modérée, de la même manière que la porosité liée aux fissures continue à augmenter d'une façon plus modérée.**

Les valeurs de résistance en compression font apparaître les deux phases d'évolution observées jusqu'à présent : une forte baisse jusqu'au cycle 3 puis une baisse plus modérée.

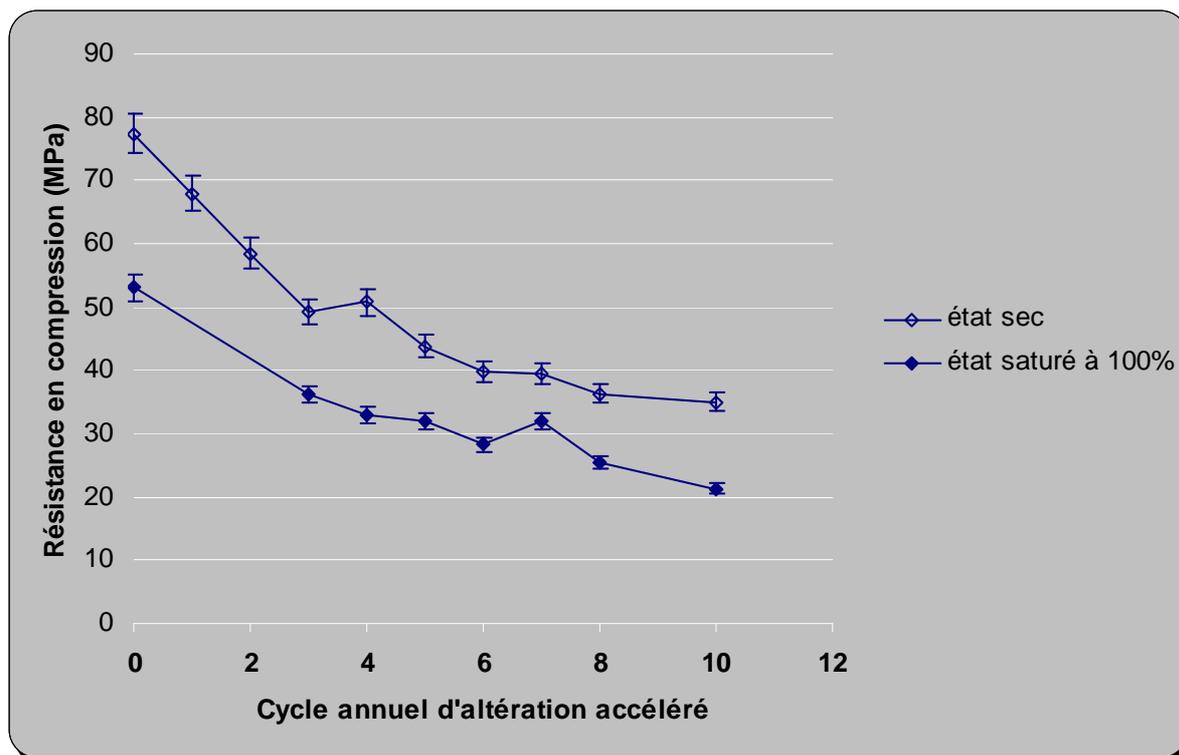


Figure 5-5 Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour Chamesson. Valeurs pour un échantillon sec et un échantillon saturé à 100%. L'incertitude correspond à celle déterminée dans le Chapitre 3 (3.2.3.2).

Le Tableau 5-2 reprend l'ensemble des tendances observées au niveau de l'évolution des propriétés mécaniques et des porosités liées aux pores et aux fissures.

	Porosité liée aux pores	Porosité liée aux fissures	Fréquence de résonance	Vitesse du son	Résistance à la compression
Phase 1 : fissuration	Diminution	Forte augmentation	Forte diminution	Forte diminution	Forte diminution
Transition	Cycle 3				
Phase 2 : élargissement des vides	Augmentation par palier	Augmentation atténuée	Baisse très atténuée, voire stabilisation	Diminution par palier	Diminution atténuée

Tableau 5-2 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des évolutions des propriétés mécaniques et des porosités liées aux pores et aux fissures pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson

Compte-tenu de l'ensemble des observations faites jusqu'à présent, la phase 1 peut être considérée comme une phase de fissuration et la phase 2 comme une phase d'élargissement des vides (avec une légère fissuration).

5.2.1.2. Propriétés physiques

Les valeurs obtenues concernant l'évolution de la porosité à l'eau en fonction des cycles d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-6. Encore une fois, les résultats présentent une allure homogène, en tenant compte de la sensibilité de cette mesure (Chapitre 3, 3.3.1.1), propice à l'interprétation.

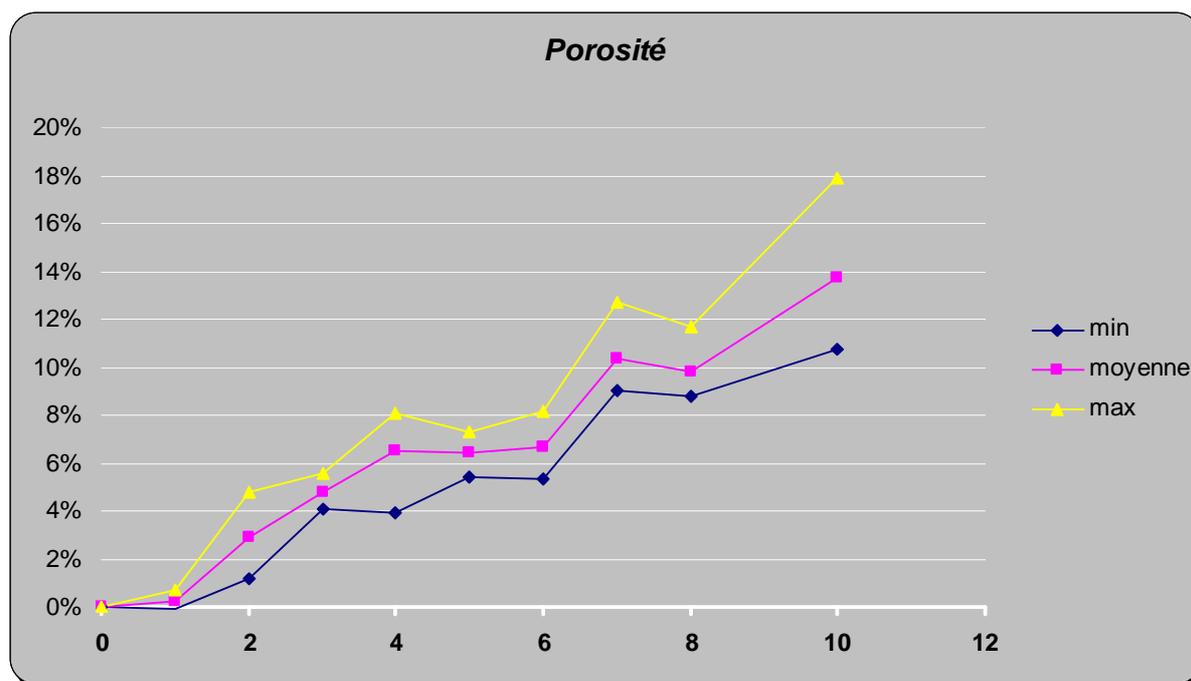


Figure 5-6 Evolution de la porosité à l'eau en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

La porosité à l'eau augmente par palier au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, tout comme la vitesse du son diminue par palier (Figure 5-2). La différence entre ces deux courbes réside dans le fait que la porosité augmente à partir du cycle 2 alors que la vitesse du son diminue dès le cycle 1. Ce « décalage » est effectif jusqu'au cycle 7, ensuite, l'augmentation (ou la stabilisation) de porosité coïncide avec la diminution (ou la stabilisation respectivement) de vitesse du son. Or, on a vu que jusqu'au cycle 3, la porosité créée est celle des fissures (Figure 5-4). Mais le décalage suggère que **lorsque la fissure apparaît à un cycle, elle ne génère aucune porosité pour ce cycle, par contre, dès le cycle suivant, l'élargissement de la fissure justifierait l'augmentation de porosité.**

A partir du cycle 7, les évolutions entre la porosité et la vitesse du son se font en même temps : quand la porosité augmente (ou se stabilise), la vitesse diminue (ou se stabilise respectivement). Or, c'est à partir du cycle 7 que la porosité liée aux pores a une évolution positive (Figure 5-3). **La variation de la vitesse du son est donc corrélée à l'apparition ou l'élargissement de pores.** Il n'y a donc plus de décalage entre l'évolution de la porosité et celle de la vitesse du son en fonction des cycles d'altération accélérés.

Le décalage entre l'augmentation de la porosité et la diminution de la vitesse du son peut être attribué à l'élargissement des fissures (jusqu'au cycle 6). Puis, à partir du cycle 7, la simultanéité des deux évolutions confirme l'élargissement des pores.

Regardons maintenant l'évolution de la perméabilité à l'eau en fonction des cycles annuels d'altération accélérés. Les valeurs obtenues sont reportées dans la Figure 5-7. Les résultats présentent une allure relativement homogène, compte-tenu de la sensibilité de la mesure (Chapitre 3, 3.3.2.1) et peuvent donc être interprétés. Notons qu'au cycle 7, le pic d'augmentation de la perméabilité est dû à un échantillon uniquement. Nous ne prenons donc pas en compte ce phénomène singulier dans notre interprétation.

D'après la Figure 5-7, la perméabilité **augmente régulièrement** jusqu'au cycle 7, puis elle atteint **une valeur limite** autour de + 330 %, soit en moyenne 0,47 mD.

La limite entre les deux tendances de l'évolution de la perméabilité se fait au cycle 7. L'augmentation régulière de la perméabilité jusqu'au cycle 7 semble être liée à

l'augmentation de la porosité liée aux fissures (Figure 5-4). Ce point sera confirmé par les observations visuelles du paragraphe 5.2.1.3.

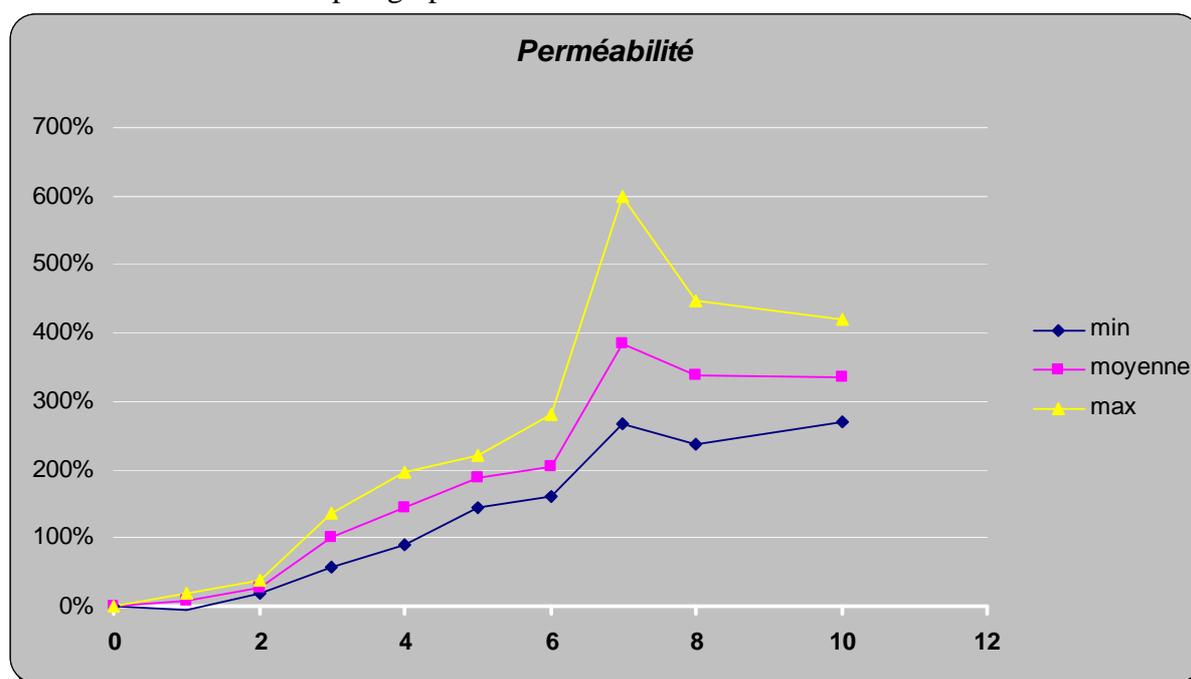


Figure 5-7 Evolution de la perméabilité en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour Chamesson. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

La perméabilité augmente avec la fissuration jusqu'à une valeur limite.

	Porosité liée aux pores	Porosité liée aux fissures	Porosité à l'eau	Perméabilité
Phase 1 : fissuration	Inférieure à la valeur initiale	Augmentation	Augmentation par palier décalée avec la vitesse du son	Augmentation
Transition	Cycle 7			
Phase 2 : élargissement des vides	Supérieure à la valeur initiale	Augmentation	Augmentation par palier simultanée avec la vitesse du son	Stabilisation

Tableau 5-3 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des évolutions des propriétés physiques et des porosités liées aux pores et aux fissures pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson

Le Tableau 5-3 reprend l'ensemble des observations faites pour les propriétés physiques et celles faites pour les porosités liées aux pores et aux fissures.

Compte-tenu des tendances observées, il est possible de distinguer deux phases d'évolution : une phase fissuration puis une phase d'élargissement des vides. Le passage d'une phase à l'autre a lieu au cycle 7.

5.2.1.3. Observations

L'observation de l'altération vient s'ajouter aux remarques et conclusions faites sur les propriétés mécaniques et physiques pour les confirmer ou bien les nuancer.

A l'échelle de l'éprouvette

Selon la méthode des surfaces « déroulées » au scanner décrite dans le Chapitre 3 (3.4.1), pour le cycle 1, aucune fissure n'est présente en surface des échantillons scannés, ce cycle n'est donc pas présent sur les figures qui suivent.

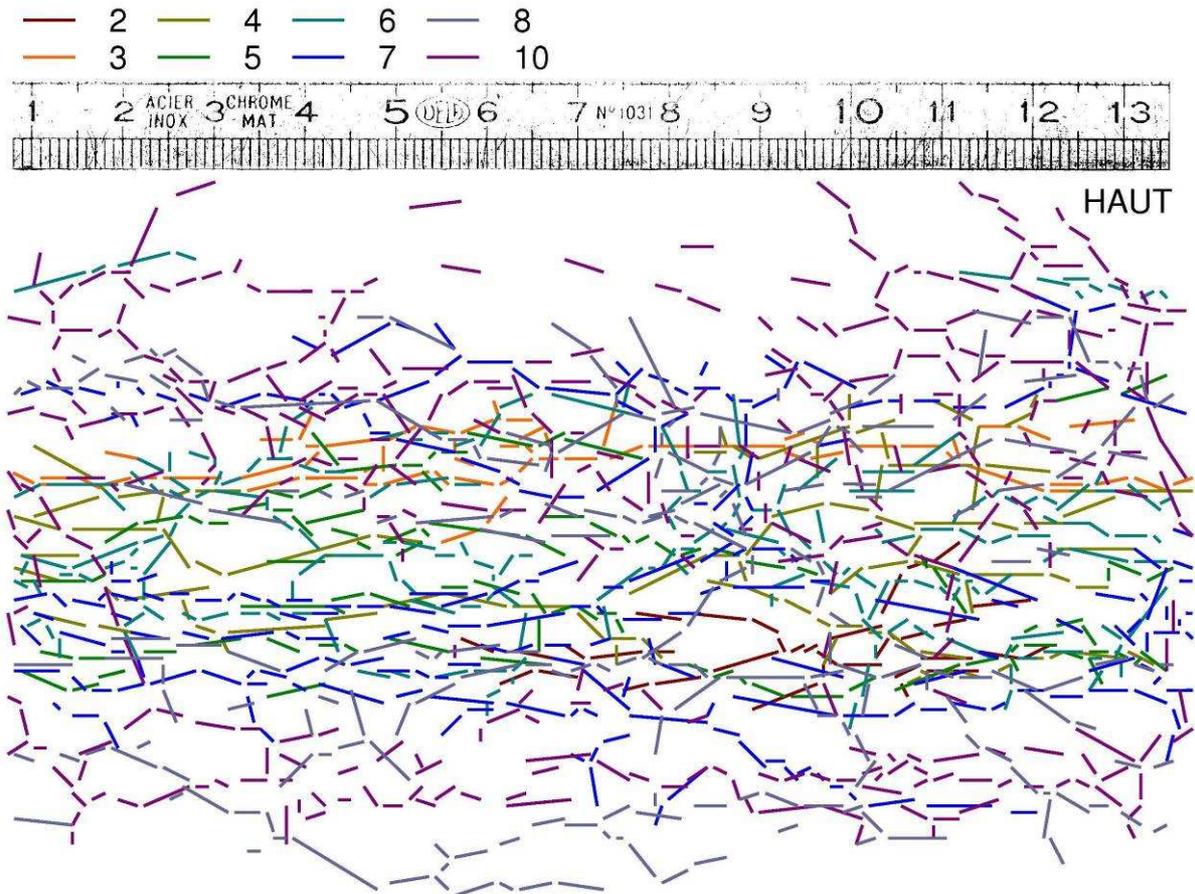


Figure 5-8 Représentations en courbe linéaire par morceaux des fissures présentes en surface des échantillons scannés du cycle 2 au cycle 10 pour le calcaire de Chamesson. Les numéros de la légende correspondent aux numéros du cycle annuel d'altération accéléré.

Dans la Figure 5-8, les représentations linéaires par morceaux des fissures présentes à chaque cycle ont été superposées pour visualiser l'étendue de la fissuration en surface des échantillons. Cette représentation permet de montrer que la **densité de fissuration est importante et augmente** avec les cycles annuels d'altération accélérés et devient très forte pour les derniers cycles. Les fissures démarrent dans la partie centrale de l'éprouvette, puis se propagent vers le haut et vers le bas de l'éprouvette.

Ce tracé de droites permet d'obtenir par analyse d'images pour chaque portion de droite, une orientation et une longueur. La Figure 5-9 présente la longueur totale, moyenne entre les 4 échantillons sacrifiés, des fissures pour une gamme d'orientations donnée (tous les 10°). Cette représentation souligne de façon remarquable la **direction préférentielle des fissures proche de l'horizontale**. Les calcaires étudiés ne présentent pas de litage, cette propagation n'est donc pas contrôlée par celui-ci.

Si l'on regarde la Figure 5-9, on voit que l'allure de la longueur cumulée des fissures en fonction de l'orientation a toujours la même forme, sauf que cette forme s'allonge dans la direction horizontale au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés. Il est, de plus, possible de faire ressortir plusieurs étapes dans cette propagation horizontale des fissures :

- phase 1 : jusqu'au cycle 7, la **longueur des fissures augmente progressivement** avec une orientation préférentielle proche de l'horizontale ;
- phase 2 : à partir du cycle 7, **il n'y a plus de propagation des fissures**.

Ces phases **rejoignent l'évolution de la perméabilité** : quand les fissures se propagent, la perméabilité augmente, quand elles ne se propagent plus, la perméabilité se stabilise.

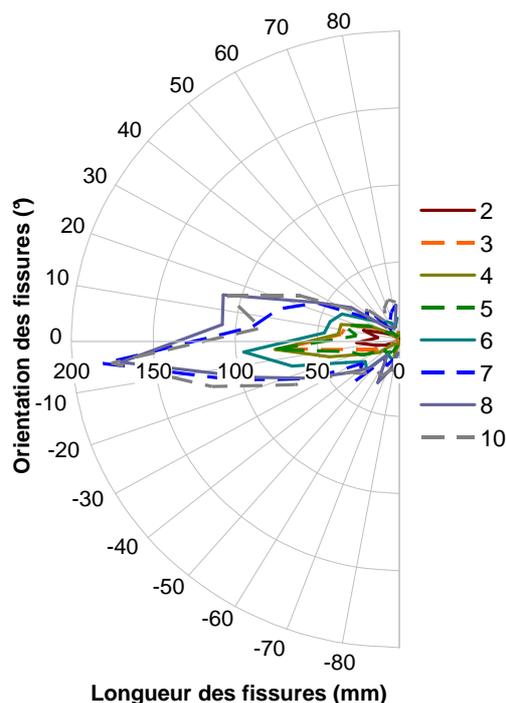


Figure 5-9 Représentation polaire de l'orientation et de la longueur des fissures obtenues par analyse d'images à partir des surfaces latérales des échantillons « déroulées » au scanner pour le calcaire de Chamesson. 0° correspond à l'orientation horizontale, 90° à l'orientation verticale vers le haut de l'éprouvette et -90° à l'orientation verticale vers le bas de l'éprouvette. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

La propagation des fissures en surface des échantillons souligne la forte fissuration des échantillons du calcaire de Chamesson. Cette fissuration a lieu avec une orientation préférentielle quasi-horizontale.

A l'échelle de la microstructure

Au niveau de la microstructure, regardons les courbes issues de l'essai de porosimétrie au mercure et les images obtenues par microscopie électronique.

Pour obtenir les courbes porosimétriques de la Figure 5-13, des échantillons cylindriques de 1 cm de diamètre et de hauteur 1,4 cm ont été carottés au centre des échantillons cylindriques de hauteur 8 cm et de diamètre 4 cm. Nous avons choisi de prélever les petits échantillons au centre des échantillons sacrifiés, car il s'agit de la zone la plus touchée par l'endommagement (Figure 5-8). Un échantillon pour chaque cycle a été prélevé dans un des 4 échantillons sacrifiés.

Détaillons maintenant les allures des courbes porosimétriques de la Figure 5-13. Avant d'entrer dans les détails, remarquons que la structure du réseau poreux, traduite par les courbes porosimétriques, garde la même forme entre le cycle 1 et le cycle 10. Des différences sont néanmoins remarquables et elles concernent des variations de :

- la hauteur du pic de la gamme de pores principale ;
- la largeur de la base du pic de la gamme de pores principale ;
- la quantité de « gros » pores, soit pour des rayons d'accès de $10 \mu\text{m}$.

Regardons donc ces variations de plus près. Les valeurs de la hauteur du pic en fonction des cycles annuels d'altération accélérés, obtenues par lecture graphique, sont reportées dans la Figure 5-10. Les valeurs de la largeur de la base du pic en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-11. La largeur de la base du pic a été calculée en considérant les valeurs à partir desquelles le volume incrémental est supérieur à $0,0001 \text{ mL/g}$.

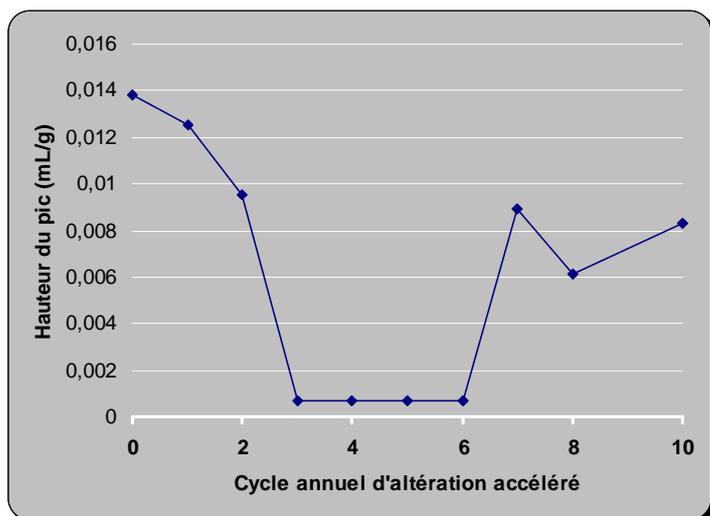


Figure 5-10 Valeur de la hauteur du pic de la gamme de pores principale pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour le calcaire de Chamesson

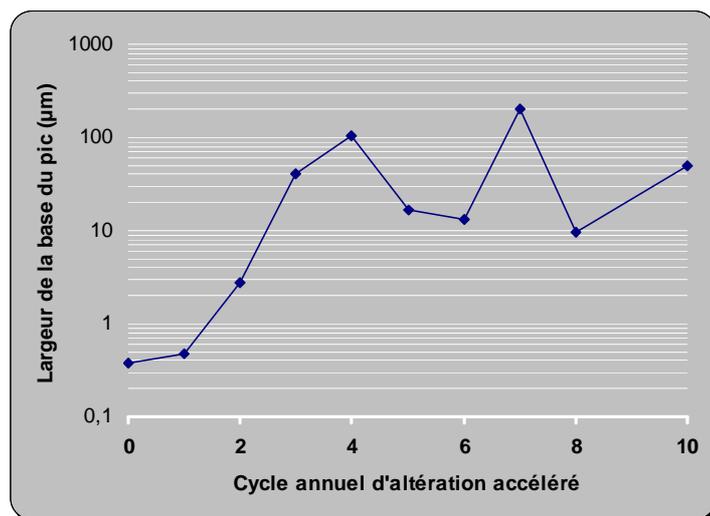


Figure 5-11 Valeur de la largeur de la base du pic de la gamme de pores principale pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour le calcaire de Chamesson

La hauteur du pic fait ressortir trois phases :

- phase 1 : diminution jusqu'au cycle 3 ;
- phase 2 : stabilisation jusqu'au cycle 6 ;
- phase 3 : augmentation et oscillations à partir du cycle 7.

Or, le pic de la gamme de pores principale représente la porosité liée aux pores de l'échantillon, puisqu'il est présent à l'état initial. Et, les phases décrites coïncident avec les phases décrites pour l'évolution de la porosité liée aux pores (Figure 5-3). Les variations de la hauteur du pic de la gamme de pores principale traduisent donc l'évolution de la porosité liée aux pores. La quantité de pores diminue jusqu'au cycle 3, puis elle **augmente dès le cycle 7**.

L'élargissement ou le rétrécissement de la base du pic se fait toujours du côté des pores les plus gros. La largeur de la base du pic présente deux phases dans son évolution :

- phase 1 : augmentation jusqu'au cycle 3 ;
- phase 2 : oscillations à partir du cycle 4.

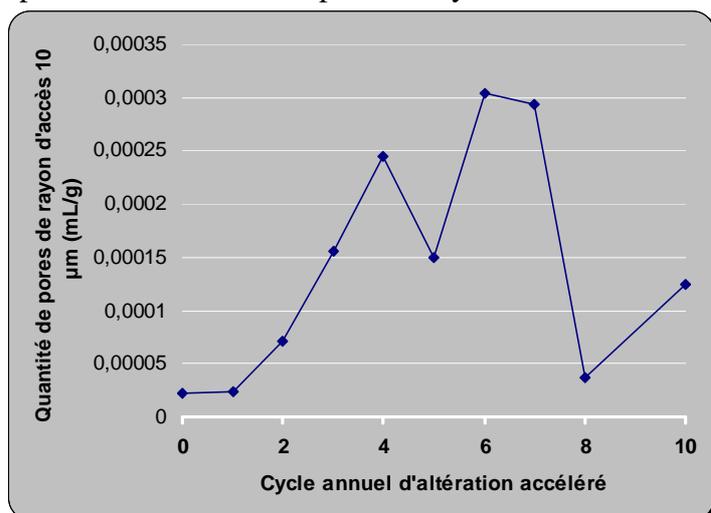


Figure 5-12 Valeur de la quantité de pores de rayon d'accès 10 µm pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour le calcaire de Chamesson

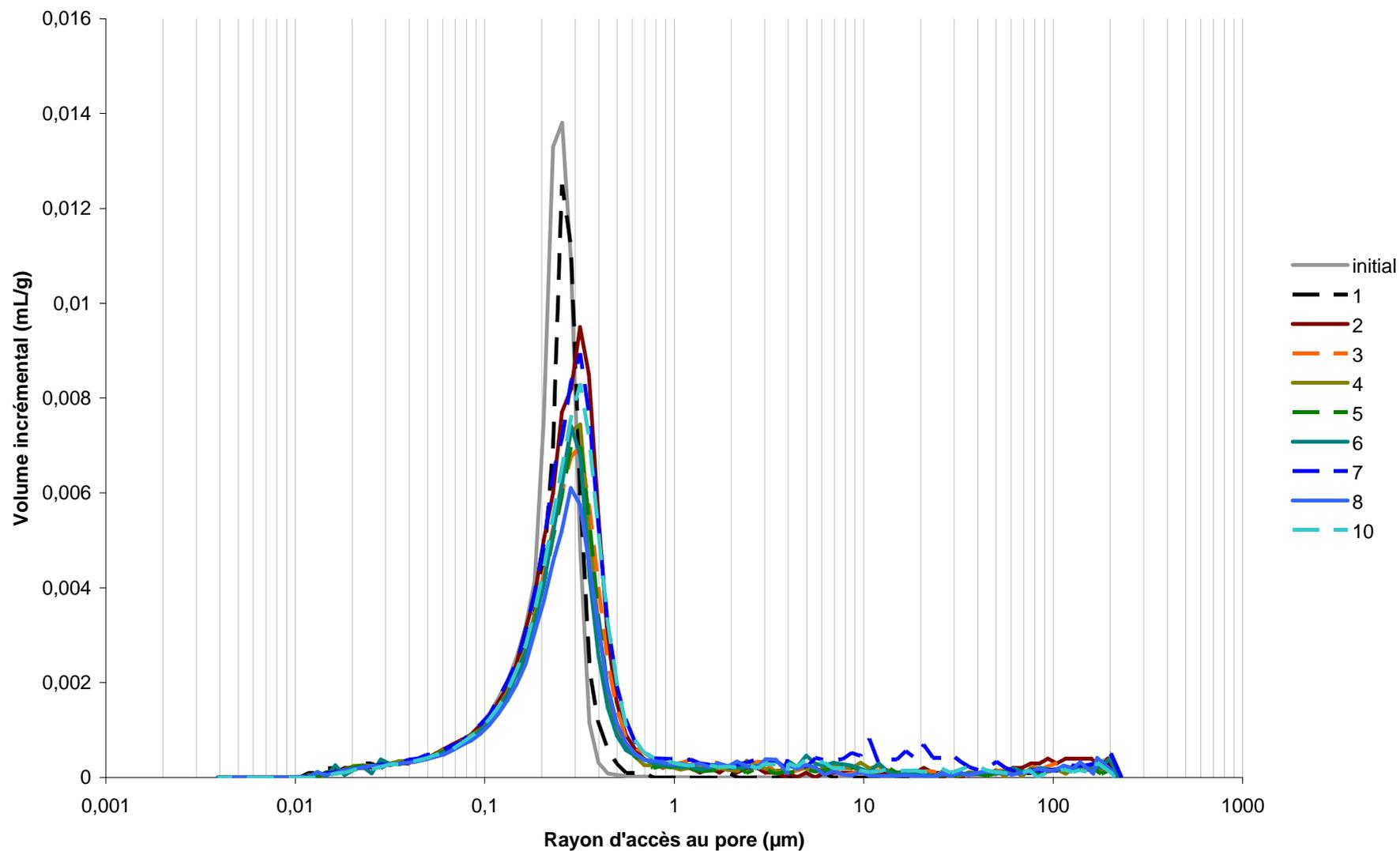


Figure 5-13 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour le calcaire de Chamesson. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

Les phases liées aux variations de la base du pic rejoignent les évolutions observées pour la porosité liée aux fissures. Donc les variations de la largeur de la base du pic de la gamme de pores principale traduisent l'évolution de la porosité liée aux fissures. Il y a donc une **augmentation de la fissuration jusqu'au cycle 3**.

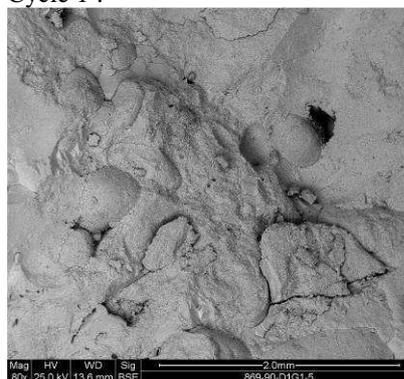
Les valeurs de la quantité de « gros » pores en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-12. Nous avons choisi de nous placer au rayon d'accès de 10 µm pour qualifier les variations de la quantité de « gros » pores dans la mesure où c'est pour ce rayon que l'on observe les plus fortes variations (Figure 5-13).

La quantité de pores de rayon d'accès 10 µm présente deux phases dans son évolution :

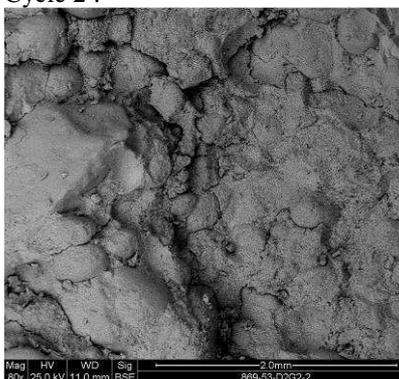
- phase 1 : augmentation jusqu'au cycle 3 ;
- phase 2 : oscillations à partir du cycle 4.

Ces évolutions rejoignent celles de la largeur de la base du pic, elles traduisent donc également l'évolution de la porosité liée aux fissures. Il y a donc une **augmentation de la fissuration jusqu'au cycle 3**.

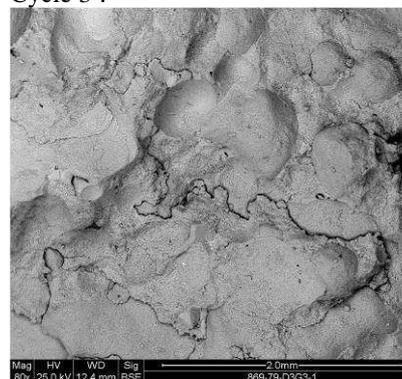
Cycle 1 :



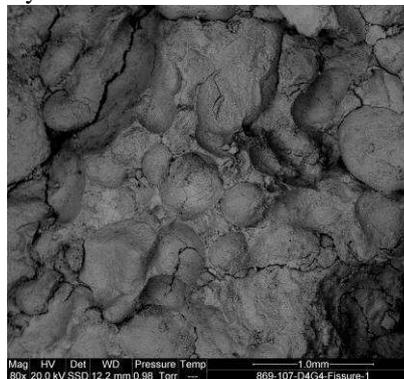
Cycle 2 :



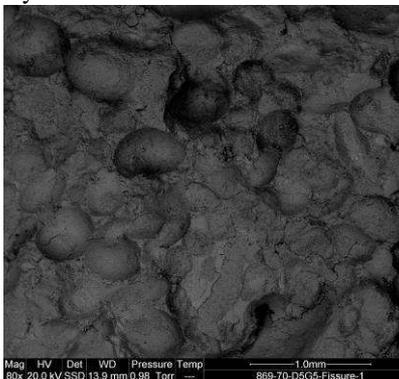
Cycle 3 :



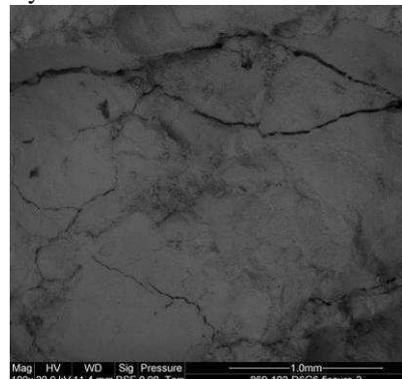
Cycle 4 :



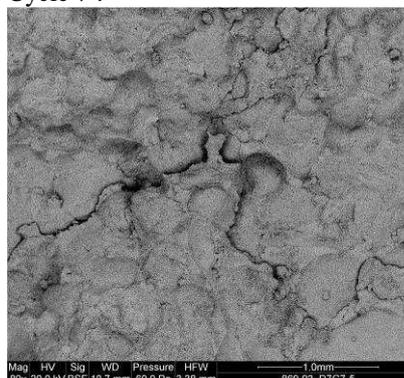
Cycle 5 :



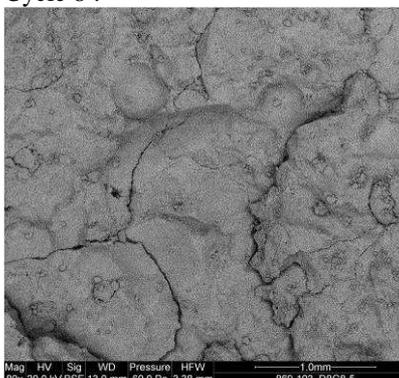
Cycle 6 :



Cycle 7 :



Cycle 8 :



Cycle 10 :

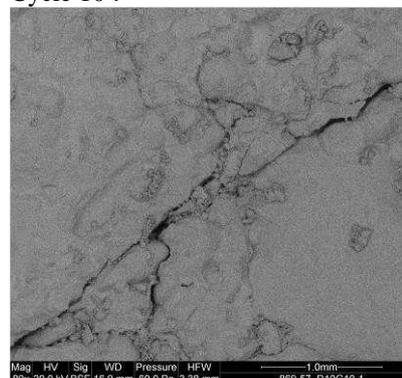


Figure 5-14 Vue d'ensemble de l'état du calcaire de Chamesson par microscopie électronique, les fissures se propagent dans la roche

Les courbes issues de l'essai de porosimétrie au mercure montrent que :

- la hauteur du pic de la gamme de pores principale, représentant les pores, augmente à partir du cycle 7, c'est donc une phase d'élargissement des pores ;
 - la quantité de « gros » pores et la largeur de la base du pic, représentant les fissures, augmente jusqu'au cycle 3, c'est donc une phase de fissuration.

La visualisation de la propagation et l'élargissement des fissures est observable au microscope électronique à balayage, avec un faible grossissement (x80).

Nous avons reporté les images correspondantes dans la Figure 5-14. Les **fissures apparaissent nettement** (courbes noires) sur les images du microscope électronique, on observe même un élargissement notamment au niveau du cycle 6. Elles se retrouvent dans la matrice sparitique. Et dès le cycle 4, elles traversent certains oolithes.

Les images au microscope électronique permettent de visualiser les fissures générées lors des cycles annuels d'altération accélérés. On peut les visualiser dès le cycle 4, c'est-à-dire lorsqu'on a atteint la phase d'élargissement des vides.

Le Tableau 5-4 reprend l'ensemble des observations de l'altération et les résultats obtenues pour les porosités liées aux pores et aux fissures. Compte-tenu des tendances observées, il est possible de distinguer deux phases d'évolution : une phase fissuration puis une phase d'élargissement des vides. Le passage d'une phase à l'autre a lieu au cycle 7.

	Images des surfaces « déroulées » au scanner	Courbes porosimétriques	Images MEB
Phase 1 : fissuration	Propagation des fissures	Diminution et stabilisation de la hauteur du pic Augmentation (jusqu'au cycle 3) et oscillations de la largeur de la base du pic et de la quantité de gros pores	Présence de fissures dans la matrice sparitique
Transition :	Cycle 7		
Phase 2 : élargissement des vides	Fissuration stabilisée	Augmentation et oscillations de la hauteur du pic Oscillations de la largeur de la base du pic et de la quantité de gros pores	Présence de fissures dans la matrice sparitique et traversant des oolithes

Tableau 5-4 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des observations de l'altération et des porosités liées aux pores et aux fissures pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson

5.2.1.4. Synthèse des phases du processus d'altération

D'après l'ensemble des conclusions du Tableau 5-2, du Tableau 5-3 et du Tableau 5-4, le processus d'altération du calcaire de Chamesson se déroule selon les phases suivantes :

- phase 1 : Fissuration

Cette phase consiste en des ruptures importantes du squelette rocheux. Le processus d'altération se caractérise donc tout d'abord pour une forte propagation des fissures pour le calcaire de Chamesson.

D'un point de vue mécanique, elle s'initie jusqu'au cycle 3. Par contre, d'un point de vue physique, la fissuration continue jusqu'au cycle 7. Cette différence s'explique par l'évolution de la porosité liée aux pores (Figure 5-3). Elle est négative jusqu'au cycle 7 mais elle augmente à partir du cycle 3. L'augmentation de la porosité liée aux pores atténue donc l'effet mécanique de la fissuration dès le cycle 3 par contre, c'est uniquement lorsqu'elle devient supérieure à la valeur initiale que cette phase de fissuration s'achève.

- phase 2 : Elargissement des vides

Cette phase se caractérise par des variations importantes de la porosité du calcaire de Chamesson. Elle correspond à la deuxième étape du processus d'altération où le calcaire est sollicité par fatigue.

Elle a un impact sur les propriétés mécaniques très atténué par rapport à la phase précédente. Elle se caractérise avant tout par une augmentation de la porosité liée aux pores mais également par des cycles d'élargissement-amincissement des fissures qui fatigue la roche, jusqu'à la rupture.

Le processus d'altération du calcaire de Chamesson, d'après les résultats du vieillissement accéléré, se compose d'une phase de fissuration, où des ruptures importantes du squelette rocheux ont lieu, puis une phase d'élargissement des vides (principalement les pores), où l'altération se traduit par des variations importantes de la porosité. Elles mettent en évidence le fait que ce calcaire a un comportement homogène et réagit en se fissurant de façon très importante lors du processus d'altération.

Comparons ce processus d'altération par vieillissement accéléré avec des échantillons altérés « naturellement ». Il s'agit des faciès altérés décrits dans le Chapitre 2 (2.2.1.4).

5.2.2. Degrés d'altération des échantillons provenant de blocs prélevés sur site

5.2.2.1. Obtention des échantillons à partir des blocs prélevés sur site

Les échantillons provenant de blocs prélevés sur site ont été carottés aux mêmes dimensions que les échantillons altérés en laboratoire.

Or, contrairement aux échantillons altérés en laboratoire qui n'ont subi aucune manipulation mécanique, les échantillons altérés du terrain ont été carottés dans leur état d'altération final. Et une carotte trop fissurée ne permettait pas d'obtenir les dimensions désirées. Donc, **les échantillons obtenus proviennent des zones les moins sensibles mécaniquement** des blocs prélevés sur site.

Ainsi, pour le faciès très altéré, nous n'avons pu obtenir que deux échantillons correspondant aux dimensions. Pour le faciès peu altéré, 11 échantillons ont été obtenus et enfin pour le faciès altéré, 12 échantillons ont été obtenus. Nous devons donc garder en tête que le carottage des échantillons entraîne une sous-estimation du degré d'altération de ces faciès plus ou moins altérés.

5.2.2.2. Observations de l'altération

L'étude des échantillons aux faciès altérés prélevés sur le terrain ne donne pas des évolutions mais uniquement des valeurs à l'instant où nous les avons prélevés. **La comparaison avec les échantillons altérés en laboratoire peut donc se faire uniquement par le biais des observations de l'altération.** L'observation de l'altération se fait aux échelles macroscopique et microscopique.

A l'échelle de l'éprouvette

Regardons tout d'abord les fissures observables par les images des parois latérales au scanner. Pour les faciès peu altéré et altéré, aucune fissure n'est visible sur les échantillons. Trois hypothèses peuvent expliquer cette situation :

- 1) les échantillons sont exposés aux conditions climatiques depuis peu de temps et ne sont donc pas encore fissurés, comme les échantillons altérés au laboratoire après le 1^{er} cycle annuel d'altération accéléré ;
- 2) les échantillons n'ont pas réagi en fissurant face aux conditions climatiques ;
- 3) les échantillons carottés sont les moins endommagés et donc ceux qui ne présentent pas de fissures en surface.

Concernant le faciès peu altéré, les échantillons présentent une **porosité liée aux fissures très faible** (entre 0,4 et 0,7 %), l'hypothèse 1 paraît donc la plus adaptée.

Pour le faciès altéré, la **porosité liée aux fissures des échantillons est non négligeable** (entre 0,4 et 1,2 %). Pourtant aucune fissure n'est visible sur la surface des échantillons, ceci s'explique par l'hypothèse 3.

Regardons maintenant la longueur et l'orientation des fissures présentes sur les 2 échantillons du faciès très altéré. Les valeurs moyennes des longueurs des fissures en fonction de leur orientation sont données dans la Figure 5-15.

Les longueurs et orientations des fissures du calcaire au faciès très altéré montrent, comme les échantillons soumis aux cycles annuels d'altération accélérés, une **orientation préférentielle des fissures** dans la direction horizontale.

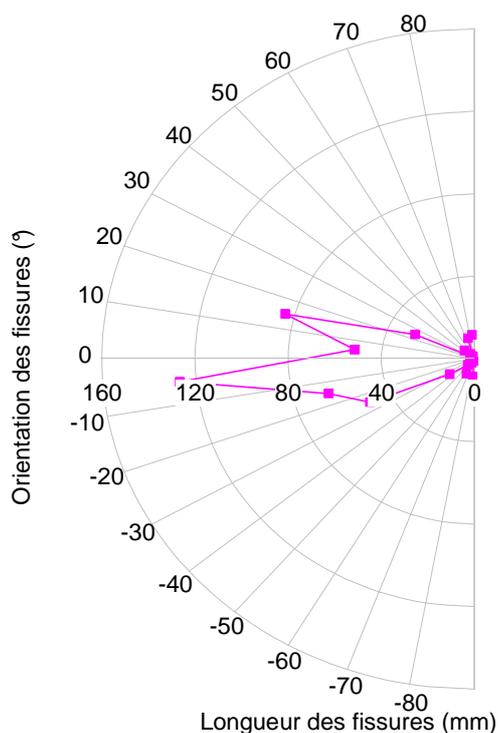


Figure 5-15 Représentation polaire de l'orientation et de la longueur des fissures obtenues par analyse d'images à partir des surfaces des échantillons « déroulées » au scanner pour le calcaire prélevé sur site au faciès très altéré. 0° correspond à l'orientation horizontale, 90° à l'orientation verticale vers le haut et -90° à l'orientation verticale vers le bas. Les valeurs correspondent à la moyenne faite à partir des résultats de deux échantillons.

Figure 5-16 Fissures présentes en surface des échantillons du calcaire au faciès très altéré, elles sont remplies de calcite.

Par contre, si l'on compare la longueur maximale des fissures horizontales du faciès très altéré avec les valeurs de la Figure 5-9, elle se situe entre le 6^{ème} et le 7^{ème} cycles annuels d'altération accélérés. Or, le carottage sous-estime le degré d'altération du calcaire (5.2.2.1). Il semble donc que ce faciès ait un **âge d'exposition aux cycles climatiques très avancé**. Au niveau du processus d'altération, ce faciès a donc dépassé la phase 1 de fissuration. Pourtant, la porosité totale de ce calcaire est très faible (0,8%), il est donc difficilement concevable qu'il se situe dans la phase 2 d'élargissement des vides.

Si l'on regarde la surface des échantillons, les fissures présentes ne sont pas vides contrairement aux échantillons soumis aux cycles annuels d'altération accélérés, mais sont remplies de calcite (Figure 5-16). Cet aspect met en évidence un phase de l'altération due à la dissolution que nous n'avons pas observé sur les échantillons altérés en laboratoire : **la calcite dissoute vient précipiter dans les fissures déjà créées**.

Donc, en résumé, ce faciès très altéré présente :

- une forte fissuration, il a donc dépassé la phase 1 de fissuration ;
- une porosité totale très faible, il n'est donc pas dans la phase 2 d'élargissement des vides ;
- des fissures remplies de calcite, aspect non observé en laboratoire.

Il semble donc que ce **faciès très altéré se situe dans une phase du processus d'altération située après les phases 1 et 2 observées en laboratoire**. Cette phase correspond au remplissage des fissures par de la calcite dissoute et re-précipitée.

Les observations des fissures au scanner confirment les degrés d'altération estimés suite aux observations sur site.

Elles donnent par ailleurs des informations précises sur le processus d'altération :

- le faciès peu altéré ne présente pas de fissures dans la mesure où il n'a pas été exposé aux intempéries un temps suffisant ;
- le faciès altéré est fissuré mais le carottage des échantillons empêche d'observer ces fissures sur leurs surfaces ;
- le faciès très altéré fait apparaître une autre phase d'altération, plus avancée que celles observées en laboratoire, où les fissures sont remplies de calcite.

A l'échelle de la microstructure

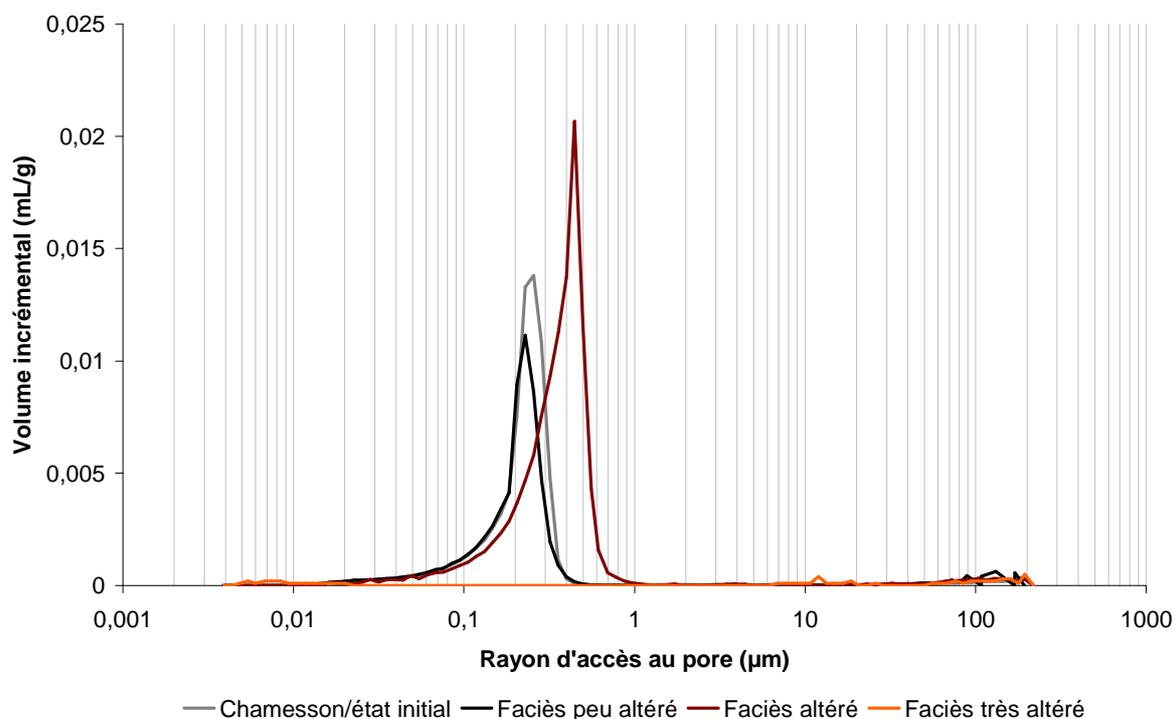


Figure 5-17 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour chaque faciès observé sur site. La courbe porosimétrique du calcaire de Chamesson à l'état initial a été rajoutée pour comparaison avec les autres états.

Regardons maintenant les courbes obtenues par l'essai de porosimétrie au mercure et comparons-les à celle du calcaire de Chamesson à l'état initial. Elles sont reportées dans la Figure 5-17.

La courbe du calcaire au faciès peu altéré présente une seule différence avec la courbe du calcaire de Chamesson à l'état initial : la hauteur du pic de la gamme principale est plus petite pour le faciès peu altéré. Or, cette même différence a été observée dès le premier cycle d'altération accéléré et jusqu'au cycle 3, c'est-à-dire au début de la phase 1 de fissuration des échantillons du calcaire de Chamesson en laboratoire (Figure 5-10). Ce faciès correspondrait donc **au début de la phase 1 du processus d'altération**.

L'allure de la courbe du faciès altéré présente deux différences avec la courbe du calcaire de Chamesson à l'état initial :

- la hauteur du pic de la gamme de pores principale est plus élevée pour le faciès altéré ;
- le rayon de la gamme de pores principale est plus élevé pour le faciès altéré.

La hauteur du pic de la gamme de pores principale plus élevée correspond à une augmentation de la quantité de pores. Or, cette augmentation est observée sur les échantillons altérés en laboratoire au cycle 7. Donc ce faciès correspondrait **au début de la phase 2 du processus d'altération d'élargissement des vides**. Par contre, aucun décalage important du pic vers les rayons d'accès aux pores plus larges n'est observé sur les échantillons altérés en laboratoire (Figure 5-13). Ce décalage peut s'expliquer par deux hypothèses :

- 1) initialement, ce calcaire présente des rayons de pores supérieurs à ceux du calcaire de Chamesson que nous avons étudié en laboratoire ;
- 2) au cours de l'altération du calcaire au faciès altéré, la gamme de pores principale s'est élargie uniformément.

Compte-tenu du fait que les courbes porosimétriques des échantillons altérés en laboratoire (Figure 5-13) montrent de faibles variations au fur et à mesure des cycles, il est difficile d'envisager un élargissement aussi important de la gamme de pores principale. Par ailleurs, l'épaisseur de la zone d'exploitation du calcaire de Chamesson est de 40 m, d'après la carte géologique, des variations de porosité à l'état initial sont donc tout à fait envisageables. Il est donc beaucoup plus probable que ce **faciès altéré ait, à l'état initial, une gamme de pores principale de rayon plus élevé**.

Concernant la courbe correspondant au faciès très altéré, sa très faible porosité (0,8%) limite l'interprétation de sa courbe porosimétrique. En comparant cette courbe avec la courbe du calcaire de Chamesson à l'état initial, trois différences apparaissent néanmoins :

- un pic correspondant à un rayon d'accès au pore proche de 10 μm ;
- la disparition du pic de la gamme de pores principale ;
- l'apparition de pores de rayons d'accès inférieurs à 0,02 μm et atteignant jusqu'à 0,005 μm .

Le pic situé à un rayon de 10 μm coïncide avec les pics des courbes porosimétriques à partir du cycle 2 et particulièrement visible au cycle 7 (Figure 5-13). Or, ce pic a été attribué, pour les échantillons altérés en laboratoire à la porosité liée aux fissures. Or la valeur de la porosité liée aux fissures est proche de 0,8%, soit la totalité de la porosité de l'échantillon, il est donc très probable que **ce pic corresponde également à la porosité liée aux fissures**.

La disparition du pic de la gamme de pores principale signifie que ces vides ont été remplis. Or, nous avons vu sur la Figure 5-16 que les vides sont remplis de calcite re-précipitée à l'échelle de l'échantillon. Nous pouvons donc extrapoler cette observation à l'échelle des pores du calcaire au faciès très altéré. En outre, l'apparition de pores de rayon inférieurs à 0,02 μm rejoint cette idée de **comblement des vides par de la calcite dissoute et re-précipitée**. En effet, il reste quelques pores non entièrement comblés dont le rayon d'accès a donc fortement diminué.

Ainsi, les courbes porosimétriques des échantillons altérés sur site rejoignent les observations faites sur les échantillons altérés en laboratoire et apportent des compléments d'information :

- le faciès peu altéré présente les mêmes courbes que les échantillons altérés en laboratoire pour le début de la phase 1 de fissuration ;
- le faciès altéré présente des variations semblables à celles des échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 2 d'élargissement des pores ;
- le faciès très altéré présente les mêmes pics associés à la porosité liée aux fissures que les échantillons altérés en laboratoire auxquels s'ajoutent des indices confirmant l'idée d'un comblement des vides par de la calcite dissoute et re-précipitée.

Enfin, les observations faites sur les courbes issues de l'essai de porosimétrie au mercure vont être complétées par les observations faites au microscope électronique à balayage. Les vues d'ensemble de la microstructure de ces différents faciès sont données dans la Figure 5-18.

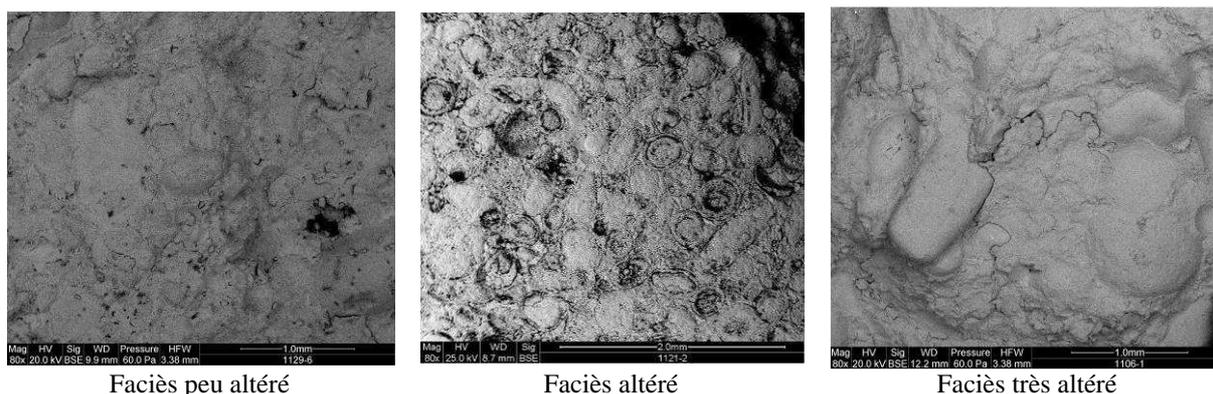


Figure 5-18 Vue d'ensemble de la microstructure des différents faciès altérés naturellement pour le calcaire de Chamesson

Pour le faciès peu altéré, nous notons la présence de vides localisés dans la matrice, **attribuables à la dissolution** d'après le Chapitre 4 (4.1.2), mais aucune fissure n'est visible.

Pour le faciès altéré, une forte porosité autour des oolithes est observable, là aussi une **modification plutôt attribuable à la dissolution** d'après le Chapitre 4 (4.1.2).

Enfin, pour le faciès très altéré, aucune porosité n'est observable, par contre, **quelques fissures** sont visibles dans la microstructure.

Les observations au microscope électronique montre que :

- les faciès peu altéré et altéré ne présentent que des effets de la dissolution ;
- le faciès très altéré présente quelques fissures et une porosité quasi inexistante.

5.2.2.3. Synthèse des degrés d'altération

Le Tableau 5-5 reprend l'ensemble des observations de l'altération faites pour les échantillons provenant des blocs prélevés sur site présentant des faciès plus ou moins altérés.

Images des surfaces « déroulées » au scanner			Courbes porosimétriques		Images MEB	
Observations	Phase d'altération	Observations	Phase d'altération	Observations	Phase d'altération	
Faciès peu altéré	Pas de fissures	Début du processus d'altération	Diminution de la quantité de pores	Début de la phase 1	Vides localisés dans la matrice de dissolution	Début du processus d'altération
Faciès altéré	Fissures (pas en surface)	Phase 1 au moins	Augmentation de la quantité de pores	Début de la phase 2	Vides autour des oolithes	Phase 2
Faciès très altéré	Fissures remplies de calcite	Après la phase 2	Augmentation de la quantité de fissures Comblement des pores	Après la phase 2	Présence de fissures	Phase 1 au moins

Tableau 5-5 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des observations de l'altération sur les blocs des faciès plus ou moins altérés prélevés sur site pour le calcaire de Chamesson. La phase d'altération correspond aux phases décrites dans le paragraphe 5.2.1.4.

Le faciès peu altéré rejoint les observations de l'altération faites sur les échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 1 du processus d'altération.

Le faciès altéré rejoint les observations faites sur les échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 2.

Le faciès très altéré présente une phase du processus d'altération postérieure à celles observées sur les échantillons altérés en laboratoire. On peut la considérer comme une phase 3

où les vides (fissures et pores) sont comblés par de la calcite re-précipitée, suite à la phase 2 d'élargissement des pores.

Les estimations des degrés d'altération des échantillons prélevés sur site sont donc confirmées par les observations de l'altération en laboratoire. Le faciès peu altéré correspond au calcaire présentant le plus faible degré d'endommagement, le faciès très altéré correspond au calcaire présentant le plus haut degré d'endommagement et le faciès altéré correspond au calcaire avec un degré d'endommagement intermédiaire.

5.2.3. Conclusion

Suite aux mesures et observations réalisées sur les échantillons ayant subi les cycles annuels d'altération accélérés et sur les échantillons altérés provenant du terrain, il est possible de mieux connaître le processus d'altération du calcaire de Chamesson.

Ce processus s'effectue en phases successives :

- phase 1 : propagation des fissures (jusqu'au cycle 3 d'un point de vue mécanique) ;
- phase 2 : élargissement des vides (fissures et pores) ;
- phase 3 : comblement des vides (fissures et pores) par la calcite dissoute.

Les phases 1 et 2 ont été observées sur les échantillons altérés en laboratoire et confirmées par les observations réalisées sur les échantillons prélevés sur site correspondant aux faciès peu altéré et altéré. Par contre, deux différences ont été observées entre les observations en laboratoire et les observations in situ :

- la phase 1 de fissuration pour les faciès peu altéré et altéré semble **moins prononcée** que sur les échantillons altérés en laboratoire ;
- la phase 3 n'a **pas été observée sur les échantillons altérés en laboratoire** mais sur les échantillons prélevés sur site correspondant au faciès très altéré.

5.3. *Processus d'altération de la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon*

Le cycle annuel d'altération accéléré déterminé pour la Pierre de Lens est donné dans le Tableau 2-11. Il est constitué de 7 jours de dissolution et de 8 cycles de gel-dégel.

5.3.1. Endommagement par cycles annuels d'altération accélérés

5.3.1.1. Propriétés mécaniques

L'analyse du comportement de la Pierre de Lens consiste tout d'abord à observer l'évolution de ses propriétés mécaniques, attestant de l'endommagement de l'échantillon.

Regardons d'abord l'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés (Figure 5-19), mesure de référence pour toutes les expérimentations de ce travail de thèse.

Les valeurs obtenues présentent une très grande dispersion, surtout entre les cycles 7 et 11, bien qu'il s'agisse de mesures réalisées sur les 4 échantillons les plus endommagés (d'après leur fréquence de résonance) tous les 2 cycles. Cette dispersion traduit l'**hétérogénéité du comportement** de la Pierre de Lens à l'échelle de l'éprouvette.

Une baisse de 100% (ou proche de 100%) de la fréquence de résonance traduit la rupture totale du contact entre les deux extrémités de l'échantillon : l'échantillon est cassé en 2, il ne peut plus entrer en résonance.

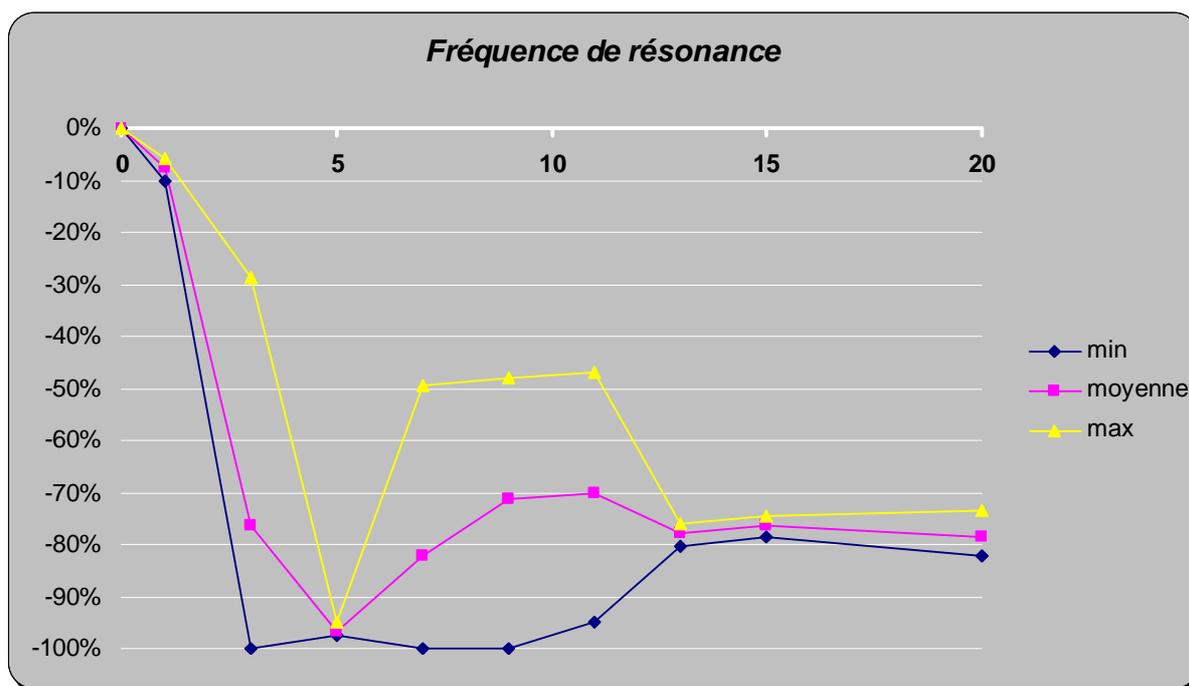


Figure 5-19 Evolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Malgré la dispersion des résultats, **trois phases** dans l'altération ressortent de l'évolution de la fréquence de résonance dans la Figure 5-19 :

- phase 1 : jusqu'au cycle 5, la fréquence de résonance **diminue considérablement** atteignant une valeur moyenne quasi nulle pour les 4 échantillons du cycle 5, c'est-à-dire la rupture des échantillons ;
- phase 2 : entre les cycles 7 et 11, l'évolution de la fréquence de résonance présente une **grande dispersion** (écart de 50 % entre les valeurs minimale et maximale) et une **stabilisation** des valeurs minimale (autour de -100%) et maximale (autour de -50%) ;
- phase 3 : à partir du cycle 13, les valeurs sont **homogènes** et la fréquence de résonance **se stabilise** entre -70 et -80%.

La phase 1, où la fréquence de résonance baisse considérablement, traduit une **déstructuration importante du squelette rocheux**.

Notons que pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson, cette baisse est également observée jusqu'au cycle 3 mais elle est plus modérée, puisque la rupture des échantillons n'est pas atteinte (5.2.1.1). **La déstructuration du squelette rocheux semble donc se faire plus facilement pour la Pierre de Lens que pour le calcaire de Chamesson lors de la phase 1.**

En outre, les phases 1 et 2 montrent une forte dispersion des résultats. D'ailleurs, entre les cycles 3 et 11, la diminution minimale de la fréquence de résonance est comprise entre -90% et -100%. La Pierre de Lens présente donc des échantillons très sensibles aux cycles d'altération accélérés alors que d'autres échantillons, plus résistants, voient leur fréquence de résonance diminuer de moitié uniquement, même au cycle 11. La Pierre de Lens est donc **constituée de zones très résistantes et de zones très fragiles**, c'est-à-dire des zones où le squelette rocheux est très bien « soudé » à la roche et des zones où il se rompt très facilement. Les phases 2 et 3 présentent une évolution constante de la fréquence de résonance, **la déstructuration du squelette rocheux ne semble plus évoluer.**

La phase 3, dans laquelle il ne reste que les échantillons les plus « résistants » du fait de notre choix du cas le plus défavorable, ne présente **plus de dispersion** au niveau des évolutions de

la fréquence de résonance. Cette remarque montre que le comportement des derniers échantillons sacrifiés est homogène.

L'évolution de la fréquence de résonance présente une forte dispersion entre les valeurs obtenues pour les différents échantillons sacrifiés jusqu'au cycle 11. Cette dispersion traduit une hétérogénéité de la microstructure de ce calcaire. De cette hétérogénéité, trois phases ressortent :

- forte baisse hétérogène jusqu'au cycle 5 ;
- stabilisation hétérogène entre les cycles 7 et 11 ;
- stabilisation homogène à partir du cycle 13.

La déstructuration du squelette rocheux lors de la 1^{ère} phase semble se faire plus facilement pour la Pierre de Lens que pour le calcaire de Chamesson.

Les résultats mettent en évidence des zones fragiles et des zones résistantes, à l'échelle de l'échantillon.

Regardons maintenant l'évolution de la vitesse du son relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés (Figure 5-20). Contrairement à la fréquence de résonance, l'évolution est homogène, compte-tenu de la dispersion des résultats et de la précision de la mesure définie au Chapitre 3 (3.2.1.1). La diminution de la vitesse du son se fait selon une courbe logarithmique. On peut distinguer **3 phases** :

- phase 1 : jusqu'au cycle 3, la vitesse du son **baisse assez rapidement** ;
- phase 2 : du cycle 5 au cycle 13, la vitesse du son **diminue plus lentement** ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, la vitesse du son **se stabilise** autour de -50%.

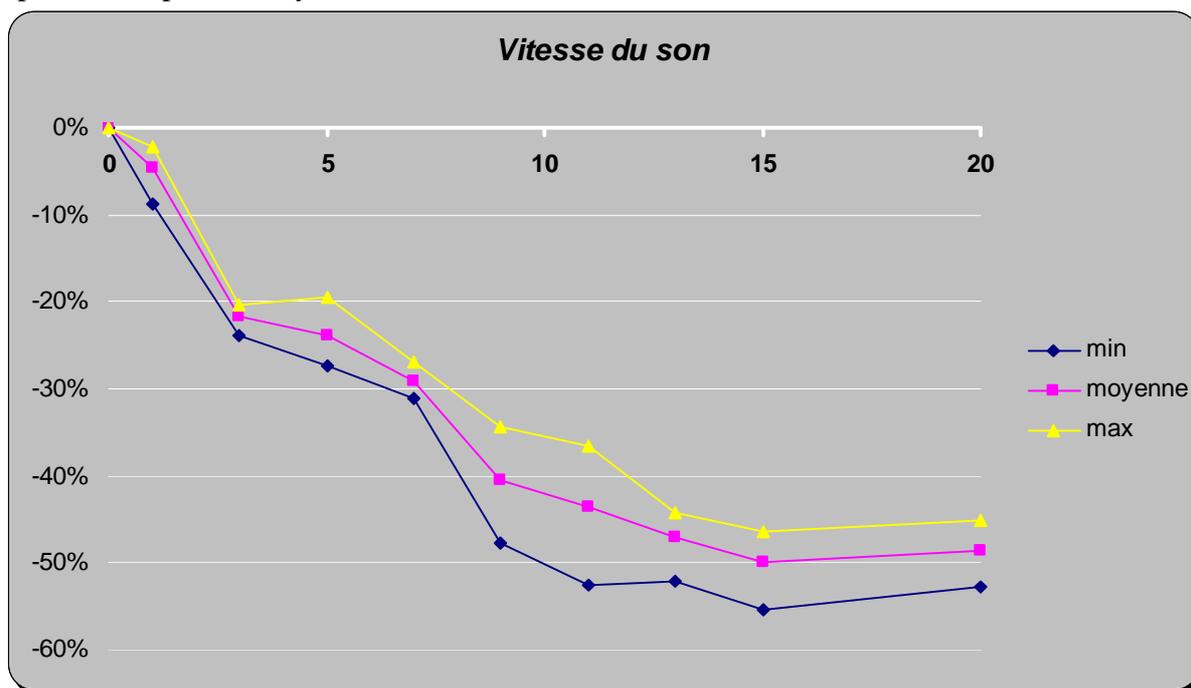


Figure 5-20 Evolution de la vitesse du son en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

La phase 1 de la vitesse du son rejoint la phase 1 de la fréquence de résonance, même si pour la fréquence de résonance cette phase dure jusqu'au cycle 5. Tout comme observé pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson (5.2.1.1), cette diminution peut être attribuée à la **déstructuration du squelette rocheux**.

Au cours de la phase 2, la baisse plus modérée de la vitesse du son traduit un **élargissement des vides**, comme vu pour les échantillons altérés en laboratoire du calcaire de Chamesson (5.2.1.1).

La phase 3 correspond à une stabilisation de la vitesse du son et de la fréquence de résonance. Elle traduit donc une **stabilisation de l'évolution du squelette rocheux**

La vitesse du son met en évidence des phases très proches de celles de la fréquence de résonance. En plus de traduire l'évolution de la structure du squelette rocheux, la vitesse du son traduit l'élargissement des vides. A partir du cycle 15, aucune évolution ne semble visible.

Des mesures de la vitesse du son, nous avons déterminé l'évolution de l'indice de continuité pour chaque cycle annuel d'altération accéléré. A partir de cette valeur et de celle de la porosité, il est possible de connaître la part de la porosité liée aux pores à celle liée aux fissures (Chapitre 3, 3.2.1.2). Les valeurs obtenues à chaque cycle sont données dans la Figure 5-21 pour la porosité liée aux pores et dans la Figure 5-22 pour la porosité liée aux fissures.

Au niveau de la porosité liée aux pores (Figure 5-21), son évolution est négative et homogène jusqu'au cycle 9. A partir du cycle 11, son évolution devient très hétérogène, avec des évolutions positives et d'autres négatives.

Concernant la porosité liée aux fissures (Figure 5-22), elle présente une évolution homogène. Jusqu'au cycle 13, elle augmente en deux phases : une augmentation rapide jusqu'au cycle 3 puis une augmentation plus modérée entre les cycles 5 et 13. Puis elle se stabilise à partir du cycle 15.

Donc, au cours de la phase 1 (décrite pour la fréquence de résonance et la vitesse du son), la porosité liée aux fissures augmente fortement. Lors de la même phase, la porosité liée aux pores diminue. Donc, tout comme pour les échantillons altérés du calcaire de Chamesson (5.2.1.1), **la propagation importante des fissures de la phase 1 se fait au détriment des pores présents dans la roche.**

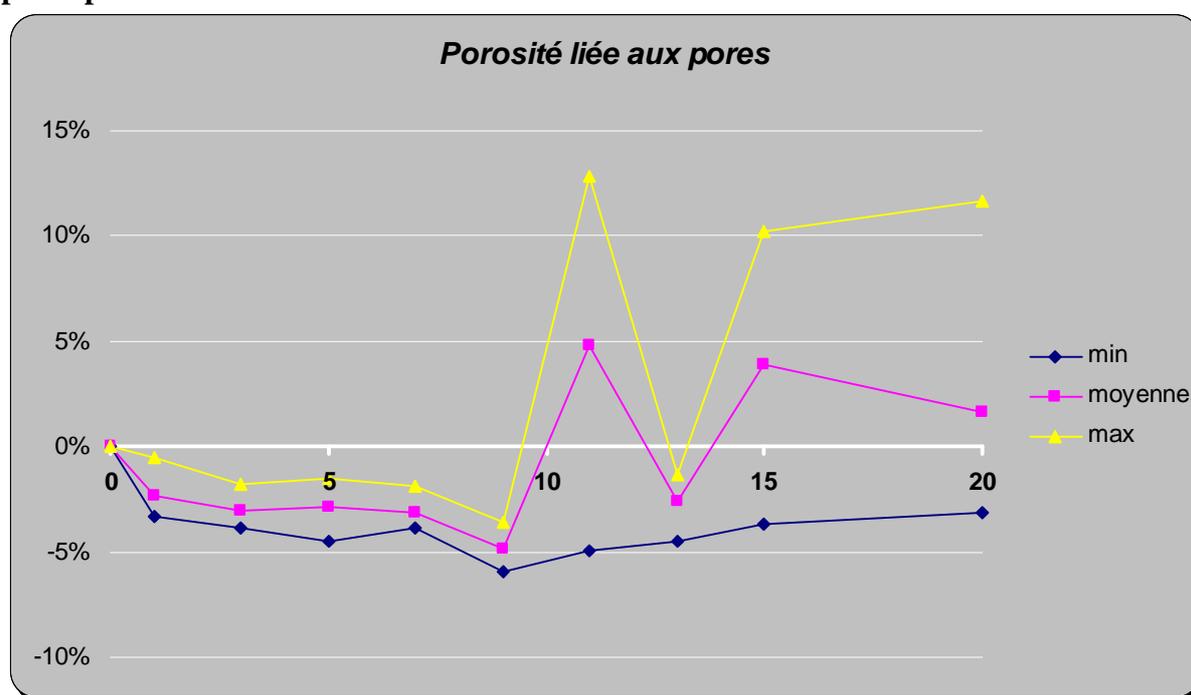


Figure 5-21 Evolution de la porosité liée aux pores en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens (Tourenq et al., 1971). Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Au cours de la phase 2 (décrite pour la fréquence de résonance et la vitesse du son), la porosité liée aux fissures continue à augmenter mais plus lentement qu'à la phase 1. Au cours de cette phase, la porosité liée aux pores présente une évolution négative puis dès le cycle 11, son évolution est très hétérogène (soit positive, soit négative). Pendant cette phase, tout comme pendant la phase 2 du calcaire de Chamesson, la fissuration se stabilise

progressivement. Par contre, l'évolution de la porosité liée aux pores n'est pas la même. Il semblerait que certains échantillons voient leur porosité liée aux pores augmenter et d'autres la voit rester négative. Cette hétérogénéité de comportement rejoint les observations faites sur la phase 2 de la fréquence de résonance. Il y a donc pendant cette phase un **élargissement des fissures et des phénomènes hétérogènes d'élargissement et de rétrécissement des pores**. Pour la phase 3, l'évolution des **porosités liée aux pores et aux fissures se stabilise**.

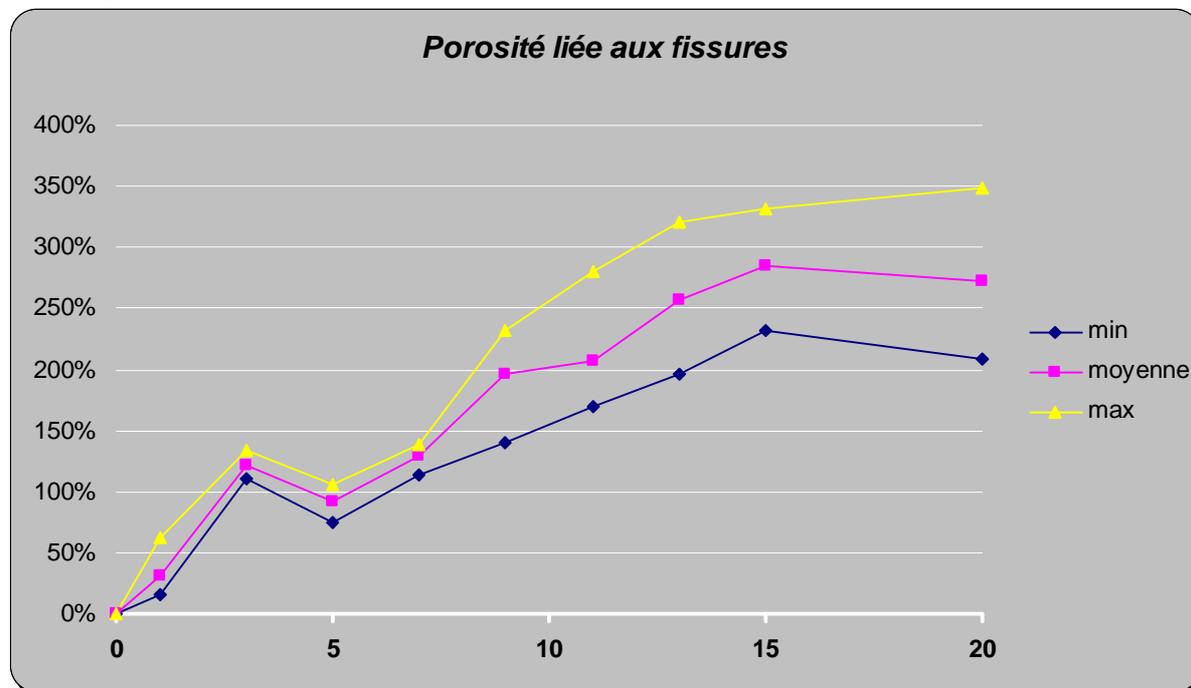


Figure 5-22 Evolution de la porosité liée aux fissures en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens (Tourenq et al., 1971). Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Lors de la phase 1, c'est l'augmentation de la porosité liée aux fissures qui entraîne une forte diminution de la fréquence de résonance et de la vitesse du son.

Concernant la phase 2, la diminution de la vitesse du son plus modérée rejoint l'augmentation plus modérée de la porosité liée aux fissures qui n'affecte pas la valeur de la fréquence de résonance. Il y a donc un élargissement des fissures existantes. L'hétérogénéité de l'évolution de la fréquence de résonance de la phase 2 rejoint l'hétérogénéité de l'évolution de la porosité liée aux pores au cours de cette même phase.

Toutes les évolutions (fréquence de résonance, vitesse du son et porosités liées aux pores et aux fissures) se stabilisent à la phase 3.

Intéressons nous, enfin, à la dernière propriété mécanique de cette étude : la résistance à la compression uniaxiale.

Nous avons mesuré la résistance en compression à chaque cycle sur un échantillon à l'état sec et un échantillon à l'état saturé à 100%. Ces deux états présentent les extrema des valeurs de résistance en compression en fonction du degré de saturation : à l'état sec, la roche a une résistance maximale, à l'état saturé à 100%, elle a une résistance quasi-minimale (cf. Chapitre 3, 3.2.3.2). Les incertitudes pour ces mesures sont présentées dans le Chapitre 3 (3.2.3.2).

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 5-23.

L'interprétation de ces résultats n'est pas aisée dans la mesure où les échantillons de la Pierre de Lens ont des porosités initiales avec des variations importantes entre elles. Nous avons donc cherché une relation entre porosité initiale n et résistance à la compression initiale R_C à l'état sec. Cette relation, établie à partir de 5 échantillons de Pierre de Lens, est la suivante :

$$R_C = -6,51 \times n + 154,08, r^2 = 0,85$$

Le coefficient de corrélation r^2 n'est pas excellent mais cette relation permet d'analyser les résultats obtenus (Figure 5-23) en déterminant des valeurs relatives (Figure 5-24).

Nous avons essayé d'établir la même relation pour les échantillons saturés mais le coefficient de corrélation n'est pas satisfaisant (il vaut 0,60) donc nous ne l'utiliserons pas.

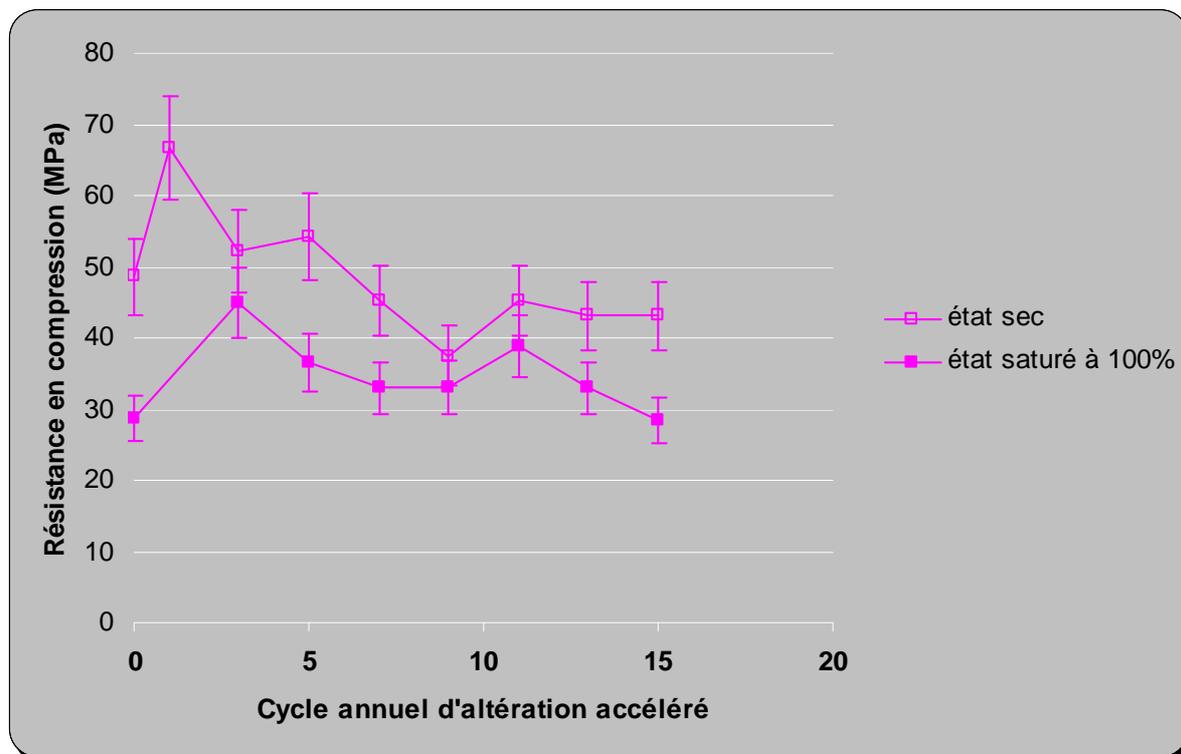


Figure 5-23 Evolution de la résistance à la compression uniaxiale en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens. Valeurs pour un échantillon sec et un échantillon saturé à 100%. L'incertitude correspond à celle déterminée dans le Chapitre 3 (3.2.3.2).

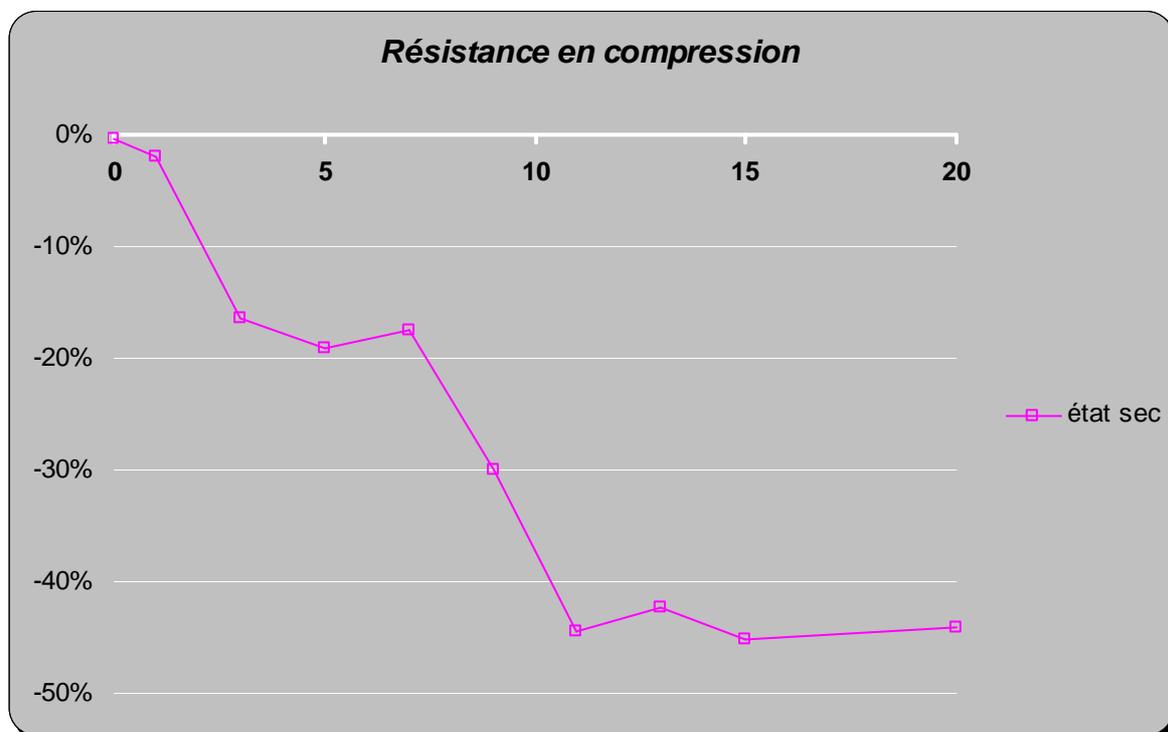


Figure 5-24 Evolution de la résistance en compression uniaxiale en valeur relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour la Pierre de Lens. Chaque point représente un échantillon.

L'évolution de la résistance en compression uniaxiale pour des échantillons secs en fonction des cycles annuels d'altération accélérés est donnée dans la Figure 5-24.

Deux phases ressortent de cette représentation :

- phase 1, jusqu'au cycle 13 : **la résistance en compression diminue par palier**, il y a une alternance entre la baisse de la résistance à la compression et la stabilisation de la valeur ;
- phase 2, à partir du cycle 15 : **la résistance à la compression se stabilise** à environ -45%.

La baisse par palier (et la stabilisation) de la résistance à la compression coïncide avec l'augmentation (et la stabilisation respectivement) de la porosité liée aux fissures (Figure 5-22) et la baisse de la vitesse du son (Figure 5-20). Cette baisse est donc liée à la fissuration du squelette rocheux et à l'élargissement des fissures. A partir du moment où la porosité liée aux fissures ne varie plus, la résistance à la compression non plus.

La diminution de la résistance en compression en fonction des cycles annuels d'altération accélérés ne s'arrête qu'une fois que la porosité liée aux fissures ne varie plus. La fissuration a donc un effet très néfaste sur l'endommagement mécanique de la Pierre de Lens

Le Tableau 5-6 reprend l'ensemble des tendances observées au niveau de l'évolution des propriétés mécaniques et des porosités liées aux pores et aux fissures.

Compte-tenu de ces observations, la phase 1 peut être considérée comme une phase de fissuration, la phase 2 comme une phase d'élargissement des vides et où l'hétérogénéité du calcaire ressort dans son comportement et la phase 3 comme une phase de stabilisation.

	Porosité liée aux pores	Porosité liée aux fissures	Fréquence de résonance	Vitesse du son	Résistance à la compression
Phase 1 : Fissuration	Diminution	Augmentation forte	Forte diminution	Forte baisse	Diminution par palier
Transition	Cycle 3 ou 5				
Phase 2 : élargissement des vides et comportement hétérogène	Oscillations et grande dispersion	Augmentation modérée	Stabilisation et grande dispersion	Diminution plus modérée	Diminution par palier
Transition	Cycle 13 ou 15				
Phase 3 : évolution stable	Stabilisation et grande dispersion	Stabilisation	Stabilisation homogène	Stabilisation	Stabilisation

Tableau 5-6 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des évolutions des propriétés mécaniques et des porosités liées aux pores et aux fissures pour les échantillons altérés en laboratoire de la Pierre de Lens

5.3.1.2. Propriétés physiques

L'analyse des propriétés physiques vient compléter les observations faites sur les évolutions des propriétés mécaniques.

Concernant la porosité à l'eau, l'évolution de la porosité relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés est reportée dans la Figure 5-25. Plusieurs phases ressortent des résultats :

- phase 1 : jusqu'au cycle 9 (mis à part le cycle 1), la porosité **augmente lentement** et présente des valeurs peu dispersées ;
- phase 2 : du cycle 11 au cycle 13, la porosité **augmente fortement** par oscillations ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, la porosité **se stabilise, voire diminue**.

Au cycle 1, la porosité diminue légèrement **ceci s'explique par la différence entre l'augmentation de la porosité liée aux fissures (Figure 5-22) et la diminution de la porosité liée aux pores (Figure 5-21)**.

Lors de la phase 1, la porosité augmente de façon modérée. Or, d'après l'allure des courbes de la Figure 5-21 sur la porosité liée aux pores et de la Figure 5-22 sur la porosité liée aux

fissures, **cette hausse de porosité rejoint la hausse de porosité liée aux fissures**. Cette phase est donc liée à la fissuration.

Lors de la phase 2, les variations de la porosité **coïncide avec les variations de la porosité liée aux pores** (Figure 5-21).

Lors de la phase 3, la porosité diminue légèrement et présente une forte dispersion.

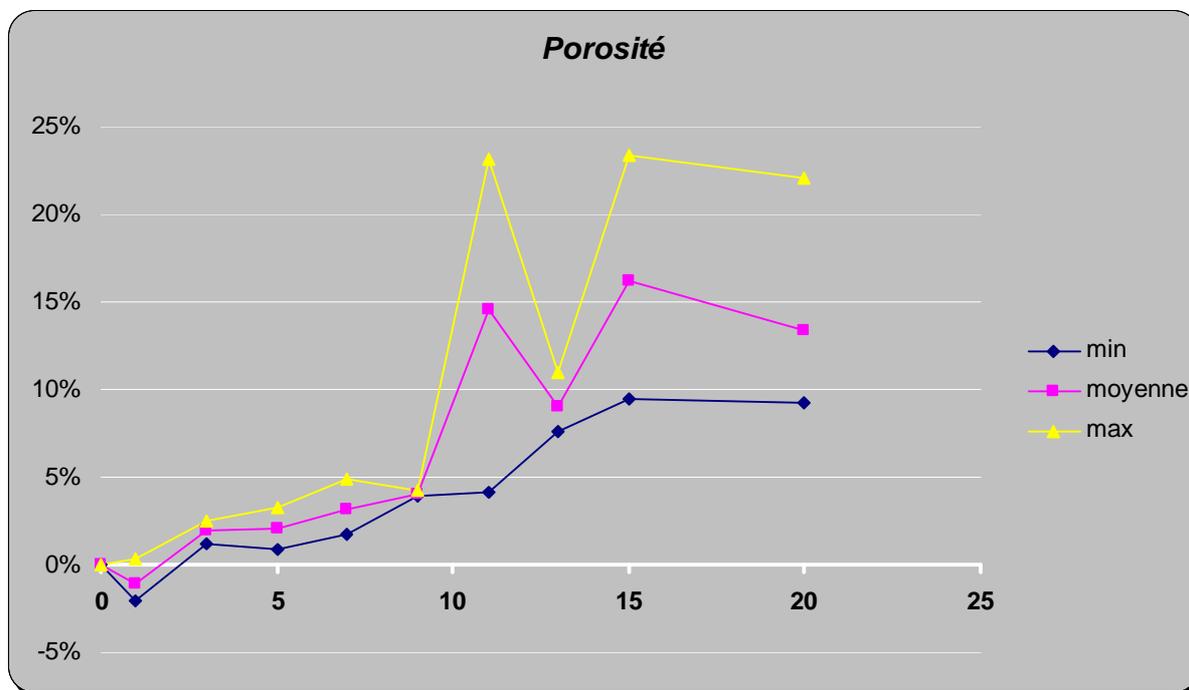


Figure 5-25 Evolution de la porosité à l'eau en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour Pierre de Lens. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

L'évolution de la porosité présente trois phases. Elle suit dans un premier temps l'évolution de la porosité liée aux fissures puis celle de la porosité liée aux pores dès que celle-ci présente de fortes variations.

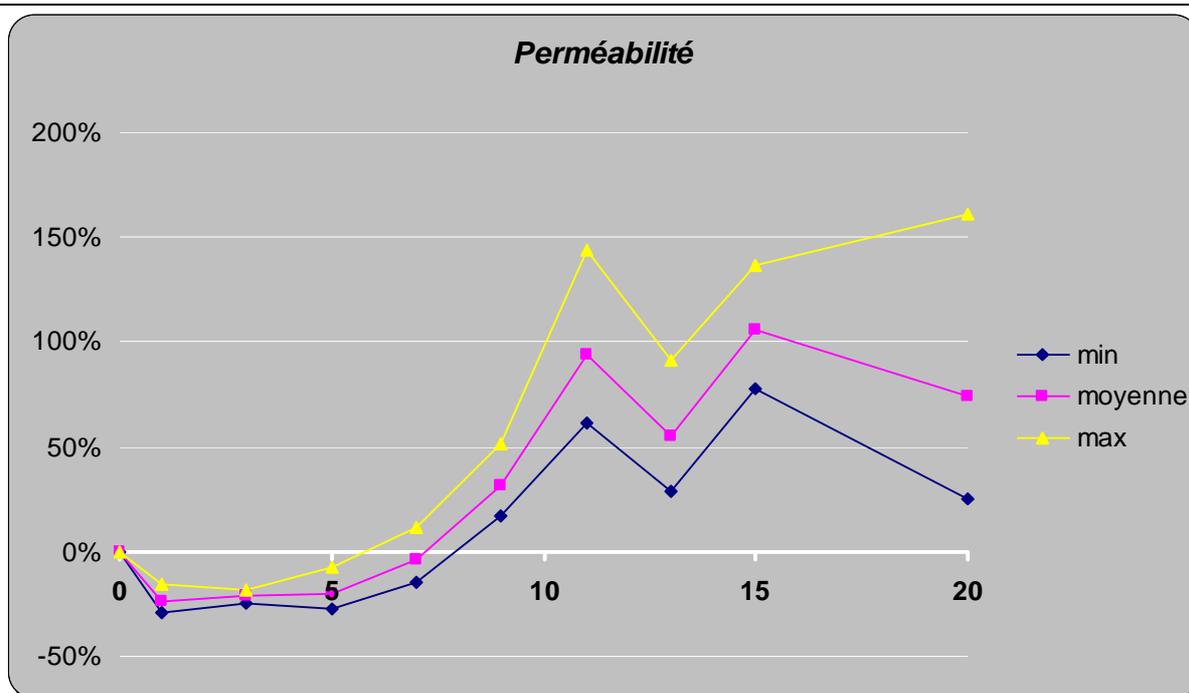


Figure 5-26 Evolution de la perméabilité en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour Pierre de Lens. Valeurs obtenues par des mesures sur 4 échantillons.

Regardons maintenant l'évolution de la perméabilité en fonction des cycles annuels d'altération accélérés (Figure 5-26). Les résultats ne présentent pas de forte dispersion et peuvent donc être interprétés, compte-tenu de la sensibilité de cette mesure déterminée au Chapitre 3 (3.3.2.1). L'évolution de la perméabilité en fonction des cycles annuels d'altération accélérés fait apparaître **3 phases** :

- phase 1 : jusqu'au cycle 9 (mis à part le cycle 1), la perméabilité **augmente** ;
- phase 2 : entre les cycles 11 et 13, la perméabilité **augmente fortement par oscillations** jusqu'à +106%, soit une perméabilité moyenne de 0,33 mD ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, la perméabilité **diminue légèrement avec une forte dispersion**.

L'évolution de la perméabilité suit celle de la porosité, contrairement à ce qui a été observée pour le calcaire de Chamesson où l'évolution de la perméabilité est corrélée à l'évolution de la porosité liée aux fissures uniquement (5.2.1.2). Ceci souligne le fait de la forte déstructuration du squelette rocheux déjà mentionnée concernant les résultats de la fréquence de résonance

L'évolution de la perméabilité est liée à l'évolution de la porosité. Elle confirme le fait que la Pierre de Lens a une plus grande déstructuration du squelette rocheux que le calcaire de Chamesson.

Le Tableau 5-7 reprend l'ensemble des tendances observées au niveau de l'évolution des propriétés physiques et des porosités liées aux pores et aux fissures.

	Porosité liée aux pores	Porosité liée aux fissures	Porosité	Perméabilité
Phase 1 : Fissuration	Diminution	Augmentation forte	(Cycle 1 = diminution) Augmentation lente	(Cycle 1 = diminution) Augmentation
Transition	Cycle 3 ou 5		Cycle 7	
Phase 2 : élargissement des vides et comportement hétérogène	Oscillations et grande dispersion	Augmentation modérée	Augmentation forte par oscillations	Augmentation forte par oscillations
Transition	Cycle 13 ou 15		Cycle 13	
Phase 3 : évolution stable	Stabilisation et grande dispersion	Stabilisation	Légère diminution et forte dispersion	Légère diminution et forte dispersion

Tableau 5-7 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des évolutions des propriétés physiques et des porosités liées aux pores et aux fissures pour les échantillons altérés en laboratoire pour la Pierre de Lens

Compte-tenu des observations, la phase 1 peut être considérée comme une phase de fissuration, la phase 2 comme une phase d'élargissement des vides et où l'hétérogénéité du calcaire ressort dans son comportement et la phase 3 comme une phase de stabilisation avec une forte dispersion qui entraîne une légère diminution de la porosité et de la perméabilité.

5.3.1.3. Observations de l'altération

L'observation de l'altération vient s'ajouter aux remarques et conclusions faites sur les propriétés mécaniques et physiques pour les confirmer ou bien les nuancer.

A l'échelle de l'éprouvette

Selon la méthode des surfaces « déroulées » au scanner décrite dans le Chapitre 3 (3.4.1). Pour le cycle 1, aucune fissure n'était présente en surface des échantillons scannés, ce cycle n'est donc pas présent sur les figures qui suivent. Dans la Figure 5-27, les courbes représentant les fissures présentes à chaque cycle ont été superposées pour visualiser la propagation des fissures en surface des échantillons. Cette représentation est uniquement qualitative.

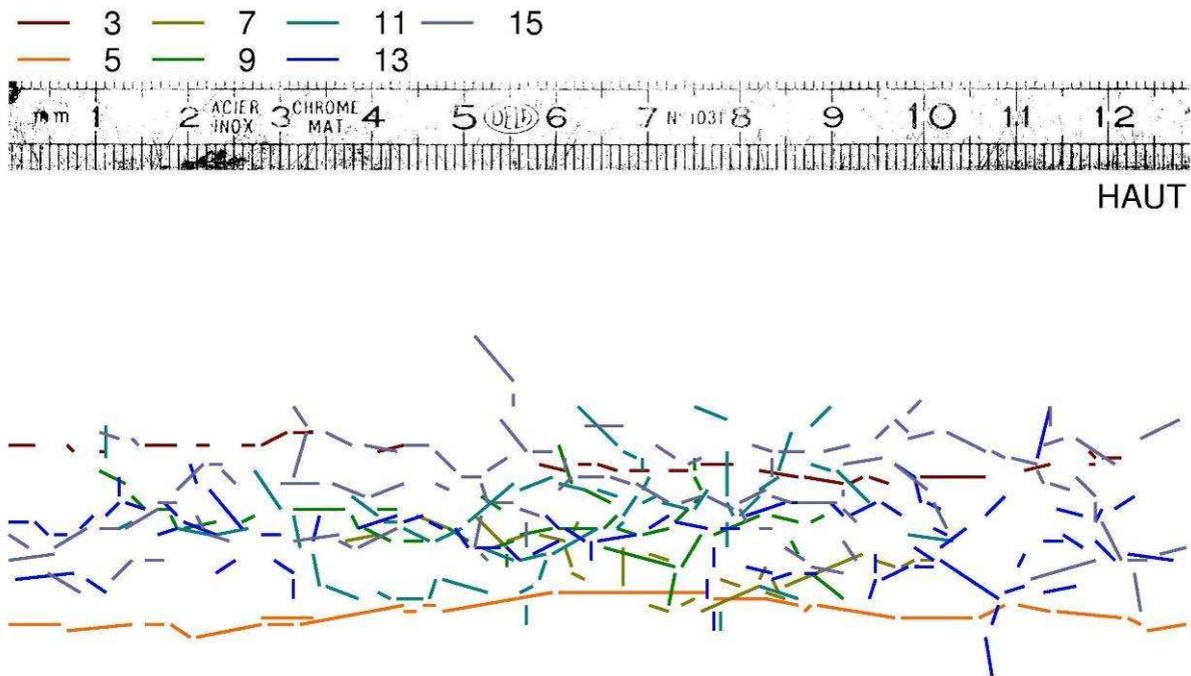


Figure 5-27 Représentations en courbes linéaires par morceaux, des fissures présentes en surface des échantillons scannés du cycle 3 au cycle 15 pour la Pierre de Lens. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

On voit que la **densité de fissuration est assez faible mais augmente** avec les cycles. Les fissures se situent dans la partie centrale de l'éprouvette.

De plus, la propagation des fissures pour les cycles 3 et 5 est différente de celle des cycles suivants. En effet, pour les cycles 3 et 5, la propagation des fissures se fait dans une unique direction, la direction horizontale, au centre de l'échantillon et de manière continue. Par contre, dès le cycle 7, la propagation des fissures se fait dans toutes les directions. Cette distinction rejoint les observations faites sur l'évolution de la fréquence de résonance : **la fissuration horizontale quasi-continue dans premiers cycles justifie la brusque diminution de la fréquence de résonance**. La fissuration horizontale s'effectuant sur toute la longueur « déroulée » de l'échantillon, l'éprouvette est séparée en deux et alors la fréquence de résonance s'annule.

Cette représentation permet d'obtenir par analyse d'images pour chaque portion linéaire une orientation et une longueur. La Figure 5-28 présente la longueur totale, moyenne entre les 4 échantillons sacrifiés, des fissures pour une gamme d'orientation donnée (tous les 10°). Ainsi, la représentation laisse apparaître 3 phases dans la fissuration :

- phase 1 : jusqu'au cycle 5, on visualise la **propagation horizontale des fissures** ;
- phase 2 : à partir du cycle 7, les fissures sont moins longues et leur propagation se fait plutôt **dans toutes les directions** ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, la longueur et l'orientation des fissures **ne semblent plus évoluer**.

Ces phases rejoignent **l'évolution de la vitesse du son** (Tableau 5-6): quand la propagation des fissures est importante, la vitesse du son baisse de façon importante, quand celle-ci est plus modérée, la vitesse du son baisse de façon plus modérée également.

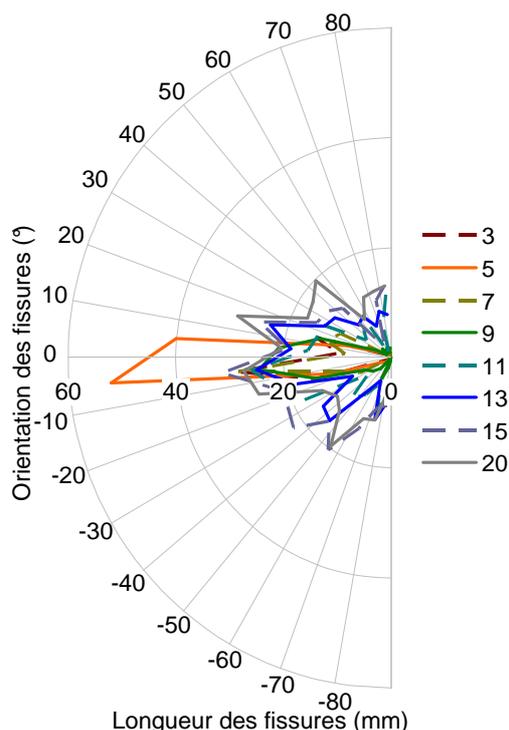


Figure 5-28 Représentation polaire de l'orientation et de la longueur des fissures obtenues par analyse d'images à partir des surfaces des échantillons « déroulées » au scanner pour la Pierre de Lens. 0° correspond à l'orientation horizontale, 90° à l'orientation verticale vers le haut et -90° à l'orientation verticale vers le bas. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

La propagation des fissures en surface des échantillons de la Pierre de Lens est assez limitée mais a un impact sur l'endommagement mécanique de ce calcaire.

A l'échelle de la microstructure

Au niveau de la microstructure, regardons les courbes issues de l'essai de porosimétrie au mercure et les images obtenues par microscopie électronique à balayage.

Pour obtenir les courbes porosimétriques de la Figure 5-29, des échantillons cylindriques de 1 cm de diamètre et de hauteur 1,8 cm ont été carottés au centre des échantillons cylindriques de hauteur 8 cm et de diamètre 4 cm.

Les courbes obtenues (Figure 5-29) présentent des **allures très différentes** au fur et à mesure des cycles. A partir du cycle 9, la structure du réseau poreux, traduite par ces courbes, perd complètement son allure initiale :

- le pic de la gamme de pores principale a disparu ;
- une gamme de pores en quantité assez homogène apparaît avec des rayons atteignant jusqu'à 60 μm .

Le pic de la gamme de pores principale correspond donc à la zone où la structure se modifie de façon très importante. Or, nous avons vu au Chapitre 3 (3.4.2.2) que ce pic correspond aux vides entourant les oolithes. **Ces vides permettent donc à la structure de se modifier de façon très conséquente** : ils offrent de l'espace donnant la possibilité à la structure de se réorganiser. Ceci n'avait pas été observé pour le calcaire de Chamesson qui n'a pas ces vides dans son réseau poreux.

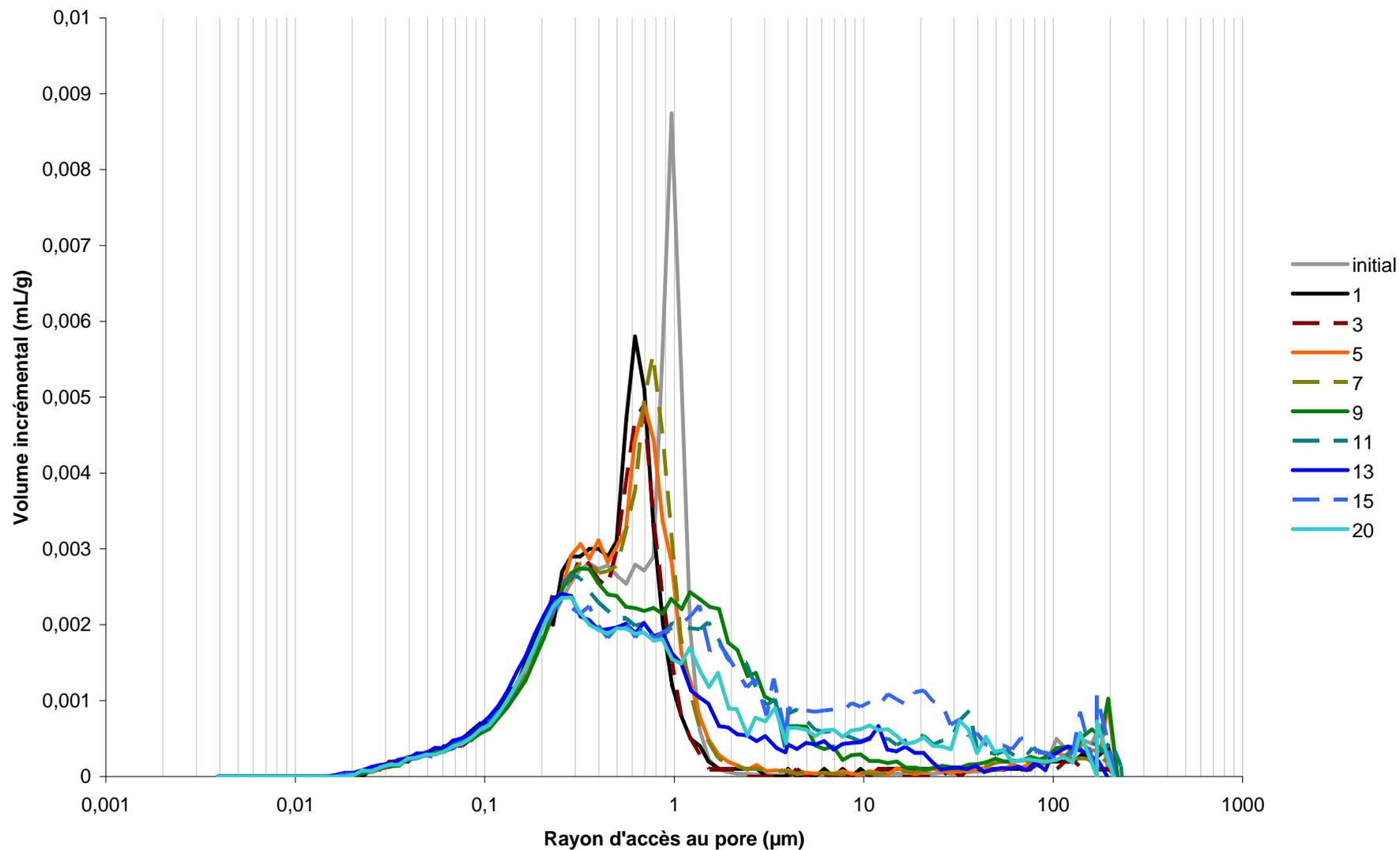


Figure 5-29 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour chaque cycle annuel d'altération accélérés pour la Pierre de Lens. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

Le réseau poreux est **totalemment déstructuré à partir du cycle 9**. Or, c'est à partir de ce cycle que la perméabilité et la porosité augmentent par oscillations (Figure 5-25 et Figure 5-26). Cette perte de structure expliquerait donc ces évolutions par oscillations.

D'après les courbes, les différences au niveau de la structure concernent des variations de :

- la hauteur du pic de la gamme de pores principale ;
- la largeur du pic de la gamme de pores principale ;
- la hauteur de l'épaulemement représentant la gamme de pores secondaire ;
- la quantité de gros pores.

Regardons donc ces variations de plus près.

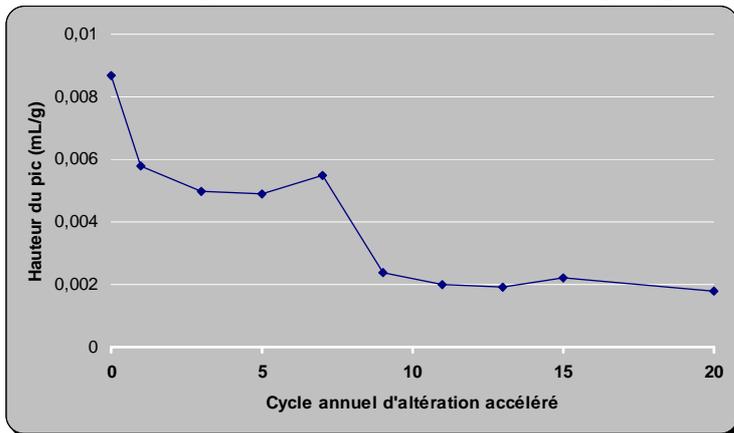


Figure 5-30 Valeur de la hauteur du pic de la gamme de pores principale pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour la Pierre de Lens

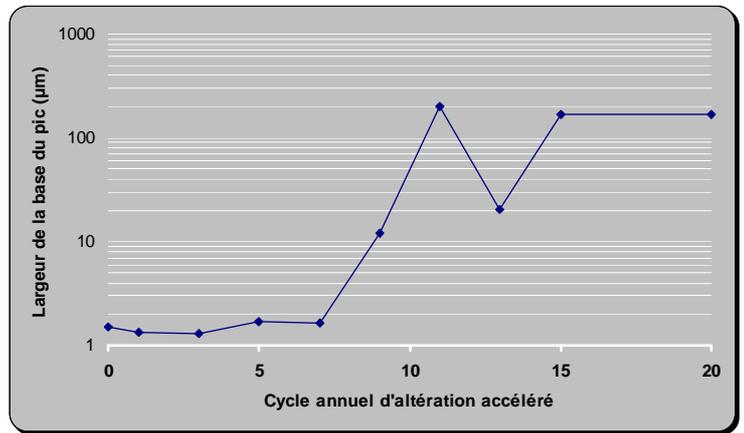


Figure 5-31 Valeur de la largeur de la base du pic de la gamme de pores principale pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour la Pierre de Lens

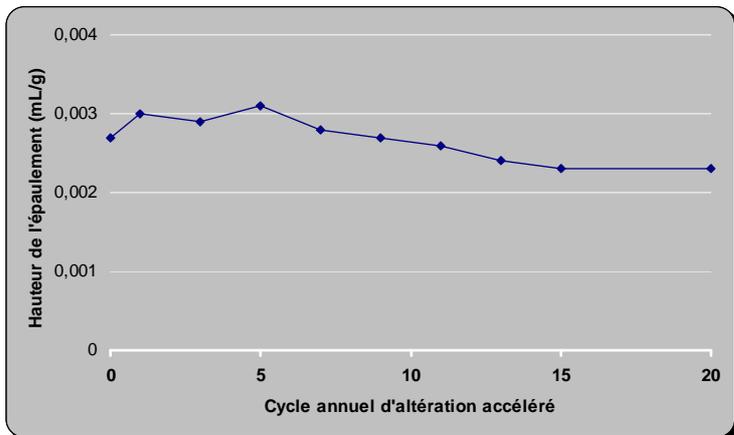


Figure 5-32 Valeur de la hauteur de l'épaulemement de la gamme de pores secondaire pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour la Pierre de Lens

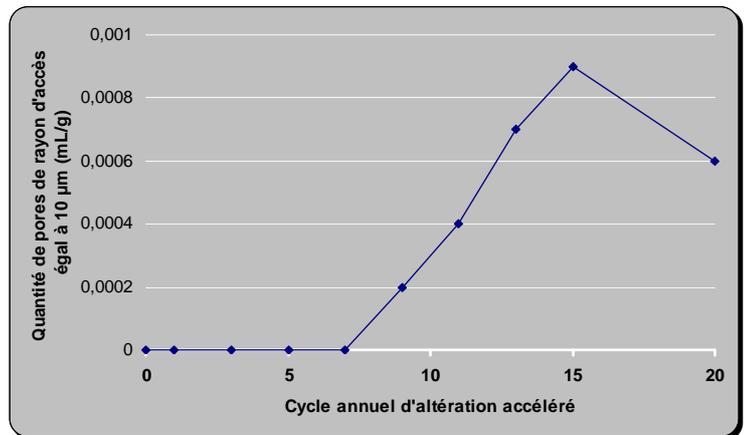


Figure 5-33 Valeur de la quantité de gros pores (rayon d'accès égale à 10µm) pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour la Pierre de Lens

Les valeurs de la hauteur du pic en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-30. La hauteur du pic présente une **diminution par palier** : elle baisse au cycle 1, se stabilise jusqu'au cycle 7, puis baisse à nouveau au cycle 9, puis se stabilise de nouveau. Cette diminution par palier coïncide avec celle de la résistance à la compression (Figure 5-24). La « disparition » du pic de la gamme de pores principale a donc un lien avec la résistance à la compression. Ce pic correspond à une porosité comprise autour des oolithes (Chapitre 3, 3.4.2.2). Or, la résistance en compression est liée à la porosité liée aux fissures (5.3.1.1). Donc, **les fissures apparaissent au niveau des vides entourant les oolithes**.

Les valeurs de la largeur de la base du pic en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-31. La largeur de la base du pic a été calculée en

prenant les valeurs à partir desquelles le volume incrémental est supérieur à 0,0002 mL/g. La largeur de la base du pic présente trois phases :

- phase 1 : jusqu'au cycle 7, légère augmentation de la largeur de la base du pic ;
- phase 2 : du cycle 9 au cycle 13, une forte augmentation par oscillations ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, la largeur se stabilise.

Ces phases d'évolution de la largeur de la base du pic rejoignent fortement les observations des propriétés physiques (porosité et perméabilité). Les variations de la largeur de la base du pic de la gamme de pores principale (à l'échelle de la microstructure) a donc des conséquences directes sur la porosité et la perméabilité (à l'échelle de l'éprouvette). **Les vides (pores et/ou fissures) s'élargissent à partir du cycle 9.**

Les valeurs de la hauteur de l'épaule de la gamme de pores secondaire en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-32. L'évolution de la hauteur de l'épaule présente trois phases :

- phase 1 : jusqu'au cycle 5, les valeurs de la hauteur oscillent et augmentent légèrement ;
- phase 2 : du cycle 7 au cycle 13, la hauteur diminue ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, elle se stabilise.

La phase 1 d'augmentation de la hauteur de l'épaule de la gamme de pores secondaires correspond à la première diminution de la hauteur du pic de la gamme de pores principale. Il paraît donc probable qu'il y ait eu une **redistribution de la taille des pores de la gamme principale** vers des rayons plus petits. Cette diminution a pour effet de diminuer la perméabilité jusqu'au cycle 5 (Figure 5-26). De même, lors de la phase 2, la diminution de la hauteur de cet épaule correspond à une **redistribution de la taille des pores de la gamme secondaire** vers des rayons plus grands : en effet, aucune variation de la quantité de pores n'est observable pour les rayons d'accès inférieurs aux rayons d'accès de cet épaule. Et cet élargissement engendre une augmentation de la perméabilité à partir du cycle 7 (Figure 5-26). Donc l'évolution de la quantité de pores de la gamme de pores secondaires (à l'échelle de la microstructure) est corrélée à celle de la perméabilité (à l'échelle de l'échantillon). Or, ces pores correspondent à la porosité contenue dans les oolithes elles-mêmes (Chapitre 3, 3.4.2.2). Donc **la perméabilité suit, entre autres, les modifications de la porosité contenue dans les oolithes.**

Les valeurs de la quantité de gros pores en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 5-33. Les gros pores sont représentés arbitrairement pour les pores de rayon d'accès égal à 10 µm. Trois phases apparaissent dans cette évolution :

- phase 1 : jusqu'au cycle 5, aucun pore de rayon d'accès de 10 µm n'est présent ;
- phase 2 : entre les cycles 7 et 13, la quantité de pores augmente ;
- phase 3 : à partir du cycle 15, elle diminue.

Encore une fois, ces phases coïncident avec les phases des propriétés physiques et notamment avec l'évolution de la perméabilité (Figure 5-26) : **des gros pores sont présents dans la microstructure à partir du moment où la perméabilité des échantillons augmente.**

Les courbes issues de l'essai de porosimétrie au mercure mettent en évidence les liens entre :

- la hauteur du pic de la gamme de pores principale et la résistance à la compression ;
- la largeur de la base du pic, la quantité de pores de la gamme de pores secondaire et la quantité de gros pores et les propriétés physiques (porosité et perméabilité).

La Pierre de Lens se déstructure progressivement mais de manière irrémédiable dans les premiers cycles causant une redistribution du réseau poreux et l'apparition de pores de plus en plus larges.

L'apparition des fissures se fait au niveau des vides autour des oolithes et cause une déstructuration importante du squelette rocheux.

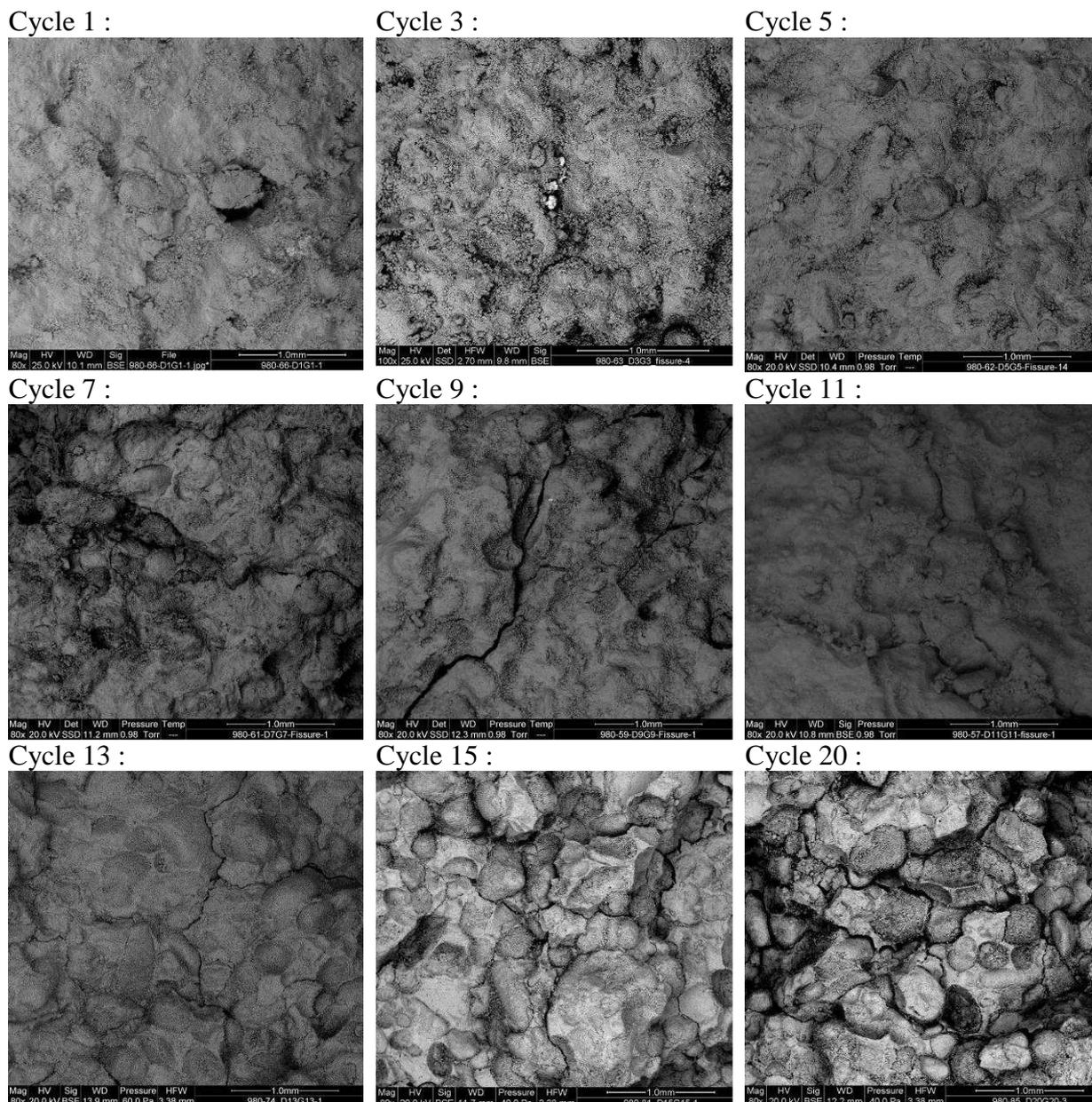


Figure 5-34 Vue d'ensemble de l'état de la Pierre de Lens par microscopie électronique, les fissures se propagent dans la roche et le réseau est détruit

La visualisation de la propagation des fissures et de la déstructuration du réseau poreux est observable au microscope électronique à balayage, avec un faible grossissement (x80). Nous avons reporté les images correspondantes dans la Figure 5-34.

Les fissures (courbes noires) ressortent nettement des images surtout à partir du cycle 7. La déstructuration du réseau poreux s'observe au niveau des oolithes : à partir du cycle 9, des creux apparaissent à la place des oolithes qui se sont détachées de la structure.

Les images au microscope électronique à balayage permettent de visualiser :

- les fissures dès le cycle 7 ;
- la déstructuration du réseau poreux (au niveau des oolithes) dès le cycle 9.

De plus, des « points noirs » ont été observés à l'œil nu dans les zones fissurées des échantillons de la Pierre de Lens à partir du cycle 5.

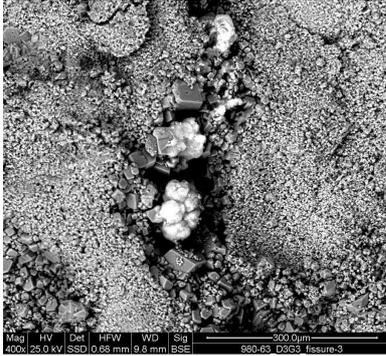


Figure 5-35 Concrétions blanches d'oxydes de manganèse présentes dans les zones fissurées, à l'œil nu ces concrétions correspondent à des points noirs

Ils ne sont pas visibles sur les échantillons non altérés. Ils sont observables au MEB où ils apparaissent sous forme de concrétions blanches (Figure 5-35). Une analyse aux rayons X a révélé que ces concrétions correspondent à des oxydes de manganèse. Ces oxydes se forment en présence d'ions H^+ . Il s'agit donc d'un signe attestant des effets de la dissolution.

La présence d'oxydes de manganèse dans les fissures atteste de la dissolution du squelette rocheux de la Pierre de Lens.

Le Tableau 5-8 reprend l'ensemble des observations de l'altération faites à l'échelle de l'échantillon et de la microstructure.

	Images des surfaces « déroulées » au scanner	Courbes porosimétriques	Images MEB
Phase 1 : Fissuration	Fissuration importante et unidirectionnelle	Diminution et stabilisation de la hauteur du pic, augmentation légère de la largeur de la base du pic, légère augmentation de la hauteur de l'épaule, aucun gros pores présent	Peu de fissures
Transition	Cycle 5 ou 7		
Phase 2 : élargissement des vides et comportement hétérogène	Fissuration modérée et dans toutes les directions	Diminution et stabilisation de la hauteur du pic, forte augmentation de la largeur de la base du pic par oscillations, diminution de la hauteur de l'épaule, augmentation de la quantité de gros pores	Fissures et creux au niveau des oolites
Transition	Cycle 13		
Phase 3 : évolution stable	Stabilisation	stabilisation des hauteurs du pic et de l'épaule et de la largeur de la base du pic, diminution de la quantité de gros pores	Fissures et creux au niveau des oolites plus nombreux

Tableau 5-8 Récapitulatif des observations de l'altération faites pour les échantillons altérés en laboratoire de la Pierre de Lens

Compte-tenu de ces observations, la phase 1 peut être considérée comme une phase de fissuration et de forte déstructuration du squelette rocheux, la phase 2 comme une phase d'élargissement des vides et où l'hétérogénéité du calcaire ressort dans son comportement et la phase 3 comme une phase de stabilisation où le calcaire a atteint un stade ultime de déstructuration.

5.3.1.4. Synthèse des phases du processus d'altération

D'après l'ensemble des conclusions du Tableau 5-6, du Tableau 5-7 et du Tableau 5-8, le processus d'altération de la Pierre de Lens se déroule selon les phases suivantes :

- phase 1 : Fissuration

Cette phase se caractérise par une propagation des fissures conduisant à la rupture de certains échantillons. Il s'agit de la première étape du processus d'altération de la Pierre de Lens.

D'un point de vue mécanique, elle se prolonge jusqu'au cycle 3, voire jusqu'au cycle 5. Par contre, d'un point de vue physique, la fissuration continue jusqu'au cycle 7. Cette différence s'explique par l'évolution de la porosité liée aux pores (Figure 5-3). Elle est négative jusqu'au cycle 7 mais elle augmente à partir du cycle 3. L'augmentation de la porosité liée aux pores atténue donc l'effet mécanique de la fissuration dès le cycle 3 par contre, c'est uniquement lorsqu'elle devient supérieure à la valeur initiale que cette phase de fissuration s'achève.

- phase 2 : Elargissement des vides et comportement hétérogène

Cette phase se caractérise par une modification importante du réseau poreux de la Pierre de Lens et une forte baisse de sa résistance mécanique. Le calcaire s'endommage par fatigue. Cette phase constitue la deuxième étape du processus d'altération.

Elle a un impact sur les propriétés mécaniques et sur la fissuration très atténué par rapport à la phase précédente. Elle se caractérise avant tout par une augmentation de la porosité liée aux pores par oscillations et de façon très hétérogène. Lors de cette phase, le réseau poreux est totalement déstructuré et de larges pores sont présents en son sein. Cette perte de structure paraît donc à l'origine du comportement hétérogène des échantillons.

- phase 3 : Evolution stable

Cette phase correspond à un stade ultime où la Pierre de Lens n'a plus la possibilité de réagir à l'altération et garde les mêmes propriétés.

Cette phase se caractérise par une stabilisation de l'ensemble des mesures et des observations et un comportement hétérogène au niveau des propriétés physiques. La déstructuration du réseau poreux semble avoir atteint son stade ultime et devient beaucoup moins sensible aux cycles annuels d'altération accélérés.

Le processus d'altération de la Pierre de Lens, d'après les résultats du vieillissement accéléré, se compose d'une phase de fissuration, où la fissuration conduit à la rupture de certains échantillons, puis une phase d'élargissement des vides, où l'altération se traduit par des modifications importantes du réseau poreux et une baisse importante de la résistance mécanique et enfin une phase de stabilisation où les échantillons ne présentent plus aucune variation de leurs propriétés mécaniques et physiques.

Les phases du processus d'altération de la Pierre de Lens par vieillissement accéléré mettent en évidence le fait que ce calcaire réagit de façon hétérogène lors du processus d'altération et présente une forte déstructuration de son réseau poreux.

Comparons ce processus d'altération par vieillissement accéléré avec des échantillons altérés « naturellement ». Il s'agit des faciès altérés décrits dans le Chapitre 2 (2.2.2.4).

5.3.2. Comparaison avec des échantillons provenant de blocs prélevés sur site

5.3.2.1. Obtention des échantillons à partir des blocs prélevés sur site

Les échantillons provenant de blocs prélevés sur site ont été carottés aux mêmes dimensions que les échantillons altérés en laboratoire.

Or, contrairement aux échantillons altérés en laboratoire qui n'ont subi aucune manipulation mécanique, les échantillons altérés du terrain ont été carottés dans leur état d'altération final. Une carotte trop fissurée ne permettait pas d'obtenir les dimensions désirées. **Les échantillons obtenus proviennent donc des zones les moins sensibles mécaniquement** des blocs prélevés sur site.

Ainsi, pour le faciès altéré CA, nous avons pu obtenir 10 échantillons correspondant aux dimensions. Pour le faciès altéré CE, 10 échantillons ont été obtenus et enfin pour le faciès peu altéré, 13 échantillons ont été obtenus. Nous devons donc garder en tête que le carottage des échantillons entraîne une sous-estimation du degré d'altération de ces faciès plus ou moins altérés.

5.3.2.2. Observations de l'altération

L'étude des échantillons aux faciès altérés prélevés sur le terrain ne donne pas des évolutions mais uniquement des valeurs à l'instant où nous les avons prélevés. **La comparaison avec les échantillons altérés en laboratoire peut donc se faire uniquement par le biais des observations, à deux échelles, de l'endommagement.**

A l'échelle de l'éprouvette

Regardons tout d'abord les fissures observables par les images des parois latérales au scanner. Les valeurs moyennes (sur 6 échantillons pour chaque faciès) de l'orientation et la longueur des fissures sont données dans la Figure 5-36.

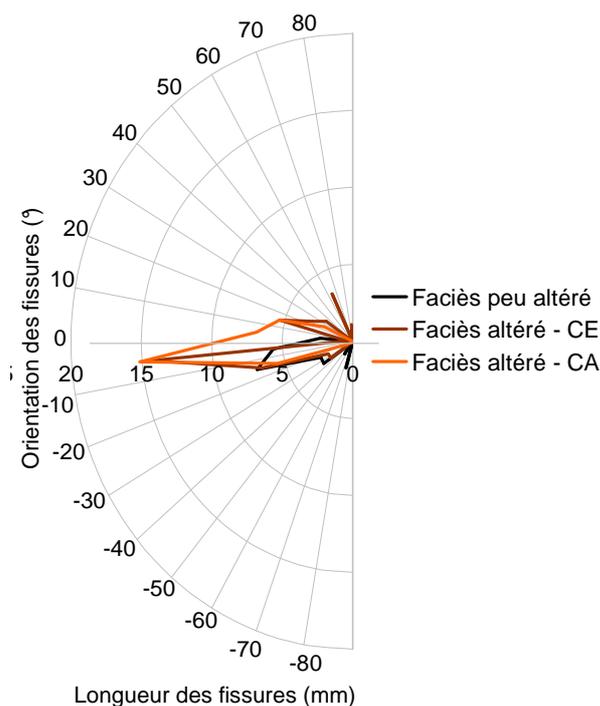


Figure 5-36 Représentation polaire de l'orientation et de la longueur des fissures obtenues par analyse d'images à partir des surfaces des échantillons « déroulées » au scanner pour les calcaires prélevés sur site aux faciès peu altéré, altéré - CE et altéré - CA. 0° correspond à l'orientation horizontale, 90° à l'orientation verticale vers le haut et -90° à l'orientation verticale vers le bas. Les valeurs correspondent à la moyenne faite à partir des résultats de deux échantillons.

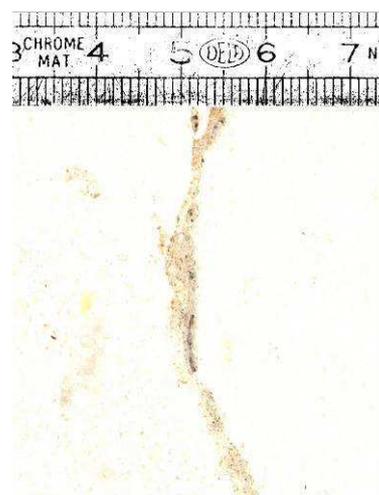


Figure 5-37 Exemple de remplissage des fissures pour les faciès altérés CE et CA



Figure 5-38 Exemples de vides de dissolution présents en surface des échantillons des faciès CE et CA

Au niveau du faciès peu altéré, les fissures ont des longueurs limitées mais présentant, néanmoins, une direction préférentielle. Son allure rappelle celle des échantillons aux cycles 3 et 5. Ce faciès semble donc avoir une durée d'exposition aux conditions climatiques limitée. **Ce faciès se situerait donc à la fin de la phase 1 du processus d'altération observé en laboratoire.**

Concernant les faciès altérés CE et CA, la longueur et l'orientation des fissures présentes en surface des échantillons est sensiblement la même. Une orientation préférentielle des fissures est encore visible. Par contre, la longueur des fissures est plus grande que pour le faciès peu altéré, il s'agit donc bien de faciès qui ont été soumis depuis **plus longtemps aux conditions climatiques.**

Il est intéressant de préciser que certaines fissures des faciès altérés CE et CA ne sont pas vides mais remplies d'une matière brunâtre (Figure 5-37). Il s'agit soit d'altérites, soit d'oxydes de fer. Comme pour le faciès très altéré du calcaire de Chamesson, ces faciès altérés ont des fissures remplies. **Ces faciès se situeraient donc au-delà des phases du processus d'altération observé en laboratoire.** Il semblerait qu'une 4^{ème} phase de remplissage des fissures fasse partie du processus d'altération de la Pierre de Lens.

Enfin, les faciès altérés CE et CA, en plus de fissures en surface présentent **des signes d'une dissolution très importante** : les surfaces des échantillons font apparaître des vides localisés dans la matrice. Ces signes de la dissolution sont particulièrement visibles sur les échantillons du faciès altéré CE (Figure 5-38). Or, nous avons vu au Chapitre 4 (4.1.2), que la Pierre de Lens est plus sensible à la dissolution. Ces observations sur des faciès altérés in situ viennent le confirmer.

Les observations des fissures au scanner confirment les degrés d'altération estimés suite aux observations sur site.

Elles donnent également des informations sur le processus d'altération de la Pierre de Lens :

- le faciès peu altéré présente des fissures en surface, tout comme les échantillons altérés en laboratoire au début du processus d'altération ;
- les faciès CE et CA présentent une fissuration plus importante et des fissures plus larges, tout comme les échantillons altérés en laboratoire à partir de la phase 2 ;
- certaines des fissures des faciès CE et CA sont remplies ;
- la présence de vides localisés dans la matrice de dissolution souligne l'importance de ce phénomène d'altération dans le processus d'altération de la Pierre de Lens, vu au Chapitre 4 (4.1.2).

A l'échelle de la microstructure

Regardons maintenant les courbes obtenues par l'essai de porosimétrie au mercure et comparons-les à celle de la Pierre de Lens à l'état initial. Elles sont reportées dans la Figure 5-39.

Les pores présents dans le réseau poreux des trois faciès plus ou moins altérés ont tous des rayons d'accès au pore plus petits que ceux que la Pierre de Lens à l'état initial. Ce décalage peut s'expliquer par deux hypothèses :

- 1) initialement, ces calcaires présentent des rayons de pores inférieurs à ceux de la Pierre de Lens que nous avons étudiée en laboratoire ;
- 2) au cours de l'altération de ces calcaires au faciès plus ou moins altérés, les rayons d'accès au pore ont rétréci.

Or, nous avons vu (5.3.1) que la Pierre de Lens présente une grande dispersion au niveau de ces valeurs de porosités à l'état initial. Et, l'épaisseur importante de la couche dont est extraite la Pierre de Lens (au moins 30 m, d'après la carte géologique) entraîne forcément des écarts importants au niveau de la porosité. Nous considérons donc que **ce décalage vers des pores de rayons d'accès plus petits ne semble pas dû au processus d'altération mais à la porosité initiale des échantillons prélevés in situ.**

La courbe du calcaire au faciès peu altéré présente une différence majeure avec la courbe de la Pierre de Lens à l'état initial : le pic de la gamme de pores principale a presque disparu. Or cette observation concerne **le début de la phase 2 du processus d'altération de la Pierre de Lens** (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) **observé sur les échantillons altérés en laboratoire.**

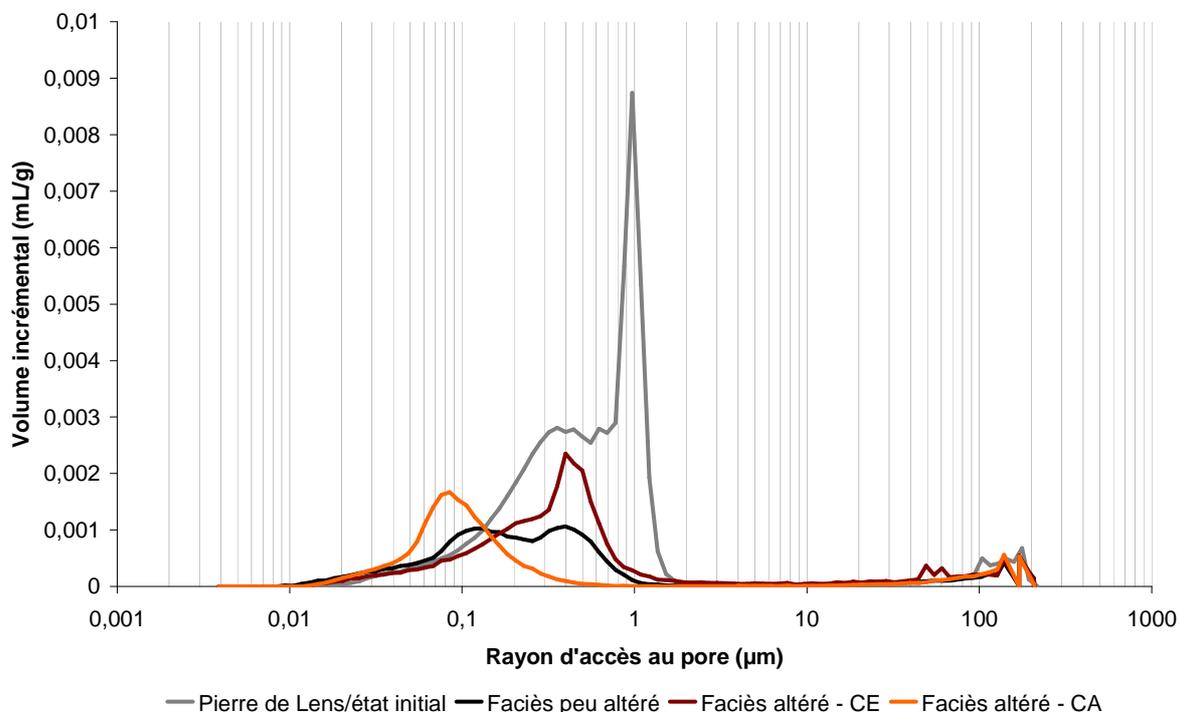


Figure 5-39 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour chaque faciès observé sur site. La courbe porosimétrique de la Pierre de Lens à l'état initial a été rajoutée pour comparaison avec les autres états.

Pour la courbe du calcaire au faciès altérés CE, deux différences sont remarquables :

- la baisse de l'épaule de la gamme de pores secondaires ;
- la présence de gros pores (de rayons supérieurs à 10 µm).

Ces deux observations ont également été faites lors de la phase 2 du processus d'altération de la Pierre de Lens déterminé sur les échantillons altérés en laboratoire. **Ce faciès se situerait au moins à la phase 2 du processus d'altération.**

Concernant la courbe du faciès altéré CA, elle présente de deux différences avec la courbe de la Pierre de Lens à l'état initial :

- le pic de la gamme de pores principale a complètement disparu ;
- la quantité de pores de l'épaule a augmenté et se décale vers les pores plus petits.

Pour ce faciès, comme pour le faciès très altéré du calcaire de Chamesson, il semblerait que les pores et les fissures présentes dans le réseau poreux ont été comblés suite aux écoulements et au phénomène de dissolution. Ceci engendre un réseau poreux composé uniquement de pores de très faibles rayons d'accès (inférieurs à 0,4 µm). **Le faciès altéré CA serait donc à une phase d'altération ultérieure à celles observées sur les échantillons altérés en laboratoire.**

Ainsi, les courbes porosimétriques des échantillons altérés de façon naturelle rejoignent les observations faites sur les échantillons altérés en laboratoire et apportent des compléments d'informations sur le processus d'altération de la Pierre de Lens :

- le faciès peu altéré présente la même diminution de la hauteur du pic de la gamme de pores principale que les échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 2 ;

- le faciès altéré CE présente des caractéristiques similaires (diminution de la hauteur de l'épaule et augmentation de la quantité de gros pores) que les échantillons altérés en laboratoire lors de la phase 2 ;
- le faciès altéré CA présente uniquement une gamme de pores très petite, confirmant l'idée que les fissures et les pores ont été comblés lors d'une phase du processus d'altération ultérieure à celles observées en laboratoire.

Enfin, les observations faites sur les courbes porosimétriques vont être complétées par les observations faites au microscope électronique à balayage. Les vues d'ensemble de la microstructure de ces différents faciès sont données dans la Figure 5-40.

Le faciès peu altéré présente une déstructuration de son squelette rocheux au MEB.

Le faciès altéré CE présente une forte déstructuration de son squelette rocheux ainsi que des creux au niveau des oolithes.

Le faciès altéré CA présente une porosité différente des deux autres faciès, constituée de vides localisés dans la matrice, les oolithes sont moins visibles.

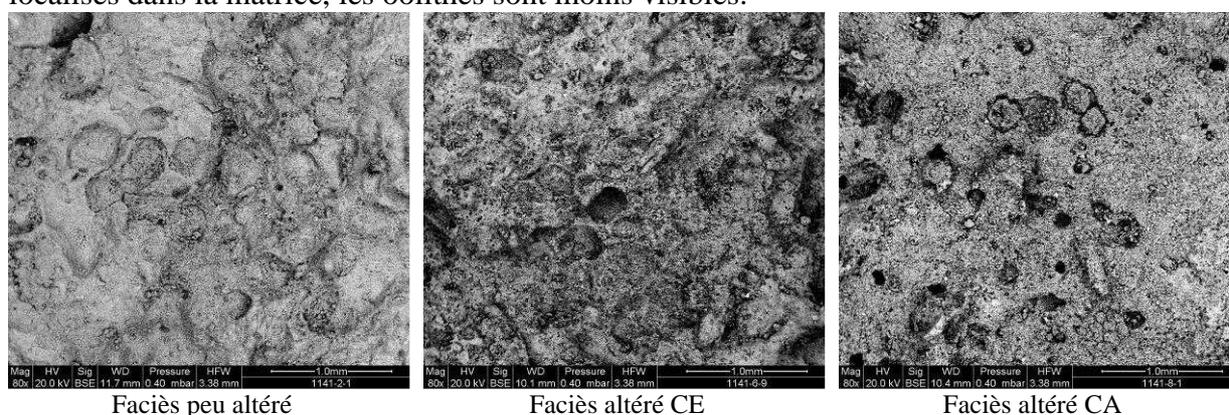


Figure 5-40 Vue d'ensemble de la microstructure des différents faciès altérés naturellement pour la Pierre de Lens

Les images MEB montrent une déstructuration du squelette rocheux pour les faciès peu altéré et altéré CE. Elle est plus accentuée pour le faciès CE. Le faciès CA a une structure différente, avec des gros vides localisés dans la matrice et avec moins d'oolithes visibles.

De plus, les concrétions observées dans le réseau poreux des échantillons de la Pierre de Lens altérés en laboratoire se retrouvent également dans le réseau poreux des échantillons altérés naturellement (Figure 5-41). Cette présence atteste de la dissolution du réseau poreux (cf. 5.3.1.3) mais montre également que des effets de la dissolution en laboratoire sont proches des effets naturels.

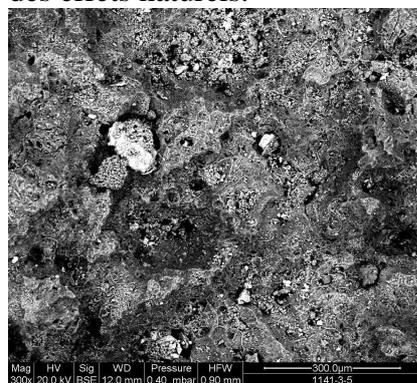


Figure 5-41 Concrétions blanches présentes dans le réseau poreux des calcaires altérés naturellement

Les concrétions blanches au MEB (« points noirs » à l'œil nu) attestent d'une dissolution des échantillons altérés naturellement et montrent que la dissolution en laboratoire a des effets similaires à la dissolution naturelle.

5.3.2.3. Synthèse des degrés d'altération

Le Tableau 5-9 reprend l'ensemble des observations de l'altération faites pour les échantillons provenant des blocs prélevés sur site présentant des faciès plus ou moins altérés.

Images des surfaces « déroulées » au scanner			Courbes porosimétriques		Images MEB	
	Observations	Phase d'altération	Observations	Phase d'altération	Observations	Phase d'altération
Faciès peu altéré	Fissures	Fin de la phase 1	Diminution de la quantité de pores de la gamme principale	Début de la phase 2	Déstructuration du squelette rocheux	Phase 1 au moins
Faciès altéré	Fissures remplies en partie	Phase 2 au moins	Diminution de la quantité de pores de l'épaulement et augmentation de la quantité de gros pores	Phase 2	Déstructuration du squelette rocheux plus accentuée	Phase 1 au moins
Faciès très altéré	Fissures remplies en partie	Phase 2 au moins	Diminution de la taille des pores Comblement des pores	Après la phase 3	Gros vides localisés dans la matrice et peu d'oolithes	Après la phase 3

Tableau 5-9 Récapitulatif des résultats obtenus à partir des observations de l'altération sur les blocs des faciès plus ou moins altérés prélevés sur site pour la Pierre de Lens. La phase d'altération correspond aux phases décrites dans le paragraphe Erreur ! Source du renvoi introuvable..

Le faciès peu altéré rejoint les observations de l'altération faites sur les échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 2 du processus d'altération.

Le faciès altéré CE rejoint les observations faites sur les échantillons altérés en laboratoire au début de la phase 2.

Le faciès altéré CA présente une phase du processus d'altération postérieure à celles observées sur les échantillons altérés en laboratoire. On peut la considérer comme une phase 4 où les vides (fissures et pores) sont comblés, suite à la phase 2 d'élargissement des pores.

5.3.3. Conclusion

Suite aux mesures et observations réalisées sur les échantillons ayant subis les cycles annuels d'altération accélérés et sur les échantillons altérés provenant du terrain, il nous est possible de mieux connaître le comportement de la Pierre de Lens vis-à-vis de l'altération.

Ce processus s'effectue en phases successives :

- phase 1 : propagation des fissures (jusqu'au cycle 3 d'un point de vue mécanique);
- phase 2 : élargissement des vides (fissures et pores) et comportement hétérogène ;
- phase 3 : stabilisation de l'évolution ;
- phase 4 : comblement des vides (fissures et pores).

Les phases 1 et 2 ont été observées sur les échantillons altérés en laboratoire et confirmées par les observations réalisées sur les échantillons prélevés sur site correspondant aux faciès peu altéré et altéré CE.

Par contre, deux différences ont été observées entre les observations en laboratoire et les observations in situ :

- la phase 1 de fissuration pour les faciès peu altéré et altéré semble moins prononcée que sur les échantillons altérés en laboratoire, tout comme la déstructuration du réseau poreux ;

- la phase 4 n'a pas été observée sur les échantillons altérés en laboratoire mais sur les échantillons prélevés sur site correspondant au faciès altéré CA.

5.4. Conclusion

Le but de ce Chapitre était de déterminer les processus d'altération du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens en laboratoire et de confirmer les observations en laboratoire par des observations sur des échantillons prélevés sur site et altérés naturellement.

Les phases du processus d'altération sont identiques pour les deux calcaires de référence :

- phase 1 : fissuration, cette phase concerne les 3 premiers cycles annuels d'altération accélérés au niveau des propriétés mécaniques pour les deux calcaires de référence ;

- phase 2 : élargissement des vides.

Une phase 3 de stabilisation de l'évolution des observations apparaît pour la Pierre de Lens uniquement. Cette phase n'est pas présente pour le calcaire de Chamesson :

- soit parce que les échantillons en laboratoire ne l'ont pas atteinte ;

- soit parce qu'elle est négligeable ou inexistante.

Nous leverons cette hésitation au Chapitre 6 (6.1.1.2).

Des différences au niveau du comportement des deux calcaires ont néanmoins été mises en évidence :

- le calcaire de Chamesson présente une fissuration importante alors que la Pierre de Lens présente une déstructuration de son squelette rocheux importante ;

- les échantillons du calcaire de Chamesson ont un comportement global homogène alors que les échantillons de la Pierre de Lens ont un comportement global hétérogène.

Les résultats montrent que ces différences sont dues à une microstructure différente : la présence ou non de vides autour des oolithes. Par exemple, le fait que la perméabilité soit corrélée à la porosité liée aux pores pour la Pierre de Lens et à la porosité liée aux fissures pour le calcaire de Chamesson montre que la Pierre de Lens a une capacité de modification de sa microstructure et cette capacité est effective grâce à la présence de vides autour des oolithes.

Concernant la comparaison des observations de l'altération en laboratoire et de l'altération sur site, des différences permettent d'émettre des perspectives d'amélioration du modèle de cycles annuels d'altération accélérés :

- la fissuration des échantillons altérés naturellement est plus atténuée que celle des échantillons altérés en laboratoire, ceci peut être dû au fait que les conditions de confinement sont différentes et implique que les conditions envisagées en laboratoire sont plus extrêmes et donc plus défavorables ;

- pour les échantillons les plus altérés naturellement, les vides sont remplis de matière alors que les vides des échantillons altérés en laboratoire ne le sont pas, ceci peut être dû au fait que nous n'avons pas pris en compte les cycles de saturation-séchage qui ont lieu dans les conditions réelles.

Dans ce Chapitre, nous avons regardé le comportement des deux calcaires de référence indépendamment, le Chapitre 6 va maintenant comparer ces deux calcaires par l'analyse de leurs cinétiques d'altération.

Bibliographie

Goudie A. S., Allison R. J., McLaren S. J. « The relations between modulus of elasticity and temperature in the contact of the experimental simulation of rock weathering by fire ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 1992. Vol. 17, p. 605-615.

Grange S. *Expérimentation et modélisation de l'endommagement sous chargements dynamiques de deux roches calcaires*. Thèse. Cachan : Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007. 170 p.

NF EN 1936. *Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale*. mai 2007.

Prick A. « Critical Degree of Saturation as a Threshold Moisture Level in Frost Weathering of Limestones ». *Permafrost and Periglacial Processes*. 1997. Vol. 8, n°1, p. 91-99.

Tourenq C., Fourmaintraux D., Denis A. « Propagation des ondes et discontinuités des roches ». In : *Proceedings Symposium ISRM. Rock fracture*. Nancy, France : ISRM, 1971. p. I-1.

Weibull W. *A Statistical Theory of the Strength of Materials*.: Roy. Swed. Inst. Eng. Res., 1939.

6. Comportement à la fissuration et cinétiques d'altération

INTRODUCTION

Les résultats du Chapitre 5 montrent l'impact de l'altération et une différence entre le développement des fissures pour le calcaire de Chamesson et pour la Pierre de Lens : le calcaire de Chamesson présente une propagation des fissures beaucoup plus importante mais il n'atteint pas la rupture alors que la Pierre de Lens présente une propagation des fissures beaucoup moins rapide et plus homogène mais elle atteint la rupture rapidement. Il semble donc que ces calcaires oolithiques ne résistent pas de la même façon à la propagation de la fissure. Nous allons donc, dans cette partie, essayer de déterminer une façon de mettre en évidence cette différence de comportement au niveau de la fissuration. Pour cela, nous allons utiliser des principes de mécanique de la rupture.

Par ailleurs, nous allons évaluer l'impact de ces comportements différents sur la cinétique d'altération des calcaires de référence. Ces cinétiques s'obtiennent par l'analyse d'une mesure mécanique en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés. Nous devons donc déjà déterminer quelle mesure mécanique est la plus adaptée. Ensuite l'évolution de cette mesure en fonction des cycles permettra d'obtenir des cinétiques d'altération qu'il sera ensuite possible de comparer.

Par cette démarche, nous pourrons donner des conclusions sur l'impact du comportement à la fissuration et du climat sur la cinétique d'altération des calcaires.

6. COMPORTEMENT A LA FISSURATION ET CINETIQUES D'ALTERATION 169

6.1. Evaluation du comportement vis-à-vis de la fissuration	171
6.1.1. Mécanique de la rupture	171
6.1.1.1. Définitions utiles	171
6.1.1.2. Loi de Paris	172
6.1.1.3. Mesure de la ténacité	175
6.1.2. Analyse	178
6.1.3. Conclusion	179
6.2. Moyen d'obtention des cinétiques d'altération	179
6.2.1. Critères du choix de la méthode de mesure	179
6.2.2. Prévission de la rupture par la mesure de la fréquence de résonance	180
6.2.2.1. Relation entre l'endommagement et l'état de contrainte	180
6.2.2.2. Validation avec un endommagement naturel	183
6.2.3. Conclusion	184
6.3. Cinétiques d'altération des calcaires de référence	185
6.3.1. Conditions de mesure	185
6.3.2. Résultats	187
6.3.2.1. Nombre d'échantillons mesurés	187
6.3.2.2. Cinétiques d'altération obtenues	188
6.3.2.3. Analyse des résultats	191
6.3.3. Conclusion	192
6.4. Conclusion	192

6.1. Evaluation du comportement vis-à-vis de la fissuration

6.1.1. Mécanique de la rupture

6.1.1.1. Définitions utiles

Les définitions de mécanique de la rupture données dans ce paragraphe sont issues de Grange (2007) sauf mentions contraires.

Modes de propagation des fissures :

Si l'on considère que les fissures sont planes et se propagent dans leur plan, leur propagation se limite à la superposition de trois modes (Figure 6-1) :

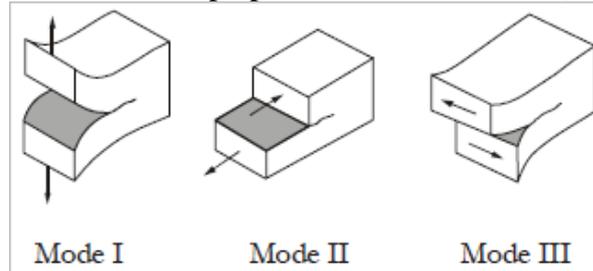


Figure 6-1 Les trois modes de base de propagation des fissures (Backers, 2004)

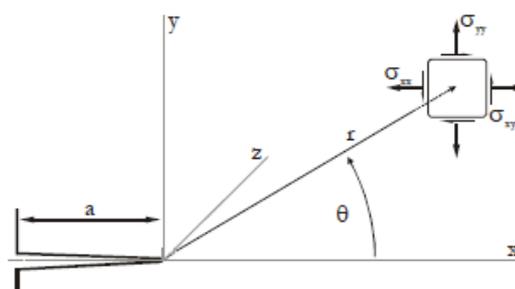


Figure 6-2 Notations en coordonnées cartésiennes et polaires du tenseur des contraintes (Backers, 2004)

- le mode I par ouverture, les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement au plan de fissure ;
- le mode II par glissement en translation, les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction perpendiculaire au front de fissure ;
- le mode III par glissement en rotation, les surfaces de la fissure se déplacent dans le plan de fissure et dans une direction parallèle au front de la fissure.

Le mode I est souvent le plus critique et nous nous limiterons donc à ce mode de propagation.

Facteur d'intensité de contraintes :

Par calcul analytique des champs de contraintes et de déplacements en pointe de fissure, on montre qu'en coordonnées polaire (r, θ) (Figure 6-2) le premier terme du développement limité du champ des contraintes s'écrit en $r^{-1/2}$ quelles que soient les conditions de chargement et la géométrie de l'éprouvette.

Plus précisément, on peut toujours l'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

La constante K est fonction du chargement et de la géométrie de l'éprouvette et s'appelle facteur d'intensité de contraintes. Elle est utilisée pour décrire le niveau de chargement au voisinage de la fissure, plutôt que la contrainte maximale. Ainsi, l'ensemble de la singularité spatiale du champ des contraintes est pris en compte. Ce facteur s'exprime en $MPa\sqrt{m}$.

Fatigue :

Il s'agit du comportement des matériaux sous des cycles répétés de contraintes ou de déformations qui causent une détérioration de la matière, d'où résulte une rupture progressive (Frade, 2008).

Fissure :

C'est une petite fente dans un solide, elle peut apparaître à la surface du solide (fissure superficielle), se trouver à l'intérieur et être donc invisible depuis l'extérieur (fissure interne), ou traverser complètement le solide (fissure traversante).

Ténacité :

Il s'agit de la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure existante (amenant à la rupture). Elle est déduite du bilan énergétique réalisée sur la surface de rupture potentielle. On l'appelle aussi valeur critique du facteur d'intensité des contraintes. En effet, les critères de contrainte stipulent que la fissuration devient instable lorsque le facteur d'intensité de contraintes excède cette valeur. Elle est considérée comme une propriété intrinsèque du matériau dans un état donné. Pour le mode I, elle est notée K_{IC} et est donnée en $MPa\sqrt{m}$.

6.1.1.2. Loi de Paris

Paris, Gomez et Anderson (1961) ont corrélié la vitesse de fissuration par fatigue da/dN , où a est la longueur de la fissure et N le nombre de cycles de fatigue, à l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes ΔK (c'est-à-dire sa variation d'un cycle à l'autre). Ils distinguent trois régimes (Figure 6-3) décrits de la façon suivante (Bouvard, 2006) :

- Régime (B) : la vitesse de fissuration est proportionnelle à l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes élevé à la puissance m , ce régime correspond à la loi de Paris définie par $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ où C et m sont des constantes dépendant du matériau ;
- Régime (C) : les vitesses de fissuration sont supérieures à celles prévues par la loi de Paris, la fissure se propage de manière instable lorsque ΔK atteint la ténacité du matériau $\Delta K = K_c$;
- Régime (A) : les vitesses de fissuration sont inférieures à celles prévues par la loi de Paris, si la sollicitation est telle que ΔK est inférieure au seuil de fissuration K_{th} , alors la fissure ne se propage pas.

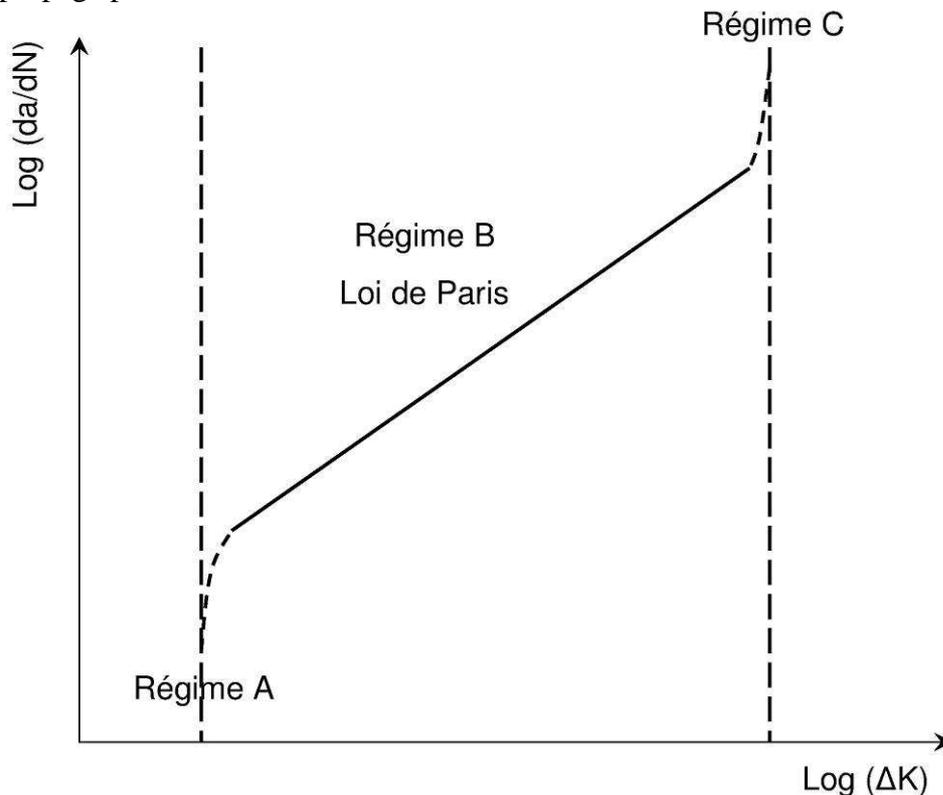


Figure 6-3 Représentation logarithmique schématique de la loi de Paris dans un diagramme $da/dN=f(\Delta K)$ (Bouvard, 2006)

La loi de Paris est limitée à des conditions idéales (Bouvard, 2006) :

- plasticité confinée en pointe de fissure, c'est-à-dire dans le cas où la taille de la zone plastique reste très inférieure à la longueur de la fissure ;

- amplitude du chargement constante ;
- régime de fissure longue, c'est-à-dire des fissures de longueur supérieure à quelques millimètres.

Or, nous pouvons considérer que dans notre cas (matériau fragile), la **plasticité est confinée en pointe de fissure**. Par ailleurs, les cycles annuels d'altération accélérés peuvent être considérés comme **un chargement à amplitude constante**. Enfin, les images obtenues par scanner permettent l'observation des fissures visibles à l'œil nu, nous sommes donc bien dans un **régime de fissure longue**.

Nous avons donc voulu voir l'allure de la vitesse de propagation des fissures en fonction de l'amplitude du facteur d'intensité pour les échantillons de calcaires ayant subi les cycles annuels d'altération accélérés. N correspond au nombre de cycles annuels accélérés en tant que nombre de cycles de fatigue. Par ailleurs, nous n'avons pas la possibilité de mesurer le facteur d'intensité de contraintes à chaque cycle. Mais il existe des formules reliant le facteur d'intensité de contraintes à la contrainte appliquée et aux dimensions des fissures (Lemaignan, 2003). Lemaignan (2003) affirme que la relation $K_I = \sigma \sqrt{\pi \times a}$ est très satisfaisante pour une première approximation de la valeur du facteur d'intensité de contraintes. Nous utiliserons donc cette relation.

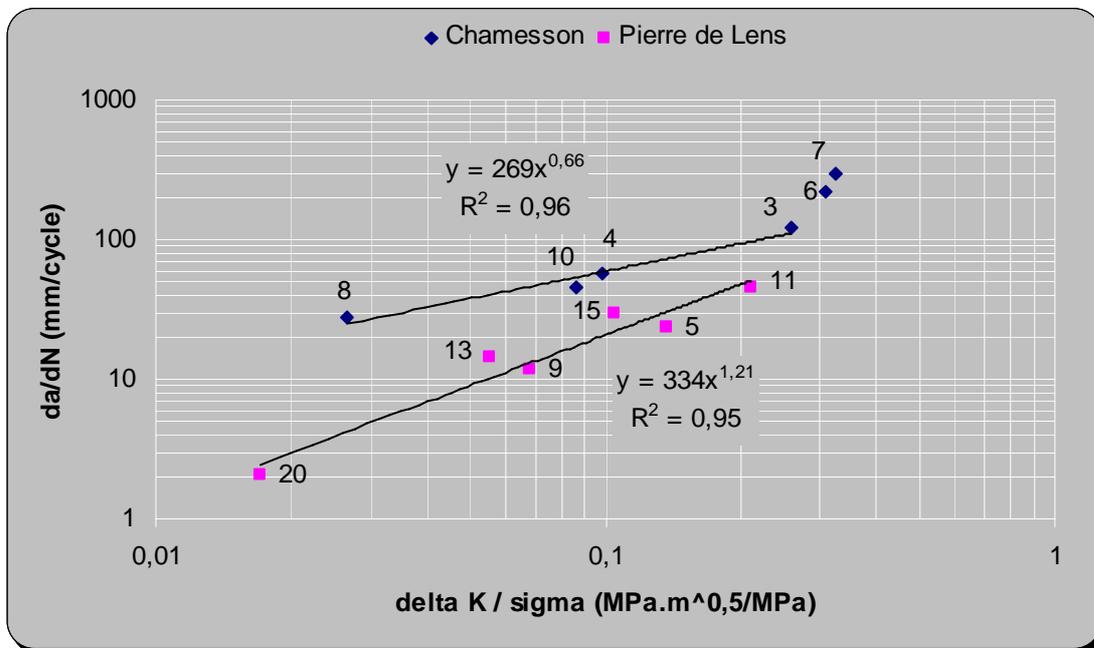


Figure 6-4 Diagramme $da/dN=f(\Delta K)$ pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens. Le numéro à côté de chaque figuré correspond au cycle annuel d'altération accéléré.

Or, pour chaque cycle annuel d'altération accéléré, il nous est possible de calculer :

- la vitesse de propagation de la fissuration $\frac{da_j}{dN_j}$ au cycle j telle que :

$$da_j = a_j - a_i \text{ avec } a_i = \sum_{\theta} u_{\theta}^i \text{ et } u_{\theta}^i \text{ la longueur de la fissure d'angle } \theta \text{ au cycle } i, \theta \text{ allant de } -$$

90° à $+90^{\circ}$

$$dN_j = j - i$$

- le rapport de l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes sur la contrainte appliquée

$$\frac{\Delta_j K_I}{\sigma} = \sqrt{\pi \times a_j} - \sqrt{\pi \times a_i} \text{ au cycle } j \text{ tel que :}$$

$$a_i = \sum u_{\theta}^i \text{ et } u_{\theta}^i \text{ la longueur de la fissure d'angle } \theta \text{ au cycle } i, \theta \text{ allant de } -90^{\circ} \text{ à } +90^{\circ}$$

Ainsi, nous obtenons les résultats reportés dans la Figure 6-4.

Notons que les cycles 7 pour la Pierre de Lens et 5 pour le calcaire de Chamesson ne sont pas sur cette représentation car les valeurs de vitesse de propagation de la fissuration et de l'amplitude du facteur d'intensité de contraintes sont négatives. Ceci est probablement dû au fait que la longueur des fissures est mesurée sur des échantillons différents d'un cycle à l'autre. Ces valeurs négatives ne peuvent pas apparaître sur une représentation logarithmique. Par ailleurs, les numéros de cycles annuels d'altération accélérés commencent à 3 pour le calcaire de Chamesson et à 5 pour la Pierre de Lens. En effet, les fissures observables au scanner n'apparaissent qu'aux cycles 2 (pour le calcaire de Chamesson) et 3 (pour la Pierre de Lens). Or pour le calcaire de Chamesson, nous avons des valeurs sur les longueurs de fissures à chaque cycle et pour la Pierre de Lens, nous en avons tous les deux cycles. Nous ne pouvons donc pas calculer les valeurs précédant les cycles 3 (pour le calcaire de Chamesson) et 5 (pour la Pierre de Lens).

Contrairement à la Figure 6-3 où l'on trouve ΔK en abscisses, dans la représentation de la Figure 6-4, nous avons reporté le rapport $\frac{\Delta K_I}{\sigma}$. Cette contrainte est différente pour chacun des deux calcaires de référence dans la mesure où ils ne subissent pas les mêmes cycles annuels d'altération accélérés.

La représentation de la Figure 6-4 fait apparaître certains des régimes décrits par Paris et al. (1961). Pour la Pierre de Lens, en représentation logarithmique, **toutes les valeurs calculées sont alignées**. Il s'agit donc du régime (B), c'est-à-dire celui dans lequel s'applique la loi de Paris. Et ainsi, pour la Pierre de Lens, on a la relation suivante :

$$\frac{da}{dN} = \frac{334}{\sigma_{PL}^{1,21}} (\Delta K)^{1,21}.$$

Pour le calcaire de Chamesson, **certaines valeurs sont alignées** et correspondent donc au régime (B) avec la loi de Paris suivante :

$$\frac{da}{dN} = \frac{269}{\sigma_{Ch}^{0,66}} (\Delta K)^{0,66}.$$

Les valeurs restantes correspondent à des vitesses de propagation de la fissuration supérieures à celles prévues par la loi de Paris, il s'agit donc du régime (C). Dans cette zone, la propagation de la fissuration est donc instable et conduit à la rupture lorsque la valeur de ténacité K_{IC} est atteinte. D'après

les valeurs mesurées, on peut approximer le rapport $\frac{K_{IC}}{\sigma_{Ch}}$ à environ 0,32.

Par contre, le régime (A) n'est visible pour aucun des deux calcaires. Notre méthode d'observation ne permet peut-être pas de calculer des vitesses de fissuration inférieures à celles prévues par la loi de Paris, elles sont en effet plus difficile à détecter.

Cette analyse, en plus de confirmer la fatigue induite par la répétition de cycles annuels d'altération accélérés estimé pour le calcul, met en évidence les comportements différents des deux calcaires de référence. **Le comportement de la Pierre de Lens vis-à-vis de la fissuration concerne uniquement le régime (B) alors que le comportement du calcaire de Chamesson vis-à-vis de la fissuration concerne les régimes (B) et (C).**

Or, la Pierre de Lens présente dans son processus d'altération une phase de stabilisation de l'évolution (après la phase de fissuration et d'élargissement des vides) qui n'est pas visible pour le calcaire de Chamesson. Cette stabilisation donne une limite au processus d'altération de la Pierre de Lens : son endommagement se stabilise. Ceci rejoint le fait que la Pierre de Lens n'atteigne pas le régime (C), contrairement au calcaire de Chamesson.

La stabilisation de l'endommagement de la Pierre de Lens au cours de son processus d'altération l'empêche d'atteindre le régime de propagation instable des fissures, décrit par Paris et al. (1961), contrairement au calcaire de Chamesson.

6.1.1.3. Mesure de la ténacité

Pour affiner l'interprétation des résultats de la partie précédente, nous avons voulu mesurer la ténacité des calcaires de référence. L'essai de ténacité a été réalisé à l'aide d'un article de l'ISRM expliquant comment déterminer la ténacité à partir d'une éprouvette CCNBD (= Cracked Chevron Notched Brazilian Disc) (International Society for Rock Mechanics-Commission on Testing Methods, 1995). La Figure 6-5 illustre les caractéristiques géométriques de ce type d'éprouvette et donne également la façon dont le chargement s'opère. Il existe, en particulier, des conditions géométriques à respecter pour que l'essai soit valide, à savoir :

$$\left\{ \begin{array}{l} (0) : \alpha_1 \geq 0,4 \\ (1) : \alpha_1 \geq \alpha_B / 2 \\ (2) : \alpha_B \leq 1,04 \\ (3) : \alpha_1 \leq 0,8 \\ (4) : \alpha_B \geq 1,1729 \times \alpha_1^{1,666} \\ (5) : \alpha_B \geq 0,44 \end{array} \right.$$

Le numéro entre parenthèses correspond à une des droites de la Figure 6-6 qui illustre ces conditions.

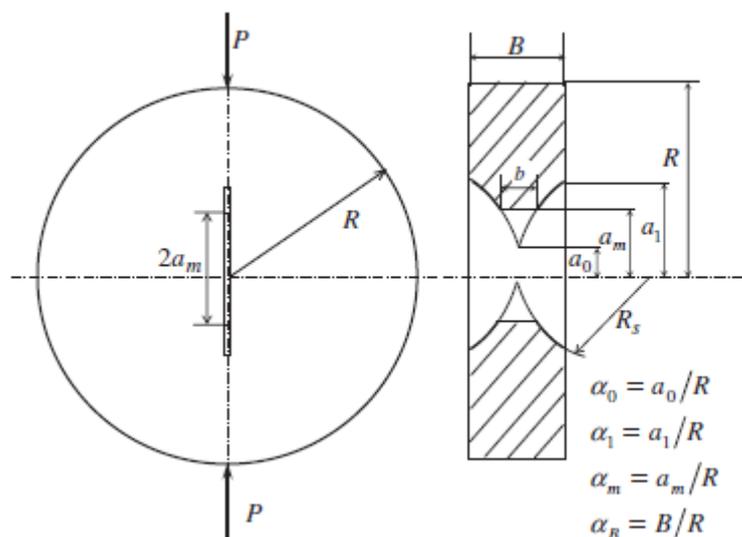


Figure 6-5 Schéma d'une éprouvette CCNBD (Wang, 2010)

Dans notre cas, les dimensions choisies et calculées sont celles données dans le Tableau 6-1 et leur validité est vérifiée dans la Figure 6-6.

Paramètres	Dimensions (mm)
R	45,0
a_0	11,9
a_1	29,3
B	36,0
R_s	31,5

Tableau 6-1 Dimensions des éprouvettes CCNBD des essais de ténacité réalisés

La préparation des éprouvettes CCNBD se déroule comme suit :

- carottage de cylindres de rayon R ;
- sciage des cylindres pour une épaisseur B ;
- sciage au centre de l'éprouvette, à l'aide d'une scie de rayon R_s , d'une entaille de hauteur $2a_1$ sur chacune des faces des cylindres.

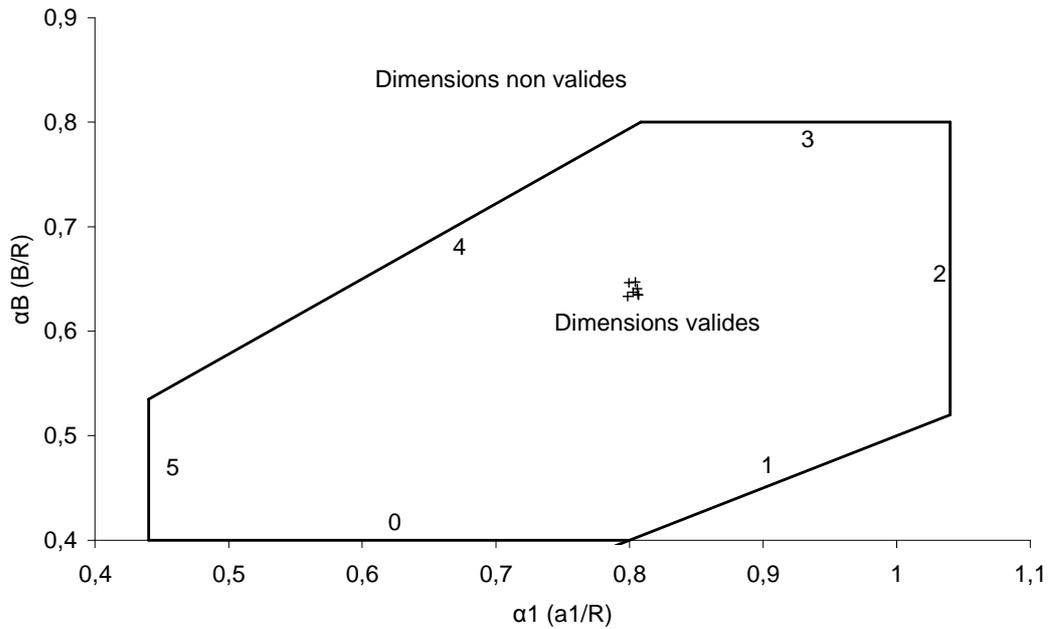


Figure 6-6 Conditions géométriques pour des dimensions valides pour la mesure de ténacité avec une éprouvette CCNBD (International Society for Rock Mechanics-Commission on Testing Methods, 1995). Les croix noires représentent les conditions obtenues sur les essais réalisés pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens.

L'essai se déroule à l'aide d'une presse utilisée pour des essais en compression. Le chargement se fait dans la même direction que celle de l'entaille (Figure 6-5). L'essai doit être rapide (dynamique), nous avons donc choisi de le contrôler en force avec une vitesse de 0,01 kN/s.

Le test est considéré comme réussi uniquement si le plan de la fissure correspond au plan de l'entaille initiale. La dimension a_0 est mesurée après l'essai pour une meilleure précision dans le calcul de la ténacité. La Figure 6-7 montre des clichés d'essais de ténacité réussis pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens.

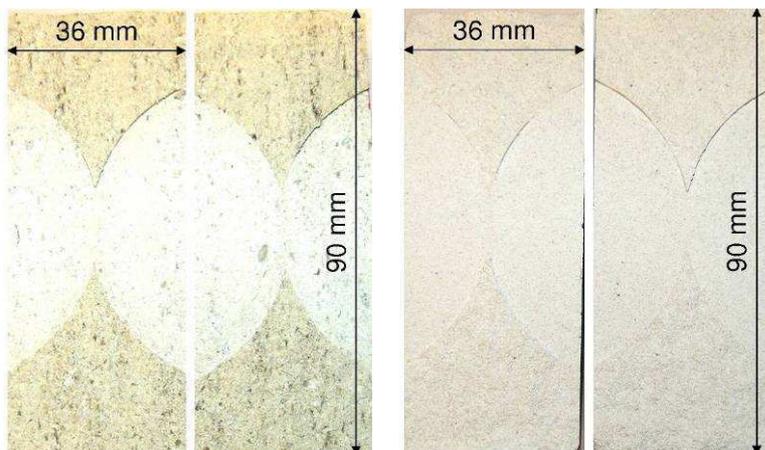


Figure 6-7 Clichés de l'intérieur des éprouvettes CCNBD cassées en 2 tranches identiques après des essais réussis de ténacité pour le calcaire de Chamesson (à gauche) et la Pierre de Lens (à droite)

La valeur de la ténacité s'obtient ensuite par le calcul suivant :

$$K_{IC} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{2} \times R} Y_{\min}^*$$

Avec

K_{IC} : la ténacité en $MPa\sqrt{m}$

P_{max} : la charge maximale admise par l'éprouvette CCNDB en MN

R : le rayon du cylindre en m

B : l'épaisseur du cylindre en m

Y_{min}^* : l'intensité de contrainte critique sans dimension. La valeur de Y_{min}^* dépend des dimensions de l'échantillon, elle s'obtient par la formule suivante : $Y_{min}^* = u \times \exp(v \times \alpha_1)$, où u et v sont des constantes déterminées à partir de α_0 et α_B uniquement. Un tableau donné par l'ISRM (1995) permet de faire correspondre ces deux valeurs aux valeurs de u et v .

Nous avons réalisé trois essais valides pour chacun des deux calcaires de référence. Les résultats de ces essais sont reportés dans le Tableau 6-2.

	$K_{IC} (MPa\sqrt{m})$	
	Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens
essai 1	0,63	0,44
essai 2	0,59	0,53
essai 3	0,70	0,54
moyenne	0,64	0,50
écart type	0,05	0,06

Tableau 6-2 Résultats des essais de mesure de la ténacité pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens

Avant d'interpréter les valeurs obtenues, nous avons regardé leur cohérence avec les valeurs trouvées dans d'autres études. Bost (2008) affirme que pour les calcaires, la ténacité est de l'ordre de $1 MPa\sqrt{m}$. Le Tableau 6-3 nous donne aussi d'autres valeurs de ténacité pour des calcaires. Les essais de mesure de la ténacité ne sont pas de type CCNBD mais les résultats restent comparables (Backers, 2004;Grange, 2007).

	Porosité (%)	$K_{IC} (MPa\sqrt{m})$	Type d'essai	Référence
Calcaire crinoïde	< 1%	1,40	SENB (Single-edge notched beam)	(Grange, 2007)
Blanche de Beaucaire	$14 \pm 1\%$	0,44	SENB (Single-edge notched beam)	(Grange, 2007)
Calcaire de Rüdersdorf	5,5%	$1,12 \pm 0,06$	CB (Chevron bend)	(Backers, 2004)

Tableau 6-3 Valeurs de ténacité et de porosité pour d'autres calcaires mesurée à partir d'autres types d'essais

Lorsque la valeur de la porosité augmente, la ténacité diminue. De plus, on voit que pour la blanche de Beaucaire, calcaire ayant une porosité proche de celle de la Pierre de Lens ($13,9 \pm 0,9\%$, cf. Chapitre 2, 2.2.2.3), sa valeur de ténacité est également très proche de celle de la Pierre de Lens. **Les valeurs que nous avons obtenues semblent être cohérentes avec celles d'autres études.**

La ténacité du calcaire de Chamesson, $0,64 MPa\sqrt{m}$ en moyenne, est plus élevée que celle de la Pierre de Lens, $0,50 MPa\sqrt{m}$ en moyenne. Ainsi, **la Pierre de Lens est plus sensible à la fissuration que le calcaire de Chamesson.**

Pourtant, dans les résultats du paragraphe 6.1.1.2, la Pierre de Lens n'atteint pas le régime de propagation instable des fissures au cours des cycles annuels d'altération accélérés, **les facteurs d'intensité de contrainte développés dans les fissures de la Pierre de Lens sont donc moins élevés que ceux développés dans les fissures du calcaire de Chamesson.** Ceci s'expliquerait par le fait d'avoir des vides autour des oolithes, qui augmentent la taille moyenne des fissures, et donc diminuent la concentration de contraintes en fond de fissures.

Le comportement à la fissuration montre que :
 - la résistance à la fissuration de la Pierre de Lens est plus faible que celle de Chamesson ;

- la Pierre de Lens ne présente de valeurs que dans le régime B de la loi de Paris alors que le calcaire de Chamesson a des valeurs dans les régimes B et C ;
- les facteurs d'intensité de contrainte développés dans les fissures de la Pierre de Lens sont moins élevés que ceux développés dans les fissures du calcaire de Chamesson.

6.1.2. Analyse

Les résultats précédents montrent que les deux calcaires de référence ne résistent pas aussi bien à la fissuration.

Revenons sur la microstructure de ces deux calcaires.

Ils ont des caractéristiques microstructurales identiques sauf pour un point : la Pierre de Lens présente des vides autour de ses oolithes (Chapitre 2, 2.2.2.3) alors que le calcaire de Chamesson présente des oolithes complètement solidaires du ciment sparitique (Chapitre 2, 2.2.1.3).

Cette caractéristique divergente peut expliquer les comportements différents au niveau de la fissuration de ces deux calcaires oolithiques :

- Au niveau de la génération des fissures :

La solidarisation de l'oolithe au ciment rend la microstructure rigide : le matériau fissure lorsqu'il est sollicité mécaniquement. Au contraire, la présence de vides autour des oolithes limite la rigidité du matériau : le matériau peut se déstructurer sous sollicitations mécaniques sans fissurer.

- Au niveau de la propagation des fissures :

La solidarisation de l'oolithe au ciment permet à la structure de résister à la propagation des fissures car les éléments qui la constituent sont soudés entre eux. Au contraire, la présence de vides autour des oolithes génère des zones « de faiblesse » vis-à-vis de la propagation de la fissuration car ces vides désolidarisent les oolithes de son ciment et donc une fissure peut s'y propager sans que la contrainte générée soit importante.

Nous avons vérifié cette propriété au niveau de la propagation des fissures en mesurant la ténacité d'autres calcaires oolithiques : le faciès NG et le faciès MG du calcaire de Vilhonneur. Le faciès NG, tout comme la Pierre de Lens, présente des vides autour de ses oolithes (Chapitre 7, 7.1.1.2). Par contre le faciès MG a une microstructure présentant des vides autour de certains oolithes, les autres étant solidaires du ciment (Chapitre 7, 7.1.1.2). Sa microstructure est donc intermédiaire entre celle de la Pierre de Lens et celle du calcaire de Chamesson.

Les essais de ténacité ont été réalisés de la même façon que ceux réalisés sur des échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens (cf. 6.1.1.3) et sont donnés dans le Tableau 6-4.

Les valeurs montrent que :

- le faciès NG du calcaire de Vilhonneur et la Pierre de Lens, qui ont des vides autour de leurs oolithes, ont les mêmes ténacités ;

- le faciès MG du calcaire de Vilhonneur, avec une microstructure intermédiaire entre la Pierre de Lens et le calcaire de Chamesson, a une valeur de ténacité située entre les valeurs de ténacité du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens.

	Faciès NG du calcaire de Vilhonneur	Faciès MG du calcaire de Vilhonneur	Calcaire de Chamesson	Pierre de Lens
essai 1	0,51	0,47	0,63	0,44
essai 2	0,41	0,53	0,59	0,53
essai 3	0,57	0,59	0,70	0,54
moyenne	0,50	0,53	0,64	0,50
écart type	0,08	0,06	0,05	0,06

Tableau 6-4 Résultats des essais de mesure de la ténacité $K_{IC} (MPa\sqrt{m})$ pour les faciès NG et MG du calcaire de Vilhonneur et rappel des résultats des essais de mesure de la ténacité pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens

Les mesures de ténacité sur les faciès NG et MG du calcaire de Vilhonneur **confirment le lien entre la présence ou non de vides autour des oolithes et la résistance à la propagation des fissures**. Les calcaires qui ont des vides autour de leurs oolithes (en partie ou en totalité) ont des valeurs de ténacité comprises entre 0,41 et 0,59 $MPa\sqrt{m}$ et le calcaire qui n'en a pas a des valeurs de ténacité comprises entre 0,59 et 0,70 $MPa\sqrt{m}$.

La limite entre les deux types de résistance à la propagation des fissures se situe donc à 0,59 $MPa\sqrt{m}$.

6.1.3. Conclusion

L'étude de la fissuration et de la résistance à la propagation des fissures montre que la présence ou non de vides autour des oolithes dans la microstructure a un impact sur :

- sa rigidité et donc sur la génération de fissures ;
- son « soudage » et donc sur la résistance à la propagation des fissures.

Cette dernière remarque est confirmée par des mesures de ténacité sur des échantillons du calcaire de Vilhonneur.

D'après les résultats, la limite entre une résistance à la propagation des fissures lorsqu'il y a des vides autour des oolithes (c'est-à-dire pour une résistance faible) et une résistance à la propagation des fissures lorsqu'il n'y en a pas (c'est-à-dire pour une résistance forte) se situe à 0,59 $MPa\sqrt{m}$.

Regardons maintenant comment ces différences au niveau de la fissuration impactent les cinétiques d'altération des calcaires de référence.

6.2. *Moyen d'obtention des cinétiques d'altération*

6.2.1. Critères du choix de la méthode de mesure

Pour déterminer les cinétiques d'altération des calcaires de référence dans leurs conditions climatiques respectives, nous devons choisir une méthode de mesure permettant de quantifier l'endommagement au cours des cycles successifs c'est-à-dire une méthode :

- a) non destructive ;
- b) présentant une bonne répétabilité ;
- c) décrivant des propriétés mécaniques ;
- d) sensible à l'altération ;
- e) permettant de connaître le moment de rupture, c'est-à-dire lorsque l'échantillon se sépare en plusieurs morceaux.

Les 4 premières conditions ont fait l'objet de vérifications spécifiques dans le Chapitre 3 (3.2.2) et dans le Chapitre 4 (4.3). Et c'est la fréquence de résonance qui répond le mieux à l'ensemble de ces critères (Saad et Bost, 2009). **Concernant le dernier critère, sur la rupture, nous allons présenter dans quelles mesures la fréquence de résonance y répond** (Saad et al., 2010).

Avant de continuer, il faut préciser que cette analyse concerne uniquement l'endommagement par fissuration alors que les cycles annuels d'altération accélérés comprennent un endommagement plus global. Mais, dans la mesure où nous nous intéressons à la rupture de l'échantillon, il est raisonnable d'envisager l'analyse en s'intéressant à ce type d'endommagement.

6.2.2. Prédiction de la rupture par la mesure de la fréquence de résonance

6.2.2.1. Relation entre l'endommagement et l'état de contrainte

Il faut d'abord **établir la relation entre l'endommagement et la mesure de la fréquence de résonance**. L'étude de la contrainte axiale σ_1 en fonction de la déformation volumique $\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ (ε_1 étant la déformation axiale et ε_3 la déformation radiale) d'un échantillon cylindrique permet de déterminer le lien entre l'état de contrainte et l'endommagement de cette échantillon (Bourbié et al., 1986; Panet, 1976). Pour ce faire, il s'agit de réaliser un essai de compression uniaxiale sur un échantillon cylindrique et de mesurer la contrainte, la déformation axiale et la déformation radiale. Ainsi, les courbes de contrainte axiale en fonction des déformations axiale, radiale et volumique sont obtenues.

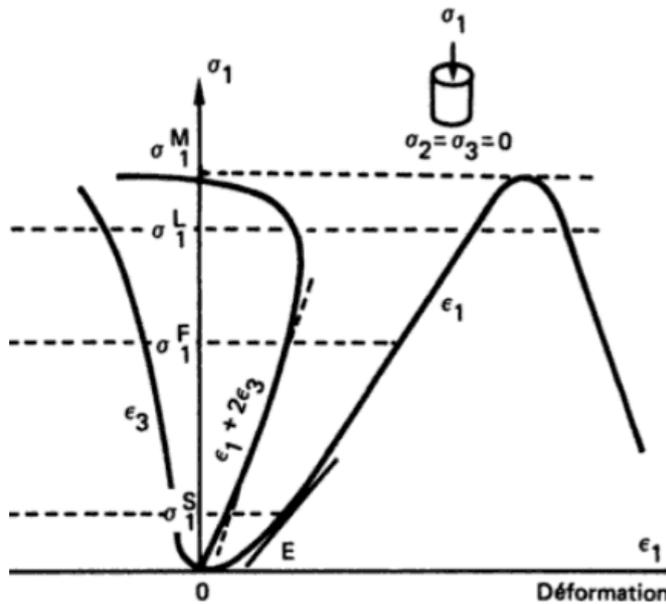


Figure 6-8 Courbe de contrainte-déformation typique d'une roche obtenue par un essai en compression uniaxiale (Bourbié et al., 1986 ;Panet, 1976). σ_1 = contrainte axiale, ε_1 = déformation axiale, ε_3 = déformation radiale, $\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ = déformation volumique, $\sigma_1^S \leq \sigma \leq \sigma_1^F$ = comportement élastique, $\sigma_1^F \leq \sigma \leq \sigma_1^L$ = fissuration stable, $\sigma_1^L \leq \sigma \leq \sigma_1^M$ = fissuration instable.

Comme le montre la Figure 6-8, la courbe de la déformation volumique $\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$ peut être divisée en trois zones, après la phase de serrage pour $\sigma \leq \sigma_1^S$:

- pour $\sigma_1^S \leq \sigma \leq \sigma_1^F$, le comportement de la roche est élastique dans la mesure où la contrainte est proportionnelle aux déformations axiale et volumique. La contrainte σ_1^F est appelée seuil de fissuration parce que la contrainte n'est plus proportionnelle à la déformation volumique à partir de cette valeur : il y a eu des modifications irréversibles au sein du squelette rocheux ;
- pour $\sigma_1^F \leq \sigma \leq \sigma_1^L$, la contrainte est toujours proportionnelle à la déformation axiale ce qui traduit une propagation stable des fissures ;
- pour $\sigma_1^L \leq \sigma \leq \sigma_1^M$, la déformation volumique décroît quand la contrainte augmente et la déformation axiale n'est plus proportionnelle à la contrainte. La progression des fissures devient instable et conduit à la rupture pour $\sigma = \sigma_1^M$.

Les courbes de contrainte-déformation obtenues par essai de compression uniaxiale modélisent donc la relation entre l'état de contrainte d'un échantillon et son endommagement.

Nous avons réalisés des essais de compression uniaxiale sur les calcaires de référence présentés dans les conditions classiques préconisées par la norme utilisée pour déterminer le module d'Young (NF P94-425, 2002). Les courbes obtenues sont données dans la Figure 6-9 pour la Pierre de Lens et la Figure 6-10 pour le calcaire de Chamesson. Elles donnent l'état de contrainte $\frac{\sigma_1}{\sigma_1^M}$ en fonction des déformations axiale, radiale et volumique.

Nous retrouvons les allures typiques décrites précédemment. Ces courbes vont permettre la détermination de l'endommagement en fonction de la contrainte de chargement pour chacun des deux calcaires (Tableau 6-5).

A partir de ces constatations, nous avons cherché à mesurer la fréquence de résonance pour ces différents endommagements, en soumettant des échantillons aux états de contraintes correspondants.

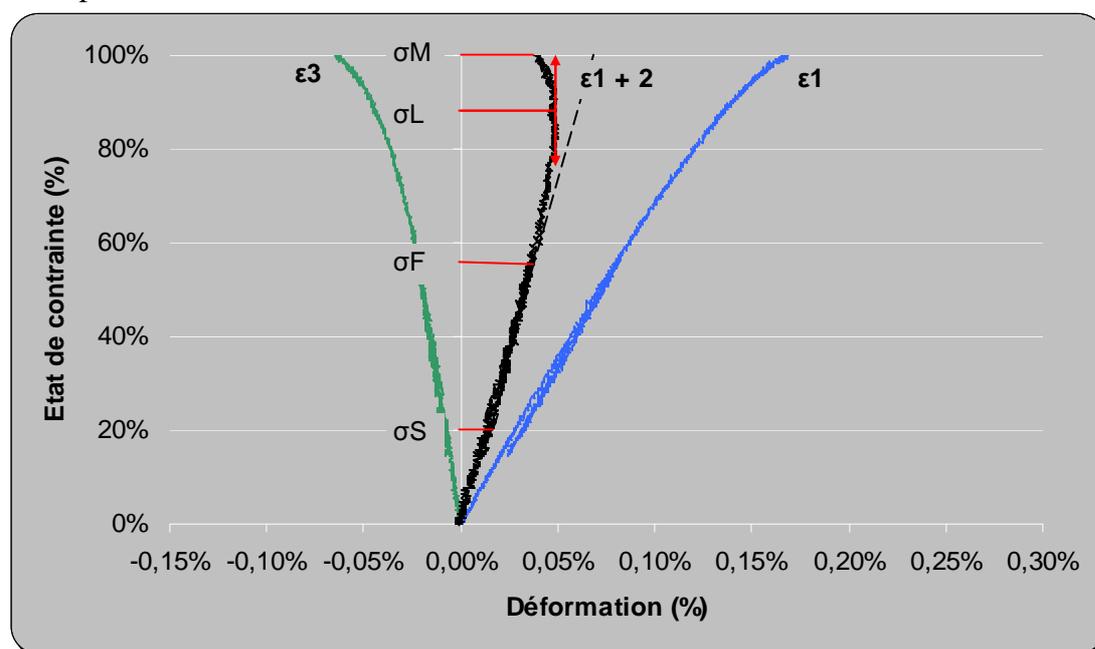


Figure 6-9 Courbe de contrainte-déformation pour la Pierre de Lens. Les notations reprennent celles de la Figure 6-8.

Soumettre un échantillon à un état de contraintes signifie lui appliquer une pression donnée selon les conditions d'un essai de compression uniaxiale. Nous avons choisi de prendre 4 échantillons de même dimension que celle des échantillons soumis aux cycles annuels d'altération accélérés, c'est-à-dire avec un élancement (rapport de la hauteur sur le diamètre pour un échantillon cylindrique) de 2, comme le préconise la norme utilisée pour déterminer la résistance à la compression uniaxiale (NF P 94-420, 2000).

Le 1^{er} échantillon est soumis à la contrainte correspondant au seuil de fissuration, les 2^{ème} et 3^{ème} échantillons sont soumis à des contraintes comprises dans la zone de propagation stable des fissures et enfin le 4^{ème} échantillon est soumis à la contrainte correspondant au début de la propagation instable des fissures. Les valeurs correspondant à ces états de contraintes sont reportées dans le Tableau 6-5.

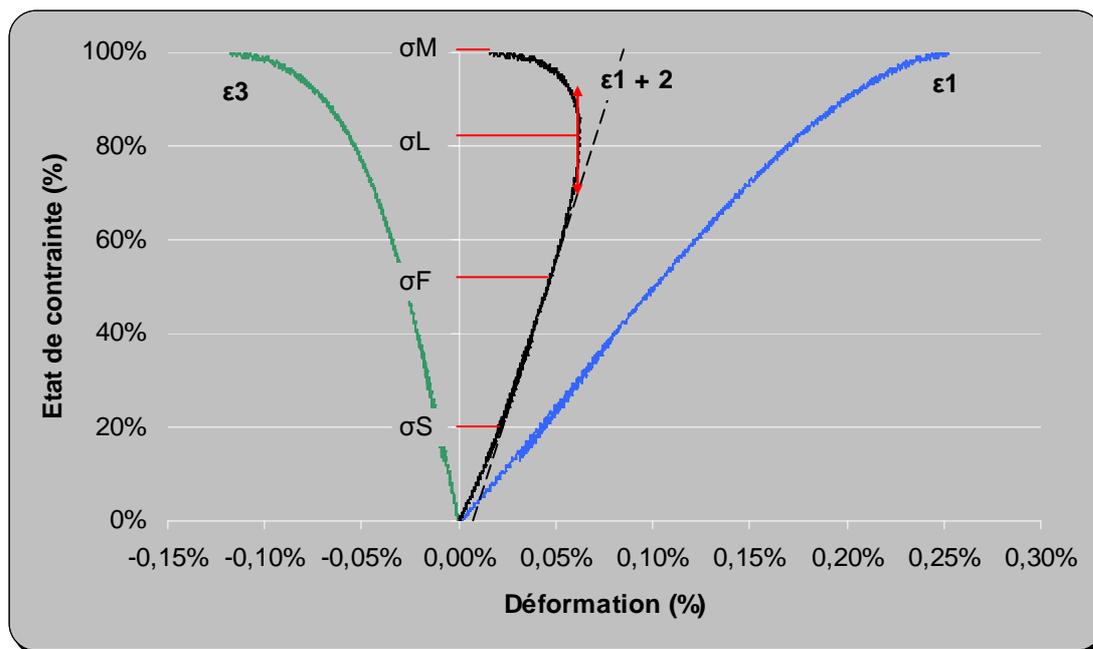


Figure 6-10 Courbe de contrainte-déformation pour le calcaire de Chamesson. Les notations reprennent celles de la Figure 6-8.

Etat de contraintes $\frac{\sigma_1}{\sigma_1^M}$				
Endommagement	Seuil de fissuration : σ_1^F	Propagation des fissures stables : $\sigma_1^F \leq \sigma \leq \sigma_1^L$		Début de la propagation instable des fissures : σ_1^L
Numéro associé	1	2	3	4
Calcaire de Chamesson	52%	60%	71%	82%
Pierre de Lens	55%	70%	80%	88%

Tableau 6-5 Les différents états de contrainte obtenus relier aux différentes phases de l'état de fissuration

La diminution relative de la fréquence de résonance %*f* a été mesurée par le calcul suivant :

$$\% f = \frac{f_{EC}}{f_{initial}} - 1$$

Avec f_{EC} la fréquence de résonance mesurée après l'application de l'état de contraintes 1, 2, 3 ou 4 sur l'échantillon.

Et $f_{initial}$ la fréquence de résonance initiale mesurée sur le même échantillon.

Les résultats de ces mesures sont reportés dans la Figure 6-11.

Plusieurs points sont remarquables dans la Figure 6-11 :

- avant le seuil de fissuration σ_1^F , la fréquence de résonance diminue très peu : la baisse est de moins de 2% ce qui est normal dans la mesure où il s'agit de la zone du comportement élastique du matériau ;
- dans la zone de propagation stable des fissures, i.e. pour $\sigma_1^F \leq \sigma \leq \sigma_1^L$, la fréquence de résonance diminue lorsque l'état de contrainte augmente. Le développement des fissures est donc graduel ;
- au début de la propagation instable des fissures, i.e. à σ_1^L , proche de la rupture, la fréquence de résonance se stabilise voire augmente légèrement.

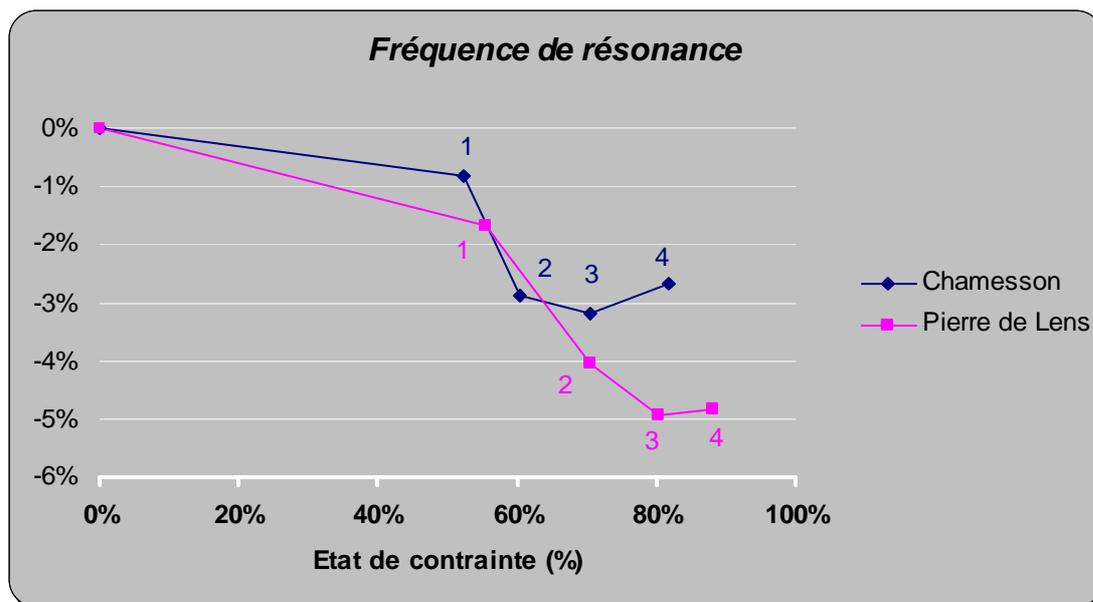


Figure 6-11 Diminution relative de la fréquence de résonance en fonction de l'état de contrainte pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens. Les numéros à côtés des points correspondent aux états de fissuration décrits dans le Tableau 6-5.

Cette dernière tendance contraste avec la diminution observée dans la zone de propagation stable des fissures. Or, la fréquence de résonance est sensible à la désorganisation du squelette rocheux perpendiculairement à la direction de parcours des ondes (cf. Chapitre 3, 3.2.2). Dans la zone de propagation stable, elle baisse probablement car la désorganisation du squelette rocheux dans cette direction augmente. Par contre dans la zone de propagation instable, la compression devient tellement importante que les modifications du squelette rocheux perpendiculaires à la direction de compression se stabilisent et la désorganisation du squelette rocheux se développe dans les autres directions, ainsi, la fréquence de résonance se stabilise.

Nous voyons donc que **la diminution relative de la fréquence de résonance varie en fonction de l'endommagement par compression uniaxiale et permet de dissocier l'endommagement par fissuration stable de celui par fissuration instable**, pour des contraintes dans une seule direction.

Regardons maintenant cette évolution lorsque les calcaires sont soumis à un endommagement naturel.

6.2.2.2. Validation avec un endommagement naturel

Nous allons donc mesurer l'évolution de la fréquence de résonance sur des échantillons soumis à des cycles de gel-dégel.

Les cycles de gel-dégel comprennent :

- une phase de gel à l'air à -5°C pendant 6 heures ;
- une phase de dégel dans l'eau à 20°C pendant 6 heures.

Les échantillons ont été saturés sous vide pour accentuer le phénomène (Bousquie, 1979). Un échantillon a été utilisé pour chaque calcaire de référence. Les mesures de fréquence de résonance ont été faites sur chaque échantillon après chaque cycle de gel-dégel. Les résultats sont présentés dans la Figure 6-12.

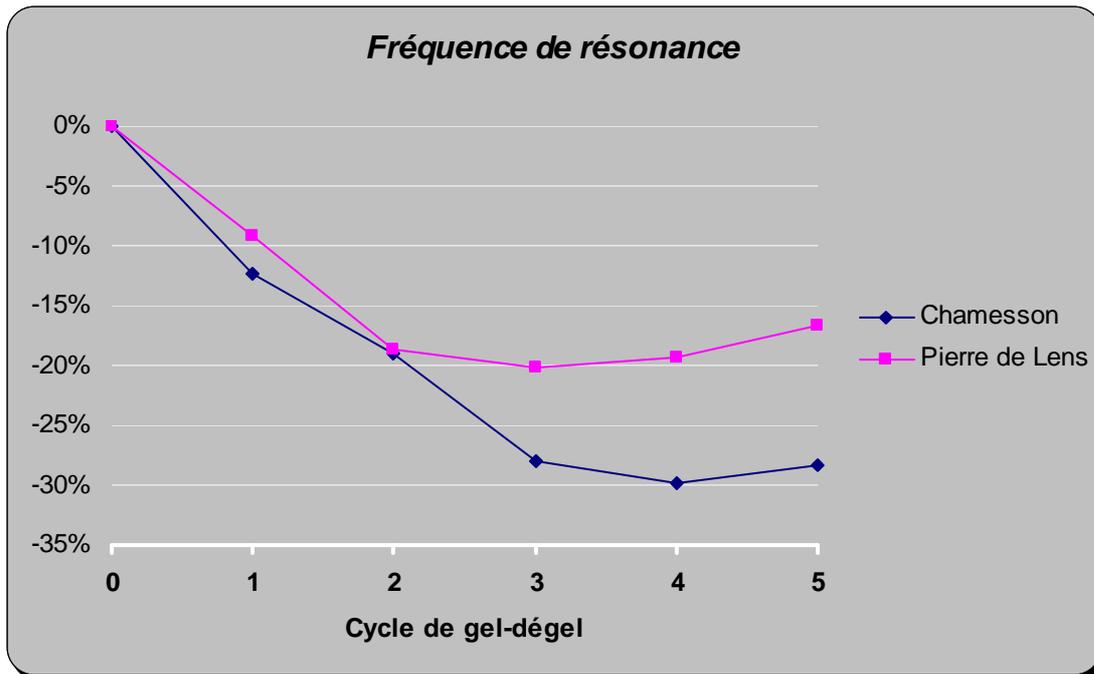


Figure 6-12 Evolution de la fréquence de résonance en fonction du nombre de cycles de gel-dégel

D'abord, pour les premiers cycles de gel-dégel, la fréquence de résonance diminue, il s'agit de la zone de propagation stable des fissures d'après l'allure de la Figure 6-11. Cette phase concerne les 4 premiers cycles pour le calcaire de Chamesson et les 3 premiers cycles pour la Pierre de Lens. Après cette phase, on observe une augmentation de la fréquence de résonance, ce qui correspond au début de la propagation instable des fissures, d'après l'allure de la Figure 6-11. Les deux calcaires sont donc proches de la rupture. **L'évolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles de gel-dégel (Figure 6-12) présente donc la même allure qu'en fonction du chargement en compression uniaxiale (Figure 6-11).**

Notons aussi que la fréquence de résonance diminue dix fois plus avec les contraintes liées aux cycles de gel-dégel qu'avec les contraintes liées à la compression uniaxiale. Ceci est sûrement dû au fait que les contraintes générées par les cycles de gel-dégel correspondent à un champ de contraintes multidirectionnelles alors que par compression, les contraintes sont appliquées dans une seule direction, elles ont donc un effet moins important sur l'endommagement.

6.2.3. Conclusion

La fréquence de résonance est une méthode de mesure qui permet de connaître le moment de rupture : le critère de rupture est la stabilisation de l'évolution de la fréquence de résonance en valeur relative. Elle répond donc bien au dernier critère de choix de la méthode de mesure utilisée pour l'obtention des cinétiques d'altération des calcaires de référence.

Son évolution est la suivante :

- faible diminution pour un endommagement compris dans la zone de comportement élastique du calcaire ;
- diminution importante pour un endommagement par propagation stable des fissures ;
- stabilisation (voire légère augmentation) dès que l'endommagement résulte de la propagation instables des fissures.

La fréquence de résonance répond donc à l'ensemble des critères de choix pour l'obtention des cinétiques d'altération. Elle sera donc le moyen utilisé dans la partie suivant pour estimer les cinétiques d'altération des calcaires de référence.

6.3. Cinétiques d'altération des calcaires de référence

6.3.1. Conditions de mesure

La procédure de mesure de la fréquence de résonance est décrite dans le Chapitre 3 (3.2.2.1). La mesure de la fréquence de résonance entre chaque cycle sur l'ensemble des échantillons est réalisée sur les échantillons :

- saturés « à 48 heures » d'après la norme NF B 10-504 (1973) ;
- entourés de leur membrane (cf. Chapitre 2, 2.3.5.1) ;
- après l'étape de dissolution et après l'étape de gélivation.

Ces trois conditions ont une influence sur la mesure de la fréquence de résonance. Des essais préliminaires, décrits dans la suite de ce paragraphe, permettent de la déterminer.

Influence du degré de saturation sur la mesure

Dans un souci d'optimisation du temps, nous avons décidé de **mesurer la fréquence de résonance sur les échantillons sans modifier leur degré de saturation**. Ceci a nécessité une étude préalable pour vérifier l'influence du degré de saturation sur la mesure de la fréquence de résonance.

Degré de saturation	1) Sec	2) Degré de saturation maximal lorsque les températures maximales sont supérieures à 20°C	3) Degré de saturation maximal lorsque les températures maximales sont inférieures à 20°C	4) Saturé
Procédure de saturation	Séchage dans une étuve à 60°C jusqu'à masse constante entre deux pesées quotidiennes	Saturation par imbibition (cf. degré de saturation 3) puis échantillons placés dans une salle climatisée à 20°C et pesée quotidienne jusqu'au degré de saturation proche de 50%*.	Saturation par imbibition, selon la procédure de saturation "à 48 heures" décrite dans la norme NF B 10-504 (1973)	Saturation sous vide
Valeurs obtenues				
Calcaire de Chamesson	0%	52%	94%	100%
Pierre de Lens	0%	49%	84%	100%

*Pour éviter que le séchage ne se fasse qu'en surface, des membranes en plastique ajustées ont été mises autour de chaque échantillon. Pour que cette perte en eau soit encore plus homogène, à chaque pesée quotidienne, l'échantillon est retourné et la face supérieure d'évaporation devient la face inférieure d'évacuation.

Tableau 6-6 Degrés de saturation choisis pour l'étude de l'évolution de la fréquence de résonance en fonction du degré de saturation donné dans la Figure 2-31. Les valeurs obtenues correspondent à la moyenne des degrés de saturation des 3 échantillons.

Pour ce faire, nous avons mesuré l'évolution de la fréquence de résonance à différents degrés de saturation. Rappelons que le degré de saturation S_r en eau d'une roche est défini comme le rapport entre le volume d'eau et celui des vides constituant la roche :

$$S_r = \frac{m_i - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sat}} - m_{\text{sec}}}$$

Avec

m_i = masse de l'échantillon à l'instant i

m_{sec} = masse du même échantillon après séchage (Procédure 1 du Tableau 6-6)

m_{sat} = masse du même échantillon après saturation sous vide (Procédure 4 du Tableau 6-6)

Ainsi, une roche complètement sèche a un degré de saturation de 0% et une roche complètement saturée a un degré de saturation de 100%.

Nous avons choisi 4 degrés de saturation en fonction du degré de saturation estimé en fonction des données de températures et de précipitations réelles au Chapitre 2 (2.3.1.4). Ils sont donnés dans le Tableau 6-6, ainsi que la procédure expérimentale utilisée pour les obtenir. Pour chaque degré de saturation et chaque calcaire, 3 échantillons ont été mesurés, la valeur moyenne de leur degré de saturation est également donnée dans ce tableau. Comme la mesure de la fréquence de résonance est non destructive, nous avons utilisé les mêmes échantillons pour chaque degré de saturation.

Le calcul de la diminution de la fréquence de résonance % f se fait ensuite de la manière suivante :

$$\% f = \frac{f_{sat}}{f_{sec}} - 1$$

Avec f_{sat} la fréquence de résonance mesurée pour les degrés de saturation 2, 3 ou 4 (Tableau 6-6) sur l'échantillon.

Et f_{sec} la fréquence de résonance mesurée sur le même échantillon à l'état sec.

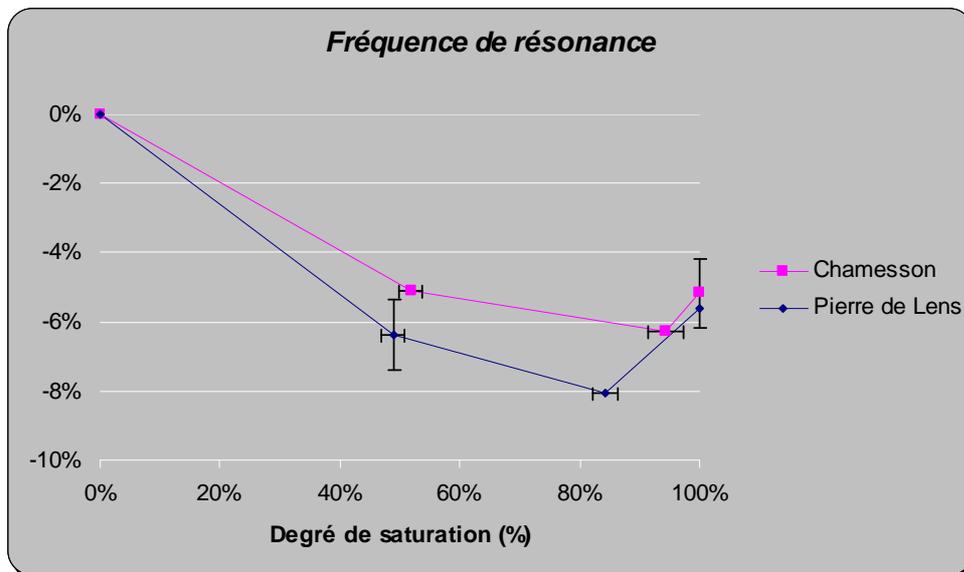


Figure 6-13 Diminution relative de la fréquence de résonance en fonction du degré de saturation en eau. Chaque valeur correspond à une moyenne de mesures faites sur les 3 mêmes échantillons pour les 2 calcaires de référence. Les écart-types sont également représentés, certains sont nuls.

On obtient ainsi l'évolution de la fréquence de résonance (en valeur relative moyenne) en fonction du degré de saturation, reportée dans la Figure 6-13.

L'analyse des résultats montre que :

- La fréquence de résonance baisse de 5% pour le calcaire de Chamesson et de 6% pour la Pierre de Lens entre les degrés de saturation 0% et 50% ;
- Les variations de la fréquence de résonance en fonction du degré de saturation sont inférieures à 2% pour des degrés de saturation compris entre 50% et 100%.

Or, entre chaque cycle annuel d'altération accéléré, le degré de saturation est proche du degré de saturation obtenu par saturation « à 48 heures » (NF B10-504, 1973), c'est-à-dire supérieure à 50%. **La mesure de la fréquence de résonance peut donc se faire sans modifier le degré de saturation des échantillons.**

Influence de la membrane sur la mesure

Ensuite, rappelons que les échantillons sont entourés d'une membrane qui permet de réaliser l'étape de dissolution et qui limite l'évaporation de l'eau contenue dans la roche par l'ensemble de sa surface latérale (cf. Chapitre 2, 2.3.5.1).

Sachant que les échantillons vont être de plus en plus endommagés au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, les manipuler en retirant la membrane risque de les endommager encore plus. Nous avons donc choisi de mesurer la fréquence de résonance sur les échantillons avec leurs membranes.

Nous avons vérifié l'influence de la membrane sur la mesure de la fréquence de résonance en la mesurant pour des échantillons saturés à 48 heures avec et sans membrane. Les mesures ont été réalisées sur 3 échantillons du calcaire de Chamesson et 3 échantillons de la Pierre de Lens. Les écarts entre les deux mesures sont inférieurs à 100 Hz, soit moins de 0,4% de la valeur de la fréquence de résonance. **L'influence de la membrane sur la valeur de la fréquence de résonance est donc négligeable.**

Influence de l'étape sur la mesure

Enfin, les cycles annuels d'altération accélérés comprennent deux étapes : une étape de gélivation et une de dissolution. Or, la répartition de l'eau dans l'échantillon n'est pas la même pour les deux étapes.

Le sens de l'apport en eau lors de l'étape de gélivation se fait par la base de l'échantillon, ce qui favorise l'évaporation de l'eau par le haut de l'échantillon et donc une répartition non homogène de l'eau dans l'échantillon. Lors de l'étape de dissolution, l'apport en eau se fait par le haut de l'échantillon et donc la répartition de l'eau dans l'échantillon est plus homogène. **Nous avons donc choisi de ne considérer la mesure de la fréquence de résonance qu'après l'étape où le degré de saturation est le plus homogène, c'est-à-dire après l'étape de dissolution.**

Nous pouvons maintenant passer à la présentation des résultats et à leur analyse.

Calcaire de Chamesson		Pierre de Lens	
Cycle annuel d'altération accéléré	Nombre d'échantillons	Cycle annuel d'altération accéléré	Nombre d'échantillons
0	40	0-1	40
1	36	2-3	36
2	32	4-5	32
3	28	6-7	28
4	24	8-9	24
5	20	10-11	20
6	16	12-13	16
7	12	14-15	12
8-9	8	16-19	8
10-12	4	20-24	4

Tableau 6-7 Nombre d'échantillons dont la fréquence de résonance a été mesurée à chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les deux calcaires de référence

6.3.2. Résultats

6.3.2.1. Nombre d'échantillons mesurés

La mesure de la fréquence de résonance est réalisée sur l'ensemble des échantillons soumis aux cycles annuels d'altération accélérés. Or, comme vu au Chapitre 5 (5.1), 4 échantillons sont régulièrement prélevés du lot pour réaliser des mesures destructives. Donc le nombre

d'échantillons diminue au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés. Le Tableau 6-7 donne le nombre d'échantillons mesurés en fonction du cycle annuel d'altération accéléré.

6.3.2.2. Cinétiques d'altération obtenues

La valeur relative de la fréquence de résonance est calculée par rapport à la valeur initiale mesurée sur le même échantillon, ainsi :

$$\% f_{i,k} = \frac{f_{i,k}}{f_{i,0}}$$

Avec

$\% f_{i,k}$ la valeur relative de la fréquence de résonance pour l'échantillon i au cycle k

$f_{i,0}$ la valeur mesurée de la fréquence de résonance pour l'échantillon i à l'état initial

$f_{i,k}$ la valeur mesurée de la fréquence de résonance pour l'échantillon i au cycle k

La moyenne sur l'ensemble des échantillons, dont le nombre total n décroît au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, au cycle k vaut :

$$\% f_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \% f_{i,k}$$

L'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour les deux calcaires de référence est donnée dans la Figure 6-14.

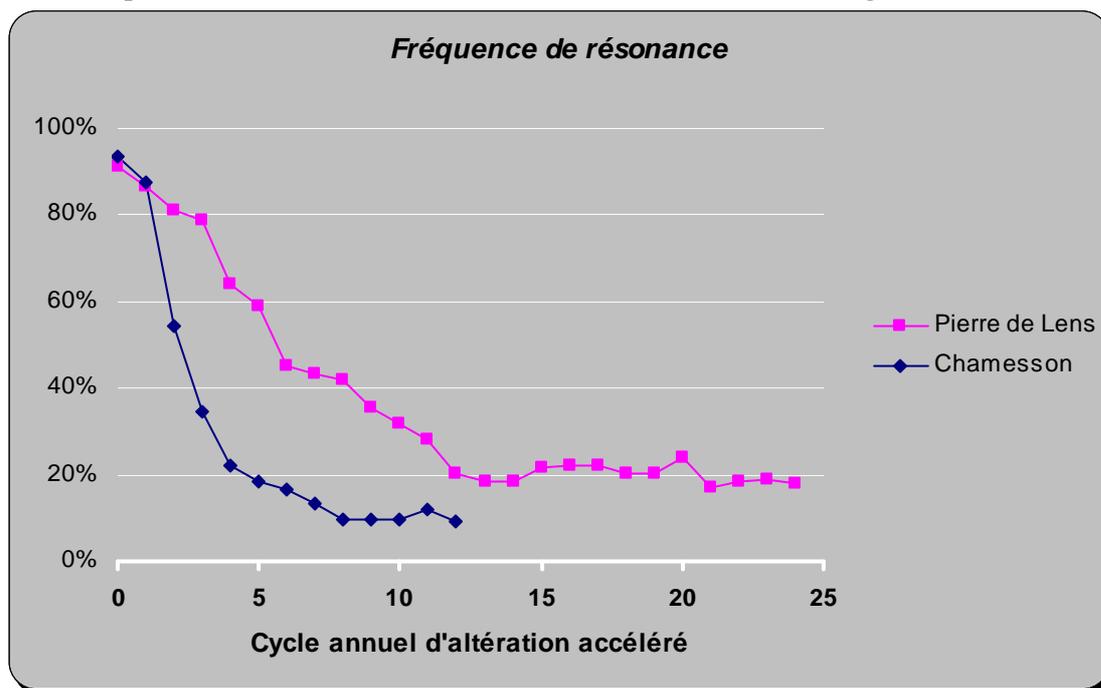


Figure 6-14 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés pour les deux calcaires de référence

Rappelons que les cycles annuels d'altération accélérés ne sont pas les mêmes pour les deux calcaires. Chacun a un cycle annuel d'altération qui lui est propre, en fonction du climat de sa région (cf. Chapitre 2, 2.3.4) :

- le cycle du calcaire de Chamesson se compose de 14 jours de dissolution et 28 cycles de gel-dégel ;

- le cycle de la Pierre de Lens se compose de 7 jours de dissolution et 8 cycles de gel-dégel.

Les cinétiques d'altération brutes de ses deux calcaires ne sont ainsi pas comparables.

L'évolution de la fréquence de résonance donne, ici, une tendance moyenne sur l'ensemble des échantillons. Elle permet de dégager des cinétiques d'altération moyennes. **Trois cinétiques d'altération apparaissent :**

- cinétique 1 : cinétique d'altération lente jusqu'au cycle 1 pour le calcaire de Chamesson et 3 pour la Pierre de Lens, où l'évolution de la fréquence de résonance décroît selon une fonction linéaire en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés ;

- cinétique 2 : cinétique d'altération plus rapide jusqu'au cycle 7 pour le calcaire de Chamesson et 13 pour la Pierre de Lens, où l'évolution de la fréquence de résonance décroît selon une fonction puissance en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés ;

- cinétique 3 : cinétique d'altération qui présente une évolution nulle voire même positive, où l'évolution de la fréquence de résonance en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés est stable, voire augmente.

L'évolution globale de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés rappelle l'évolution observée dans le paragraphe 6.2.2 : les différents stades d'endommagement apparaissent dans cette évolution. Ainsi, si l'on reprend la Figure 6-11, la cinétique lente correspond au comportement élastique du matériau, la cinétique rapide à la propagation stable des fissures et la cinétique nulle à la propagation instable des fissures.

Les cinétiques d'altération décrites sont reliées à des numéros de cycles annuels d'altération accélérés. Comparons ces cycles avec ceux associés aux phases du processus d'altération pour les deux calcaires de référence donnés dans le Chapitre 5, 5.2.1.4 et 5.3.1.4 (Tableau 6-8).

Calcaire de Chamesson		Pierre de Lens	
Phases du processus d'altération	Cinétique d'altération	Phases du processus d'altération	Cinétique d'altération
Fissuration :	Lente :	Fissuration :	Lente :
1 à 3 (Mécanique)	1	1 à 3 (Mécanique)	1 à 3
1 à 7 (Physique)		1 à 7 (Physique)	
	Rapide :	Elargissement des vides :	Rapide :
	2 à 7	8 à 13	4 à 13
Elargissement des vides à partir de 8	Nulle : à partir de 8	Stabilisation : à partir de 15	Nulle : à partir de 14

Tableau 6-8 Comparaison entre les phases du processus d'altération (Chapitre 5, 5.2.1.4 et 5.3.1.4) et les phases de la cinétique d'altération (Figure 6-14)

Les cinétiques d'altération ne correspondent pas directement aux phases du processus d'altération en termes de cycles. En effet, pour les phases du processus d'altération les mesures ont été faites sur les échantillons les plus endommagés (compte-tenu de leur valeur de fréquence de résonance). **Les phases du processus d'altération représentent donc le cas le plus défavorable et les cinétiques d'altération le cas moyen.**

La décroissance puis la stabilisation de la fréquence de résonance pour les cinétiques 2 et 3 s'apparente à une fonction puissance. Ce type de fonction n'a pas de sens physique. Par contre, si l'on représente l'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction du logarithme du nombre de cycles annuels d'altération accélérés, on aboutit à une relation reposant sur une loi exponentielle (Figure 6-15).

Cette représentation de la forme $\% f_k = A \times e^{-B \times \log(k)}$ donne les relations suivantes :

- pour le calcaire de Chamesson : $\% f_k = 0,91 \times e^{-2,21 \times \log(k)}$ pour $k > 1$, $r^2 = 0,97$;

- pour la Pierre de Lens : $\% f_k = 1,74 \times e^{-1,72 \times \log(k)}$ pour $k > 4$, $r^2 = 0,91$.

Avec $\% f_k$ la moyenne des valeurs relatives de fréquence de résonance au cycle k .

La valeur de A est plus élevée pour la Pierre de Lens que pour le calcaire de Chamesson, ce qui traduit le fait que la **cinétique d'altération lente se maintient plus longtemps**, en termes de cycles annuels d'altération accélérés, pour la Pierre de Lens que pour le calcaire de Chamesson.

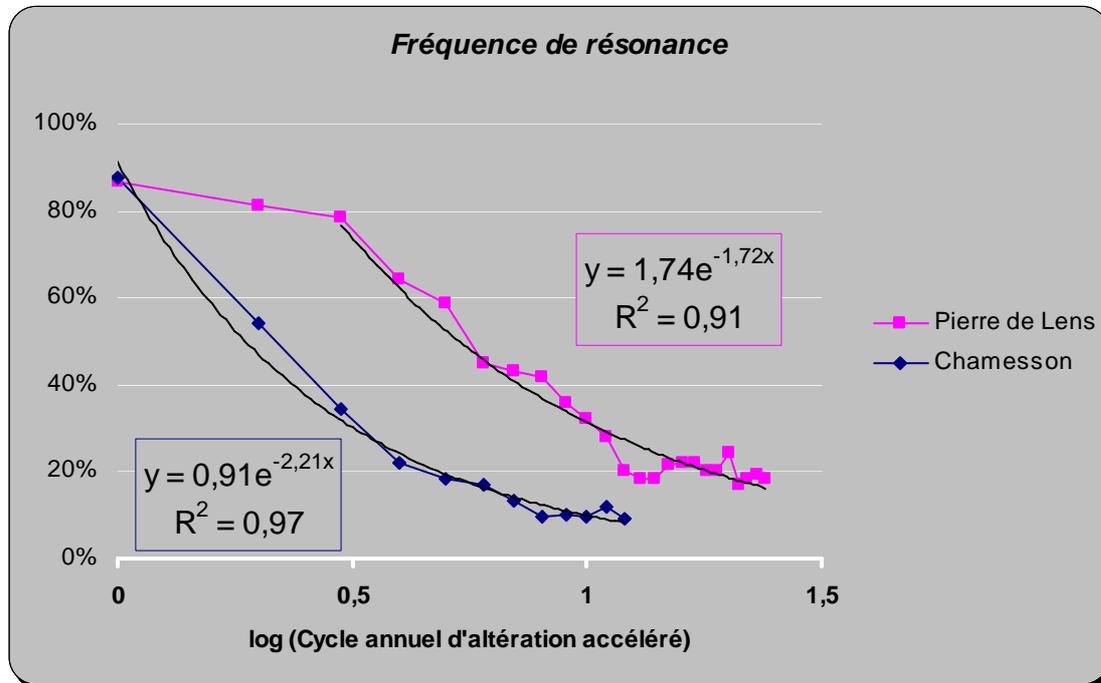


Figure 6-15 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons en fonction du logarithme du nombre de cycles annuels d'altération accélérés pour les deux calcaires de référence

La valeur de B est similaire entre le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens, les variations ne semblent donc **pas significatives**.

Concernant la zone où la cinétique d'altération est nulle, la valeur relative de la fréquence de résonance, devenue quasi-constante est de 20% pour la Pierre de Lens et de 10% pour le calcaire de Chamesson. Cette valeur correspond à une valeur limite au-delà de laquelle l'échantillon atteint la rupture. Or, nous avons vu (6.1.1.3) que la Pierre de Lens a une résistance à la fissuration plus petite que le calcaire de Chamesson. Ces deux informations coïncident : **le calcaire le moins résistant à la fissuration atteint une valeur seuil de fréquence de résonance plus élevée, c'est-à-dire qu'en étant moins fissuré, il atteint déjà la valeur limite avant la rupture.**

Les cinétiques d'altération obtenues donnent le cas moyen de l'évolution de la fréquence de résonance.

Elles font apparaître trois cinétiques (lente, rapide puis stable) rappelant les différentes phases d'endommagement décrites dans le paragraphe 6.2.3.

Les cinétiques d'altération associées au calcaire de Chamesson en Bourgogne et à la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon sont proches pour la phase de diminution rapide de la fréquence de résonance. Par contre, la cinétique d'altération lente dure plus longtemps pour la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon.

Un seuil de rupture apparaît pour les deux calcaires lors de la cinétique d'altération stable. Il est plus élevé pour la Pierre de Lens que pour Chamesson, ce qui s'explique par leur résistance à la fissuration (6.1.1.3).

6.3.2.3. Analyse des résultats

Nous avons vu qu'il y a une différence entre les deux calcaires concernant le moment où la fréquence de résonance chute rapidement : pour le calcaire de Chamesson en Bourgogne, ce moment est plus précoce (dès le 2^{ème} cycle) que pour la Pierre de Lens dans le Languedoc-Roussillon (dès le 4^{ème} cycle).

Doit-on attribuer cette différence à la différence de comportement des deux calcaires vis-à-vis de l'altération (cf. Chapitre 5, 5.4), ou bien aux cycles annuels d'altération accélérés différents qu'ils subissent, ou bien aux deux ?

Pour comparer ces deux calcaires qui ont subi des climats différents, décomposons leurs cycles annuels d'altération accélérés en termes de :

- nombre de jours avec dissolution, c'est-à-dire le nombre de jours associés à l'étape de dissolution (cf. Chapitre 2, 2.3.4) ;
- nombre de cycles de gel-dégel, c'est-à-dire le nombre de jours associés à l'étape de gélivation (cf. Chapitre 2, 2.3.4).

Les nombres associés à ces deux étapes sont rappelés dans le Tableau 6-9 ainsi que leur somme.

	Nombre de jours avec dissolution correspondant à 1 cycle annuel d'altération accéléré	Nombre de cycles de gel-dégel correspondant à 1 cycle annuel d'altération accéléré	Nombre de jours total associé à 1 cycle annuel d'altération accéléré
Calcaire de Chamesson	14	28	14 + 28 = 42
Pierre de Lens	7	8	7 + 8 = 15

Tableau 6-9 Décomposition d'un cycle annuel d'altération accéléré en termes de jours de dissolution et de cycles de gel-dégel pour les deux calcaires de référence

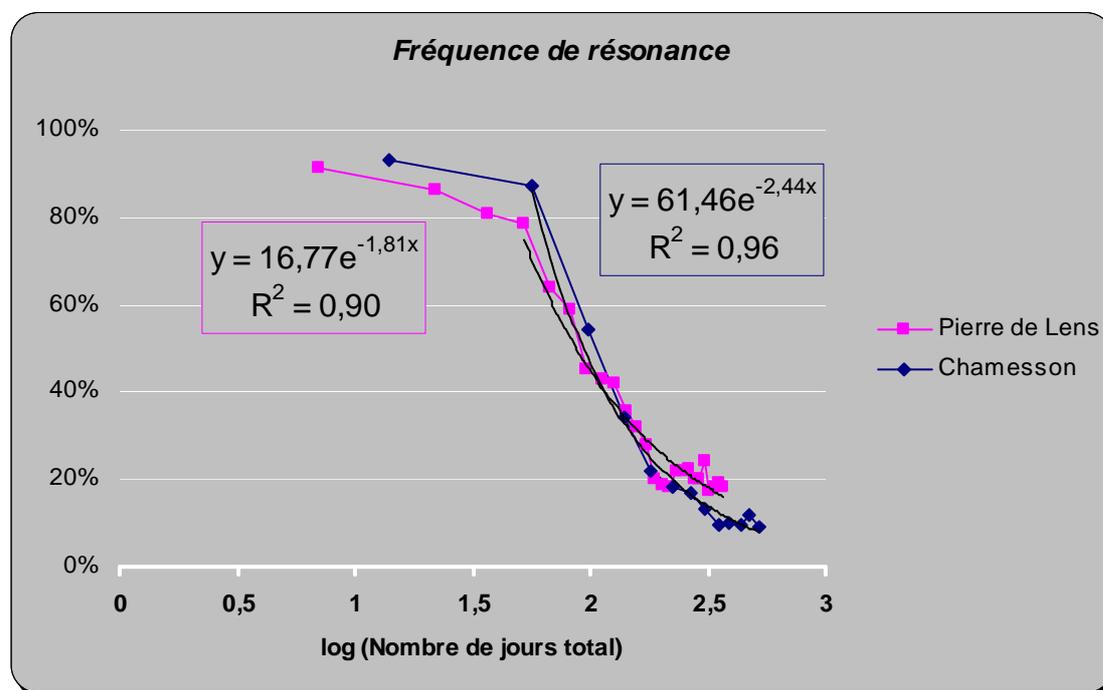


Figure 6-16 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons en fonction du logarithme du nombre de jours total d'altération (somme du nombre de jours de dissolution et du nombre de cycles de gel-dégel) pour les deux calcaires de référence

De cette façon nous pouvons aboutir au nombre de jours total d'altération, c'est-à-dire la somme du nombre de jours avec dissolution et du nombre de cycles de gel-dégel, et ainsi comparer les cinétiques d'altération des deux calcaires de référence.

La Figure 6-16 donne l'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction du logarithme du nombre de jours total d'altération.

Dans cette représentation, le point de départ de la baisse rapide de la fréquence de résonance est quasiment identique pour les deux calcaires de référence : il est compris entre 1,72 et 1,75, soit entre 52 et 56 jours d'altération. **C'est donc le climat, à l'origine du cycle annuel d'altération accéléré, qui conditionne le point de départ de la partie où la cinétique d'altération devient élevée** et donc de l'endommagement de la roche.

De plus, les relations obtenues présentent des exposants proches pour les deux calcaires (2,44 pour le calcaire de Chamesson et 1,81 pour la Pierre de Lens) avec une valeur légèrement plus élevée pour le calcaire de Chamesson, comme vu au paragraphe 6.3.2.2. Le comportement de la roche vis-à-vis de l'altération apparaît comme **secondaire concernant la partie où la cinétique d'altération est rapide** pour ces deux calcaires par rapport au climat.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux calcaires de références met en évidence le rôle majeur du climat dans la cinétique d'altération sous nos latitudes et le rôle secondaire du comportement de la roche vis-à-vis de la cinétique d'altération.

6.3.3. Conclusion

L'évolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés met en évidence les différents états d'endommagement (comportement élastique, fissuration stable et fissuration instable). Elle fait apparaître trois cinétiques d'altération successives : une cinétique lente, une cinétique rapide et une cinétique nulle.

Les cinétiques d'altération des deux calcaires de référence sont semblables mais avec un décalage dans le temps. Ce décalage semble dû au climat et non au comportement de la roche. La dernière étape (cinétique d'altération nulle) met en évidence un seuil de rupture qui dépend de la résistance à la fissuration du calcaire. Ce seuil est plus élevé pour un calcaire dont la ténacité est plus faible (Pierre de Lens) : il se situe à 20% de la valeur de la fréquence de résonance initiale. Pour le calcaire dont la ténacité est la plus élevée (calcaire de Chamesson), ce seuil se situe à 10% de la valeur de la fréquence de résonance initiale.

6.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de déterminer que :

- la présence de vides autour des oolithes diminue la résistance à la propagation des fissures ;
- la cinétique d'altération se décompose en trois étapes, une cinétique d'altération lente puis une cinétique d'altération rapide et enfin une cinétique d'altération nulle ;
- le climat a un impact sur le temps écoulé avant le début de la cinétique d'altération rapide ;
- le calcaire, et en particulier sa résistance à la propagation des fissures, conditionne le seuil de rupture, c'est-à-dire le pourcentage de la fréquence de résonance initiale atteint lors de l'étape de cinétique d'altération nulle.

Ces résultats et ceux du Chapitre 5 vont maintenant être confrontés à une nouvelle série de mesures sur un autre calcaire oolithique (calcaire de Vilhonneur) dans un autre climat (dominante océanique). Ils permettront de valider la démarche adoptée et fixer les limites des conclusions établies jusqu'ici.

Bibliographie

Backers T. *Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading*. PhD Thesis. Potsdam : Institut für Geowissenschaften, 2004. 138 p.

Bost M. *Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 281 p.

Bourbié T., Coussy O., Zinszner B. *Acoustique des milieux poreux*. Paris : Technip, 1986. 339 p.

Bousquie P. *Texture et porosité de roches calcaires*. Thèse. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1979. 191 p.

Bouvard J.-L. *Modélisation de la propagation de fissure dans les aubes de turbines monocristallines*. Thèse. Paris : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006. 306 p.

Frade G. *Fatigue* [En ligne]. *Encyclopaedia Universalis*. 2008. < www.universalis-edu.com >

Grange S. *Expérimentation et modélisation de l'endommagement sous chargements dynamiques de deux roches calcaires*. Thèse. Cachan : Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007. 170 p.

International Society for Rock Mechanics-Commission on Testing Methods. « Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched brazilian disc (CCNBD) specimens ». *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1995. Vol. 32, n°1, p. 57-64.

Lemaignan C. *La rupture des matériaux*. EDP Sciences, 2003. 142 p. ISBN : 9782868836427.

NF B10-504. *Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau*. août 1973.

NF P 94-420. *Roches - Détermination de la résistance en compression uniaxiale*. 2000.

NF P94-425. *Roches - Détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson*. avril 2002.

Panet M. *La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil*. 1976. 235 p.(Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

Paris P. C., Gomez R. E., Anderson W. E. « A rational analytic theory of fatigue ». *Trend Eng*. 1961. Vol. 13, n°1, p. 9-14.

Saad A., Bost M., Martineau F. « Failure scenario estimated by a non-destructive method ». In : *Proceedings of EUROCK2010. European Rock Mechanics Symposium*. Lausanne, Switzerland : CRC Press/Balkema, 2010. p. 4.

Saad A., Bost M. « The resonant frequency measurement and cracking evolution in rocks ». In : *Proceedings of EUROCK2009. European Rock Mechanics Symposium*. Dubrovnik (Croatia) : CRC Press/Balkema, 2009. p. 345-350. ISBN : 978-0-415-80481-3.

Wang Q. Z. « Formula for calculating the critical stress intensity factor in rock fracture toughness tests using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. septembre 2010. Vol. 47, n°6, p. 1006-1011.

7. Validation des résultats à l'aide d'un autre calcaire sous un autre climat

INTRODUCTION

Le travail effectué jusqu'ici a permis d'obtenir des résultats concernant le processus d'altération (Chapitre 5) et les cinétiques d'altération (Chapitre 6) des calcaires oolithiques à partir de deux calcaires de référence (le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens). Nous devons donc valider la démarche et les conclusions faites jusqu'à présent. Pour cela, nous avons choisi de prendre un troisième calcaire, présentant des caractéristiques similaires aux calcaires de référence mais sous un autre climat français.

Pour le choix de cette troisième zone d'expérimentation, nous avons gardé les critères du Chapitre 2 (2.1), c'est-à-dire :

- une porosité comprise entre 10 et 20% ;
- un calcaire oolithique ;
- une sensibilité à la gélivation différente ;
- un calcaire disponible au laboratoire.

Par ailleurs, nous souhaitons étudier un autre climat très présent en France d'où le choix du climat océanique.

Cette nouvelle analyse a pour but de répondre aux points suivants (issues des conclusions du Chapitre 4 et du Chapitre 5) :

- Au niveau des cinétiques d'altération :

A-t-on les mêmes états d'endommagement au niveau la fréquence de résonance (cinétiques lente, rapide et nulle) ?

Le décalage dans le temps est-il dû uniquement au climat ?

La résistance à la propagation de la fissuration est-elle liée au seuil de rupture ?

- Au niveau du processus d'altération :

Est-ce que la différence de comportement vis-à-vis de la fissuration est due à la microstructure ?

Retrouve-t-on les phases du processus d'altération ?

7. VALIDATION DES RESULTATS A L'AIDE D'UN AUTRE CALCAIRE SOUS UN AUTRE CLIMAT	195
7.1. Le calcaire de Vilhonneur en Poitou-Charentes	196
7.1.1. Description de la zone d'extraction	197
7.1.1.1. Description du climat	197
7.1.1.2. Description du calcaire	197
7.1.2. Cycle annuel d'altération accéléré	200
7.2. Validation des cinétiques d'altération	200
7.2.1. Nombre d'échantillons mesurés	200
7.2.2. Résultats et analyse	201
7.2.3. Conclusion	204
7.3. Validation du processus d'altération	204
7.3.1. Nombre d'échantillons mesurés	204
7.3.2. Résultats et analyse	204
7.3.3. Conclusion	211
7.4. Conclusion	211

7.1. Le calcaire de Vilhonneur en Poitou-Charentes

Le calcaire de Vilhonneur répond à l'ensemble de caractéristiques précédentes et en particulier, il présente trois faciès qui ont des sensibilités à la gélivation différentes. Ces faciès sont décrits dans le paragraphe 7.1.1.2. Nous avons donc choisi de mesurer la cinétique d'altération des trois faciès du calcaire de Vilhonneur en fonction des conditions climatiques océaniques associées à sa zone d'extraction. Les caractéristiques géographiques de ce calcaire sont données dans le Tableau 7-1.

Calcaire	Commune où se situe la carrière	Département	Classe (NF B10-601, 2006), cf. Chapitre 2 (2.1)	Station Météo France la plus proche	Climat (cf. Chapitre 2, 2.1)
Vilhonneur	Vilhonneur	Charente	B	Cognac	Dominante océanique

Tableau 7-1 Caractéristiques géographiques du 3^{ème} calcaire étudié

7.1.1. Description de la zone d'extraction

7.1.1.1. Description du climat

La zone d'extraction en Poitou-Charentes se situe dans la commune de Vilhonneur (Figure 7-1). La carrière de Vilhonneur est toujours en exploitation.



Figure 7-1 Localisation de la commune où se trouve le calcaire de Vilhonneur

La station météorologique la plus proche de la commune de Vilhonneur est la station de Cognac. C'est donc celle qui a servi pour obtenir les données climatiques. Nous présentons, ici, les valeurs de températures (Figure 7-2) et de précipitations (Figure 7-3) mensuelles moyennes fournies par Météo France (2009) calculées sur la période de 1971-2000.

7.1.1.2. Description du calcaire

Le calcaire de Vilhonneur est oolithique et présente trois faciès différents, dont les caractéristiques sont reportées dans le Tableau 7-2.

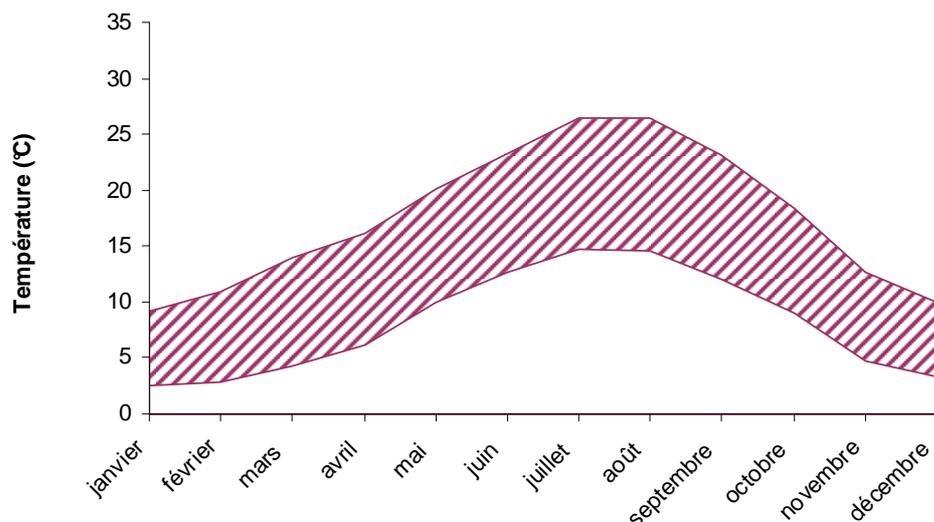


Figure 7-2 Températures mensuelles moyennes minimales et maximales calculées sur la période 1971-2000 pour la station Cognac (Météo France, 2009)

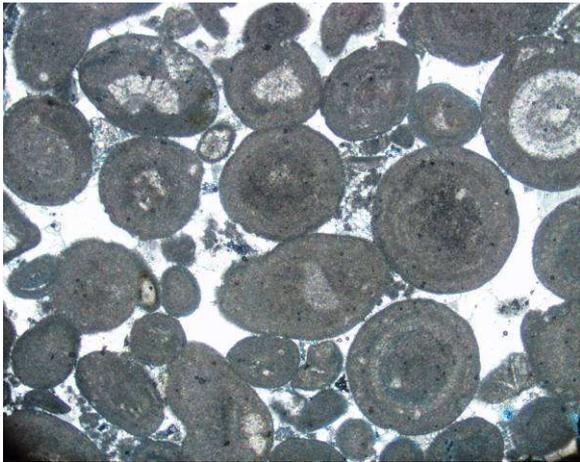


Figure 7-3 Cumuls mensuels moyens des précipitations calculés sur la période 1971-2000 pour la station Cognac (Météo France, 2009)

Faciès	Sensibilité à la gélivation qualitative*	Vitesse du son (m/s)	Module d'élasticité dynamique (GPa)	Porosité totale (%)	Perméabilité à l'eau (μD , $1 \mu D = 10^{-18} m^2$)
NG	Faible	4140	31	10,7	130
MG	Moyenne	3920	33	11,5	170
G	Forte	3190	22	11,0	85

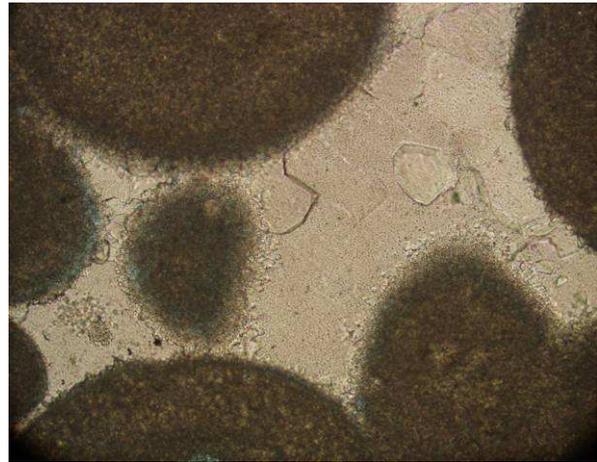
*Cette sensibilité correspond à l'appellation des carriers, adaptée à l'utilisation de la pierre en œuvre (revêtement au sol, revêtement mural mince ou massif, etc.), ceci permet une graduation du comportement de ces faciès vis-à-vis de la gélivation.

Tableau 7-2 Caractéristiques physico-mécaniques des trois faciès du calcaire de Vilhonneur étudiés ici

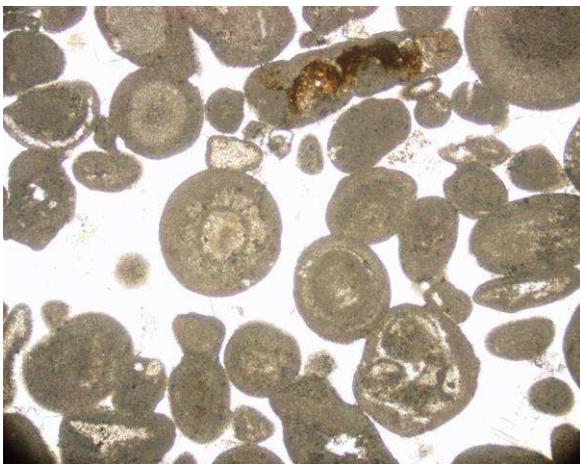


(LN, x50)

Figure 7-4 Observations au microscope optique du calcaire de Vilhonneur faciès NG (la résine bleue fait apparaître la porosité), lumière polarisée

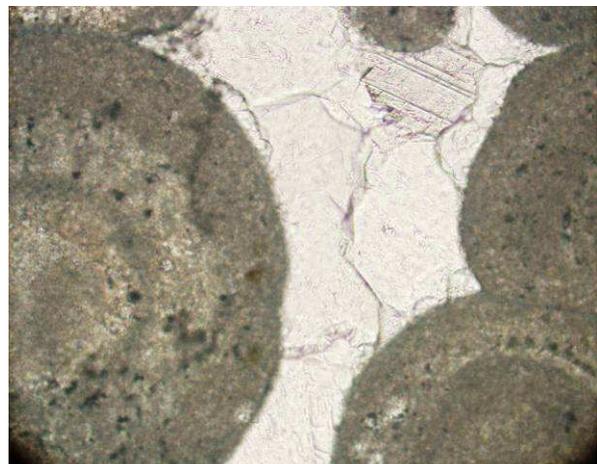


(LN, x200)

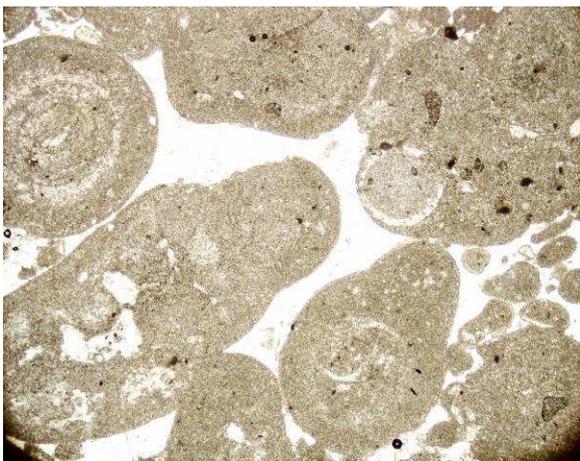


(LN, x50)

Figure 7-5 Observations au microscope optique du calcaire de Vilhonneur faciès G (la résine bleue fait apparaître la porosité), lumière polarisée



(LN, x200)



(LN, x50)

Figure 7-6 Observations au microscope optique du calcaire de Vilhonneur faciès MG (la résine bleue fait apparaître la porosité), lumière polarisée



(LN, x200)

Ces trois faciès ont les caractéristiques microstructurales suivantes :

- le faciès NG (Figure 7-4) est de couleur beige clair (patine et à la cassure). Il s'agit d'un calcaire relativement homogène avec des grains d'environ 1 mm de diamètre. En lames

minces, ce calcaire oolithique présente une porosité autour des oolithes, tout comme la Pierre de Lens (Figure 2-19);

- le faciès G (Figure 7-5) est de couleur beige clair (patine et à la cassure). Il s'agit d'un calcaire relativement homogène avec des grains d'environ 1 mm de diamètre. En lames minces, aucun vide n'est remarquable autour des oolithes, tout comme pour le calcaire de Chamesson (Figure 2-8) ;

- le faciès MG (Figure 7-6) est de couleur beige clair (patine et à la cassure). Il s'agit d'un calcaire relativement homogène avec des grains d'environ 1 mm de diamètre. En lames minces, certains oolithes sont entourés de vides et d'autres pas. Cette microstructure est donc intermédiaire entre le faciès NG et le faciès G.

Les deux calcaires qualifiés de sensibles à la gélivation (faciès G du calcaire de Vilhonneur et calcaire de Chamesson) ne présentent pas de vides autour de leurs oolithes. Les deux calcaires qualifiés de non sensibles à la gélivation (faciès NG du calcaire de Vilhonneur et Pierre de Lens) présentent des vides autour de leurs oolithes. Le faciès MG du calcaire de Vilhonneur, avec une sensibilité à la gélivation intermédiaire, ne présente des vides qu'autour de certains oolithes. Cette caractéristique microstructurale semble donc déterminante dans le comportement des calcaires oolithiques vis-à-vis de la gélivation.

7.1.2. Cycle annuel d'altération accéléré

Reprenons le Tableau 2-12 du Chapitre 2 pour déterminer le cycle annuel d'altération accéléré à appliquer aux échantillons du calcaire de Vilhonneur pour reproduire le climat à dominante océanique qui lui est associé. Les paramètres nécessaires à l'établissement de ce cycle sont :

- le degré de saturation : nous prendrons le degré de saturation à 48 heures, comme pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens

- la durée (jours) de la dissolution : d'après les normales de 1971-2000 fournies par Météo France (2009), le nombre moyen de jours avec précipitations par an N2 vaut 121

- le nombre de cycles de gel-dégel N1 : d'après les données fournies par Météo France (2009) en 2009 et 2010, il vaut en moyenne 18

- la température de gel T : d'après les données fournies par Météo France (2009), elle vaut en moyenne -4°C

Ainsi, le cycle annuel d'altération accéléré peut être établi. Il est donné dans le Tableau 7-3. Il se compose de 14 jours de dissolution et de 14 cycles de gel-dégel, soit 21 jours d'essai.

Etape du cycle	Variable	Méthode de détermination	Valeur
Tout le cycle	Degré de saturation	S ou S48	S48
Dissolution	pH		3
	Durée (jours)	Multiple de 7 le plus proche de N2/7,7	14
	Débit	5 mL jusqu'à percolation de la solution	
Gélivation	Nombre de cycles de 12 heures	Multiple de 14 le plus proche de N1	14
	Température de gel (°C)	Multiple de -5 le plus proche de T	-5
	Température de dégel (°C)		10

Tableau 7-3 Tableau récapitulatif pour déterminer le cycle d'altération accéléré du calcaire de Vilhonneur en Poitou-Charente, d'après le Tableau 2-12 du Chapitre 2

7.2. Validation des cinétiques d'altération

7.2.1. Nombre d'échantillons mesurés

Le volume de l'enceinte climatique limite le nombre total d'échantillons pour les cycles annuels d'altération accélérés. Par ailleurs, la quantité disponible des trois faciès du calcaire de Vilhonneur a également été un facteur limitant. Ainsi, nous avons fixé le nombre

d'échantillons au départ des cycles annuels d'altération accélérés à 16 échantillons pour le faciès NG, 12 échantillons pour le faciès MG, 6 échantillons pour le faciès G.

Tout comme pour les échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens, des échantillons ont été régulièrement prélevés du lot subissant les cycles annuels d'altération accélérés pour réaliser des mesures complémentaires pour l'analyse du processus d'altération du calcaire. Cette opération a été effectuée pour chacun des faciès du calcaire de Vilhonneur. Le nombre décroissant d'échantillons au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés est donné dans le Tableau 7-4 pour chacun des trois faciès du calcaire de Vilhonneur.

Cycle annuel d'altération accéléré	Faciès NG	Faciès MG	Faciès G
0-1	16	12	6
2-3	13	9	4
4-5	10	6	2

Tableau 7-4 Nombre d'échantillons dont la fréquence de résonance a été mesurée à chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

7.2.2. Résultats et analyse

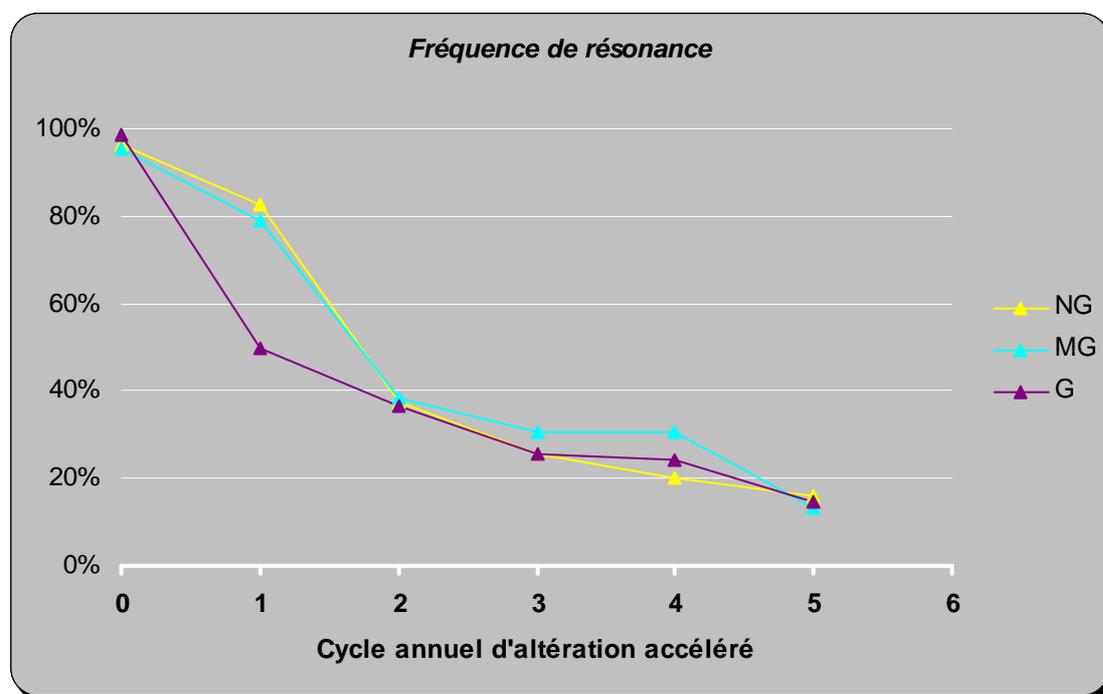


Figure 7-7 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons après chaque cycle pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

L'évolution moyenne de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur est obtenue par le même calcul que dans le Chapitre 6 (6.3.2.2). Elle est donnée dans la Figure 7-7. Ici, les trois faciès du calcaire de Vilhonneur subissent les mêmes cycles annuels d'altération accélérés. Les résultats sont donc directement comparables.

L'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés fait apparaître trois allures et donc **trois cinétiques d'altération**. Ces allures sont les mêmes que celles décrites dans le Chapitre 6 (6.3.2.2) : une 1^{ère} partie où la cinétique d'altération est assez lente, une 2^{ème} partie où la cinétique d'altération est plus rapide et enfin une 3^{ème} partie où la cinétique d'altération n'évolue plus. **L'allure de ces trois cinétiques**

d'altération des trois faciès du calcaire de Vilhonneur est donc identique à celle observée pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens.

La 1^{ère} phase n'est pas visible pour le faciès G du calcaire de Vilhonneur. Nous reviendrons sur ce point plus tard dans le paragraphe

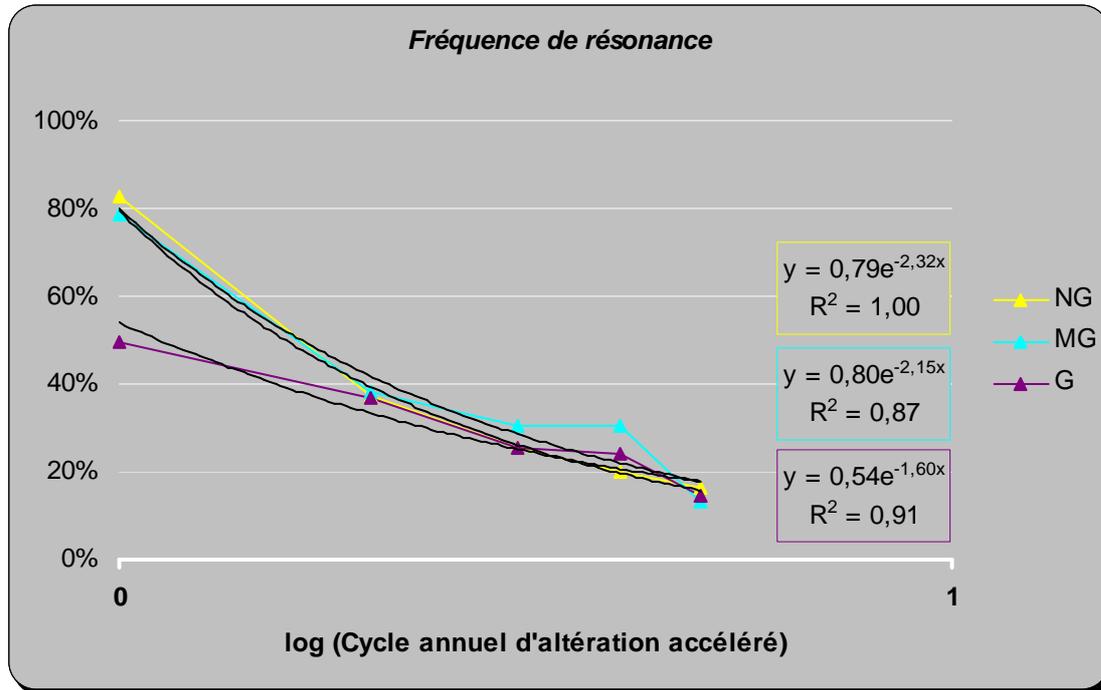


Figure 7-8 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons en fonction du logarithme du nombre de cycles annuels d'altération accélérés pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

La décroissance puis la stabilisation de la fréquence de résonance pour les cinétiques 2 et 3 s'apparente à une fonction puissance. Ce type de fonction n'a pas de sens physique. Par contre, si l'on représente l'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction du logarithme du nombre de cycles annuels d'altération accélérés, on aboutit à une relation reposant sur une loi exponentielle (Figure 7-8).

Cette représentation de la forme $\% f_k = A \times e^{-B \times \log(k)}$ donne les relations suivantes :

- pour le faciès NG : $\% f_k = 0,79 \times e^{-2,32 \times \log(k)}$ pour $k > 1$, $r^2 = 1,00$;
- pour le faciès MG : $\% f_k = 0,80 \times e^{-2,15 \times \log(k)}$ pour $k > 4$, $r^2 = 0,87$;
- pour le faciès G : $\% f_k = 0,54 \times e^{-1,60 \times \log(k)}$ pour $k > 1$, $r^2 = 0,91$.

Avec $\% f_k$ la moyenne des valeurs relatives de fréquence de résonance au cycle k .

Les variations entre les valeurs de B des trois faciès du calcaire de Vilhonneur restent faibles et ne sont donc **pas significatives**.

	Nombre de jours avec dissolution correspondant à 1 cycle annuel d'altération accéléré	Nombre de cycles de gel-dégel correspondant à 1 cycle annuel d'altération accéléré	Nombre de jours total associé à 1 cycle d'altération
Calcaire de Chamesson	14	28	14 + 28 = 42
Pierre de Lens	7	8	7 + 8 = 15
Calcaire de Vilhonneur	14	14	14 + 14 = 28

Tableau 7-5 Décomposition d'un cycle annuel d'altération accéléré en termes de dissolution et de gélification pour le calcaire de Chamesson, la Pierre de Lens et les calcaires de Vilhonneur

Comparons maintenant les cinétiques d'altération obtenues pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur avec celles des deux calcaires de référence. L'ensemble des évolutions de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés est reporté dans la Figure 7-9.

Comme nous l'avons vu au Chapitre 6 (6.3.2.2), il est intéressant de regarder l'évolution de la fréquence de résonance en fonction du logarithme du nombre de jours total d'altération. Le nombre total de jours d'altération pour les calcaires de référence et les calcaires de Vilhonneur est rappelé dans le Tableau 7-5.

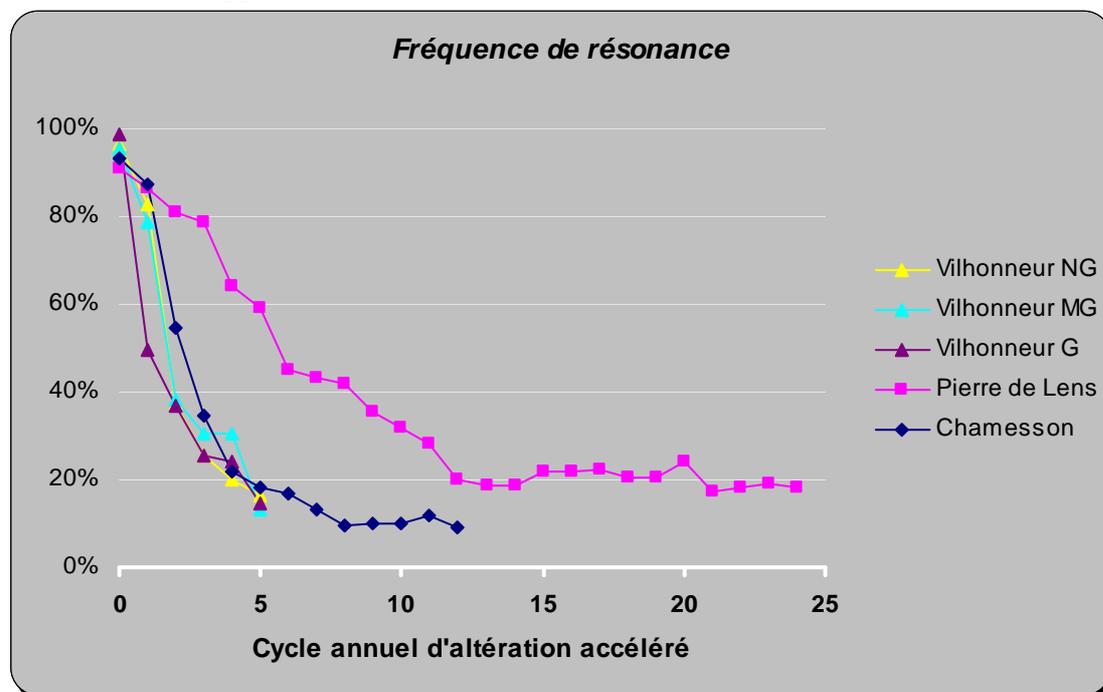


Figure 7-9 Evolution de la fréquence de résonance relative en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour les deux calcaires de référence et les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

Cette conversion permet d'aboutir à la représentation de la Figure 7-10. Par ce biais, nous pouvons comparer les évolutions de la fréquence de résonance de l'ensemble des échantillons en nous affranchissant des cycles annuels d'altération accélérés auxquels ils sont associés.

Le point de départ de la forte baisse de la fréquence de résonance en fonction du nombre de jours total d'altération se situe entre 1,62 et 1,75 soit entre 42 et 56 jours d'altération pour tous les calcaires, sauf le calcaire de Vilhonneur faciès G dont le nombre est plus faible.

Or, sur les 12 échantillons carottés dans le bloc du calcaire de Vilhonneur au faciès G, la moitié d'entre eux présentaient des valeurs de vitesses du son beaucoup plus faibles que les autres. Le bloc était donc, avant de démarrer le vieillissement accéléré, dans un état d'altération avancé, comme le confirme la valeur moyenne de porosité liée aux fissures du Tableau 7-6. Les variations de la fréquence de résonance relative ne sont donc pas observées à partir d'un état non endommagé. Ceci explique très probablement la différence entre ce calcaire et les autres au niveau du point de départ de la cinétique d'altération rapide.

Compte-tenu de cette remarque, **nous pouvons donc considérer que, pour des calcaires initialement non endommagés, l'étape de forte baisse de la fréquence de résonance, c'est-à-dire pour une cinétique d'altération rapide, débute au bout de 42 à 56 jours d'altération** (gélivation et dissolution confondues).

Par ailleurs, les valeurs de B dans les relations de la forme $\% f_k = A \times e^{-B \times \log(n)}$, n étant le nombre de jours total vont de 1,69 à 2,87 avec une valeur moyenne de $2,3 \pm 0,5$. L'écart entre les courbes des calcaires de référence et les calcaires de Vilhonneur n'est donc pas

significatif. Ceci confirme l'hypothèse faite sur les deux calcaires de références que **le climat joue un rôle prépondérant dans l'altération des calcaires**, excepté pour le faciès G du calcaire de Vilhonneur pour lequel nous considérons que son état initial est déjà un état altéré.

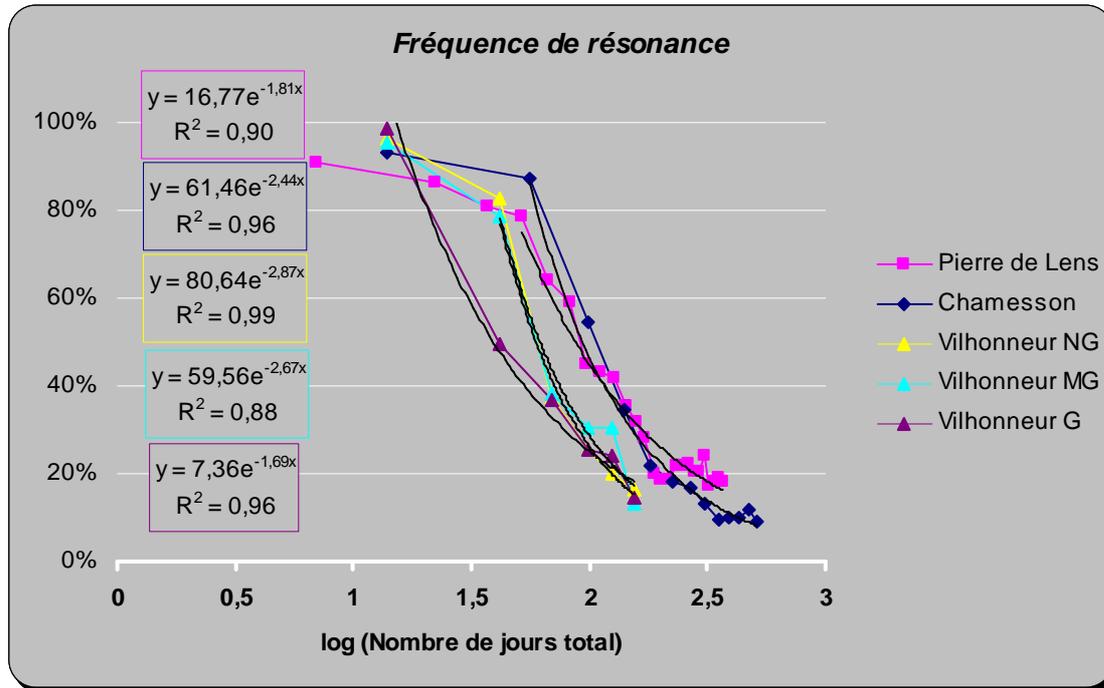


Figure 7-10 Evolution de la fréquence de résonance mesurée sur l'ensemble des échantillons en fonction de la somme du nombre de jours de dissolution et du nombre de cycles de gel-dégel pour les deux calcaires de référence et les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

Concernant la phase 3, nous n'avons pas fait suffisamment de cycles pour connaître le (ou les) seuil(s) de rupture atteint par chacun des faciès. Ils semblent en tout cas proches des seuils de rupture des deux calcaires de référence.

7.2.3. Conclusion

L'évolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés associée aux trois faciès du calcaire de Vilhonneur permet de confirmer les conclusions du Chapitre 6 :

- les mêmes états d'endommagement successifs apparaissent : une cinétique d'altération lente, puis rapide puis nulle ;
- le décalage dans le temps de la cinétique d'altération dû au climat ;
- le rôle du climat prédominant par rapport au comportement du calcaire.

Par contre, nous n'avons pas atteint un nombre de cycles suffisant pour confirmer le lien entre la résistance à la propagation des fissures et le seuil de rupture établi au Chapitre 6.

7.3. Validation du processus d'altération

7.3.1. Nombre d'échantillons mesurés

Le nombre d'échantillons étant limité (cf. 7.2.1), les mesures destructives ont été réalisées à l'état initial, au cycle 1 et au cycle 4. Le nombre d'échantillons « sacrifiés » pour ces cycles est de 3 pour les faciès NG et MG et de 2 pour le faciès G.

7.3.2. Résultats et analyse

Mesure de l'endommagement

D'après les conclusions du Chapitre 5 (5.2.1 et 5.3.1), les porosités liées aux pores et aux fissures permettent de distinguer les différentes phases du processus d'altération. Pour la mesure de l'endommagement, nous allons donc regarder ces résultats.

Pour ce faire, nous avons mesuré la vitesse du son et la porosité de chacun des échantillons pour obtenir l'indice de continuité en fonction de la porosité (cf. Chapitre 3, 3.2.1.2).

	Porosité liée aux pores	Porosité liée aux fissures
Faciès NG	11,35	1,17
Faciès MG	9,81	0,78
Faciès G	9,69	1,42

Tableau 7-6 Porosités liées aux pores et aux fissures pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur à l'état initial

Les porosités liées aux pores et aux fissures à l'état initial sont données dans le Tableau 7-6. Ces valeurs permettent de souligner le fait qu'à l'état initial, **le faciès G a déjà une porosité liée aux fissures importante.**

L'évolution de la porosité liée aux pores en fonction des cycles annuels d'altération accélérés est reportée dans la Figure 7-11 et celle de la porosité liée aux fissures dans la Figure 7-12.

Ces représentations font ressortir deux phases :

- phase 1 : la porosité liée aux pores diminue et la porosité liée aux fissures augmente fortement ;
- phase 2 : la porosité liée aux pores augmente (l'évolution reste néanmoins négative pour le faciès MG) et la porosité liée aux fissures augmente de façon plus modérée.

Les évolutions associées à ces deux phases sont les mêmes que celles associées aux deux premières phases du processus d'altération du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens (Chapitre 5, Tableau 5-2 et Tableau 5-6) qui sont la phase 1 de fissuration et la phase 2 d'élargissement des vides.

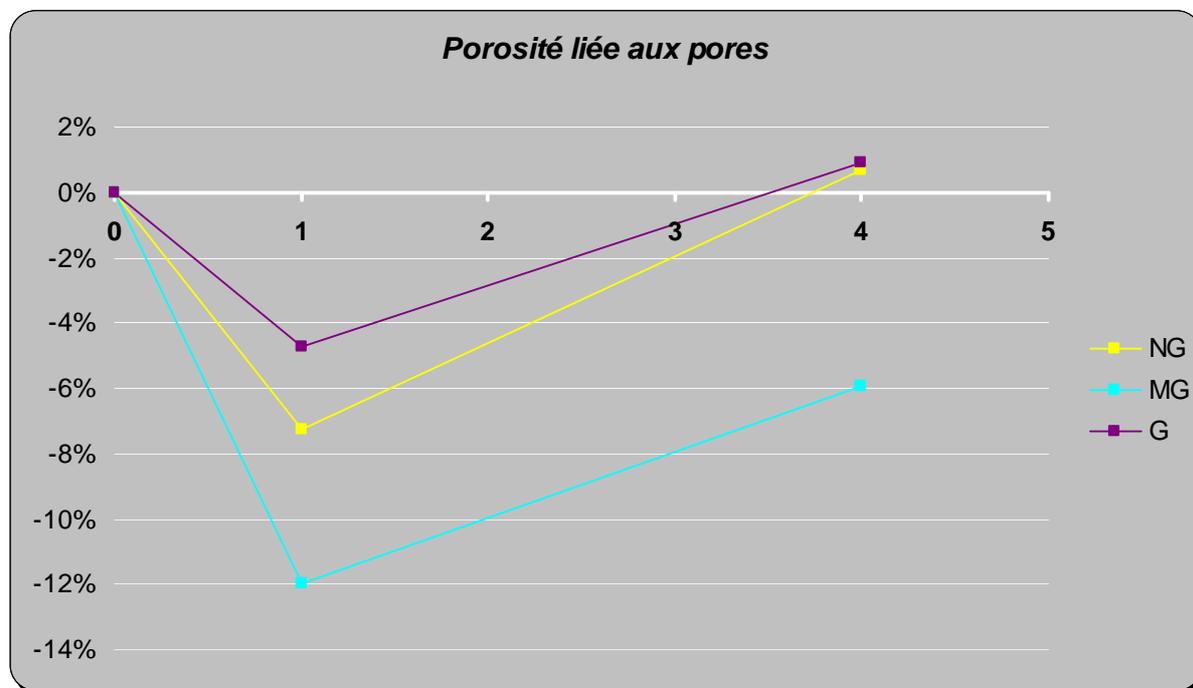


Figure 7-11 Evolution de la porosité moyenne liée aux pores (Tourenq et al., 1971) en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

Les comportements entre les 3 faciès sont proches, il existe cependant une nuance dans le fait que les faciès G et NG ont des évolutions quasi-superposées alors que **le faciès MG a des**

évolutions plus accentuées : la porosité liée aux pores diminue plus que pour les deux autres et la porosité liée aux fissures augmente plus que pour les deux autres. Or, ce calcaire a une perméabilité supérieure à celles des deux autres faciès (cf. Tableau 7-2). Cette propriété lui confère une sensibilité à la dissolution supérieure à celles des deux autres faciès (Chapitre 4, 4.1.2.3). **Cette forte perméabilité explique probablement l'accroissement de l'endommagement observé.**

L'allure des évolutions des porosités liées aux pores et aux fissures confirment les deux premières phases du processus d'altération observées pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens qui sont la fissuration et l'élargissement des vides.

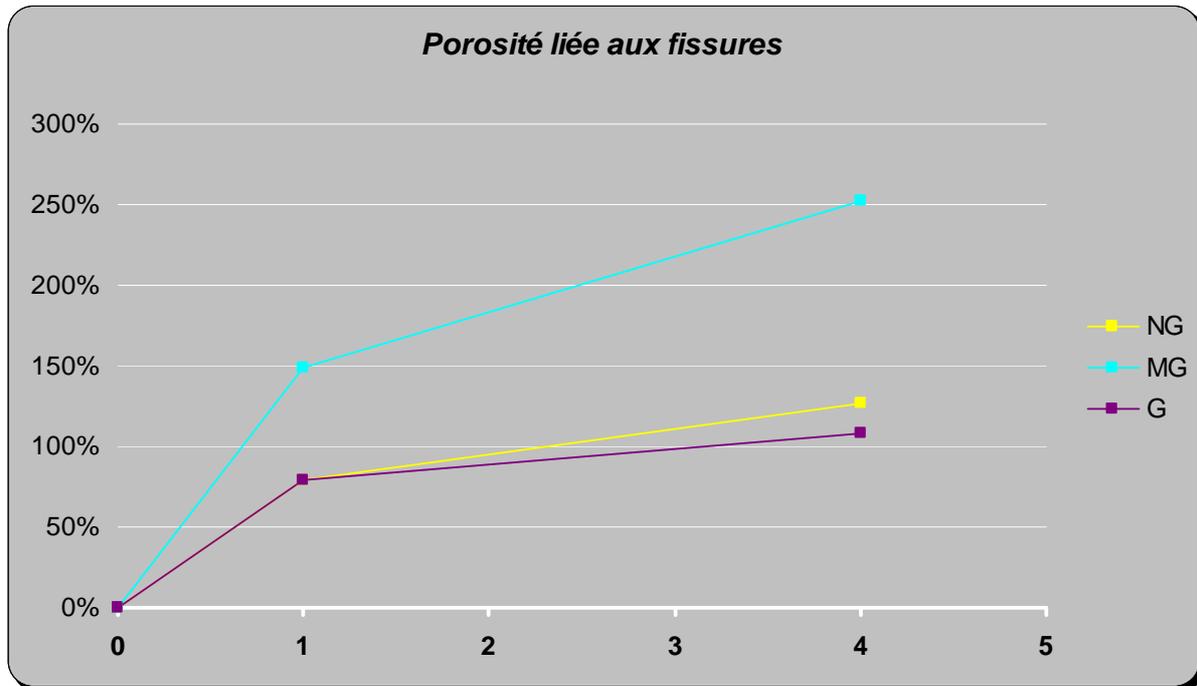


Figure 7-12 Evolution de la porosité moyenne liée aux fissures (Tourenq et al., 1971) en fonction des cycles annuels d'altération accélérés pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

Observations de l'altération

La longueur et l'orientation des fissures obtenues grâce aux surfaces scannées sont données dans la Figure 7-13. Aucune fissure n'était visible en surface au cycle 1, comme pour le calcaire de Chamesson et la Pierre de Lens (cf. Chapitre 5, 5.2.1.3 et 5.3.1.3), nous avons donc uniquement la longueur et l'orientation des fissures pour le cycle 4.

Cette représentation montre deux allures :

- pour le faciès G, une **orientation préférentielle** apparaît autour de l'axe horizontal avec des fissures de longueur plus importante ;
- pour les faciès MG et NG, la **longueur des fissures est plus petite et mieux répartie** en fonction de l'orientation.

L'orientation préférentielle des fissures du faciès G rejoint celle observée sur les échantillons du calcaire de Chamesson. Et l'orientation répartie des fissures avec une longueur plus atténuée rejoint les observations faites pour les échantillons de la Pierre de Lens.

Or, le faciès G a une microstructure proche du calcaire de Chamesson en raison de l'absence de vides autour des oolithes (cf. 7.1.1.2 et Chapitre 2, 2.2.1.3) et le faciès NG a une microstructure proche de la Pierre de Lens dans la mesure où leurs microstructures sont constituées de vides autour des oolithes (cf. 7.1.1.2 et Chapitre 2, 2.2.2.3). Quant au faciès MG, sa microstructure présente des vides autour de certains oolithes (cf. 7.1.1.2).

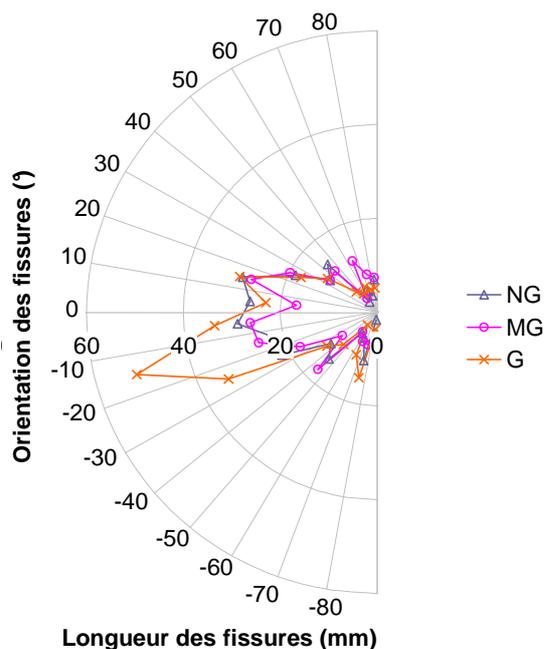


Figure 7-13 Longueur et orientation des fissures des trois faciès du calcaire de Vilhonneur présentes au cycle 4. Valeurs obtenues par moyenne sur 3 échantillons pour les faciès MG et NG et sur 2 échantillons pour le faciès G.

Ceci confirme le fait que la microstructure et plus précisément la présence ou non de vides autour des oolithes a une influence sur la façon dont les calcaires oolithiques fissurent, de façon uniforme ou avec une orientation préférentielle, vu au Chapitre 6 (6.1).

Au niveau de la fissuration macroscopique, le faciès G se rapproche du calcaire de Chamesson et les faciès MG et NG de la Pierre de Lens, ce qui confirme le rôle de la microstructure, et plus particulièrement de la présence ou non de vides autour des oolithes, dans le comportement des calcaires vis-à-vis de la fissuration.

Au niveau de la microstructure, les courbes porosimétriques des faciès G (Figure 7-14), MG (Figure 7-15) et NG (Figure 7-16) permettent de compléter les observations. D'une manière générale, des modifications significatives de la microstructure sont observables par l'essai de porosimétrie au mercure. Elles concernent :

- la hauteur du pic de la gamme de pores les plus petits (entre 0,1 et 0,2 μm) ;
- la hauteur du pic de la gamme de pores les plus grands (autour de 0,3 μm) ;
- la largeur de la base des deux pics réunis ;
- la quantité de gros pores.

Regardons ces modifications de plus près.

Les valeurs de la hauteur du pic de la gamme de pores petits en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 7-17. Les valeurs de la hauteur du pic de la gamme de pores grands en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 7-19. Ces tendances se rapprochent des variations de la porosité liée aux pores (Figure 7-11). Ceci a également été observé pour le calcaire de Chamesson (Chapitre 5, 5.2.1.3). **La quantité de pores diminue au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, comme pour la phase 1 de fissuration du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens.**

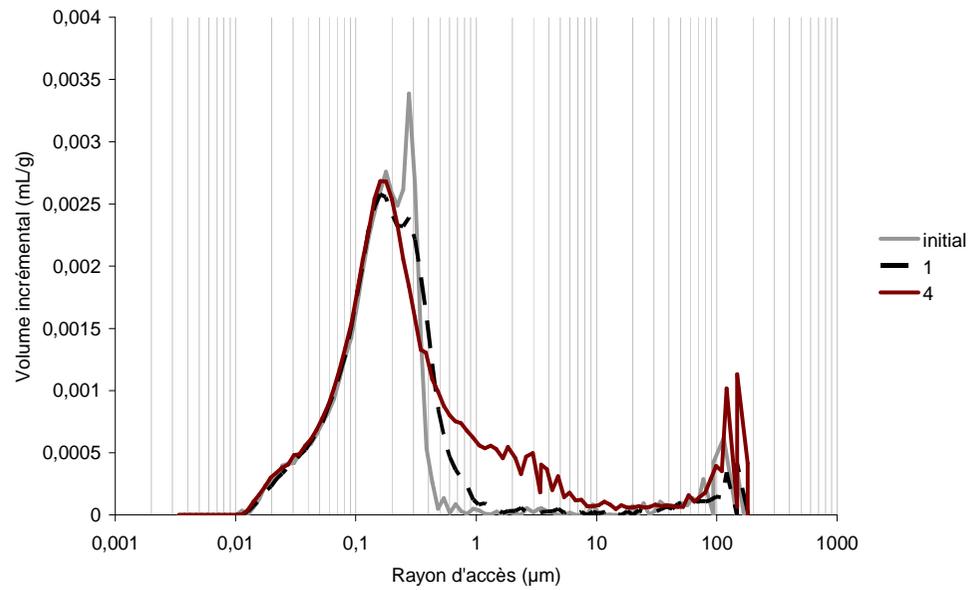


Figure 7-14 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour différents cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Vilhonneur faciès G. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

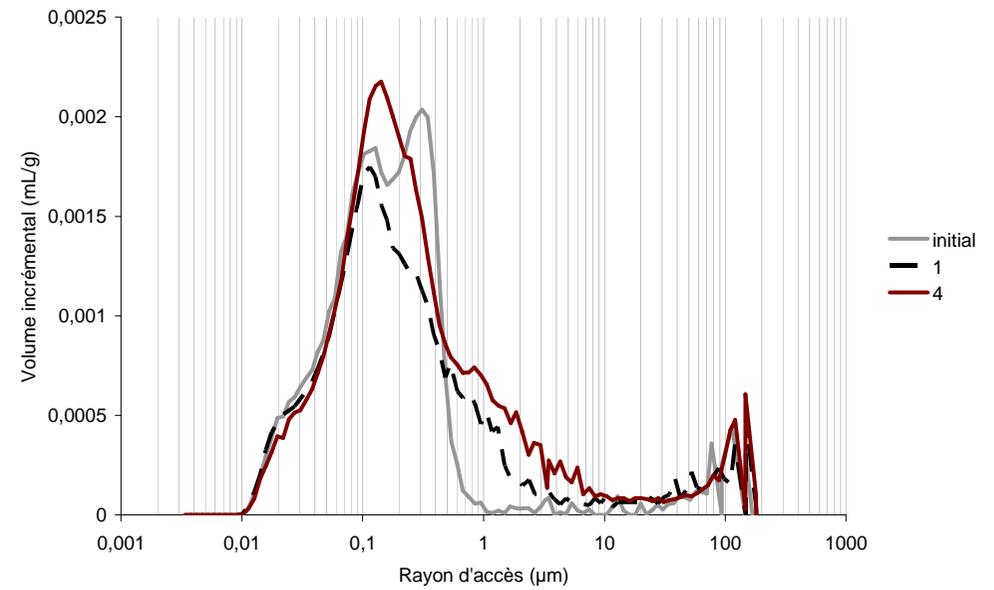


Figure 7-15 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour différents cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Vilhonneur faciès MG. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

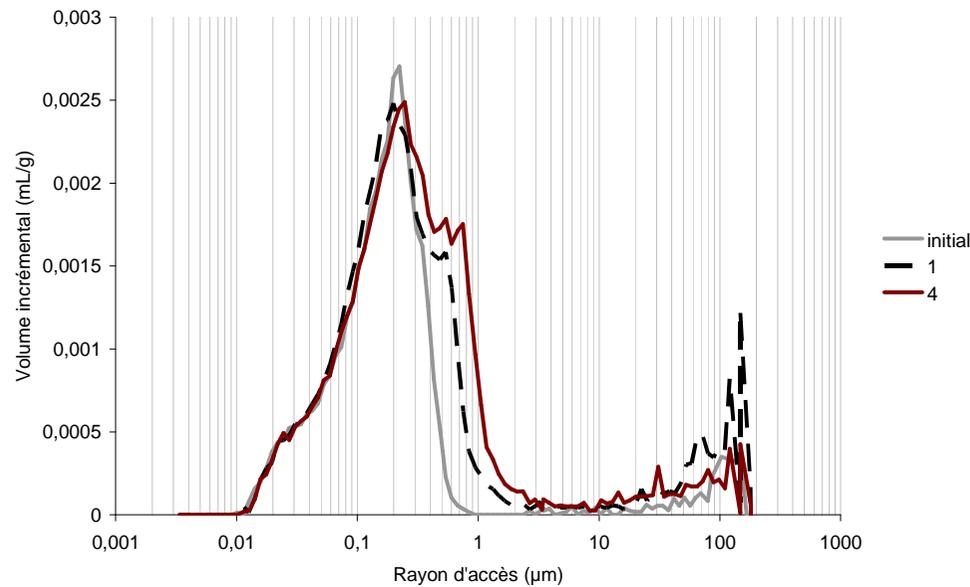


Figure 7-16 Courbes porosimétriques du volume incrémental en fonction du rayon d'accès au pore obtenues pour différents cycles annuels d'altération accélérés pour le calcaire de Vilhonneur faciès NG. Les numéros de la légende correspondent au numéro du cycle annuel d'altération accéléré.

Les valeurs de la largeur de la base des deux pics en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 7-18. La largeur de la base du pic a été calculée en prenant les valeurs à partir desquelles le volume incrémental est supérieur à 0,00005 mL/g. Cette largeur augmente, comme la porosité liée aux fissures (Figure 7-12). Ceci a également été observé pour le calcaire de Chamesson (Chapitre 5, 5.2.1.3). **Les fissures se propagent au fur à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, tout comme pour la phase 1 de fissuration du calcaire de Chamesson.**

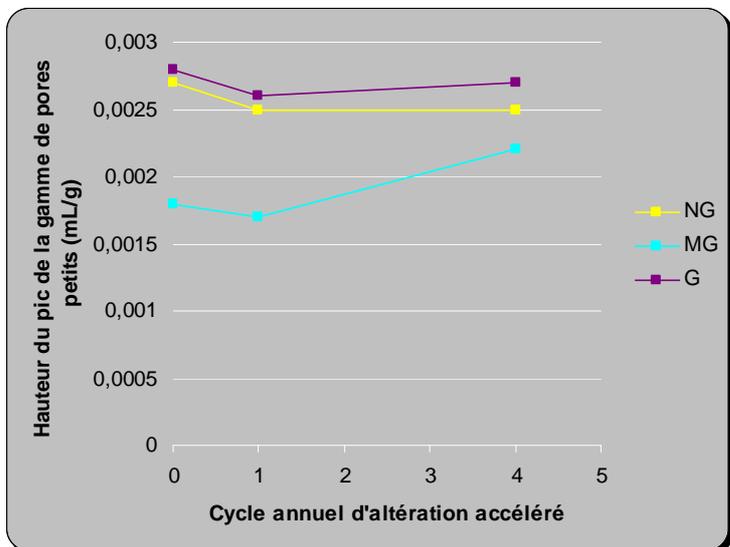


Figure 7-17 Valeur de la hauteur du pic de la gamme de pores petits pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

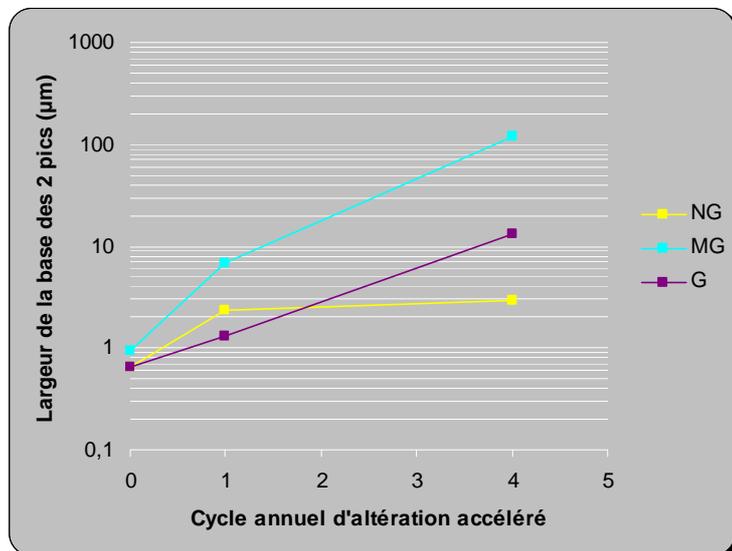


Figure 7-18 Valeur de la largeur de la base des 2 pics pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

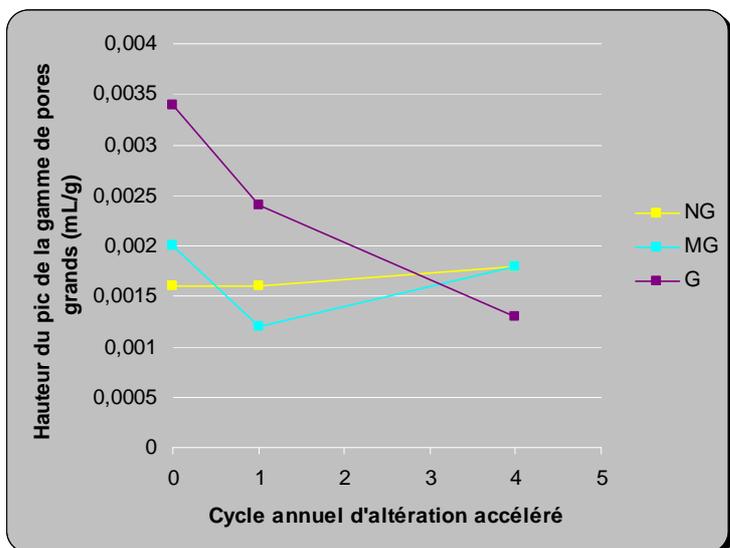


Figure 7-19 Valeur de la hauteur du pic de la gamme de pores grands pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

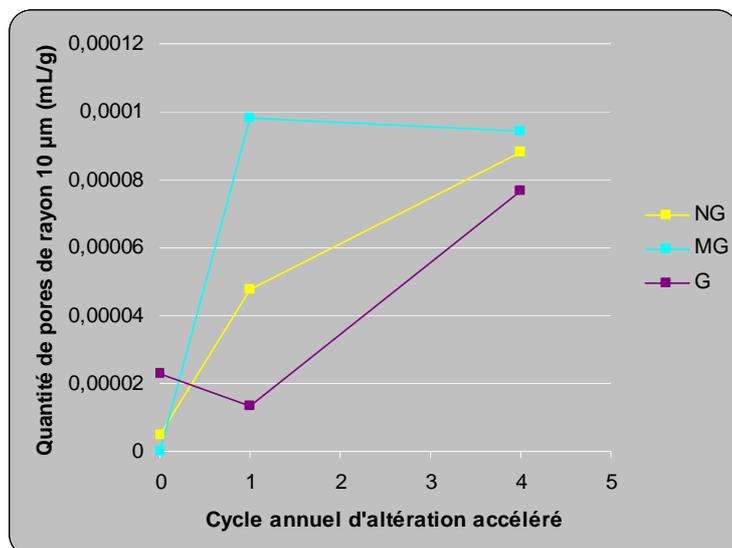


Figure 7-20 Valeur de la quantité de gros pores (rayon d'accès égale à 10µm) pour chaque cycle annuel d'altération accéléré pour les trois faciès du calcaire de Vilhonneur

Les valeurs de la quantité de gros pores en fonction des cycles annuels d'altération accélérés sont reportées dans la Figure 7-20. Les gros pores sont représentés arbitrairement pour les pores de rayon d'accès égal à 10 µm. **Leur quantité augmente au fur à mesure des cycles annuels d'altération accélérés, tout comme pour la phase 1 de fissuration du calcaire de Chamesson.**

Des tendances similaires apparaissent pour les trois faciès au niveau de la largeur de la base des deux pics, comme déjà observées pour les deux calcaires de référence (Tableau 5-4 et

Tableau 5-8). Concernant la hauteur du pic de la gamme de pores plus petits, **les faciès G et MG présentent des tendances proches et le faciès NG se distingue**. Et pour la hauteur du pic de la gamme de pores plus grands, **les faciès NG et MG présentent des tendances proches et le faciès G se distingue**. Au niveau de la quantité de gros pores, aucune tendance ne se rapproche.

Au niveau des courbes porosimétriques, les évolutions montrent une augmentation de la fissuration et une diminution de la quantité de pores, comme pour la phase 1 de fissuration du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens. Ceci confirme donc les évolutions observées lors de cette phase.

Les tendances du faciès NG et du faciès G sont toujours distincts. Le faciès MG, avec une microstructure intermédiaire, a des tendances proches du faciès G dans un cas puis proches du faciès NG dans l'autre.

Regardons si les observations au microscope électronique permettent d'affiner l'interprétation des courbes porosimétriques. La Figure 7-21 correspond aux images obtenues pour le faciès G du calcaire de Vilhonneur, la Figure 7-22 pour le faciès MG et la Figure 7-23 pour le faciès NG.

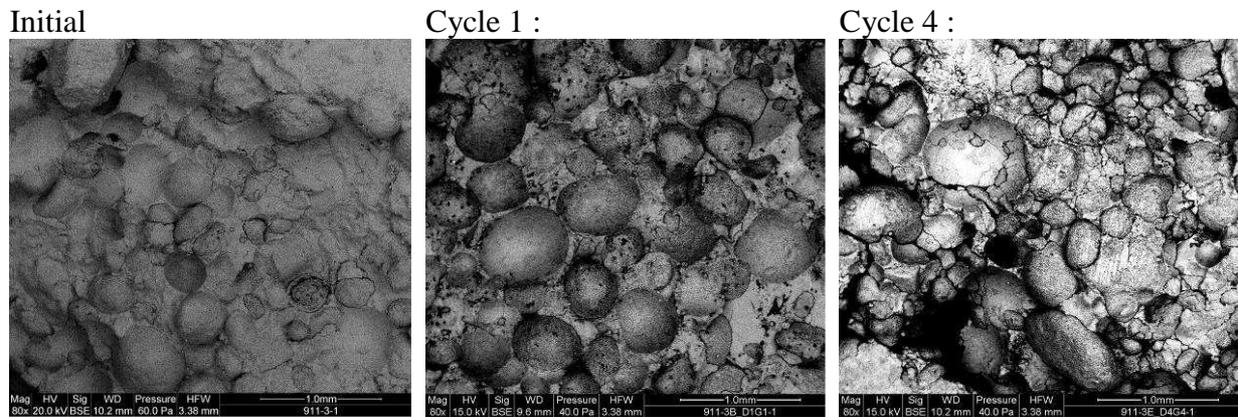


Figure 7-21 Vue d'ensemble au microscope électronique de la microstructure de calcaire de Vilhonneur faciès G

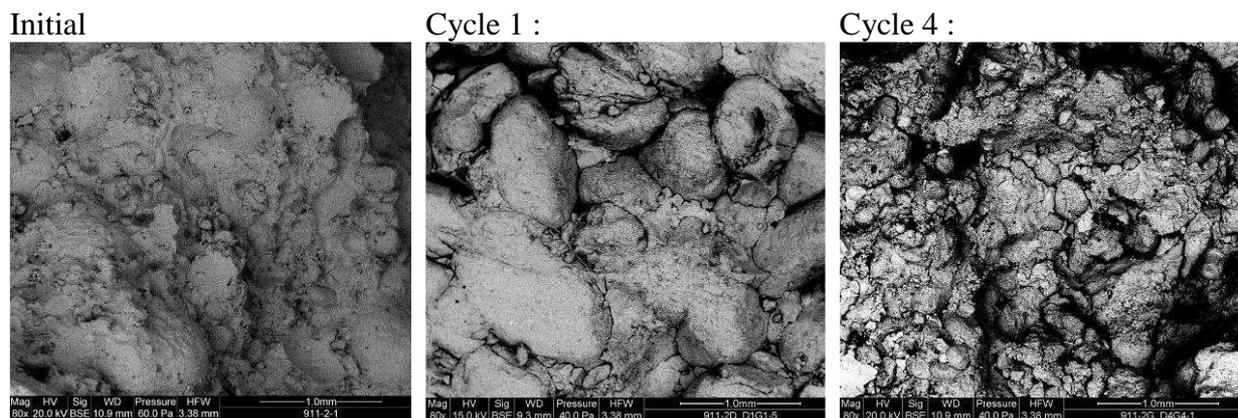


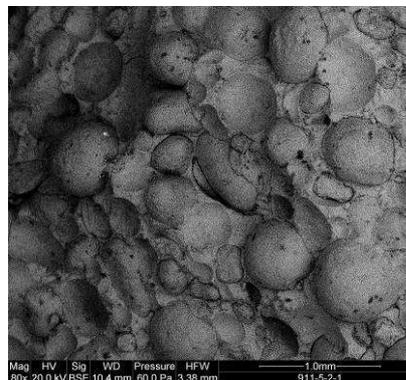
Figure 7-22 Vue d'ensemble au microscope électronique de la microstructure de calcaire de Vilhonneur faciès MG

Pour le faciès G du calcaire de Vilhonneur, le cycle 1 ne présente pas une fissuration importante, par contre, au cycle 4, la **fissuration est visible** et cette fissuration est sévère car elle va **jusqu'à fissurer les oolites** et les segmenter en plusieurs morceaux.

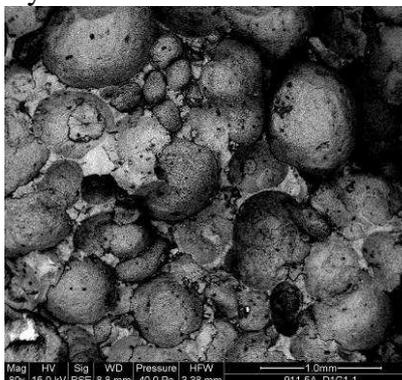
Pour le faciès MG du calcaire de Vilhonneur, le cycle 1 fait apparaître des vides autour des oolites, qui n'étaient pas présent à l'état initial. Au cycle 4, ce faciès présente des **fissures importantes et larges**, il en devient même **difficile de distinguer les oolites**.

Pour le faciès **NG** du calcaire de Vilhonneur, le cycle 1 diffère du cycle 1 du faciès G par la présence des vides autour des oolithes. Au cycle 4, ce faciès est **très fissuré**, de plus les oolithes semblent avoir disparu en surface, elles ne sont plus solidaires à la structure et laissent **des creux en surface**.

Initial



Cycle 1 :



Cycle 4 :

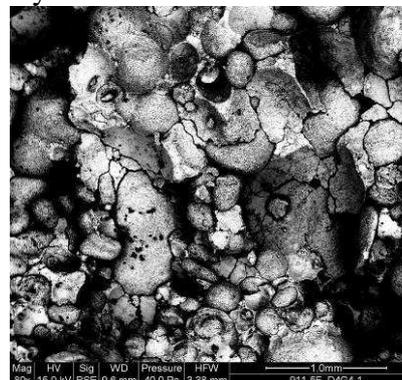


Figure 7-23 Vue d'ensemble au microscope électronique de la microstructure de calcaire de Vilhonneur faciès NG

Au microscope électronique, les trois faciès du calcaire de Vilhonneur présentent une fissuration importante mais elle ne se manifeste pas de la même façon. Pour le faciès G, les fissures segmentent les oolithes, pour le faciès MG, les fissures s'élargissent de manière conséquente et pour le faciès NG, les fissures provoquent le détachement des oolithes remplacés par des creux.

7.3.3. Conclusion

La mesure de l'endommagement et l'observation de l'altération des trois faciès du calcaire de Vilhonneur viennent confirmer et affiner les conclusions faites dans le Chapitre 5 sur les processus d'altération des calcaires de référence :

- la différence de comportement vis-à-vis de la fissuration est due à la microstructure ;
- on retrouve les phases 1 (fissuration) et 2 (élargissement des vides) du processus d'altération.

7.4. Conclusion

Ce Chapitre a permis de répondre aux questions soulevées dans l'introduction :

- Au niveau des cinétiques d'altération :

Les états d'endommagement au niveau de la fréquence de résonance (cinétiques lente, rapide et nulle) sont bien les mêmes pour les 3 calcaires ;

Le décalage dans le temps est bien dû au climat ;

La relation entre la résistance à la propagation de la fissuration et le seuil de rupture n'a pas pu être confirmée.

- Au niveau du processus d'altération :

Les observations des courbes porosimétriques et des images MEB confirment le fait que la différence de comportement vis-à-vis de la fissuration est due à la microstructure ;

Les phases 1 et 2 du processus d'altération concernent également le calcaire de Vilhonneur. Ces phases sont donc bien caractéristiques du processus d'altération des calcaires oolithiques.

Nous n'avons pas pu confirmer le lien entre la résistance à la propagation de la fissuration et le seuil de rupture. Néanmoins, les observations au niveau de la microstructure (courbes porosimétriques et images MEB) et au niveau des fissures (images scannés) confirment l'effet

de la microstructure sur le comportement vis-à-vis de la fissuration. Il est donc raisonnable de considérer que le seuil de rupture est lié à la résistance à la propagation des fissures.

La validation de la démarche et des résultats étant faites, le prochain Chapitre reprend l'ensemble des conclusions pour une prévision statistique de la durée de vie des calcaires oolithiques en fonction du climat.

Par ailleurs, ces résultats ouvrent une perspective à l'étude. En effet, il serait intéressant d'appliquer ces conclusions sur le lien entre la présence ou non d'oolithes autour des vides et le comportement vis-à-vis de la fissuration à un modèle micromécanique reprenant les caractéristiques microstructurales des calcaires oolithiques : oolithes, ciment et présence de vides ou non autour des oolithes.

Ceci pourrait être fait en utilisant le modèle micromécanique d'assemblage de sphères composites appliqué aux calcaires oolithiques développé par Nguyen (2010). Ce modèle nécessite de connaître les paramètres élastiques et plastiques de l'oolithe, de la matrice et de l'interface oolithe-matrice obtenus par essai d'indentation. Le modèle bonded-particle (BPM) développé par Potyondy et Cundall (2004) qui simule le comportement mécanique de grains reliés par du ciment peut également être utilisé. Le calcul se base sur les propriétés du ciment et des grains. Le logiciel Particle Flow Code (ICG, 2008) permet une analyse numérique d'un de ces deux modèles. Ce logiciel convient dans la mesure où il modélise le mouvement et les interactions de particules circulaires par la méthode des éléments distincts (DEM) et qu'il peut modéliser un solide fragile en soudant les particules entre elles. L'assemblage qui en résulte peut être considéré comme un « solide » qui a des propriétés élastiques et est capable de « fissurer » par rupture progressive des liaisons.

Bibliographie

Itasca Consulting Group Inc. PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions), Version 4.0 Minneapolis, MN : ICG ; 2008

Météo France. *Bulletins météorologiques* [En ligne]. Web : Météo France, 2009. < www.meteofrance.com >

NF B10-601. *Produit de carrières - Pierres naturelles - Prescription générale d'emploi des pierres naturelles*. 2006.

Nguyen N. B. *Modélisation micromécanique des roches poreuses. Application aux calcaires oolithiques*. Thèse. Nancy, France : Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010. 198 p.

Potyondy D. O., Cundall P. A. « A bonded-particle model for rock ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. décembre 2004. Vol. 41, n°8, p. 1329-1364.

Tourenq C., Fourmaintraux D., Denis A. « Propagation des ondes et discontinuités des roches ». In : *Proceedings Symposium ISRM. Rock fracture*. Nancy, France : ISRM, 1971. p. I-1.

8. Prédiction de la durée de vie des calcaires en fonction du climat

INTRODUCTION

Dans cette étude, la durée de vie des calcaires est définie par le temps qu'il lui reste avant qu'il n'atteigne la rupture. Cette prédiction, comme l'ensemble du travail, se limite à un endommagement dû au climat.

Pour parvenir à estimer la durée de vie, nous devons choisir un outil permettant d'aboutir à une prédiction en réutilisant l'ensemble des conclusions établies jusqu'à présent sur le processus d'altération et la cinétique d'altération des calcaires oolithiques. Pour ce faire, un outil statistique semble adapté à nos besoins.

Ce Chapitre vise donc à établir un outil de prédiction de la durée de vie des calcaires oolithiques en reprenant les résultats précédents. Cet outil nous permettra d'aborder l'impact des changements climatiques sur la durée de vie des calcaires en reprenant les paramètres déterminés au Chapitre 1.

8. PREVISION DE LA DUREE DE VIE DES CALCAIRES EN FONCTION DU CLIMAT	213
8.1. Prévision de l'impact du climat sur l'altération des calcaires	214
8.1.1. Choix d'un outil statistique	215
8.1.2. Construction du réseau bayésien	216
8.1.2.1. Variables	216
8.1.2.2. Graphe	217
8.1.2.3. Probabilités	218
8.1.3. Analyse	224
8.1.4. Conclusion	227
8.2. Prévision de l'impact des changements climatiques sur l'altération des calcaires	228
8.2.1. Le changement climatique en France	228
8.2.2. Effets sur les paramètres liés au climat	229
8.2.2.1. Température et ensoleillement	229
8.2.2.2. Précipitations et humidité	230
8.2.2.3. Vent	230
8.2.3. Rôle dans le processus d'altération	230
8.2.4. Conclusion	231
8.3. Conclusion	231

8.1. Prévision de l'impact du climat sur l'altération des calcaires

8.1.1. Choix d'un outil statistique

Les statistiques permettent de décrire ce qui s'est produit et de faire des projections quant à ce qu'il peut advenir dans le futur (Parent et Bernier, 2007). C'est donc à l'aide d'un outil statistique que nous allons proposer de prévoir la durée de vie des calcaires.

Par ailleurs, nous souhaitons nous baser sur un raisonnement statistique qui prend en compte les connaissances a priori mais également l'expérience contenue dans les données, d'après les cinétiques d'altération obtenues dans le Chapitre 6 (6.3). Or, la statistique bayésienne permet de prendre en compte ces deux enjeux. Nous avons donc choisi de l'utiliser pour prévoir la durée de vie des calcaires en fonctions de leurs propriétés et du climat auquel ils sont soumis. La statistique bayésienne repose sur la construction d'un réseau bayésien. Il s'agit d'un système représentant la connaissance et permettant de calculer des probabilités conditionnelles apportant des solutions à différentes sortes de problématiques (Parent et Eustache, 2007).

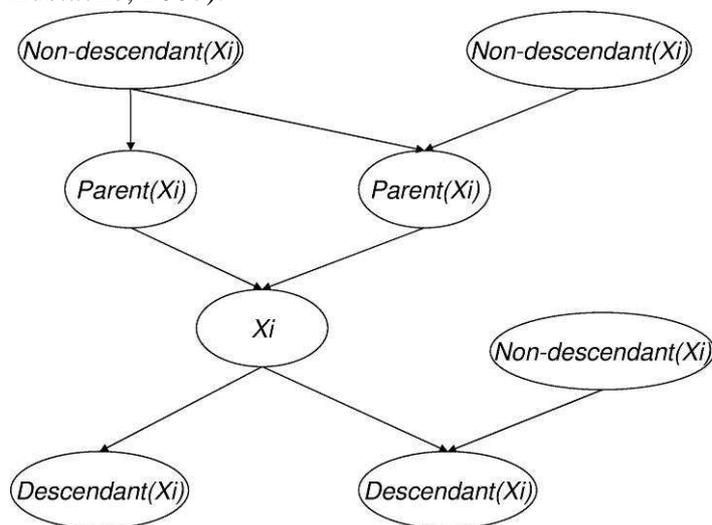


Figure 8-1 Illustration du vocabulaire utilisé pour définir les relations entre les variables d'un modèle bayésien (D'après Cornuéjols (2002))

Le réseau bayésien est composé (Parent et Eustache, 2007; Cornuéjols, 2002) :

- d'un versant qualitatif avec un graphe acyclique orienté dans lequel les nœuds représentent des variables aléatoires reliés entre eux par des arcs ;
- d'un versant quantitatif avec une distribution de probabilités P , c'est-à-dire un ensemble de probabilités conditionnelles $P(X_i | Pa_i)$, avec Pa_i = les parents de la variable X_i (Figure 8-1). (une variable par nœud et par parent).

Les réseaux bayésiens s'appuient sur le théorème de Bayes :

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

Le terme $P(A)$ est la probabilité *a priori* de A . Le terme $P(A|B)$ est la probabilité conditionnelle de A sachant B .

Les variables X_i composants le réseau bayésien sont *mutuellement conditionnellement indépendantes* si la probabilité jointe $P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | Pa_i)$ (Cornuéjols, 2002). **Pour**

calculer une probabilité jointe, il est donc nécessaire de connaître les probabilités de chaque nœud dans le réseau conditionnées uniquement par les parents.

Un réseau bayésien spécifie une distribution de probabilités grâce à deux composantes :

- un graphe acyclique orienté G
- une collection de probabilités conditionnelles $P(X_i|Pa_i)$ telle que :

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | Pa_i)$$

8.1.2. Construction du réseau bayésien

Un réseau bayésien est un graphe acyclique orienté où chaque nœud représente une variable aléatoire et chaque arc représente une dépendance causale. Chaque nœud dans le graphe est conditionnellement indépendant de tout ensemble de nœuds qui ne sont pas ses descendants (Cornuéjols, 2002).

La construction du réseau bayésien implique :

- la définition des variables du modèle ;
- l'établissement du graphe du modèle en définissant les arcs reliant les variables ;
- le calcul de probabilités associées à chaque variable, conditionnellement à ces causes.

8.1.2.1. Variables

Compte-tenu des analyses des Chapitres précédents, il est possible de faire ressortir les variables utiles pour construire le réseau bayésien. Elles peuvent être décomposées en trois types de variables :

- les variables dépendant du climat ;
- les variables dépendant du calcaire ;
- les variables dépendant du calcaire et du climat.

Pour les variables dépendant du climat, elles sont issues du Chapitre 2, présentant les climats des sites étudiés, et des résultats et analyses du Chapitre 5 et sont les suivantes :

- le climat, donné d'après la carte de la Figure 2-1 ;
- les conditions de gel, données d'après la carte de la Figure 2-2 ;
- le nombre de jours de précipitations, donné d'après la carte de la Figure 8-2 ;
- le nombre de jours d'altération, déterminé en fonction du nombre de cycles de gel-dégel et du nombre de jours de dissolution.

Pour les variables dépendant du calcaire, elles sont issues du Chapitre 2, présentant les calcaires étudiés et les faciès altérés, et des résultats et analyses des Chapitres 5 et 6 et sont les suivantes :

- la résistance à la fissuration d'après les résultats de ténacité (Chapitre 6, 6.1.1.3) qu'il est possible de relier à la présence ou non des vides autour des oolithes ;
- le seuil de rupture, d'après les valeurs de la zone de fissuration instable dans la Figure 5-24 et les résultats de ténacité (Chapitre 6, 6.1.1.3).

Pour les variables dépendant du calcaire et du climat, elles sont issues du Chapitre 2 présentant les calcaires étudiés et les faciès altérés et des résultats et analyses des Chapitres 5 et 6 et sont donc les suivantes :

- l'état d'altération (initial), déterminé à partir des phases du processus d'altération décrites dans le Chapitre 5 et de la zone où se trouve le calcaire dont on souhaite prévoir la durée de vie ;
- la durée de vie, but de ce réseau bayésien qui constitue la dernière variable du réseau. Elle se définit comme le temps qu'il reste avant que le calcaire passe sous son seuil de rupture. Le seuil de rupture découle des résultats des cinétiques d'altération du Chapitre 6. Cette variable dépend du climat et du calcaire.

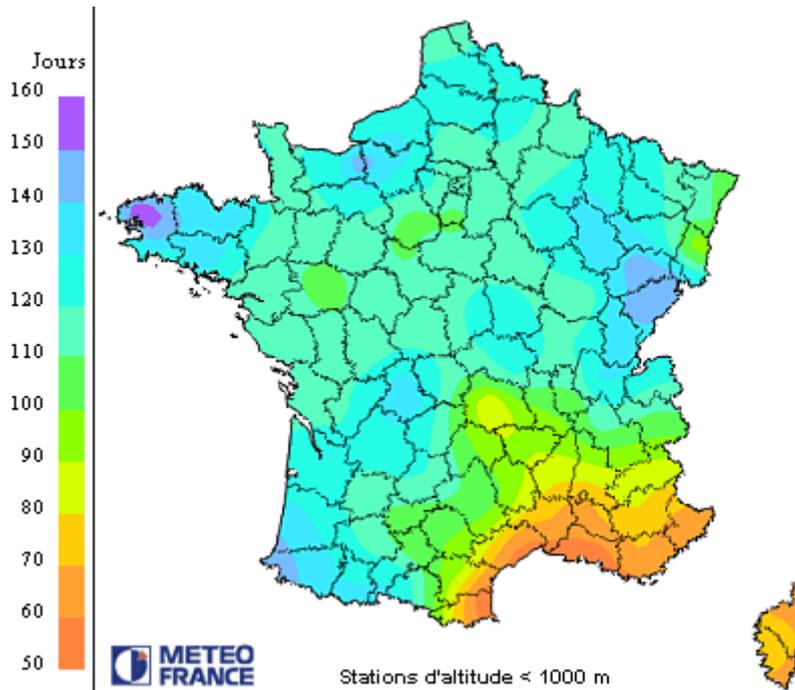


Figure 8-2 Nombre de jours de précipitations par an

8.1.2.2. Graphe

Les variables de départ du graphe sont celles qui ne dépendent pas des autres d'après la description précédente, c'est-à-dire le climat, l'état d'altération (initial) et la résistance à la fissuration.

Nous avons choisi de considérer que l'état d'altération (initial) est indépendant des autres variables dans la mesure où, dans le Chapitre 5, nous avons conclu que le processus d'altération des calcaires oolithiques se compose des mêmes phases d'altération : la phase de fissuration et la phase d'élargissement des vides. Il ne dépend donc pas d'autres paramètres.

Les liens de causalité proviennent directement de la définition des variables.

Les conditions de gel et le nombre de jours de précipitations dépendent du climat et lui sont donc rattachés. Ces deux variables permettent de connaître le nombre de jours d'altération qui leur est donc rattaché. Le nombre de jours d'altération a un impact direct sur la durée de vie dans la mesure où il a un impact sur la cinétique d'altération (Chapitre 6).

Concernant l'état d'altération, il est un impact direct sur la durée de vie (dernière étape du graphe) puisqu'il donne le point de départ des cinétiques d'altération (Chapitre 6).

Pour la résistance à la fissuration, nous avons vu au Chapitre 6 qu'elle engendre une différence pour le seuil de rupture du calcaire oolithique. Celui-ci lui est donc rattaché. Ce seuil a un impact direct sur la durée de vie dans la mesure où il a un impact au niveau des cinétiques d'altération, dans la zone où elles sont constantes.

D'après l'établissement des variables et leur description, la structure du réseau bayésien est celle présentée dans la Figure 8-3.

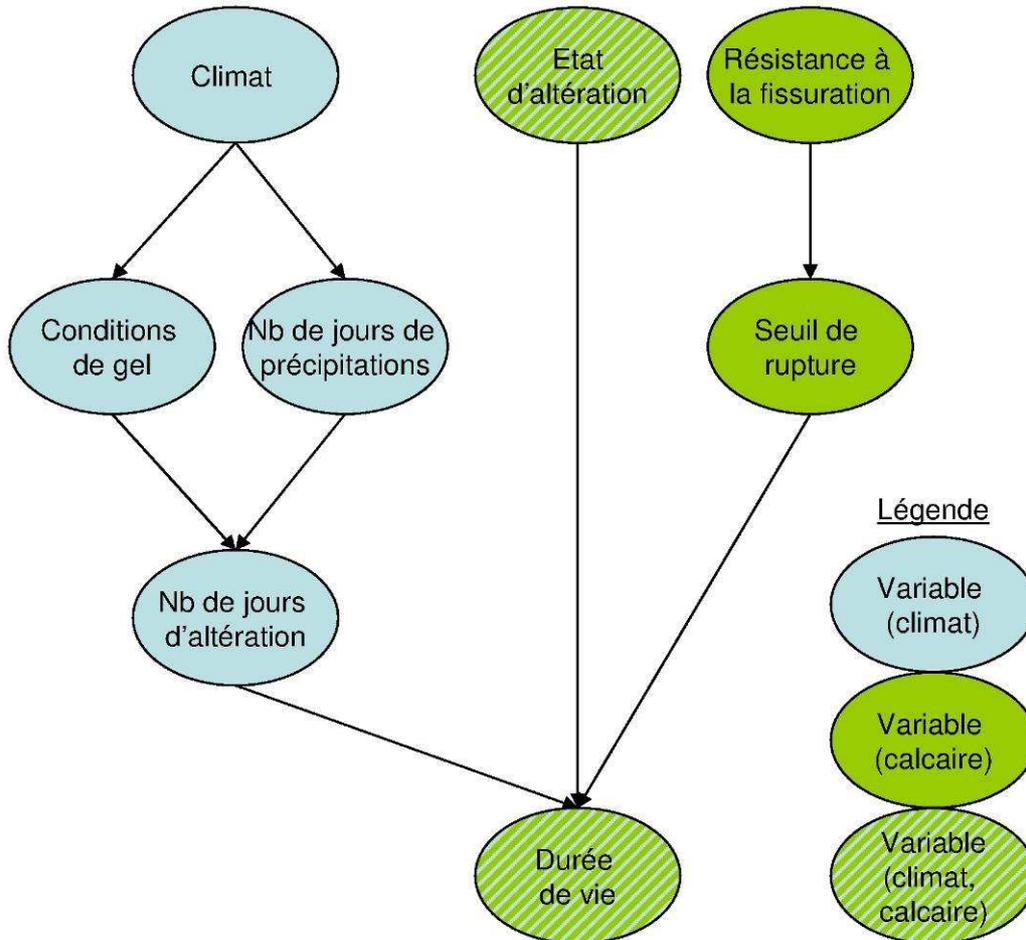


Figure 8-3 Structure du réseau bayésien correspondant à notre analyse

8.1.2.3. Probabilités

Le calcul des probabilités se fait en commençant par les variables situées en haut de la structure (Figure 8-3) puis en descendant à chacune des variables suivantes. Nous allons donc parler d'étapes, de la façon suivante :

- étape 1 : calcul des probabilités des variables « climat », « résistance à la fissuration » et « état d'altération » ;
- étape 2 : calcul des probabilités des variables « conditions de gel », « nombre de jours de précipitations » et « seuil de rupture » en fonction des variables de l'étape 1 qui leur sont associées ;
- étape 3 : calcul des probabilités de la variable « nombre de jours d'altération » en fonction des variables de l'étape 2 qui lui sont associées ;
- étape 4 : calcul des probabilités de la variable « durée de vie » en fonction des variables des étapes 1, 2 et 3 qui lui sont associées.

Pour le calcul des probabilités, nous devons établir les valeurs associées à chaque variable. Par exemple pour le climat, les valeurs qui lui sont associées sont : océanique, dominante océanique, océanique à tendance continentale, méditerranéen et montagnard.

Etape 1 : « climat », « résistance à la fissuration » et « état d'altération »

Pour le calcul de probabilité de la variable « climat », nous nous sommes basés sur la Figure 2-1 qui donne le nombre de départements associés à chacun des climats présents en France

métropolitaine. Ainsi, nous avons obtenu une probabilité pour chaque climat par le calcul suivant :

$$P(C = C_i) = \frac{n_i}{n_t}, \text{ avec } n_i \text{ le nombre de départements où le climat } C_i \text{ est présent et } n_t \text{ le nombre}$$

de départements total en France métropolitaine. Le calcul aurait pu se faire à partir des surfaces correspondant à chaque climat sur la surface total en France métropolitaine, mais nous n'avons pas accès à des données suffisamment précises pour le faire concernant les conditions de gel.

Les résultats des calculs sont donnés dans le Tableau 8-1.

Climat C	Probabilité
1 - Océanique	0,19
2 - Dominante océanique	0,31
3 - Océanique à tendance continentale	0,19
4 - Méditerranéen	0,11
5 - Montagnard	0,20

Tableau 8-1 Probabilités associées aux climats présents en France métropolitaine

Concernant les probabilités associées aux variables « résistance à la fissuration », nous les considérons comme aléatoires a priori, donc avec des probabilités identiques pour chacun des valeurs qu'elles peuvent prendre.

Les valeurs que peut prendre la résistance à la fissuration sont « résistant » ou « peu résistant », en fonction de la valeur de ténacité du calcaire étudié. La ténacité qui sépare ces deux valeurs est déduite des mesures du Chapitre 6 (Tableau 6-4) qui donne une valeur limite entre les deux types de résistance à $0,59 \text{ MPa}\sqrt{m}$. La distinction entre « résistant » et « peu résistant » peut également se faire en observant la microstructure du calcaire oolithique (Chapitre 6, 6.1.2) : un calcaire « résistant » n'a pas de vides autour de ses oolithes, un calcaire « peu résistant » a des vides autour de ses oolithes.

On obtient ainsi les probabilités du Tableau 8-2.

Résistance à la fissuration R		Probabilité	
	Critère mécanique	Critère microstructurale	
1 - Résistant	$(K_{IC} > 0,59 \text{ MPa}\sqrt{m})$	Pas de vides autour des oolithes	0,50
2 - Peu résistant	$(K_{IC} < 0,59 \text{ MPa}\sqrt{m})$	Présence de vides autour des oolithes	0,50

Tableau 8-2 Probabilités associées à la résistance à la fissuration

Les valeurs que peut prendre l'état d'altération ont été choisies en fonction des observations et des échantillons prélevés sur site du Chapitre 2 (2.2.1.4 et 2.2.2.4) pour les deux calcaires de référence. Ainsi, il y a trois valeurs possibles : « peu altéré », « altéré » et « très altéré ». Les valeurs ont été déterminées à partir des différentes phases du processus d'altération, décrites dans le Chapitre 5 :

- le début du processus d'altération correspond à un état d'altération « peu altéré » ;
- la phase de fissuration correspond à un état d'altération « altéré » ;
- la phase d'élargissement des vides correspond à un état d'altération « très altéré ».

Etat d'altération A	Cycles correspondants	Probabilité
1 - Peu altéré	Cycle 1	0,33
2 - Altéré	Cycle 2 à 6	0,33
3 - Très altéré	A partir du cycle 7	0,33

Tableau 8-3 Correspondance entre l'état d'altération et les cycles annuels d'altération accélérés à partir des phases du processus d'altération (Chapitre 5) et probabilités associées

D'après les conclusions du Chapitre 5 (5.2.1 et 5.3.1), les porosités liées aux pores et aux fissures permettent de distinguer les différentes phases du processus d'altération. Nous

utiliserons donc ces valeurs pour déterminer dans quelle phase du processus d'altération le calcaire se situe.

Ces phases sont rattachées à des cycles annuels d'altération accélérés (Tableau 8-3). Nous considérons que, a priori, les probabilités sont égales pour les différentes valeurs de la variable « état d'altération ».

Etape 2 : « conditions de gel », « nombre de jours de précipitations » et « seuil de rupture »

Pour déterminer les valeurs associées à la variable « conditions de gel », nous nous sommes basés sur la carte de la Figure 2-2 et sur les conditions de gel que nous avons étudiées ici. Ainsi, les conditions de gel étudiées sont le gel modéré et le gel faible. Nous n'avons pas étudié expérimentalement le gel très faible et le gel sévère dans la mesure où nous avons estimé que ces deux cas étaient trop extrêmes. Or, pour le calcul des probabilités, nous devons couvrir l'ensemble de la France (métropole) dans la mesure où elles sont dépendantes du climat. Donc nous avons choisi d'attribuer deux valeurs aux conditions de gel : « gel faible à très faible » et « gel modéré à sévère », par extrapolation. Par ailleurs, rappelons le nombre de cycles de gel-dégel trouvé dans les sites étudiés (d'après les données du Chapitre 2, 2.3.4 et du Chapitre 7, 7.1.2) :

- pour le site du calcaire de Chamesson (gel modéré) = 32 cycles / an ;
- pour le site de la Pierre de Lens (gel faible) = 8 cycles / an ;
- pour le site du calcaire de Vilhonneur (gel faible) = 18 cycles / an.

Nous avons ainsi pu également associer à ces deux valeurs un nombre de cycles de gel-dégel qui les distingue. Compte-tenu des nombres de cycles de gel-dégel des sites étudiés, rappelés au-dessus, nous avons choisi que 20 cycles de gel-dégel par an permettent de distinguer les deux valeurs des conditions de gel. A partir de ces valeurs, en combinant la Figure 2-1, présentant le climat en France par département, et la Figure 2-2, présentant les conditions de gel en France, nous avons pu calculer les probabilités de la manière suivante :

$$P(G = G_i) = \frac{n_i}{n_i(C)} \text{ avec } n_i \text{ le nombre de départements où la condition de gel } G_i \text{ est présente}$$

et $n_i(C)$ le nombre de départements total du climat C .

Si un département comprend plusieurs conditions de gel, c'est la condition de gel majoritaire qui l'emporte.

Le calcul aurait pu se faire à partir des surfaces correspondant à chaque climat sur la surface total en France métropolitaine, mais nous n'avons pas accès à des données suffisamment précises pour le faire.

Conditions de gel G	Océanique	Dominante océanique	Océanique à tendance continentale	Méditerranéen	Montagnard
1 - Gel faible à très faible (< 20 cycles / an)	0,72	0,43	0,00	0,42	0,00
2 - Gel modéré à sévère (> 20 cycles / an)	0,28	0,57	1,00	0,58	1,00

Tableau 8-4 Probabilités des différentes conditions de gel en fonction du climat

Les résultats des calculs sont donnés dans le Tableau 8-4.

Pour déterminer les valeurs associées à la variable « nombre de jours de précipitations », nous nous sommes basés sur la carte de la Figure 8-2 et sur le nombre de jours de précipitations associé aux sites étudiés dans cette étude. Rappelons le nombre de jours de précipitations (d'après les données du Chapitre 2, 2.3.4 et du Chapitre 7, 7.1.2) pour les trois sites étudiés :

- pour le site du calcaire de Chamesson (climat océanique à tendance continentale) = 116 jours / an ;
- pour le site de la Pierre de Lens (climat méditerranéen) = 68 jours / an ;
- pour le site du calcaire de Vilhonneur (climat à dominante océanique) = 121 jours / an.

Ces sites correspondent à trois climats différents. Il est possible de les caractériser d'un point de vue des précipitations de la façon suivante : le climat méditerranéen est sec, le climat océanique à tendance continentale est humide et le climat à dominante océanique est très humide. A ces adjectifs et compte-tenu du nombre de jours de précipitations associé à chaque site, il est possible d'ajouter un nombre de jours de précipitations. Ainsi, « sec » correspond à moins de 80 jours de précipitations par an, « humide » correspond à un nombre de jours de précipitations compris entre 80 et 120 et « très humide » correspond à plus de 120 jours de précipitations par an. Ensuite, à partir de ces valeurs, en combinant la Figure 2-1, présentant le climat en France par département, et la Figure 8-2, présentant le nombre de jours de précipitations par an en France, nous avons pu calculer les probabilités de la manière suivante :

$$P(P = P_i) = \frac{n_i}{n_t(C)} \text{ avec } n_i \text{ le nombre de départements où le nombre de jours de précipitations}$$

P_i est présent et $n_t(C)$ le nombre de départements total du climat C.

Si un département comprend plusieurs tranches de nombre de jours de précipitations, c'est le nombre de jours de précipitations majoritaire qui l'emporte.

Le calcul aurait pu se faire à partir des surfaces correspondant à chaque climat sur la surface total en France métropolitaine, mais nous n'avons pas accès à des données suffisamment précises pour le faire.

Les résultats des calculs sont donnés dans le Tableau 8-5.

Nombre de jours de précipitations P	Océanique	Dominante océanique	Océanique à tendance continentale	Méditerranéen	Montagnard
1 - Sec (<80 jours)	0,00	0,00	0,00	0,75	0,06
2 - Humide (Entre 80 et 120 jours)	0,39	0,85	0,53	0,25	0,50
3 - Très humide (>120 jours)	0,61	0,15	0,47	0,00	0,44

Tableau 8-5 Probabilités du nombre de jours de précipitations en fonction du climat

Concernant le seuil de rupture, deux valeurs peuvent lui être associées d'après les résultats des cinétiques d'altération du Chapitre 5 : une « limite basse », valant 10 % de la fréquence de résonance initiale, et une « limite haute », valant 20 % de la fréquence de résonance initiale. Or, nos résultats montrent une relation directe entre la résistance à la fissuration et le seuil de rupture : un calcaire « résistant » à la fissuration a un seuil de rupture avec une « limite basse » et un calcaire « peu résistant » à la fissuration a un seuil de rupture avec une « limite haute ». Ces résultats permettent d'aboutir aux probabilités associées au seuil de rupture, données dans le Tableau 8-6.

Seuil de rupture S	Résistant	Peu résistant
1 - Bas (10% de la fréquence de résonance initiale)	1,00	0,00
2 - Haut (20% de la fréquence de résonance initiale)	0,00	1,00

Tableau 8-6 Probabilités du seuil de rupture en fonction de la résistance à la fissuration

Etape 3 : « nombre de jours d'altération »

Pour les valeurs du nombre de jours d'altération, nous en avons choisi deux : « faible » et « élevé ».

Pour le calcul des probabilités associées au nombre de jours d'altération, nous avons repris le nombre de cycle de gel-dégel par an associé aux valeurs de la variable « conditions de gel » et le nombre de jours de précipitations par an associé aux valeurs de la variable « nombre de jours de précipitations ».

Or les deux valeurs associées aux conditions de gel sont : entre 0 et 20 cycles de gel-dégel et plus de 20 cycles de gel-dégel. Pour pouvoir calculer des probabilités, nous devons avoir une valeur maximale du nombre de cycles de gel-dégel. Nous l'avons choisi arbitrairement à 40 de telle sorte que les deux gammes de valeurs (0-20 et 20-40) comprennent le même écart entre le nombre de cycles minimal et le nombre maximal, soit 20 cycles de gel-dégel dans chaque cas.

Et les trois valeurs associées au nombre de jours de précipitations sont : entre 0 et 80 jours, entre 80 et 120 jours et entre 120 et 160 jours. La valeur maximale de 160 jours correspond à la valeur maximale de l'échelle donnée dans la Figure 8-2.

	Gel faible à très faible			Gel modéré à sévère		
	Sec	Humide	Très humide	Sec	Humide	Très humide
Nombre de cycles de gel-dégel	0 / 20	0 / 20	0 / 20	20 / 40	20 / 40	20 / 40
Nombre de jours de précipitations	0 / 80	80 / 120	120 / 160	0 / 80	80 / 120	120 / 160

Tableau 8-7 Gamme de valeurs associée à chacune des configurations de conditions de gel et du nombre de jours de précipitations sous la forme « valeur minimale / valeur maximale »

Or, d'après le Tableau 2-12 et le nombre de jours d'altération calculé dans le Chapitre 6 (6.3.2.2) et confirmé dans le Chapitre 7 (7.2.2), le nombre de jours d'altération s'obtient par le

calcul suivant : $N_g + \frac{N_p}{7,7}$, avec N_g le nombre de cycles de gel-dégel et N_p le nombre de jours de précipitations (le facteur 7,7 étant dû au fait que nous avons accéléré le phénomène de dissolution en passant d'un pH5 à un pH3 (cf. Chapitre 2, 2.3.3.3)).

Donc, le nombre de jours d'altération minimum N_a^{\min} vaut : $N_g^{\min} + \frac{N_p^{\min}}{7,7}$

Et, le nombre de jours d'altération maximum N_a^{\max} vaut : $N_g^{\max} + \frac{N_p^{\max}}{7,7}$

Avec N_g le nombre de cycles de gel-dégel minimal ou maximal et N_p le nombre de jours de précipitations minimal ou maximal.

	Gel faible à très faible			Gel modéré à sévère		
	Sec	Humide	Très humide	Sec	Humide	Très humide
Nombre de jours d'altération	0 / 30	10 / 36	16 / 41	20 / 50	30 / 56	36 / 61

Tableau 8-8 Nombres de jours d'altération minimum N_a^{\min} et maximum N_a^{\max} associés à chacune des configurations de conditions de gel et du nombre de jours de précipitations sous la forme « N_a^{\min} / N_a^{\max} »

De plus, nous avons choisi d'associer deux valeurs à la variable « nombre de jours d'altération » dans la mesure où nous avons étudié deux climats : nombre de jours d'altération « faible » et nombre de jours d'altération « élevé ».

Le nombre de jours d'altération qui sépare ces deux valeurs a été choisi en fonction du nombre de jours d'altération associé à chacun des deux sites étudiés. Pour rappel, ces nombres sont les suivants (Tableau 6-9) :

- pour le calcaire de Chamesson, il y a 42 jours d'altération ;
- pour la Pierre de Lens, il y a 15 jours d'altération.

Les valeurs doivent comprendre chacune un des sites étudiés dans la mesure où ces sites ont été choisis pour leurs climats différenciés.

Par ailleurs, nous souhaitons que le climat avec un « gel modéré à sévère » et « très humide », c'est-à-dire avec le nombre de jours d'altération le plus élevé (Tableau 8-8), soit forcément considéré comme un nombre de jours d'altération « élevé ». Il faut donc que sa valeur minimal (36) soit supérieure au nombre de jours d'altération qui sépare la valeur « faible » de la valeur « élevé ».

Ainsi, un nombre de jours d'altération faible correspond à moins de 35 jours et un nombre de jours d'altération élevé à plus de 35 jours d'altération.

Ensuite, pour chacune des valeurs du nombre de jours d'altération, nous avons déterminé combien de jours y est associé. Par exemple pour la gamme 16/41 correspondant à un gel faible à très faible et à un nombre de jours d'altération très humide, il y a :

- 19 possibilités d'avoir un nombre de jours d'altération « faible » (< 35 jours), entre 16 et 35 ;
- 6 possibilités d'avoir un nombre de jours d'altération élevé (> 35 jours), entre 35 et 41.

L'ensemble des valeurs est reporté dans le Tableau 8-9.

	Gel faible à très faible			Gel modéré à sévère		
	Sec	Humide	Très humide	Sec	Humide	Très humide
Faible (< 35 jours)	30	25	19	15	5	0
Elevé (> 35 jours)	0	1	6	15	21	25

Tableau 8-9 Nombre de possibilités situé dans les différentes gammes de jours d'altération en fonction des valeurs minimales et maximales du Tableau 8-8

A partir de ces nombres de jours minimum et maximum, nous avons déterminé le nombre de jours d'altération associés aux deux valeurs de la variable « nombre de jours d'altération ».

Ces nombres de jours nous ont permis d'aboutir aux probabilités associées à chaque valeur du nombre de jours d'altération. Le calcul se fait de la manière suivante :

$$P(A = A_i) = \frac{n_i(G, P)}{n^{tot}(G, P)}, \text{ avec } n_i(G, P) \text{ le nombre de valeurs possibles du nombre de jours}$$

d'altération i sachant les valeurs de G (valeur de conditions de gel) et P (valeur de nombre de jours de précipitations) et $n^{tot}(G, P)$ le nombre possible de valeurs de jours total.

On obtient ainsi les probabilités données dans le Tableau 8-10.

Nombre de jours d'altération N	Gel faible à très faible			Gel modéré à sévère		
	Sec	Humide	Très humide	Sec	Humide	Très humide
1 - Faible (< 35 jours)	1,00	0,96	0,76	0,50	0,19	0,00
2 - Elevé (> 35 jours)	0,00	0,04	0,24	0,50	0,81	1,00

Tableau 8-10 Probabilités du nombre de jours d'altération en fonction des conditions de gel et du nombre de jours de précipitations

Etape 4 « durée de vie »

Les valeurs associées à la variable « durée de vie » sont déduites du processus d'altération déterminé au Chapitre 5.

Au niveau de la fréquence de résonance, la phase de fissuration dure 3 cycles annuels d'altération accélérés (5.4). Ainsi, les valeurs se basent sur 3 ans et sont :

- une durée de vie très courte est inférieure à 1 an ;
- une durée de vie courte est comprise entre 1 et 3 ans ;
- une durée de vie longue est supérieure à 3 ans.

Pour l'état d'altération, la valeur « peu altéré » est associée au cycle 1, la valeur « altéré » au cycle 3 et la valeur « très altéré » au cycle 7, ce qui correspond à 1, 3 et 7 ans.

Le calcul des probabilités associées de la variable « durée de vie » s'est basé sur les mesures réalisées sur l'ensemble des échantillons du calcaire de Chamesson et de la Pierre de Lens à chaque cycle annuel d'altération accéléré (Chapitre 6) en fonction du seuil de rupture du calcaire.

La démarche pour chaque calcaire a été la suivante :

- déterminer le nombre d'échantillons qui atteignent le seuil de rupture au bout d'un cycle, entre un et trois cycles et au bout de plus de 3 cycles en commençant à un état peu altéré (cycle 1), à un état altéré (cycle 3) et à un état très altéré (cycle 7) ;
- ramener ce nombre au nombre d'échantillons total.

Ces calculs permettent d'aboutir au Tableau 8-11, établi à partir des résultats du calcaire de Chamesson et au Tableau 8-12, établi à partir des résultats de la Pierre de Lens.

Durée de vie D	Nombre de jours d'altération élevé					
	Seuil de rupture bas			Seuil de rupture haut*		
	Peu altéré	Altéré	Très altéré	Peu altéré	Altéré	Très altéré
1 - Très courte (< 1 an)	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,55
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,00	0,04	0,48	0,00	0,38	0,45
3 - Longue (> 3 ans)	1,00	0,96	0,48	1,00	0,62	0,00

* Résultats extrapolés

Tableau 8-11 Probabilité de durée de vie en fonction du seuil de rupture et de l'état d'altération pour un nombre de jours d'altération élevé

Le calcaire de Chamesson a un seuil de rupture bas et la Pierre de Lens a un seuil de rupture haut d'après les essais de ténacité du Chapitre 6 (6.1.1.3), les résultats bruts ne donnent donc que la moitié de chaque tableau. Pour la 2^{ème} moitié, nous avons choisi d'extrapoler les résultats obtenus en faisant les mêmes calculs mais en considérant les résultats du calcaire de Chamesson avec un seuil de rupture haut et les résultats de la Pierre de Lens avec un seuil de rupture bas. Ces probabilités sont donc associées à des résultats extrapolés.

Durée de vie D	Nombre de jours d'altération faible					
	Seuil de rupture bas*			Seuil de rupture haut		
	Peu altéré	Altéré	Très altéré	Peu altéré	Altéré	Très altéré
1 - Très courte (< 1 an)	0,00	0,00	0,13	0,00	0,01	0,07
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,00	0,13	0,07	0,01	0,06	0,14
3 - Longue (> 3 ans)	1,00	0,87	0,80	0,99	0,93	0,79

* Résultats extrapolés

Tableau 8-12 Probabilité de durée de vie en fonction du seuil de rupture et de l'état d'altération pour un nombre de jours d'altération faible

8.1.3. Analyse

L'ensemble des probabilités obtenues permet d'obtenir le réseau bayésien complet (Figure 8-4) de prévision de la durée de vie de calcaires oolithiques en France métropolitaine en fonction de ses caractéristiques et du climat auquel il est soumis.

Influence des changements climatiques et des conditions extrêmes sur les massifs fracturés

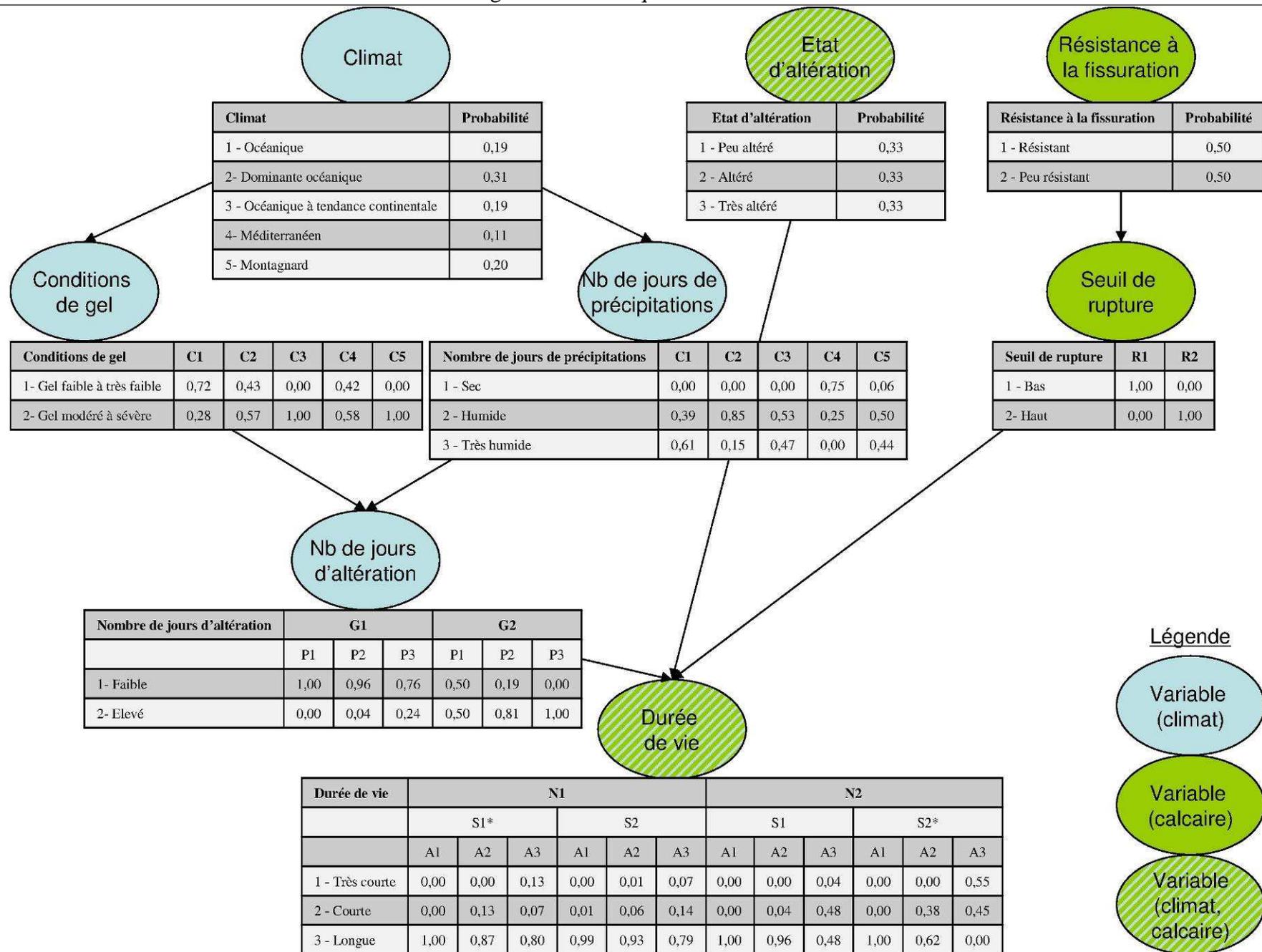


Figure 8-4 Réseau bayésien complet pour la prévision de la durée de vie de calcaires oolithiques

Pour l'analyse du réseau bayésien, utilisons déjà les relations suivantes (Cornuéjols, 2002) :

- marginalisation (série de produits locaux de matrices et de marginalisations locales) :

$$P(q, e) = \sum_{x_1, \dots, x_n} P(q, e, x_1, \dots, x_n), \text{ où } X_1, \dots, X_n \text{ sont les variables du réseau exceptées } Q \text{ (la}$$

variable requête) et E (l'ensemble des nœuds faits) ;

- factorisation :

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_i P(X_i | Pa_i), \text{ cette relation découle du fait que le graphe du réseau bayésien}$$

est une représentation des indépendances conditionnelles de la probabilité P , sinon, il faudrait calculer : $P(X_1, \dots, X_n) = P(X_1 | X_2, \dots, X_n) \times P(X_2 | X_3, \dots, X_n) \times \dots \times P(X_{n-1} | X_n)$.

Elles permettent de calculer les probabilités a priori $P(X_i)$ des variables X_i qui sont G (conditions de gel), P (nombre de jours de précipitations), N (nombre de jours d'altération), S (seuil de rupture) et D (durée de vie) (Tableau 8-13).

Conditions de gel G	P(G)
1 - Gel faible à très faible	0,32
2 - Gel modéré à sévère	0,68

Seuil de rupture S	P(S)
1 - Bas (10% de la fréquence de résonance initiale)	0,50
2 - Haut (20% de la fréquence de résonance initiale)	0,50

Nombre de jours de précipitations P	P(P)
1 - Sec (<80 jours)	0,09
2 - Humide (Entre 80 et 120 jours)	0,57
3 - Très humide (>120 jours)	0,34

Durée de vie D	P(D)
1 - Très courte (< 1 an)	0,07
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,16
3 - Longue (> 3 ans)	0,76

Nombre de jours d'altération N	P(N)
1 - Faible (< 35 jours)	0,39
2 - Elevé (> 35 jours)	0,61

Tableau 8-13 Probabilités a priori des variables G, P, N, S et D

Ces probabilités a priori mettent notamment en évidence le fait que :

- le nombre de jours d'altération a une probabilité, a priori, d'être élevé de 61%, ce qui montre qu'il y a plus de départements avec un nombre de jours d'altération élevé que faible en France ;

- la durée de vie d'un calcaire oolithique a une probabilité, a priori, d'être longue de 76%, ce qui signifie que sans information particulier, il y a 76% de chance que la durée de vie du calcaire oolithique étudié soit longue.

Ces deux probabilités a priori montre que malgré un nombre de jours d'altération élevé très présent en France (61%), la durée de vie des calcaires est a priori longue pour 76% des cas. Ce point souligne le fait que le terme « élevé » pour le nombre de jours d'altération est adapté aux conditions climatiques françaises mais il n'implique pas un risque de courte durée de vie élevé.

Le climat français présente donc un risque, a priori, limité qu'un calcaire ait une durée de vie très courte ou courte.

Regardons maintenant comment évolue la probabilité de durée de vie du calcaire oolithique lorsque l'on connaît certaines conditions pour illustrer l'intérêt d'une telle analyse.

Pour calculer $P(D = d | E = e)$ avec D la variable requête (durée de vie) et E l'ensemble des

nœuds faits, utilisons la loi définissant une probabilité conditionnelle : $P(d|e) = \frac{P(d, e)}{P(e)}$, et la

loi de marginalisation : $P(q, e) = \sum_{x_1, \dots, x_n} P(q, e, x_1, \dots, x_n)$, où X_1, \dots, X_n sont les variables du

réseau exceptées Q (la variable requête) et E (l'ensemble des nœuds faits) (Cornuéjols, 2002).

Que devient la probabilité de durée de vie du calcaire oolithique si l'on sait qu'il a un état d'altération « très altéré » ?

On cherche donc $P(d|a_3) = \frac{P(d, a_3)}{P(a_3)}$, a_3 étant la valeur « très altéré » de l'état d'altération. A

partir des calculs précédents, on aboutit au Tableau 8-14.

Durée de vie D sachant que le calcaire est très altéré (a_3)	$P(d a_3)$
1 - Très courte (< 1 an)	0,22
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,33
3 - Longue (> 3 ans)	0,46

Tableau 8-14 Probabilité de la durée de vie du calcaire oolithique sachant que son état est « très altéré »

Si l'on sait que le calcaire est très altéré, **sa durée de vie a une probabilité d'être longue à 46% alors qu'a priori elle était de 76%**. Cette remarque illustre l'intérêt d'un tel outil pour la prévision de la durée de vie du calcaire.

Par un calcul similaire, il est possible aussi de voir comment la probabilité de durée de vie évolue lorsque l'on sait que le calcaire est « résistant » (Tableau 8-15).

Durée de vie D sachant que le calcaire est résistant (r_1)	$P(d r_1)$
1 - Très courte (< 1 an)	0,03
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,13
3 - Longue (> 3 ans)	0,84

Tableau 8-15 Probabilité de la durée de vie du calcaire oolithique sachant qu'il est « résistant »

Les probabilités que la durée de vie soit très courte ou courte ont diminué par rapport aux probabilités a priori et **la probabilité que la durée de vie soit longue a augmenté** et atteint 84% au lieu de 76% a priori.

8.1.4. Conclusion

Le réseau bayésien permet de déterminer quantitativement les probabilités de durée de vie des calcaires oolithiques en fonction de leurs caractéristiques et du climat. Le modèle se base sur les résultats des Chapitres précédents et notamment sur les résultats des Chapitres 5 et 6.

Il constitue donc un moyen de synthétiser les conclusions réalisées dans toute l'étude.

Les résultats mettent en valeur l'effet des variables sur la durée de vie du calcaire et notamment que :

- un calcaire « très altéré » à l'état initial à 46% de chance d'avoir une durée de vie « longue », c'est-à-dire avec une probabilité basse ;
- un calcaire « résistant » au niveau de la propagation des fissures a 84 % de chance d'avoir une durée de vie « longue », c'est-à-dire avec une probabilité très élevée.

Ce réseau pourrait être affiné en :

- calculant les probabilités liées au climat en raisonnant à partir de surfaces plutôt qu'à partir du nombre de départements ;
- réalisant d'autres essais de cycles annuels d'altération accélérés sur d'autres calcaires oolithiques ;
- définissant trois valeurs pour le nombre de jours d'altération (au lieu de deux actuellement).

Nous allons maintenant utiliser cet outil pour prévoir l'impact des changements climatiques sur la durée de vie des calcaires oolithiques.

8.2. Prévision de l'impact des changements climatiques sur l'altération des calcaires

8.2.1. Le changement climatique en France

Les difficultés actuelles d'avoir un consensus sur la prévision de l'évolution du climat et de ses changements ne permettent pas une prévision quantitative acceptée de tous du climat. Selon les experts du GIEC (2007), la hausse de la température moyenne d'ici 2100 pourrait être comprise entre 1,1 et 6,4°C (Figure 8-5). Cette fourchette de réchauffement s'explique par l'incertitude due aux divers scénarii d'émissions de gaz à effet de serre et aux modèles simulant l'évolution du climat (Météo France, 2007). Les dernières simulations climatiques prévoient pour l'ouest de l'Europe (Météo France, 2007) :

- en été, un réchauffement marqué et une diminution des précipitations sur les régions méditerranéennes ;
- en hiver, une augmentation des précipitations sur toute la façade atlantique.

Les évolutions restent néanmoins très incertaines. Nous allons donc **regarder les effets pour tous les cas de figures**, c'est-à-dire pour une augmentation ou une diminution :

- de la température et de l'ensoleillement ;
- des précipitations et de l'humidité ;
- du vent.

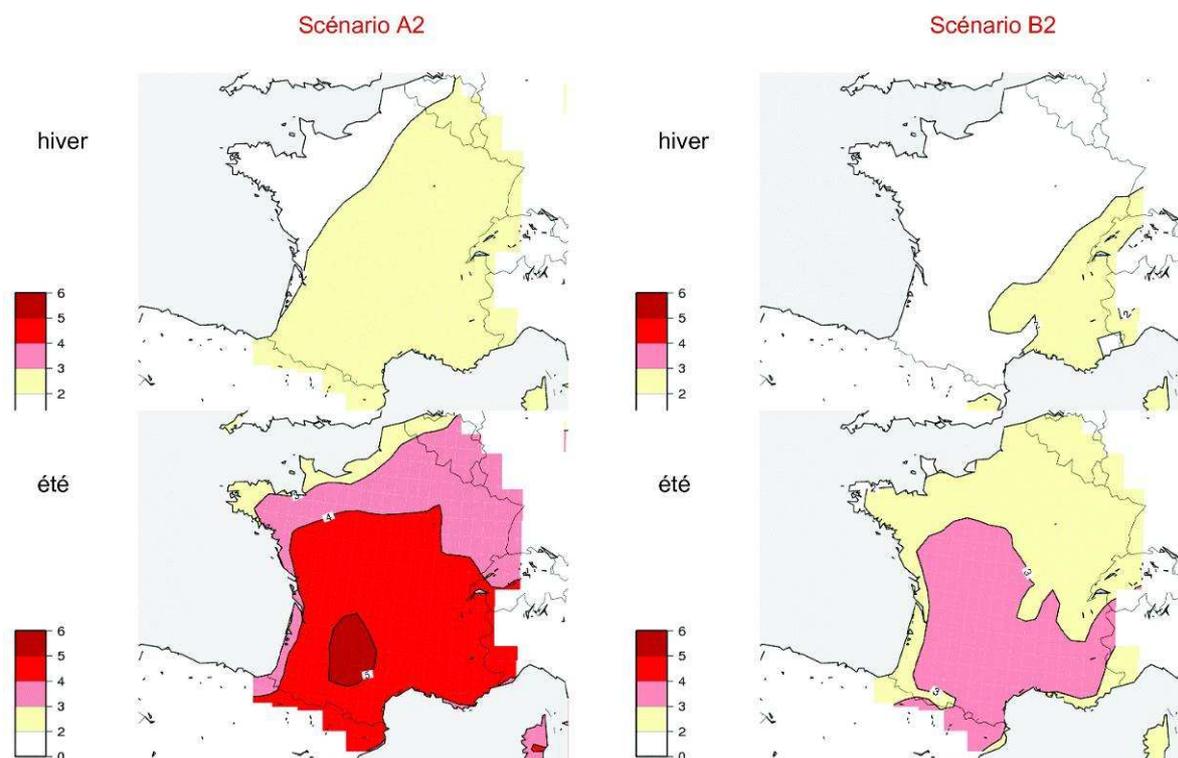


Figure 8-5 Prévisions d'écart de température en France Métropolitaine entre la fin du 21^{ème} siècle et la fin du 20^{ème} siècle, selon les scénarii pessimiste A2 et optimiste B2 (écart entre la période 2070 – 2099 et la période 1960-1969) (Météo France, 2007)

Sur la base de ces tendances nous allons déterminer qualitativement les effets des changements climatiques sur l'altération des calcaires. Pour ce faire, revenons au Chapitre 1. Nous y avons établi des **paramètres, dépendant du climat**, qu'il est possible de contrôler en laboratoire. Le Tableau 8-16 rappelle ces paramètres et leurs liens avec les facteurs d'altération climatiques.

Paramètres Facteurs d'altération climatiques	Température de la roche	Degré de saturation	Qualité de l'eau avant percolation	Temps de percolation	Débit de l'apport en eau
Température et ensoleillement	Oui	Oui	Non	Non	Non
Précipitations et humidité	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Vent	Oui	Oui	Non	Non	Non

Tableau 8-16 Les paramètres liés aux facteurs d'altération climatiques d'après le Chapitre 1

8.2.2. Effets sur les paramètres liés au climat

8.2.2.1. Température et ensoleillement

La température et l'ensoleillement ont un effet sur la température de la roche et sur le degré de saturation (Tableau 8-16). L'augmentation de la température et de l'ensoleillement entraîne une augmentation de la température de la roche et une diminution du degré de saturation, et vice versa. Regardons ces paramètres indépendamment.

D'après le Chapitre 2 (2.3.2 et 2.3.3), la température de la roche a un rôle dans :

- la réaction de dissolution ;
- la température de gel.

Concernant la réaction de dissolution, les considérations thermodynamiques du Chapitre 2 (2.3.3.2), montre que les variations de températures en France n'ont pas d'effet très important. Concernant la température de gel, **une hausse ou une baisse de la température en hiver peut soit augmenter, soit diminuer le nombre de cycles de gel-dégel par an**. En effet, dans une zone où les températures restent négatives longtemps en hiver, le décalage vers le haut de la valeur de la température peut entraîner l'apparition de cycles de gel-dégel. A l'inverse pour une zone qui présente des cycles de gel-dégel avec des températures de gel négatives de quelques degrés, une hausse de la température pourrait entraîner un passage de la température du négatif au positif et donc faire disparaître les cycles de gel-dégel en question (Figure 8-6).

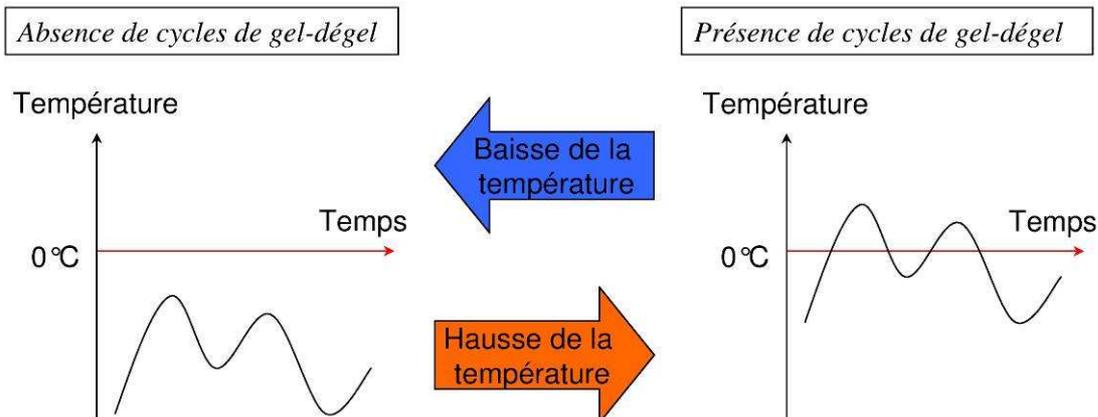


Figure 8-6 Influence de la température sur les cycles de gel-dégel

Le degré de saturation diminue lorsque la température augmente. Ce constat concerne la période estivale. Or, les variations du degré de saturation ont un effet sur les cycles de gel-dégel, c'est-à-dire en période hivernale. Cette influence n'a donc pas un rôle important dans le processus d'altération.

8.2.2.2. Précipitations et humidité

Les précipitations et l'humidité ont un effet sur le degré de saturation, la qualité de l'eau avant percolation, le temps de percolation et le débit de l'apport en eau (Tableau 8-16).

D'après le Chapitre 2 (2.3.2.1), le degré de saturation a une influence sur les effets des cycles de gel-dégel, dans la mesure où nous avons vu qu'en-dessous d'un degré de saturation (appelé degré de saturation critique, cf. 2.3.2.1) la gélivation ne crée plus d'endommagement du calcaire. Cet effet concerne donc la période hivernale. **Une baisse (ou une hausse) des précipitations en hiver et donc une baisse (ou une hausse respectivement) du degré de saturation pourrait diminuer (ou aggraver respectivement) les effets de gélivation pour les calcaires dont le degré de saturation diminuerait en-dessous du degré de saturation critique (augmenterait au-dessous du degré de saturation critique respectivement) pendant la période hivernale** (Figure 8-7).

La qualité de l'eau avant percolation, et notamment sa concentration en CO₂, a une influence sur le pH de l'eau et donc sur les effets de la dissolution. Néanmoins, pour les augmentations de la concentration de CO₂ prévues par le GIEC, les variations du pH sont négligeables.

Concernant le temps de percolation, une augmentation des précipitations favorise le ruissellement et donc la diminution du temps de contact entre l'eau et la roche et donc une **diminution des effets liés à la dissolution**. Cette remarque concerne aussi le débit d'apport en eau.

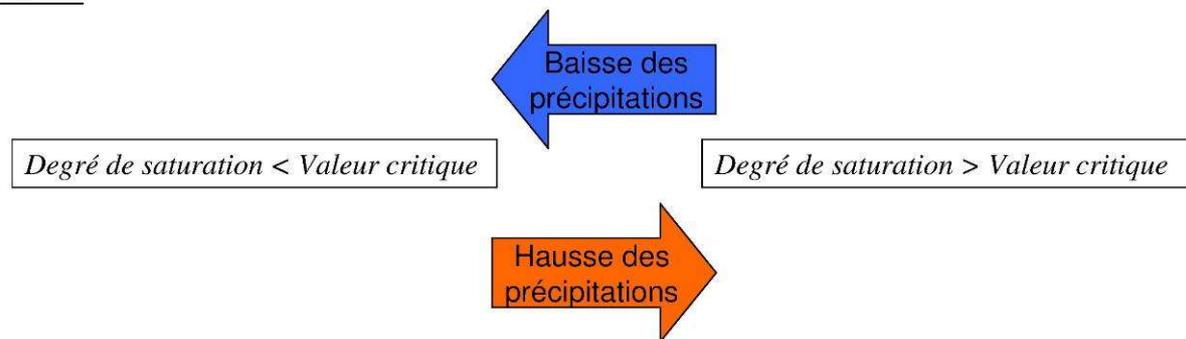


Figure 8-7 Influence des précipitations sur le degré de saturation

8.2.2.3. Vent

Le vent influence la température de la roche et le degré de saturation (Tableau 8-16). Le vent peut diminuer la température de la roche et donc influencer les effets de la gélivation (cf.8.2.2.1). Le vent peut favoriser l'évaporation et donc diminuer le degré de saturation, ce qui peut influencer les effets de la gélivation (cf.8.2.2.2)

8.2.3. Rôle dans le processus d'altération

Les variations des facteurs d'altération climatiques ont une influence sur les effets de la gélivation et de la dissolution. A partir du réseau bayésien établi ici (cf. 8.1.3), regardons l'impact d'un changement de conditions de gel ou d'une augmentation ou d'une diminution du nombre de jours de précipitations sur la durée de vie d'un calcaire oolithique.

Le Tableau 8-17 donne les probabilités de durée de vie en connaissant les conditions de gel.

Durée de vie D connaissant les conditions de gel	$P(d g_1)$	$P(d g_2)$
1 - Très courte (< 1 an)	0,04	0,09
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,08	0,20
3 - Longue (> 3 ans)	0,87	0,71

Tableau 8-17 Probabilité de la durée de vie du calcaire oolithique connaissant les conditions de gel (g_1 = gel faible à très faible, g_2 = gel modéré à sévère)

Si les conditions de gel varient de telle sorte qu'elles passent de « gel faible à très faible » à « gel modéré à sévère », les probabilités de durée de vie « très courte » et « courte » augmente et la probabilité de durée de vie « longue » diminue. Ce changement conserve néanmoins une forte probabilité pour une durée de vie « longue » du calcaire : elle est de 0,71. La plus forte variation concerne la durée de vie « courte » : elle est multipliée par 2,5 et signifie qu'un échantillon sur 5 risque d'avoir une durée de vie « courte » si l'on sait que le gel est « modéré à sévère ».

Si les conditions de gel varient de telle sorte qu'elles passent de « gel modéré à sévère » à gel « faible à très faible », les observations sont inversées.

Des variations significatives dans les conditions de gel ont un impact sérieux sur la durée de vie du calcaire, particulièrement sur sa durée de vie courte.

Durée de vie D connaissant le nombre de jours de précipitations	$P(d p_1)$	$P(d p_2)$	$P(d p_3)$
1 - Très courte (< 1 an)	0,06	0,07	0,08
2 - Courte (entre 1 et 3 ans)	0,12	0,16	0,19
3 - Longue (> 3 ans)	0,82	0,77	0,73

Tableau 8-18 Probabilité de la durée de vie du calcaire oolithique connaissant le nombre de jours de précipitations (p_1 = sec, p_2 = humide, p_3 = très humide)

Le Tableau 8-18 donne les probabilités de durée de vie en connaissant le nombre de jours de précipitations.

Les probabilités de durée de vie associées à des variations au niveau du nombre de jours de précipitations montrent que, si le temps devient plus humide, les durées de vie « très courte » et « courte » du calcaire deviennent de plus en plus probables et la durée de vie « longue » devient moins probable. Les évolutions de ces probabilités restent néanmoins très limitées : elles sont inférieures à 35% (en baisse ou en augmentation).

Des variations significatives dans le nombre de jours de précipitations ont un impact limité sur la durée de vie du calcaire.

8.2.4. Conclusion

Le réseau bayésien établi précédemment a permis de souligner l'impact des changements climatiques sur la durée de vie des calcaires oolithiques.

Cet impact s'observe en particulier pour un changement au niveau des conditions de gel. Une augmentation (ou une diminution) du nombre de cycles de gel-dégel conduit à une diminution (respectivement une augmentation) significative de la durée de vie « longue » du calcaire oolithique.

Un changement au niveau du nombre de jours de précipitations n'a pas un impact très important sur la durée de vie du calcaire oolithique.

8.3. Conclusion

Ce Chapitre reprend de nombreuses conclusions établies dans les Chapitres précédents permettant de faire des simplifications dans l'établissement d'un réseau bayésien sur la durée de vie d'un calcaire oolithique en partant du climat, de son état d'altération et de sa résistance à la fissuration.

Ce réseau bayésien offre une synthèse de l'étude réalisée et permet une analyse globale des résultats par des calculs de probabilité. Ces calculs donnent en particulier des informations sur :

- les probabilités a priori de la durée de vie du calcaire ;
- l'impact d'un changement dans les caractéristiques du calcaire sur sa durée de vie ;
- l'impact des changements climatiques sur la durée de vie du calcaire.

Concernant le dernier point, nous avons remarqué que les changements climatiques peuvent entraîner des variations significatives sur la probabilité de durée de vie du calcaire s'ils touchent les conditions de gel. Des variations du nombre de jours de précipitations ont un impact plus limité sur la durée de vie du calcaire, dans les conditions envisagées dans cette étude.

Bibliographie

Cornuéjols A. *Introduction aux Réseaux Bayésiens*. 2002.

GIEC/IPCC. *Bilan 2007 des changements climatiques: rapport de synthèse*. France : République Française, 2007.

Météo France. *Quels climats futurs?* [En ligne]. 2007. < <http://climat.meteofrance.com> >

Parent E., Bernier J. *Le raisonnement bayésien Modélisation et inférence*. France : Springer-Verlag, 2007. 364 p. ISBN : 978-2-287-33906-6.

Parent O., Eustache J. *Les réseaux Bayésiens*. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2007. (Master 2 Recherche Connaissance et Raisonnement).

Conclusions et perspectives

Le but de ce travail est de déterminer le rôle du climat dans le processus d'altération des calcaires oolithiques.

Les conclusions majeures de ce travail sont :

- l'allure de la cinétique d'altération des calcaires oolithiques est la même et le point de départ d'une cinétique d'altération rapide dépend uniquement du climat auquel le calcaire oolithique est soumis ;
- le seuil de rupture du calcaire oolithique, c'est-à-dire la valeur relative de la fréquence de résonance en-dessous de laquelle l'échantillon atteint la rupture, dépend d'une caractéristique particulière des calcaires oolithiques : la présence ou non des vides autour des oolithes.

Cette dernière partie reprend l'ensemble des conclusions de ce travail et annonce les perspectives qu'il ouvre au niveau :

- de la mesure de l'endommagement ;
- du modèle de vieillissement accéléré en laboratoire ;
- du comportement des calcaires oolithiques vis-à-vis de l'altération et en fonction de leurs caractéristiques microstructurales ;
- de l'impact du climat dans le processus d'altération.

Mesures de l'endommagement

La mesure de la vitesse du son et celle de la fréquence de résonance permettent d'obtenir des informations sur les modifications du squelette rocheux. Lorsqu'elles sont couplées, les résultats montrent qu'elles permettent de savoir si la modification du squelette rocheux est due à une déstructuration ou si elle est due à un élargissement des vides existants. Dans le premier cas la vitesse du son et la fréquence de résonance diminue, dans le deuxième la vitesse du son diminue et la fréquence de résonance ne varie pas.

Le calcul de la porosité liée aux pores et de celles liées aux fissures, à partir de la mesure de la vitesse du son et de la porosité, permet de déterminer dans quelle phase du processus d'altération se situe en calcaire.

Nous avons mis en place une méthode de mesure de la longueur et de l'orientation des fissures présentes en surface des échantillons qui permet de distinguer les différences de comportement entre les calcaires oolithiques.

La fréquence de résonance est une méthode de mesure qui permet de connaître le moment de rupture. Son évolution est la suivante :

- faible diminution pour un endommagement compris dans la zone de comportement élastique du calcaire ;
- diminution importante pour un endommagement par propagation stable des fissures ;
- stabilisation (voire légère augmentation) dès que l'endommagement résulte de la propagation instables des fissures. Cette tendance annonce une rupture proche.

Modèle de vieillissement accéléré en laboratoire

La synthèse bibliographique du Chapitre 1 a permis de déboucher sur un ensemble de paramètres, liés aux facteurs d'altération climatiques et aux facteurs d'altération de site, qu'il est possible de contrôler en laboratoire. Les paramètres liés aux facteurs climatiques ont été utilisés pour établir un modèle de vieillissement accéléré en laboratoire. Ce modèle cherche à

reproduire les conditions réelles d'altération. Il se base sur des cycles annuels d'altération accélérés déterminés à partir des données de températures et de précipitations. Il se décompose en une étape de dissolution et une étape de gélivation. Ce modèle se veut applicable à l'ensemble des conditions climatiques en France et aux calcaires.

Nous l'avons testé en l'utilisant sur deux sites d'études comprenant chacun des conditions climatiques et un calcaire différents. Le premier site concerne le calcaire de Chamesson en Côte d'Or et le deuxième site concerne la Pierre de Lens dans le Gard.

Des cinétiques d'altération ont été obtenues par vieillissement des échantillons en les soumettant aux cycles annuels d'altération accélérés.

Ce modèle a également été validé par l'établissement d'un nouveau cycle annuel d'altération accéléré pour le Calcaire de Vilhonneur en Charente.

Des échantillons provenant de faciès altérés prélevés sur site ont servi à comparer les endommagements obtenus par les cycles annuels d'altération accélérés et ceux obtenus naturellement.

Des différences entre les échantillons altérés en laboratoire et les échantillons altérés naturellement ont été observées :

- la fissuration des échantillons altérés naturellement est plus atténuée que celle des échantillons altérés en laboratoire, ceci peut être dû au fait que les conditions de confinement sont différentes et implique que les conditions envisagées en laboratoire sont plus extrêmes et donc plus défavorables ;
- pour les échantillons les plus altérés naturellement, les vides sont remplis de matière alors que les vides des échantillons altérés en laboratoire ne le sont pas, ceci peut être dû au fait que nous n'avons pas pris en compte les cycles de saturation-séchage qui ont lieu dans les conditions réelles favorisant ainsi la précipitation de matière dans les vides.

➤ Perspectives

Les différences entre les échantillons altérés en laboratoire et les échantillons altérés naturellement permettent d'émettre des perspectives d'amélioration du modèle de cycles annuels d'altération accélérés :

- imaginer un dispositif reproduisant les conditions de confinement sur site pour des échantillons en laboratoire ;
- ajouter une étape de séchage au cycle annuel d'altération accéléré.

Comportement des calcaires oolithiques vis-à-vis de l'altération et caractéristiques microstructurales

Les conclusions sur le comportement des calcaires oolithiques concernent deux points :

- les modifications du réseau poreux ;
- la résistance à la propagation des fissures.

Les calcaires étudiés ont été choisis pour leurs caractéristiques similaires au niveau de leur microstructure (oolithique), leur composition minéralogique et leur porosité mais aussi parce qu'ils présentent une sensibilité à la gélivation différente. Ils présentent également une différence microstructurale remarquable : la Pierre de Lens présente des vides autour de ses oolithes alors que le calcaire de Chamesson n'en a pas. De cette différence sont nées les conclusions qui suivent.

➤ Modifications du réseau poreux

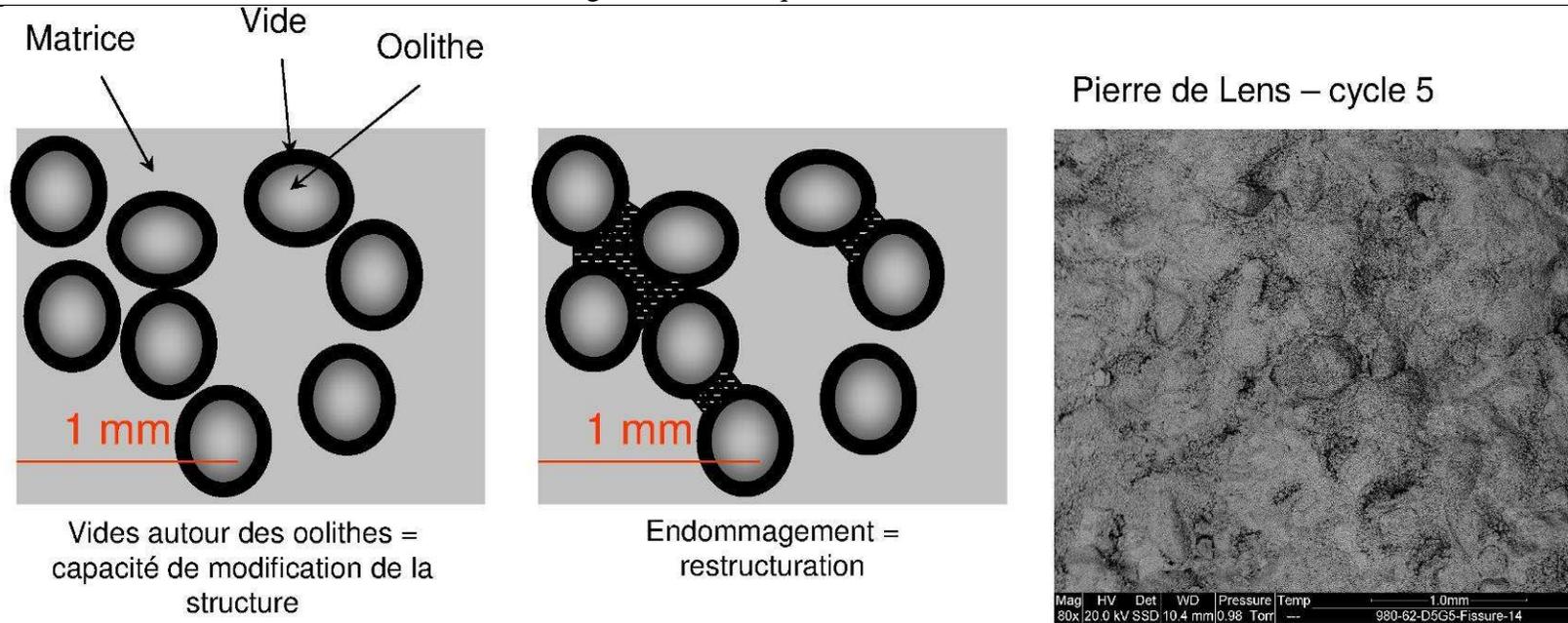


Figure 1 Schéma de comportement d'un calcaire oolithique comprenant des vides autour de ses oolithes

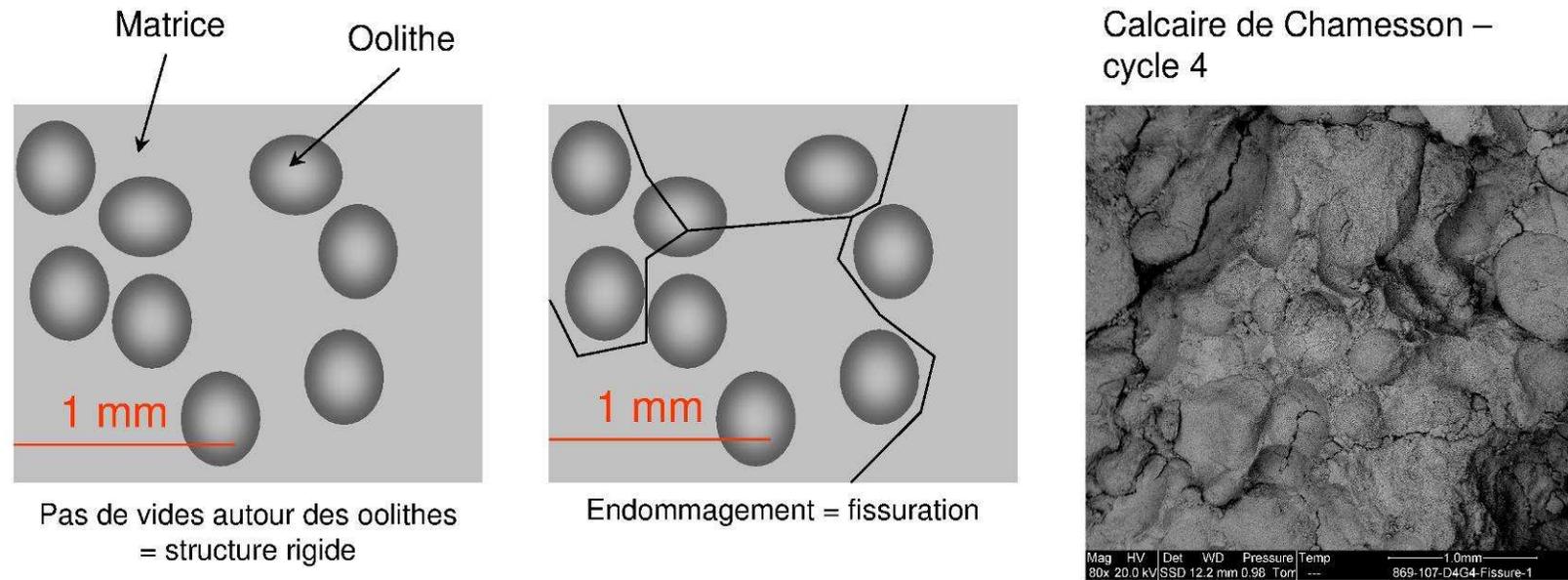


Figure 2 Schéma de comportement d'un calcaire oolithique ne comprenant pas de vides autour de ses oolithes

Les analyses du Chapitre 4 ont souligné le rôle majeur des propriétés hydrauliques dans l'impact des phénomènes d'altération :

- la taille des pores a un impact sur les effets de la gélivation ;
- la perméabilité a un impact sur les effets de la dissolution.

Des comportements différents des deux calcaires sont ressortis lors de l'étude des phénomènes d'altération regardés de façon dissociée :

- les propriétés hydrauliques de la Pierre de Lens le rendent peu sensible à la gélivation mais sensible à la dissolution. C'est l'inverse pour le calcaire de Chamesson ;
- après gélivation, le calcaire de Chamesson présente de nombreuses fissures au niveau de la matrice et la Pierre de Lens présente une déstructuration de son squelette rocheux et après dissolution, le calcaire de Chamesson présente des vides localisés dans la matrice liés à la dissolution et la Pierre de Lens montre de nombreux vides entourant ses oolithes.

Les résultats montrent que ces réactions différentes à l'altération (fissuration ou déstructuration) sont dues à une microstructure différente : le fait que la perméabilité soit corrélée à la porosité liée aux pores pour la Pierre de Lens et à la porosité liée aux fissures pour le calcaire de Chamesson montre que la Pierre de Lens a une capacité de modifier la structure de son squelette rocheux sans fissurer. Cette capacité est rendue possible grâce à la présence de vides autour des oolithes, laissant de l'espace pour une modification sans fissuration.

Donc la présence de vides autour des oolithes permet une modification du squelette rocheux sans fissuration (Figure 1) et son absence rigidifie la microstructure et entraîne sa fissuration (Figure 2).

➤ Résistance à la propagation des fissures

L'étude du Chapitre 6 montre que la présence ou non de vides autour des oolithes dans la microstructure a un impact sur la résistance à la propagation des fissures. Cette remarque est confirmée par des mesures de ténacité sur des échantillons du calcaire de Vilhonneur.

D'après les résultats, la limite entre une résistance à la propagation des fissures lorsqu'il y a des vides autour des oolithes (c'est-à-dire pour une résistance faible) et une résistance à la propagation des fissures lorsqu'il n'y en a pas (c'est-à-dire pour une résistance forte) se situe à $0,59 \text{ MPa}\sqrt{m}$.

La dernière étape (cinétique d'altération nulle) met en évidence un seuil de rupture qui dépend de la résistance à la fissuration du calcaire, qui elle-même dépend de la présence ou non de vides autour des oolithes. Ce seuil est plus élevé pour un calcaire dont la ténacité est plus faible et qui a des vides autour de ses oolithes (Pierre de Lens) : il se situe à 20% de la valeur de la fréquence de résonance initiale. Et pour le calcaire dont la ténacité est la plus élevée et qui n'a pas de vides autour de ses oolithes (calcaire de Chamesson), ce seuil se situe à 10% de la valeur de la fréquence de résonance initiale. Les observations au niveau de la microstructure (courbes porosimétriques et images MEB) et au niveau des fissures (images scannés) confirment l'effet de la microstructure sur le comportement vis-à-vis de la fissuration. Il est donc raisonnable de considérer que le seuil de rupture dépend de la résistance à la propagation des fissures et donc de la présence ou non des vides autour des oolithes.

➤ Perspectives

Nous n'avons pas atteint un nombre de cycles suffisant, pour le calcaire de Vilhonneur, pour confirmer le lien entre la résistance à la propagation des fissures et le seuil de rupture établi au

Chapitre 6. Il pourrait donc être intéressant de regarder si l'on le retrouve pour d'autres calcaires oolithiques, avec ou sans vides autour des oolithes.

Les conclusions permettent d'établir un modèle de comportement des calcaires oolithiques en fonction de la présence ou non de vides autour des leurs oolithes. Il serait donc intéressant d'utiliser ces conclusions pour modéliser numériquement ce comportement mécanique à l'aide d'un logiciel tel que Particle Flow Code (ICG, 2008). Ce logiciel convient particulièrement dans la mesure où il modélise le mouvement et les interactions de particules circulaires par la méthode des éléments distincts (DEM) et qu'il peut modéliser un solide fragile en soudant les particules entre elles. L'assemblage qui en résulte peut être considéré comme un « solide » qui a des propriétés élastiques et est capable de « fissurer » par rupture progressive des liaisons. A ce logiciel s'ajoute le modèle micromécanique d'assemblage de sphères composites appliqué aux calcaires oolithiques développé par Nguyen (2010). Ce modèle nécessite de connaître les paramètres élastiques et plastiques de l'oolithe, de la matrice et de l'interface oolithe-matrice (Figure 3) obtenus par essai d'indentation.

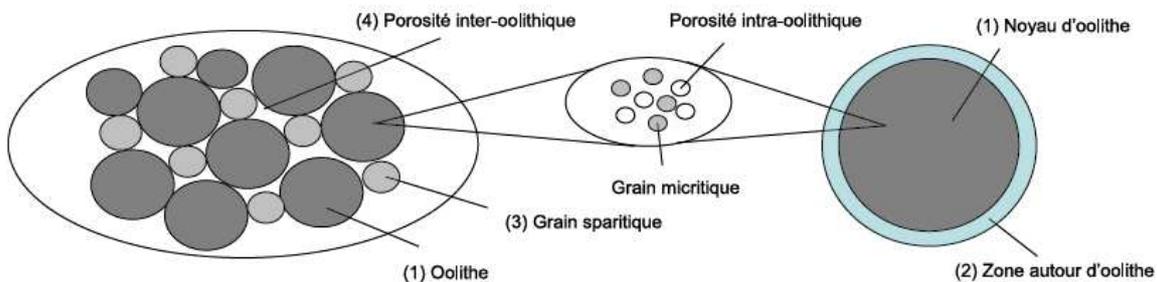


Figure 3 Modèle et méthode d'homogénéisation en deux étapes d'un calcaire oolithique (Nguyen, 2010)

Impact du climat dans le processus d'altération

Les essais de faisabilité ont permis de mettre en évidence les effets de la gélivation d'une part et les effets de la dissolution d'autre part sur les deux calcaires mais également de voir que les effets cumulés de ces deux phénomènes d'altération ne se manifestent pas de la même façon que lorsqu'ils sont regardés indépendamment. Cette observation majeure confirme l'intérêt d'une étude d'un processus d'altération globale, objet de cette étude.

Nous avons choisi deux sites d'étude en France avec des climats et des conditions de gel différenciés et ceci dans le but de mieux comprendre l'impact du climat dans le processus d'altération.

Les deux premières phases du processus d'altération des deux calcaires de référence dans leurs climats respectifs sont globalement identiques. La première phase consiste en une phase de fissuration où le squelette rocheux se déstructure et les compétences mécaniques diminuent. La deuxième phase concerne l'élargissement des vides où la porosité présente de fortes variations et le calcaire s'altère par fatigue.

L'évolution de la fréquence de résonance en fonction des cycles annuels d'altération accélérés met en évidence les différents états d'endommagement (comportement élastique, fissuration stable et fissuration instable). Elle fait apparaître trois cinétiques d'altération successives : une cinétique lente, une cinétique rapide et une cinétique nulle.

Les cinétiques d'altération des deux calcaires de référence sont semblables mais avec un décalage dans le temps. Ce décalage est dû au climat et non au comportement de la roche. Nous avons donc mis en évidence le fait que le rôle du climat est prédominant dans le processus d'altération par rapport au comportement du calcaire vis-à-vis de

l'endommagement. Cette conclusion a été validée par l'étude d'un troisième calcaire oolithique subissant des cycles annuels d'altération accélérés d'un climat charentais.

A partir des résultats obtenus, nous avons établi un réseau bayésien estimant la durée de vie (avant rupture) d'un calcaire oolithique en fonction de ces caractéristiques et du climat auquel il est soumis. Il constitue donc un moyen de synthétiser les conclusions réalisées dans toute l'étude.

Ce réseau permet également de souligner l'impact des changements climatiques sur la durée de vie des calcaires oolithiques. Les changements climatiques peuvent entraîner des variations significatives sur la probabilité de durée de vie du calcaire s'ils touchent les conditions de gel. Des variations du nombre de jours de précipitations n'ont pas un impact important sur la durée de vie du calcaire, dans les conditions envisagées dans cette étude.

➤ Perspectives

Le réseau bayésien pourrait être affiné en :

- calculant les probabilités liées au climat en raisonnant à partir de surfaces plutôt qu'à partir du nombre de départements ;
- réalisant d'autres essais de cycles annuels d'altération accélérés sur d'autres calcaires oolithiques ;
- définissant une valeur intermédiaire pour le nombre de jours d'altération pour nuancer les probabilités obtenues.

Bibliographie

- Aguirre-Puente J., Bernard J. J. « Comportement au gel des matériaux de construction ». In : Le comportement thermique des matériaux dans la construction. Paris, 1978. p. 29-72.
- Allison R. J. « A non-destructive method of determining rock strength ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 1988. Vol. 13.
- André M.-F., Etienne S., Mercier D., Vautier F., Voltaire O. « Assessment of sandstone deterioration at Ta Keo temple (Angkor): first results and future prospects ». *Environmental Geology*. 2008. Vol. 56, n°3-4, p. 677-688.
- Angeli M. Multiscale study of stone decay by salt crystallization in porous networks. Cergy : Université de Cergy-Pontoise, 2007. 239 p.
- Backers T. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock Under Mode I and Mode II Loading. PhD Thesis. Potsdam : Institut für Geowissenschaften, 2004. 138 p.
- Besnard K. Evolution physico-chimique des matériaux carbonatés en milieu triphasique. Paris : Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 2000.
- Bessac J.-C. « Les carrières du Bois des Lens (Gard) ». *Gallia*. 2002. p. 29-51.
- Blachere J. R. « Le gel de l'eau dans les matériaux poreux ». In : 6th Congr. Int. F.F.E.N. Le Havre : Aguirre-Puente, 1979. p. 295-303.
- Bost M. Altération par le gel des massifs rocheux: étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008. 281 p.
- Bourbié T., Coussy O., Zinszner B. Acoustique des milieux poreux. Paris : Technip, 1986. 339 p.
- Bousquie P. Texture et porosité de roches calcaires. Thèse. Paris : Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1979. 191 p.
- Bouvard J.-L. Modélisation de la propagation de fissure dans les aubes de turbines monocristallines. Thèse. Paris : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2006. 306 p.
- Çengel Y. A., Boles M. A., Lacroix M. Thermodynamique: Une approche pragmatique. 6e éd. Montréal : Mc Graw Hill, 2009. 784 p. ISBN : 9782804101251.
- Chahal R. S., Miller R. D. « Supercooling of water in glass capillaries ». *British Journal of Applied Physics*. 1965. Vol. 16, n°2, p. 231-239.
- Charmoille A. Etude du karst profond de la vallée du Doubs. Besançon : DIREN Franche-Comté, 2002.
- Christaras B., Auger F., Mosse E. « Determination of the moduli of elasticity of rocks, comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods ». *Materials and Structures*. 1994. Vol. 27, p. 222-228.

- Coque R. Géomorphologie. 5e éd. Paris : Armand Colin collection U, 1993. 503 p.
- Coque R. Relief karstique. Encyclopedia Universalis. 2008.
- Cornuéjols A. Introduction aux Réseaux Bayésiens. 2002.
- Couvreur J. E., Vervoort A., King M. S., Lousberg E., Thimus J. E. « Successive cracking steps of a limestone highlighted by ultrasonic wave propagation ». GEOPHYSICAL PROSPECTING. Janvier 2001. Vol. 49, n°1, p. 71-78.
- Dévigne J.-P. Geomicrobiologie. Encyclopaedia Universalis. 2008.
- Djebbar M. « Le système karstique hydrothermal constantinois (Algérie nord orientale): structure et fonctionnement. ». In: Proceedings of the 8th conference on limestone hydrogeology. Neuchâtel: Nico Goldscheider, Jacques Mudry, Ludovic Savoy & Francois Zwahlen, 2006. p. 105-108.
- Dorange G., Marchand A., Le Guyader M. « Produit de solubilité de la calcite et constantes de dissociation de CaHCO_3^+ et CaCO_3 entre 5 et 75 °C ». Revue des Sciences de l'Eau. 1990. Vol. 3, n°3, p. 261-275.
- Dubé I. De mm à cm ... Etude des rapports neige/eau liquide au Québec. SMC - Région du Québec : BSME Rimouski, 2003.
- Durand-Dastès F. Climatologie. Encyclopaedia Universalis. 2008. p. 10.
- Encyclopedia Britannica. Karst [En ligne]. Encyclopedia Britannica. 2009. < <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/312718/karst> >
- Everett D. H. « Thermodynamics of frost damage to porous solid ». Trans. Faraday Soc. 1961. Vol. 57, p. 1541-1551.
- Fagerlund G. « Degré critique de saturation un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction ». Materials and Structures. 1971. Vol. 4, n°5, p. 271-285.
- Fagerlund G. « Studies of the destruction mechanism at freezing of porous materials ». In: Proceedings. 6th International Congress of The Fondation Francaise d'Etudes Nordiques. Le Havre: 1979. p. 167-196.
- Flori J.-P. Analyse statistique pour la France du risque de gel sur une pierre calcaire saturée en eau. Nantes : Centre Scientifique & Technique du Bâtiment, 1989.
- Fort P. « Propriétés et caractéristiques de l'air humide ». In : Techniques de climatisation et de conditionnement de l'air humide [En ligne]. Web : Pascal Fort, 2011. < <http://www.dimclim.fr/> > (consulté le 17 mars 2011)
- Foucault A., Raoult J. P. Dictionnaire de géologie. 6e éd. Paris : Dunod, 2005. 382 p.
- Frade G. Fatigue [En ligne]. Encyclopaedia Universalis. 2008. < www.universalis-edu.com >
- Frayssines M. « Analyses en retour d'éboulements rocheux dans les falaises calcaires ». In : XXIIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil. AUGC. Nancy, France : 2005. p. 8.

Frayssines M. Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux. Thèse. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2005. 224 p.

Gérôme-Kupper M. Les vitesses d'érosion du calcaire. Etude de processus actuels sous différents climats. Thèse. Liège : Université de Liège, 1980. 239 p.

Ghabezloo S., Sulem J., Saint-Marc J. « Evaluation of a permeability-porosity relationship in a low-permeability creeping material using a single transient test ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009. Vol. 46, n°4, p. 761-768.

GIEC/IPCC. Bilan 2007 des changements climatiques: rapport de synthèse. France : République Française, 2007.

Goudie A. S., Allison R. J., McLaren S. J. « The relations between modulus of elasticity and temperature in the contact of the experimental simulation of rock weathering by fire ». *Earth Surface Processes and Landforms*. 1992. Vol. 17, p. 605-615.

Grange S. Expérimentation et modélisation de l'endommagement sous chargements dynamiques de deux roches calcaires. Thèse. Cachan : Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007. 170 p.

Griggs D. T. « The factor of fatigue in rock exfoliation ». *Journal of Geology*. 1936. Vol. 44, p. 783-796.

Guéguen Y., Palciauskas V. Introduction à la physique des roches. : Hermann, 1992. 299 p.

Hall K., Arocena J. M., Boelhouwers J., Liping Z. « The influence of aspect on the biological weathering of granites: observations from the Kunlun Mountains, China ». *Geomorphology*. 1 avril 2005. Vol. 67, n°1-2, p. 171-188.

Hamdi E., Du Mouza J. « A methodology for rock mass characterisation and classification to improve blast results ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Février 2005. Vol. 42, n°2, p. 177-194.

Hames V., Lautridou J.-P., Ozer A., Pissart A. « Variations dilatométriques de roches soumises à des cycles « humidification-séchage » ». *Géographie physique et Quaternaire*. 1987. Vol. XLI, n°3, p. 345-354.

Handbook of chemistry and physics. 90e éd.: Taylor and Francis Group, 2009.

Hantz D., Dussauge-Peissier C., Jeannin M., Vengeon J.-M. « Rock fall hazard assessment: from qualitative to quantitative failure probability ». In: *Fast Slope Movements. Int. Conf. on Fast Slope Movements, Prediction and Prevention for Risk Mitigation*. Naples, Italie: 2003. p. 263-267.

Hirschwald J. Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. Berlin : Borntraeger, 1912.

Homand F., Duffaut P. Manuel de mécanique des roches. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. Paris : Comité Français de Mécanique des Roches, 2000. 265 p. (Tome 1 Fondements). ISBN: 2-911762-23-1.

Horoi V. L'influence de la géologie sur la karstification. Etude comparative entre le massif d'Obarsia Closani - Piatra Mare (Roumanie) et le massif d'Arbas (France). Thèse. Toulouse : Université de Toulouse III, 2001. 165 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change. « Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». In: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 [En ligne]. Cambridge, UK and New York, USA : Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L., 2007. < http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html >

International Society for Rock Mechanics-Commission on Testing Methods. « Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched brazilian disc (CCNBD) specimens ». International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. 1995. Vol. 32, n°1, p. 57-64.

IPGP. Climat et surfaces continentales. 2008, a.

IPGP. Géophysique de l'Environnement. 2008, b.

Ishikawa M., Kurashige Y., Hirakawa K. « Analysis of crack movements observed in an alpine bedrock cliff ». Earth Surface Processes and Landforms. 2004. Vol. 28, p. 883-891.

Iskandar A. Caractérisation de l'espace poreux de roches sédimentaires par l'étude d'équilibres capillaires. Thèse. Paris : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990. 240 p.

Katz A. J., Thompson A. H. « Prediction of Rock Electrical Conductivity From Mercury Injection Measurements ». J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92, n°B1, p. 599-607.

Katz A. J., Thompson A. H. « Quantitative prediction of permeability in porous rock ». Physical Review. 1986. Vol. 34, n°7, p. 8179-8181.

Klimis N. Etude en laboratoire de l'atténuation des ondes longitudinales: application à la caractérisation géotechnique des roches. Thèse. Paris : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1987. 196 p.

Klimis N., Durville J.-L., Ehrlich J. « Influence de la taille des grains et de l'altération des roches sur les mesures de l'atténuation des ondes ultrasonores ». Revue Française de Géotechnique. 1989. Vol. 47, p. 29-38.

Lemaignan C. La rupture des matériaux. : EDP Sciences, 2003. 142 p. ISBN : 9782868836427.

Letavernier G. La gélivité des roches calcaires. Relations avec la morphologie du milieu poreux. Thèse. Caen : Université de Caen, 1984. 181 p.

Longton R. E. The biology of polar bryophytes and lichens. Cambridge : Cambridge University Press, 1988. 391 p.

Mamillan, Cuendet. Etude du comportement au gel d'une pierre tendre de 0,15 cm (Vassens) soumise à une pluie artificielle sur 1 face. Saint-Rémy-Lès-Chevreuses : Centre d'Etude du Bâtiment et des Travaux Publics - Service Central Matériaux, 1988. (Recherche effectuée en

coopération entre le CSTB (station climatique de Nantes) et le CEBTP (service de recherche sur les matériaux)).

Mari J.-L., Glangeaud F., Coppens F. Traitement du signal pour géologues et géophysiciens. TECHNIP.: 2001. ISBN : 2710807866,9782710807865.

Massonnet C., Cescotto S. Mécanique des matériaux [En ligne]. 3e éd.: De Boeck Université, 1994. 408 p. ISBN : 9782804120214.

Matsuoka N. « Direct observation of frost wedging in alpine bedrock ». Earth Surface Processes and Landforms. 2001, Vol. 26, p. 601-6014.

Matsuoka Norikazu, Sakai H. « Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods ». Geomorphology. Juillet 1999, Vol. 28, n°3-4, p. 309-328.

Merrill G. P. « Desintegration of granitic rocks of the District of Columbia ». Bulletin of Geological Society of America. 1895, Vol. 6, p. 321-332.

Météo France. « Humidité relative ». In : Comprendre la météo. Web : Météo France, 2011.

Météo France. Bulletins météorologiques [En ligne]. Web : Météo France, 2009a. < www.meteofrance.com >

Météo France. La mesure de la hauteur des précipitations. Web : Météo France, 2009b. (Les mesures).

Météo France. Quels climats futurs? [En ligne]. 2007, < <http://climat.meteofrance.com> >

Miserez J.-J. Géochimie des eaux du karst jurassien (Contribution physico-chimique à l'étude des altérations). Thèse. Neuchâtel : Université de Neuchâtel, 1973. 319 p.

Moreau M. R. Essais et moyens d'essais au laboratoire et dans l'industrie. Technique et documentation Lavoisier.: 1982. 730 p.

NF B10-504. Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure du coefficient d'absorption d'eau. août 1973.

NF B10-601. Produit de carrières - Pierres naturelles - Prescription générale d'emploi des pierres naturelles. 2006.

NF EN 12371. Méthodes d'essai pour pierres naturelles - détermination de la résistance au gel des éléments en pierre naturelle. 2010.

NF EN 14579. Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la vitesse de propagation du son. 2005.

NF EN 1936. Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale. mai 2007.

NF ISO 5725-1. Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure Partie 1: Principes généraux et définitions. 1994.

NF P 94-420. Roches - Détermination de la résistance en compression uniaxiale. 2000.

NF P94-425. Roches - Détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson. avril 2002.

Nguyen N. B. Modélisation micromécanique des roches poreuses. Application aux calcaires oolithiques. Thèse. Nancy, France : Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010. 198 p.

Noetzi J., Gruber S. « Alpiner Permafrost - ein Überblick ». In : Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt. München : Lintzmeyer, K., 2005. p. 111-121.

Noiriel C. Contribution à la détermination expérimentale et à la modélisation des différents processus contrôlant l'évolution géochimique, structurale et hydrodynamique des roches fissurées carbonatées. Paris : Ecole des Mines de Paris, 2005. 341 p.

Panet M. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil. : 1976. 235 p. (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

Parent E., Bernier J. Le raisonnement bayésien Modélisation et inférence. France : Springer-Verlag, 2007. 364 p. ISBN : 978-2-287-33906-6.

Parent O., Eustache J. Les réseaux Bayésiens. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1, 2007. (Master 2 Recherche Connaissance et Raisonnement).

Paris P. C., Gomez R. E., Anderson W. E. « A rational analytic theory of fatigue ». *Trend Eng.* 1961. Vol. 13, n°1, p. 9-14.

Parriaux A. Géologie: bases pour l'ingénieur. 1er éd. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2006. 516 p. ISBN : 2-88074-555-1.

Perrier R. « La résonance longitudinale des roches ». In : Mines et Carrières. 1996. p. 67-73.

Pissart A., Lautridou J.-P. « Variations de longueur de cylindres en pierre de Caen (calcaire bathonien) sous l'effet de séchage et d'humidification ». In: *Zeitschrift für Geomorphologie Neues Folge*. Berlin - Stuttgart: 1983. p. 111-116.

Plummer L. N., Busenberg E. « The solubilities of calcite, aragonite and vaterite in CO₂-H₂O solutions between 0 and 90°C, and an evaluation of the aqueous model for the system CaCO₃-CO₂-H₂O ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1982. Vol. 46, n°6, p. 1011-1040.

Potyondy D. O., Cundall P. A. « A bonded-particle model for rock ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. décembre 2004. Vol. 41, n°8, p. 1329-1364.

Powers T. C. « The air requirement of frost-resistant concrete ». *Proc. Highway Rese. Board*. 1949. Vol. 32, p. 184-211.

Prick A. « Critical Degree of Saturation as a Threshold Moisture Level in Frost Weathering of Limestones ». *Permafrost and Periglacial Processes*. 1997. Vol. 8, n°1, p. 91-99.

Prick A. Etude de la cryoclastie et de l'haloclastie par méthode dilatométrique. Thèse. Liège : Université de Liège, 1996. 311 p.

Rauch H. W., White W. B. « Dissolution kinetics of carbonates rocks. 1. Effects of lithology on dissolution rate ». *Water Resources Research*. 1977. Vol. 13, n°2, p. 381-394.

Remy J.-M. Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace. Application à la durabilité au gel des roches calcaires de Lorraine. Thèse. Nancy : Institut National Polytechnique de Lorraine, 1993. 355 p.

Remy J.-M., Bellanger M., Homand-Etienne F. « Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles ». *Geophysics*. février 1994. Vol. 59, n°2, p. 245-251.

Robert R. Analytical characterization of porous geomaterials. Reference assessment in some sedimentary rocks. PhD Thesis. Berlin : Hulboldt-Universität, 2004. 249 p.

Roques H., Ek C. « Etude expérimentale de la dissolution de calcaires par une eau chargée en CO₂ ». *Annales Spéléologie*. 1973. Vol. 28, n°4, p. 549-563.

Saad A., Bost M. « The resonant frequency measurement and cracking evolution in rocks ». In: *Proceedings of EUROCK2009. European Rock Mechanics Symposium*. Dubrovnik (Croatia): CRC Press/Balkema, 2009. p. 345-350. ISBN: 978-0-415-80481-3.

Saad A., Bost M., Martineau F. « Failure scenario estimated by a non-destructive method ». In: *Proceedings of EUROCK2010. European Rock Mechanics Symposium*. Lausanne, Switzerland: CRC Press/Balkema, 2010. p. 4.

Saad A., Guedon S., Bost M., Mertz J.-D., Martineau F. « Comparaison en laboratoire de l'altération par gélivation et par dissolution d'une roche calcaire ». In : *Actes JNGG2010. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur*. Grenoble, France: Grenoble INP, 2010. p. 891-898.

Saad A., Guédon S., Martineau F. « Microstructural weathering of sedimentary rocks by freeze-thaw cycles: Experimental study of state and transfer parameters ». *Comptes Rendus Geoscience*. Mars 2010. Vol. 342, n°3, p. 197-203.

Salomon J.-N. Précis de Karstologie. 2e éd. Pessac : Presses Universitaires de Bordeaux, 2006. 285 p. ISBN : 2-86781-411-1.

Salomon J.-N., Pulina M. Les karsts des régions climatiques extrêmes. Presses Universitaires de Bordeaux., 2005. 222 p. ISBN : 2867813808, 9782867813801.

Smith S. W. *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Hard Cover., 1997. ISBN : 0-9660176-3-3.

Société Suisse de Géomorphologie. Géomorphologie de la montagne [En ligne]. juillet 2007. < <http://www.unifr.ch/geoscience/geographie/cryo/ssgmfiches/> >

Talour B. « Un karst d'altitude dans le massif de la Vanoise ». *Revue de géographie alpine*. 1978. Vol. 66, n°2, p. 201-207.

Terray L., Braconnot P. Livre Blanc ESCRIME. Etude des scénarios climatiques. : CERFACS & IPSL/LSCE, 2007. 70 p.

- Thomachot C. Modifications des propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts « d'encroûtements noirs vernissés ». Strasbourg: Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2002. 346 p.
- Thomas W. N. « Experiments on the freezing of certain buildings materials ». Building Research. 1938. Vol. Technical Paper, n°17.
- Tourenq C. La gélivité des roches. Paris: LCPC, 1970.
- Tourenq C., Fourmaintraux D., Denis A. « Propagation des ondes et discontinuités des roches ». In: Proceedings Symposium ISRM. Rock fracture. Nancy, France: ISRM, 1971. p. I-1.
- Turner E. « Report on a lecture on the chemistry of geology ». London and Edimburgh Philosophical magazine, Journal of Science. 1833. Vol. 3, n°21.
- Vanara N. Le karst des Arbailles (Pyrénées occidentales, France). Contrôles tectonique, climatique, hydrogéologique et anthropique de la morphogénèse. Thèse. Bordeaux : Université Michel de Montaigne - Bordeaux 3, 1998.
- Vicol T. Problèmes posés par un calcaire hétérogène dans l'étude de la stabilité d'une carrière souterraine. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1987. (D.E.A de Mécanique Appliquée à la Construction, Option Génie Civil et Industriel).
- Wang Q. Z. « Formula for calculating the critical stress intensity factor in rock fracture toughness tests using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens ». International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Septembre 2010. Vol. 47, n°6, p. 1006-1011.
- Washburn E. « Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material ». Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1921. Vol. 7, p. 115-116.
- Weibull W. A Statistical Theory of the Strength of Materials. : Roy. Swed. Inst. Eng. Res., 1939.
- Wierzchos J., De Los Rios A., Sancho L. G., Green A., Ascaso C. « The integrated microscopical study of Antarctic endolithic microorganisms and their microhabitats ». In: Antarctic Biology in a Global Context. Leiden : Huiskes, A.H.L., Gieskes, W.W.C., Rozema, J., Schorno, R.M.L., van der Vries, S.M., Wolff, W.J., 2003. p. 152-156.
- Yale D. P. Network modelling of flow, storage and deformation in porous rocks. : Stanford University, 1984. 177 p.

ANNEXES

Annexe 1. Résultats des essais de faisabilité

Dissolution

	Chamesson	Pierre de Lens
Etat initial		
Fréquence de résonance (Hz)	24112	24187
Perméabilité (m ²)	5,8E-18	2,2E-16
Porosité à l'eau (%)	17,8	14,4
pH solution (-)	3,1	2,9
Dissolution		
Temps de percolation (heures)	287	84
Fréquence de résonance (Hz)	24023	23828
Perméabilité (m ²)	3,3E-18	2,1E-16
Porosité à l'eau (%)	18,0	14,5
pH solution (-)	7,8	7,9

Gélivation

	Chamesson	Pierre de Lens
Etat initial		
Fréquence de résonance (Hz)	21750	21637
Perméabilité (m ²)	1,2E-16	2,3E-16
Porosité à l'eau (%)	17,4	13,5
Gélivation		
Fréquence de résonance (Hz)	18412	19575
Perméabilité (m ²)	1,4E-16	2,6E-16
Porosité à l'eau (%)	17,6	13,6

Etapes successives

	Chamesson				Pierre de Lens			
	Etat initial				Etat initial			
Fréquence de résonance (Hz)	23877	24512	24756	24121	22949	23096	23486	22900
Perméabilité (m ²)	7,7E-17	5,9E-17	6,3E-17	7,0E-17	4,9E-16	5,3E-16	6,4E-16	5,7E-16
Porosité à l'eau (%)	17,1	15,6	15,5	15,9	15,8	16,0	16,4	16,0
	Etapes successives				Etapes successives			
	Fissuration (65%Rc)	Gel-dégel 1	Dissolution	Gel-dégel 2	Fissuration (65%Rc)	Gel-dégel 1	Dissolution	Gel-dégel 2
Fréquence de résonance (Hz)	23193	23877	18555	17188	22021	21387	3467	20019
Perméabilité (m ²)	7,9E-17	5,3E-17	n.d.	n.d.	4,6E-16	4,7E-16	n.d.	n.d.
Porosité à l'eau (%)	16,5	14,1	15,5	15,7	15,2	15,3	16,8	15,9

**Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à
chaque cycle annuel d'altération accéléré**

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse du son	Indice de continuité	Fréquence de résonance	Porosité	Porosité de pores	Porosité de fissures	Perméabilité	Résistance en compression	
		mm	mm	m/s	%	Hz	%	%	%	m ²	sec	sat
				sec		sec	eau	eau	eau	sat	sec	sat
869-96	initial	80,37	40,05	3883	61	23925	17,55	17,04	0,51	1,3E-16		
	Cycle 1	80,40	40,02	3407	54	17188	17,67	16,80	0,87	1,3E-16	65,3	
869-78	initial	80,39	40,03	3921	62	24512	17,10	16,58	0,52	1,1E-16		
	Cycle 1	80,36	40,04	3494	55	18945	17,17	16,32	0,85	1,0E-16	70,0	
869-90	initial	80,78	40,06	3847	61	23779	17,72	17,19	0,53	1,3E-16		
	Cycle 1	80,78	40,05	3706	59	20605	17,71	17,07	0,64	1,5E-16		
869-95	initial	80,27	40,05	3859	61	23828	17,84	17,33	0,51	1,4E-16		
	Cycle 1	80,24	40,05	3582	57	20215	17,83	17,10	0,73	1,6E-16	68,5	
980-92	initial	80,09	40,01	4283	68	25098	13,97	13,49	0,48	2,8E-16		
	Cycle 1	80,05	39,98	3905	62	22510	13,82	13,03	0,79	2,2E-16	59,9	
980-66	initial	80,03	39,98	4022	64	23975	14,22	13,56	0,67	3,0E-16		
	Cycle 1	80,02	39,97	3866	61	22021	14,27	13,49	0,78	2,2E-16		
980-55	initial	80,50	39,99	4351	69	25537	13,09	12,59	0,50	2,0E-16		
	Cycle 1	80,47	40,00	4191	66	23877	12,83	12,18	0,65	1,4E-16	70,4	
980-49	initial	79,94	40,04	4275	68	25781	13,22	12,67	0,55	2,1E-16		
	Cycle 1	79,92	40,03	4184	66	24316	13,03	12,40	0,63	1,8E-16	69,7	
911-2B	initial	80,44	39,94	4279	68	24609	10,39	9,62	0,77			
	Cycle 1	80,49	39,94	2665	42	17432	10,46	8,44	2,01	1,3E-16		
911-2D	initial	80,45	39,94	4105	65	24463	10,84	9,97	0,87			
	Cycle 1	80,46	39,93	2894	46	17285	10,81	9,01	1,81	1,3E-16		
911-2L	initial	79,95	39,93	4393	70	25293	9,42	8,67	0,76			
	Cycle 1	79,97	39,95	2666	42	16650	9,54	7,46	2,09	9,8E-17		
911-3B	initial	80,08	39,92	3379	53	20703	11,54	10,16	1,38			
	Cycle 1	80,12	40,01	2108	33	12207	12,00	9,67	2,33	7,4E-16		
911-3K	initial	80,05	39,96	3450	55	20752	11,01	9,65	1,36			
	Cycle 1	80,01	39,95	2260	36	13818	10,94	8,64	2,29	4,3E-16		
911-5A	initial	80,12	39,91	3468	55	20508	12,55	11,32	1,23			
	Cycle 1	80,13	39,9	2257	36	14355	12,55	10,38	2,17	2,9E-16		
911-5G	initial	80,16	39,95	3579	57	21680	12,74	11,61	1,13			
	Cycle 1	80,22	39,96	2180	34	14258	12,86	10,65	2,20	2,3E-16		
911-5Q	initial	80,34	39,9	3448	55	20264	12,64	11,41	1,24			
	Cycle 1	80,41	39,93	2358	37	14600	12,87	10,80	2,06	2,7E-16		

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse du son	Indice de continuité	Fréquence de résonance	Porosité	Porosité de pores	Porosité de fissures	Perméabilité	Résistance en compression	
		mm	mm	m/s	%	Hz	%	%	%	m ²	sec	sat
869-84	initial	80,60	40,03	3875	61	24463	16,60	16,01	0,59	9,0E-17		
	Cycle 2	80,96	39,97	2912	46	10498	17,39	16,12	1,28	1,1E-16	57,2	
869-73	initial	81,15	40,05	3883	61	24072	17,36	16,83	0,53	1,2E-16		
	Cycle 2	81,57	40,08	2832	45	10107	17,82	16,51	1,31	1,6E-16	57,8	
869-55	initial	81,31	40,08	3872	61	23193	17,93	17,43	0,49	1,4E-16		
	Cycle 2	81,64	40,14	2990	47	12256	18,14	16,98	1,16	1,9E-16	60,5	
869-53	initial	80,64	40,06	3915	62	23291	17,79	17,32	0,47	1,4E-16		
	Cycle 2	81,14	40,03	2626	42	10693	18,31	16,88	1,43	1,6E-16		
869-64	initial	80,64	40,05	3877	61	23437	17,50	16,98	0,52	1,2E-16		
	Cycle 3	81,14	40,43	2102	33	7177	18,21	16,37	1,84	1,9E-16		
869-76	initial	80,32	40,05	3918	62	24365	16,99	16,46	0,53	1,0E-16		
	Cycle 3	80,70	40,14	1917	30	6006	17,93	15,92	2,01	2,1E-16	36,2	
869-77	initial	80,89	40,03	3870	61	23730	17,45	16,91	0,53	1,2E-16		
	Cycle 3	81,24	40,20	2214	35	5615	18,39	16,64	1,74	2,9E-16	49,4	
869-79	initial	81,13	40,07	3882	61	22021	17,65	17,15	0,51	1,3E-16		
	Cycle 3	81,48	40,26	2362	37	5762	18,39	16,77	1,63	2,6E-16		
980-63	initial	80,31	40,04	4097	65	24268	13,90	13,27	0,63			
	Cycle 3				0	0		-4,90	4,90			
980-83	initial	79,81	39,97	4114	65	24268	15,05	14,52	0,53	4,0E-16		
	Cycle 3	79,87	39,97	3260	52	0	15,43	14,26	1,16	3,3E-16		
980-84	initial	79,82	40,01	4179	66	24756	14,07	13,51	0,56	2,9E-16		
	Cycle 3	79,92	40,01	3184	50	0	14,36	13,06	1,31	2,3E-16	52,2	
980-53	initial	80,50	40,01	4215	67	25000	13,28	12,69	0,59	2,2E-16		
	Cycle 3	80,54	40,01	3356	53	17773	13,44	12,20	1,24	1,6E-16	44,8	

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse	Indice de	Fréquence de	Porosité	Porosité	Porosité de	Perméabilité	Résistance en	
				du son							continuité	résonance
		mm	mm	m/s	%	Hz	%	%	%	m ²	MPa	MPa
				sec		sec	eau	eau	eau	sat	sec	sat
869-56	initial	81,40	40,08	3913	62	23242	17,66	17,18	0,48	1,3E-16		
	Cycle 4	81,93	40,09	2074	33	5859	18,82	17,00	1,82	3,0E-16		
869-60	initial	81,32	40,04	3929	62	23486	17,28	16,78	0,50	1,1E-16		
	Cycle 4	81,86	40,13	1852	29	4688	17,95	15,90	2,06	3,0E-16	50,7	
869-101	initial	80,40	40,03	3884	61	23584	16,90	16,34	0,56	1,0E-16		
	Cycle 4	80,95	40,06	1989	31	4883	18,16	16,23	1,93	1,9E-16		33,0
869-107	initial	80,72	40,02	3918	62	23877	15,41	14,76	0,65	6,0E-17		
	D4G4	81,44	40,10	2051	32	4980	16,65	14,65	2,00	1,8E-16		
911-2C	initial	80,05	39,96	4148	66	23877	11,38	10,59	0,79			
	Cycle 4	80,48	40,02	1684	27	4248	12,15	9,51	2,64			
911-2G	initial	80,34	39,95	4251	67	23877	11,18	10,45	0,73			
	Cycle 4	80,91	40,04	1794	28	3760	12,68	10,16	2,52			
911-2I	initial	80	39,95	4324	68	25391	10,29	9,55	0,74			
	Cycle 4	80,72	40,06	1506	24	3613	11,88	9,08	2,80			
911-3E	initial	80,48	39,94	3272	52	19287	11,12	9,63	1,49			
	Cycle 4	81,17	40,12	1168	18	4053	12,72	9,73	3,00			
911-3G	initial	80,45	39,96	3380	53	19580	10,76	9,32	1,44			
	Cycle 4	81,24	40,13	1202	19	4248	12,40	9,41	3,00			
911-5E	initial	80,12	39,92	3561	56	21143	12,47	11,31	1,16			
	Cycle 4	80,69	40,09	1570	25	4102	13,94	11,34	2,59			
911-5F	initial	80,13	39,92	3626	57	21680	12,25	11,12	1,13			
	Cycle 4	80,74	40,06	1523	24	4004	14,31	11,72	2,60			
911-5J	initial	80,18	39,87	3612	57	21729	12,46	11,34	1,12			
	Cycle 4	80,76	39,94	1676	27	3711	13,46	10,91	2,55			

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse du son	Indice de continuité	Fréquence de résonance	Porosité	Porosité de pores	Porosité de fissures	Perméabilité	Résistance en compression	
		mm	mm	m/s	%	Hz	%	%	%	m ²	MPa	MPa
				sec		sec	eau	eau	eau	sat	sec	sat
869-66	initial	80,74	40,02	3900	62	24121	17,02	16,48	0,54	1,0E-16		
	Cycle 5	81,39	40,34	2025	32	5176	17,95	16,02	1,92	2,9E-16	43,8	
869-70	initial	80,31	40,05	3880	61	23828	17,77	17,27	0,50	1,4E-16		
	Cycle 5	80,84	40,14	2179	34	5957	18,87	17,13	1,73	4,3E-16		
869-97	initial	80,82	40,03	3923	62	23877	17,38	16,89	0,50	1,2E-16		
	Cycle 5	81,41	40,09	2051	32	4834	18,55	16,69	1,86	2,9E-16		
869-100	initial	80,80	40,05	3885	61	23926	17,27	16,74	0,53	1,1E-16		
	Cycle 5	81,32	40,16	1900	30	5859	18,53	16,56	1,97	3,5E-16		32,1
980-62	initial	80,31	40,01	3861	61	23096	15,62	14,94	0,68	4,9E-16		
	Cycle 5	80,47	40,02	2874	45	781	16,12	14,71	1,41	4,6E-16		
980-65	initial	80,05	40,01	3963	63	24902	13,37	12,59	0,78	2,2E-16		
	Cycle 5	80,14	40,03	3193	51	1270	13,63	12,28	1,36	1,7E-16	54,2	
980-68	initial	80,19	40,02	4010	63	24219	13,59	12,87	0,73	2,4E-16		
	Cycle 5	80,31	40,03	3089	49	635	13,71	12,28	1,43	1,8E-16		
980-75	initial	79,59	40,02	4020	64	23730	13,92	13,23	0,69	2,7E-16		
	Cycle 5	79,78	40,02	2922	46	586	17,26	15,98	1,28	2,2E-16		36,6
869-65	initial	80,67	40,06	3897	62	23828	17,64	17,15	0,50	1,3E-16		
	Cycle 6	81,32	40,15	1684	27	4346	18,94	16,83	2,11	3,4E-16		28,2
869-75	initial	80,21	40,04	3856	61	23975	17,33	16,78	0,55	1,2E-16		
	Cycle 6	80,75	40,35	1856	29	4980	18,36	16,34	2,02	3,6E-16		
869-94	initial	80,28	40,08	3897	62	23486	17,11	16,57	0,54	1,1E-16		
	Cycle 6	80,88	40,38	1661	26	4883	18,51	16,35	2,16	4,1E-16	39,9	
869-102	initial	80,36	40,03	3845	61	23682	17,14	16,56	0,58	1,1E-16		
	Cycle 6	80,80	40,26	1966	31	5420	18,04	16,08	1,96	2,8E-16		

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse	Indice de	Fréquence de	Porosité	Porosité	Porosité de	Perméabilité	Résistance en					
				du son							continuité	résonance	de pores	fissures	compression	
				m/s							%	Hz	%	%	%	m ²
		mm	mm	sec		sec	eau	eau	eau	sat	sec	sat				
869-81	initial	80,85	40,04	3850	61	23779	17,24	16,68	0,56	1,1E-16						
	Cycle 7	81,64	40,36	1555	25	1660	18,79	16,57	2,22	4,1E-16						
869-88	initial	80,55	40,06	3910	62	24121	16,37	15,79	0,59	8,3E-17						
	Cycle 7	81,50	40,33	1285	20	2979	18,45	15,99	2,46	5,8E-16	39,4					
869-92	initial	80,73	40,08	3900	62	23877	17,50	16,99	0,50	1,2E-16						
	Cycle 7	81,47	40,19	1639	26	5078	19,11	16,98	2,13	5,1E-16		31,9				
869-93	initial	80,34	40,03	3919	62	24707	16,93	16,40	0,53	1,0E-16						
	Cycle 7	81,20	40,16	1381	22	2295	18,69	16,32	2,37	4,6E-16						
980-54	initial	80,50	40,12	4086	65	24170	13,48	12,81	0,68	2,3E-16						
	Cycle 7	80,74	40,14	2853	45	12256	14,14	12,56	1,58	2,6E-16		33,0				
980-58	initial	79,69	39,98	3985	63	23535	15,27	14,66	0,61	4,4E-16						
	Cycle 7	79,98	40,15	2908	46	4150	15,62	14,20	1,42	4,4E-16	45,1					
980-61	initial	80,29	40,01	3842	61	23633	15,20	14,47	0,73	4,2E-16						
	Cycle 7	80,50	40,12	2747	43	0	15,47	13,91	1,56	3,7E-16						
980-71	initial	80,19	40,02	4091	65	24560	13,27	12,59	0,69	2,2E-16						
	Cycle 7	80,44	40,07	2822	45	635	13,74	12,11	1,63	1,8E-16						
869-59	initial	80,74	40,04	3919	62	23926	17,66	17,18	0,48	1,3E-16						
	Cycle 8	81,60	40,28	1429	23	4736	19,26	16,98	2,28	7,1E-16						
869-82	initial	80,35	40,09	3844	61	23926	17,95	17,44	0,51	1,4E-16						
	Cycle 8	81,20	40,30	1580	25	4785	19,66	17,52	2,13	6,9E-16	25,4					
869-87	initial	80,49	40,07	3833	61	24219	17,29	16,72	0,57	1,1E-16						
	Cycle 8	81,86	40,18	1426	23	3613	19,32	17,04	2,28	4,4E-16	36,3					
869-103	initial	80,76	40,02	3864	61	23779	17,47	16,94	0,53	1,2E-16						
	Cycle 8	81,65	40,13	1493	24	4688	19,01	16,75	2,25	4,1E-16						

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse	Indice de	Fréquence de	Porosité	Porosité	Porosité de	Perméabilité	Résistance en	
				du son							continuité	résonance
		mm	mm	m/s	%	Hz	%	%	%	m ²	sec	sat
				sec		sec	eau	eau	eau	sat		
980-52	initial	80,49	40,01	3985	63	23877	13,78	13,04	0,73	2,6E-16		
	Cycle 9	80,71	40,14	2604	41	12402	14,33	12,58	1,76	3,0E-16		33,0
980-56	initial	79,71	40,01	3888	62	23193	15,45	14,77	0,67	4,6E-16		
	Cycle 9	80,06	40,20	2146	34	3076	16,10	14,13	1,97	6,0E-16	37,5	
980-59	initial	80,29	40,01	3975	63	23389	14,88	14,23	0,65	3,8E-16		
	Cycle 9	80,55	40,11	2076	33	0	15,46	13,39	2,08	5,7E-16		
980-60	initial	79,70	40,03	4428	70	26221	12,42	11,93	0,49	1,6E-16		
	Cycle 9	80,08	40,24	2901	46	13037	12,92	11,28	1,64	2,1E-16		
869-57	initial	80,61	40,03	3932	62	24316	17,17	16,67	0,51	1,1E-16		
	Cycle 10	81,76	40,09	1386	22	4541	19,02	16,68	2,34	4,1E-16		
869-68	initial	80,29	40,06	3917	62	24121	16,91	16,37	0,54	1,0E-16		
	Cycle 10	81,83	40,40	1164	18	5518	19,93	17,50	2,44	Non mesurable		
869-72	initial	80,88	40,04	3851	61	24463	17,10	16,52	0,57	1,1E-16		
	Cycle 10	82,33	40,12	1218	19	3711	19,20	16,74	2,45	4,5E-16	35,0	
869-86	initial	80,48	40,04	3907	62	23633	17,15	16,62	0,53	1,1E-16		
	Cycle 10	82,07	40,53	1080	17	4248	19,57	17,04	2,53	5,7E-16		21,3
980-57	initial	79,71	40,00	3851	61	22803	14,84	14,08	0,75	3,7E-16		
	Cycle 11	80,23	40,33	1828	29	1172	16,26	14,06	2,21	7,7E-16		
980-78	initial	79,58	40,01	4397	70	25977	13,54	13,11	0,43	2,4E-16		
	Cycle 11	79,77	40,21	2789	44	13818	14,10	12,46	1,63	3,9E-16		38,8
980-96	initial	80,60	40,06	4310	68	25195	11,17	10,49	0,68	1,0E-16		
	Cycle 11	80,81	40,15	2449	39	5420	13,76	11,84	1,92	1,7E-16	45,2	
980-101	initial	79,89	40,03	4272	68	25879	11,13	10,41	0,72	1,0E-16		
	Cycle 11	80,18	40,22	2460	39	10352	13,53	11,59	1,93	2,5E-16		

Annexe 2. Résultats des mesures sur les échantillons « sacrifiés » à chaque cycle annuel d'altération accéléré

N° éprouvette ⁱ	Etat	Longueur	Diamètre	Vitesse du son	Indice de continuité	Fréquence de résonance	Porosité	Porosité de pores	Porosité de fissures	Perméabilité	Résistance en compression							
				m/s							%	Hz	%	%	%	m ²	MPa	MPa
				sec							sec	eau	eau	eau	sat	sec	sat	
980-73	initial	80,26	40,01	4159	66	25049	13,05	12,40	0,65	2,0E-16								
	Cycle 13	80,59	40,46	2264	36	5615	14,23	12,20	2,03	2,8E-16								
980-74	initial	80,10	40,02	4087	65	25342	13,55	12,88	0,67	2,4E-16								
	Cycle 13	80,58	40,45	2283	36	5762	14,69	12,71	1,98	3,8E-16								
980-86	initial	79,85	40,03	4412	70	25976	12,19	11,67	0,52	1,5E-16								
	Cycle 13	80,12	40,37	2114	33	5127	13,53	11,33	2,20	2,8E-16	43,1							
980-95	initial	79,72	40,02	4380	69	25684	12,75	12,25	0,50	1,8E-16								
	Cycle 13	80,02	40,48	2333	37	6152	13,72	11,70	2,02	2,3E-16		32,9						
980-80	initial	80,09	40,01	4306	68	24853	13,71	13,23	0,49	2,5E-16								
	Cycle 15	80,63	40,58	2304	36	6152	15,09	13,16	1,93	4,5E-16								
980-81	initial	79,74	40,01	4406	70	26025	12,63	12,13	0,49	1,7E-16								
	Cycle 15	80,16	40,39	2166	34	5615	13,83	11,69	2,14	3,1E-16								
980-98	initial	79,93	40,00	4368	69	25195	11,61	11,00	0,60	1,2E-16								
	Cycle 15	80,27	40,43	2307	36	6445	14,13	12,12	2,00	2,8E-16	43,1							
980-100	initial	79,93	40,02	4368	69	25098	11,76	11,16	0,59	1,3E-16								
	Cycle 15	80,38	40,40	1951	31	5811	14,50	12,25	2,25	2,9E-16		28,4						
980-76	initial	80,08	40,02	4376	69	25342	13,25	12,78	0,47	2,1E-16								
	Cycle 20	80,64	40,60	2150	34	4541	14,48	12,38	2,10	3,4E-16	37,9							
980-85	initial	80,24	40,00	4291	68	25342	12,65	12,07	0,58	1,7E-16								
	Cycle 20	80,58	40,33	2342	37	4834	13,90	11,91	1,99	2,6E-16								
980-91	initial	80,54	40,01	4307	68	24902	12,66	12,09	0,57	1,7E-16								
	Cycle 20	80,93	40,43	2033	32	6592	14,22	12,01	2,21	2,2E-16								
980-97	initial	79,91	40,01	4319	68	25586	11,77	11,15	0,63	1,3E-16								
	Cycle 20	80,38	40,46	2371	38	5859	14,38	12,44	1,94	3,3E-16		29,2						

ⁱ 869 = Calcaire de Chamesson ; 980 = Pierre de Lens ; 911-2 = Calcaire de Vilhonneur faciès MG ; 911-3 = Calcaire de Vilhonneur faciès G ; 911-5 = calcaire de Vilhonneur

Annexe 3. Résultats des mesures de fréquence de résonance à chaque cycle

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Etat initial	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
869-53	23291	21582	20068					
869-55	23193	21680	19434					
869-56	23242	21484	19189	6006	7129			
869-57	24316	22607	20166	17676	4590	7227	5322	3613
869-58	23877	22217	20459	16309	11084	7031	4395	4297
869-59	23926	22266	20557	13379	7178	4688	6689	5078
869-60	23486	21875	19629	12744	6934			
869-61	23291	21680	21045	13672	11279	7178	2734	6494
869-64	23437	22070	21094	5713				
869-65	23828	22217	21973	16357	12451	4248	2881	
869-66	24121	22412	21094	6885	5078	6396		
869-68	24121	22314	20068	6738	7178	5176	4834	5176
869-70	23828	22266	21436	6787	4297	1563		
869-71	24170	22656	21191	14893	11426	5322	4053	3125
869-72	24463	22803	21436	16309	13672	6543	5078	5566
869-73	24072	22266	20605					
869-75	23975	22266	20313	13184	6885	4639	3906	
869-76	24365	22705	22363	16260				
869-77	23730	22217	21875	14941				
869-78	24512	22754						
869-79	24072	22363	20947	14355				
869-81	23779	22266	20068	6592	5469	3662	3223	3955
869-82	23926	22314	20801	14844	7031	3711	4102	3076
869-84	24463	22461	21631					
869-86	23633	22363	21484	16309	6250	6055	4883	2686
869-87	24219	22754	21338	17480	16357	4346	3516	3027
869-88	24121	22412	20996	13965	5469	3223	3516	2490
869-89	23535	22168	19727	16260	11035	6494	2441	4395
869-90	23779	22168						
869-92	23877	22314	21094	16357	6982	5225	3711	3223
869-93	24707	22852	21484	16309	12256	6836	3662	4346
869-94	23486	22266	20410	6348	7471	4688	6104	
869-95	23828	22266						
869-96	23925	22070						
869-97	23877	22412	20947	16309	5420	7080		
869-100	23926	22217	20020	16357	11133	4492		
869-101	23584	22314	22021	6445	6006			
869-102	23682	22412	21582	17432	7227	7227	6641	
869-103	23779	22266	20703	16260	5908	2783	6104	3662
869-107	23877	22510	21973	6543	6934			

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Cycle 8	Cycle 9	Cycle 10	Cycle 11	Cycle 12	Cycle 13
869-53						
869-55						
869-56						
869-57	3369	3369	2734	928		
869-58	3223	2539	2637	2588	2832	2783
869-59	2832					
869-60						
869-61	4590	2588	3076	3223	3369	3125
869-64						
869-65						
869-66						
869-68	4541	2393	2734	2246		
869-70						
869-71	2783	2197	2637	2832	2588	2881
869-72	2490	2246	2588	2490		
869-73						
869-75						
869-76						
869-77						
869-78						
869-79						
869-81						
869-82	2490					
869-84						
869-86	2637	1758	1563	1855		
869-87	2734					
869-88						
869-89	3564	1172	977	2539	2441	0
869-90						
869-92						
869-93						
869-94						
869-95						
869-96						
869-97						
869-100						
869-101						
869-102						
869-103	3174					
869-107						

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Etat initial	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7	Cycle 8
980-49	25781	24170							
980-53	25000	22803							
980-54	24170	22217	20703	19629					
980-55	25537	23730	20605	19775	17822	16455	14404	6299	
980-63	24268	22119							
980-66	23975	22021	20557	19922					
980-71	24560	22510							
980-73	25049	23437	21191	20410	16406	0	1123	537	
980-74	25342	22998	21436	20752	19336	16455	16260	6982	5762
980-80	24853	22412	20654	19287	18506	16455	14160	6934	6543
980-83	24268	22266	20605	20117	18213	16455	15479	12451	12354
980-84	24756	22510	20557	19971					
980-85	25342	23389	20313	2393					
980-91	24902	22949	21973	21436		19092	18164	17725	17529
980-92	25098	22559	21777	21436	20996	20264	18848	16455	6055
980-96	25195	22852							
980-97	25586	23486	21484	20947	20361	19092	17432	6934	4102
980-98	25195	23340	21582	21143	18555	16406	16309	6348	4980
980-100	25098	22754	21973	20947	19678	17871	16260	15625	14551
980-101	25879	23730	20654	20068	16406	15137	13379	6201	5127
980-40	25000	24072							
980-52	23877	21924	22754	21924	21191	19287	18066	17334	16504
980-56	23193	21045	21094	20703	20215	18848	16309	14648	6836
980-57	22803	20850	20313	20068	19678	18018	16943	14648	6543
980-58	23535	21826	19922	19531	18945	16406	13037	6445	0
980-59	23389	21094	21143	20947	20557	18652	3613	4736	
980-60	26221	23926	20020	19385	16357	586	6445	6836	5566
980-61	23633	21680	22998	22314	21094	18115	16309	13623	13721
980-62	23096	21240	20898	20703	20264	14697	830	0	
980-65	24902	16406	20410	20020	19629	1660			
980-68	24219	22266	19189	6641	4980	1758			
980-72	25635	23828	21582	21387	20703	18311			
980-75	23730	21826	23193	22803	22363	21045	20410	18896	17627
980-76	25342	22852	21045	20703	20068	16406			
980-78	25977	24365	21973	21484	20801	18994	17432	16357	16260
980-79	26514	24463	23389	22852	21729	19629	17480	15283	15625
980-81	26025	23486	23730	23389	22705	20215	19189	18018	18066
980-86	25976	23828	22363	21826	20654	16455	15479	14355	14209
980-90	26074	24268	22949	22412	21582	17627	15576	6006	6738
980-95	25684	23682	23535	23193	22705	21338	20361	16602	16455

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Cycle 9	Cycle 10	Cycle 11	Cycle 12	Cycle 13	Cycle 14	Cycle 15	Cycle 16
980-49								
980-53								
980-54								
980-55								
980-63								
980-66								
980-71								
980-73								
980-74	5420	5127	4639	4541	4443			
980-80	9424	4053	5469	3564	3516			
980-83	4932	4004	6104	4639	4443	4688	3906	
980-84								
980-85								
980-91	15918	15723	13623	12793	4639	3516	4443	6006
980-92	11670	5713	5664	5957	5908	4785	4639	5273
980-96								
980-97	12451	11084	5859					
980-98	5859	6201	5908	5420	4053	6201	4736	3955
980-100	12305	11475	6250	4053	3955	4297	2979	
980-101	4297	3760	5566	5127	4639	4199	4102	
980-40								
980-52	14893	13818	12354	11719	4150	4102	6055	6494
980-56	11816							
980-57	1416							
980-58	5664	781	4883					
980-59								
980-60	4932							
980-61	12305							
980-62								
980-65								
980-68								
980-72								
980-75	14844	14258	12744	4346	3516	3564	6299	6201
980-76								
980-78	13867	13330	11182	10547	6494	4980	4639	4443
980-79	14160	12695	11914					
980-81	16406	16162	15186	12793	12256	5566	5713	5908
980-86	12646	5322	6006	6055	5225	5908	4346	
980-90	5566	4346	6055	4883	4443			
980-95	15723	14453	13184	12109	4932	4785	4639	6055

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Cycle 17	Cycle 18	Cycle 19	Cycle 20	Cycle 21	Cycle 22	Cycle 23	Cycle 24	Cycle 25
980-49									
980-53									
980-54									
980-55									
980-63									
980-66									
980-71									
980-73									
980-74									
980-80									
980-83									
980-84									
980-85									
980-91	6201	5322	5518	5176					
980-92	4590	4785	4883	3613					
980-96									
980-97									
980-98	5176	4639	4883	3906					
980-100									
980-101									
980-40									
980-52	6348	6787	5273	6250	6348	4736	5273	6299	4785
980-56									
980-57									
980-58									
980-59									
980-60									
980-61									
980-62									
980-65									
980-68									
980-72									
980-75	6104	6348	6201	6445	6348	2881	3027	3223	3027
980-76									
980-78	3809	4932	3516	3516					
980-79									
980-81	6494	6152	6445	6445	6152	4785	5029	5518	5078
980-86									
980-90									
980-95	6348	6494	4785	6201	6104	5322	5518	4639	5859

Annexe 3. Fréquence de résonance à chaque cycle annuel d'altération accéléré

Echantillon ¹	Etat initial	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6
911-2A	24365	23193	18408	17041	16455	14746	5615
911-2B	24609	23584					
911-2C	23877	22754	19385	15381	4199		
911-2D	24463	23291					
911-2E	24512	23584	18701	4248	4980	4053	3662
911-2F	24121	22949	20117	6348	5127	3223	2148
911-2G	23877	22803	18896	6543	3906		
911-2H	25537	24365	19775	6348	5615	3711	0
911-2I	25391	24268	18945	5029	4004		
911-2J	24023	22949	19336	18506	17285	16162	4834
911-2K	25439	24268	20557	4395	5273	2783	3320
911-2L	25293	24316					
911-3A	4980						
911-3B	20703	20801					
911-3C	20801						
911-3D	20068	19043	5859	5371	5029	4297	0
911-3E	19287	19678	6348	5322	3662		
911-3F	20068	19482	15771	14209	6689	5420	5859
911-3G	19580	19434	11377	4199	4932		
911-3H	19385						
911-3I	23438						
911-3J	18457						
911-3K	20752	20215					
911-3L	21631						
911-5A	20508	19678					
911-5B	21484	20947	16846	5273	4053	3174	3174
911-5C	20020	18945	17090	15527	15674	6299	4346
911-5D	21387	20703	17920	5762	5859	3906	3955
911-5E	21143	20508	16797	4346	3857		
911-5F	21680	20801	16846	6152	3320		
911-5G	21680	20850					
911-5H	21143	20557	16260	6836	5176	4004	3613
911-5I	20166	19141	18311	6396	5957	5371	3906
911-5J	21729	20898	15869	5127	2979		
911-5K	21094	20459	18555	15186	4248	4004	3906
911-5L	20361	19824	15430	4150	3857	3174	0
911-5M	20850	19922	19824	14209	4053	4053	3809
911-5N	20605	20215	16504	5566	5176	3809	3613
911-5P	19580	19141	17334	6152	4248	3174	3125
911-5Q	20264	19287					

¹ 869 = Calcaire de Chamesson ; 980 = Pierre de Lens ; 911-2 = Calcaire de Vilhonneur faciès MG ; 911-3 = Calcaire de Vilhonneur faciès G ; 911-5 = calcaire de Vilhonneur faciès NG

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

Conduite d'essais

- Mesurer (à 0,1 mm près) et peser les éprouvettes
- Mode d'excitation instantanée :
 - La mise en vibration de l'éprouvette est répétée jusqu'à ce que 3 valeurs identiques consécutives à ± 60 Hz de FDR fondamentale soient mesurées
 - Traitement du signal par transformée de Fourier

Mode opératoire

- Démarrer l'ordinateur et attendre sa mise en route complète (après avoir rentrer les mots de passe)
- Brancher le data logger (rouge) et allumer le boîtier bleu. Vérifier que le data logger est bien connecté (USB) au PC
- Placer la membrane noire autour de la base de l'éprouvette et y insérer délicatement l'accéléromètre "libre" puis placer l'éprouvette sur le socle contenant l'accéléromètre
- Dans le dossier "FDR" sur le bureau, ouvrir le logiciel associé au data logger,
 - sélectionner le numéro proposé et "select"
 - les signaux des 2 accéléromètres s'affichent, attendre qu'ils se stabilisent autour de zéro
 - cliquer sur "start"
 - cliquer sur "read USB"
 - cliquer sur "cursor" pour zoomer autour du signal qui nous intéresse
 - cliquer sur "save csv", choisir l'emplacement de sauvegarde en cliquant sur "... " et donner un nom au fichier puis cliquer sur "OK" puis sur "save csv"
- Dans le dossier "FDR" précédemment ouvert, ouvrir le fichier excel "calcul FDR" et suivre les instructions qu'il contient

Programme Excel – Visual Basic

- Ouvrir le fichier .csv, convertir les données et remplacer les "." par des "," et copier les 3 colonnes de valeurs
 - Effacer le contenu des 3 premières colonnes de cette feuille et y coller les 3 colonnes de valeurs du fichier .csv
 - Cliquer sur "Ajuster les lignes de calcul" **OU** dans "FDR+Q, FDR"
- CALCUL DE LA FREQUENCE DE RESONANCE**
- Cliquer sur "FFT CH_1" pour le signal longitudinal et sur "FFT CH_2" pour le signal transversal
 - Lire graphiquement les valeurs de la fréquence de résonance dans la feuille FFT et la reporter dans la case correspondante
- CALCUL DU FACTEUR DE QUALITE (onglet "Signal+filtre")**
- Cliquer sur "Filtre longitudinal" pour affiner le signal longitudinal et sur "Filtre transversal" pour affiner le signal transversal
 - Cliquer sur "Signal longitudinal" pour la courbe d'atténuation longitudinale et sur "Signal transversal" pour la courbe d'atténuation transversale
 - Si la courbe d'atténuation ne correspond pas, cliquer sur "2ème chance" et donner la valeur minimale à conserver
 - Lire graphiquement les valeurs de zéta*oméga (coefficient alpha de la courbe d'atténuation) dans la feuille FFT et les reporter dans les cases correspondantes

Microsoft Excel - Calcul FDR.xls

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?

F36 =F35+1/\$B\$7

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	CSV Data	0,03269sec - 0,03728sec	1. Ouvrir le fichier .csv, convertir les données et remplacer les "." par des "," et copier les 3 colonnes de valeurs									
2	DATASET	S096	2. Effacer le contenu des 3 premières colonnes de cette feuille et y coller les 3 colonnes de valeurs du fichier .csv									
3	VERSION	1	3. Cliquer sur "Ajuster les lignes de calcul" automatique									
4	SERIES	CH_1 CH_2	4. Cliquer sur "FFT CH_1" pour le signal longitudinal et sur "FFT CH_2" pour le signal transversal									
5	DATE	06-16-2010	5. Lire graphiquement les valeurs de la fréquence de résonance dans la feuille FFT et la reporter dans la case correspondante									
6	TIME	10:17:37	6. Cliquer sur "Filtre longitudinal" pour affiner le signal longitudinal et sur "Filtre transversal" pour affiner le signal transversal									
7	RATE	100000	7. Cliquer sur "Signal longitudinal" pour la courbe d'atténuation longitudinale et sur "Signal transversal" pour la courbe d'atténuation transversale									
8	VERT_UNIT	G	8. Si la courbe d'atténuation ne correspond pas, cliquer sur "2ème chance" et donner la valeur minimale à conserver									
9	HORZ_UNIT	SEC	9. Lire graphiquement les valeurs de zéta*oméga (coefficient alpha de la courbe d'atténuation) dans la feuille FFT et les reporter dans les cases correspondantes									
10	NUM_SERIE	2										
11	STORAGE	INTERLACED										
12	FILE_TYPE	INTEGER										
13	SLOPE	0,05	0,05									
14	X_OFFSET	0										
15	Y_OFFSET	0										
16	NUM_SAMP	460										
17		CH_1 CH_2	Fenêtre de Hamming									
18		1 -0,05 0	CH_1	FFT	temps (s)							
19		2 -0,05 0,05										
20		3 -0,05 0										
21		4 -0,05 0										
22		5 0,3 0,25										
23		6 12,5 0,55										
24		7 18,85 -3,8										
25		8 -9,55 -2,15										
26		9 -5 0,7										
27		10 18,25 0,8										
28		11 8,2 -1,05										
29		12 -5,95 1,25										
30		13 -16,05 -1,9										
31		14 17,5 -2,2										
32		15 8,85 2,55										
33		16 -10,4 5,15										
34		17 -23,45 0										
35		18 12,45 -2,85										
36		19 1,7 -1,1										
37		20 -5,75 -1,1										
38		21 1,55 1,1										
39		22 -0,25 2,7										
40		23 4,2 -0,85										
41		24 1,25 -4,1										
42		25 4,05 -1,15										
43		26 -0,9 2,9										
44		27 2,3 3										
45		28 -0,2 -0,6										
46		29 3,9 -0,7										
47		30 -7,15 -1,15										
48		31 -0,05 -0,25										
49		32 0,05 0,95										
50		33 -0,2 2,15										
51		34 -7,6 -0,2										
52		35 9,45 -2,7										
53		36 -5,3 -1,3										
54		37 -0,1 1,05										
55		38 2,5 1,55										
56		39 5,5 1,25										
57		40 -1,95 0,65										

Calcul automatique

FDR + Q 1 ET 2 FDR + Q 1

FDR 1 ET 2 FDR 1

AjustLignes

tout_1

tout_1_2

tout_sansQ_1_2

tout_sansQ_1

FFT CH_1 FFT CH_2

FFT2

Signal longitudinal

Signal transversal

Signal / FFT / Signal+filtre / Impression

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

Microsoft Excel - Calcul FDR.xls

Fileur Edition Affichage Insertion Formules Outils Données Fenêtre

Formules

Formules

Formules

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	G.complexe		G.module		f (Hz)		Nb de points	2048								
2	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal				Longitudinal	Transversal							
3	-1,084530807	3,3109315242	0,00105811	0,00323337			FDR (Hz) -valeur max	28662,10838	17773,4375							
4	-0,785153208	2,3462713361	0,00145447	0,00388854	0		FDR (Hz)	28662	17773							
5	-9,3851954414	0,2280195394	0,00219689	0,00292399	48,828125		Incertitude (± ou)	24,4140625								
6	0,726790078	-14,799106232	0,00295737	0,00261558	97,65625		Précision (Norme : $\pm 0,5\%$)	0,49%	0,4%							
7	1,836768207	1,893651127	0,00393062	0,00196936	146,484375		Longueur (m)									
8	3,6621823103	13,76274394	0,00516907	0,00135106	195,3125		Masse volumique (kg/m ³)	#DIV/0!	#DIV/0!							
9	5,6312638603	0,8180018207	0,00527648	0,00092187	211,140625		Ea (GPa)	#DIV/0!	#DIV/0!							
10	7,0182720172	-0,940073721	0,00091120	0,00034201	232,930075		Vitesse du son (m/s)	#DIV/0!	#DIV/0!							
11	6,774307223	-10,373261099	0,00062011	0,00119209	341,750075		Longueur d'onde (m)	#DIV/0!	#DIV/0!							
12	5,0000005349	-0,000210016	0,00503044	0,00103050	300,025											
13	2,862359342	-3,944603071	0,00465742	0,0014011	433,453125		Unité	180083,3445	#1073,301							
14	1,3412103793	0,804363005	0,00317087	0,0013976	483,28125		Période (s)	0,00003	0,6264E-01							
15	0,7623720373	1,2493938478	0,00180463	0,0026238	537,103375		exa (10 ¹⁸) calculé	0	0							
16	0,733806318	1,1193919395	0,00144138	0,00118396	583,33375		Itau calculé	#NOMBRE	#NOMBRE							
17	1,1262012361	0,57344408	0,00101117	0,0011465	634,495625											
18	1,6827325104	-0,750032319	0,00165667	0,00105741	683,53375		décroissement logarithmique	0	0							
19	2,4423527593	-0,573312261	0,00241282	0,00190444	732,423875		facteur de qualité (courbe)	#DIV/0!	#DIV/0!							
20	3,128385838	-0,564017285	0,00300561	0,00063383	781,25											
21	3,2415472073	-0,28933354	0,0033703	0,00033544	830,07125											
22	2,937282395	-0,23608474	0,00321095	0,0005321	878,90625											
23	2,245480234	-0,4175410971	0,00272882	0,0010573	927,734375											
24	1,854318063	-1,252133249	0,00217211	0,0016048	975,5625											
25	2,1061083822	-2,014307489	0,00213757	0,00193182	1025,39063											
26	2,727821633	-2,009026571	0,00281045	0,00216307	1074,23875											
27	2,983842467	-10,28134978	0,00333203	0,00210742	1123,0488											
28	2,3423217071	0,41858634	0,00343567	0,00183612	1171,875											
29	0,9887019175	1,4537572013	0,00296715	0,00164338	1221,70131											
30	-0,178656584	1,478588362	0,00171167	0,00157384	1263,53125											
31	-0,25367779	0,466385346	0,00025835	0,00175335	1318,35938											
32	0,908934328	-10,191782536	0,00153886	0,00208038	1367,1875											
33	2,740102660	-2,228992118	0,00309543	0,0023772	1416,0563											
34	1,252981838	-2,556171688	0,0040699	0,00254432	1464,84375											
35	1,702869998	1,811648298	0,00479621	0,00261532	1513,67188											
36	3,821204308	0,386886341	0,00481623	0,00326881	1562,5											
37	2,2818656287	0,8730276419	0,00432771	0,00178367	1611,32813											
38	0,921393077	1,5307173016	0,00349067	0,001601	1660,15625											
39	0,204406805	0,952034707	0,0021657	0,0004791	1700,90438											
40	0,507020408	-0,740745901	0,00131390	0,00075202	1757,0125											
41	1,1038101643	-0,310328599	0,00142238	0,00116009	1806,64063											
42	1,407794837	7,8143484168	0,00177825	0,00145825	1855,48875											
43	1,231444863	1,349410633	0,0017337	0,00139031	1904,23688											
44	1,1038617902	1,340382163	0,00103863	0,0016749	1953,125											
45	1,274316222	0,1905351329	0,00142435	0,00182065	2001,95313											
46	1,7223292671	-17,791389197	0,00177824	0,00226266	2050,78125											
47	2,1035153863	-2,584886217	0,00221434	0,00254239	2099,61038											
48	2,2214342910	-14,40584223	0,00248634	0,00263448	2148,4375											
49	2,131040283	0,238586808	0,00253639	0,00251739	2197,26563											
50	2,009066703	2,1647515839	0,00253358	0,00228209	2246,09375											
51	1,8603178828	1,7845074082	0,00250105	0,00208872	2294,92188											
52	1,6563932914	2,090573340	0,00238837	0,00204478	2343,75											
53	1,479319003	-1,652232392	0,00219429	0,0020813	2392,57813											
54	1,459788078	-2,065661352	0,00210634	0,00303578	2441,40625											
55	1,5543123708	-11,73091366	0,0020657	0,0018007	2490,23438											
56	1,9150551167	1,816418618	0,00231214	0,00135751	2539,0625											
57	2,055894377	0,553512075	0,00257107	0,00081002	2587,89063											
58	2,06669106	0,093014739	0,00233997	0,00080007	2636,72075											

Longitudinal

Fréquence (Hz)

Transversal

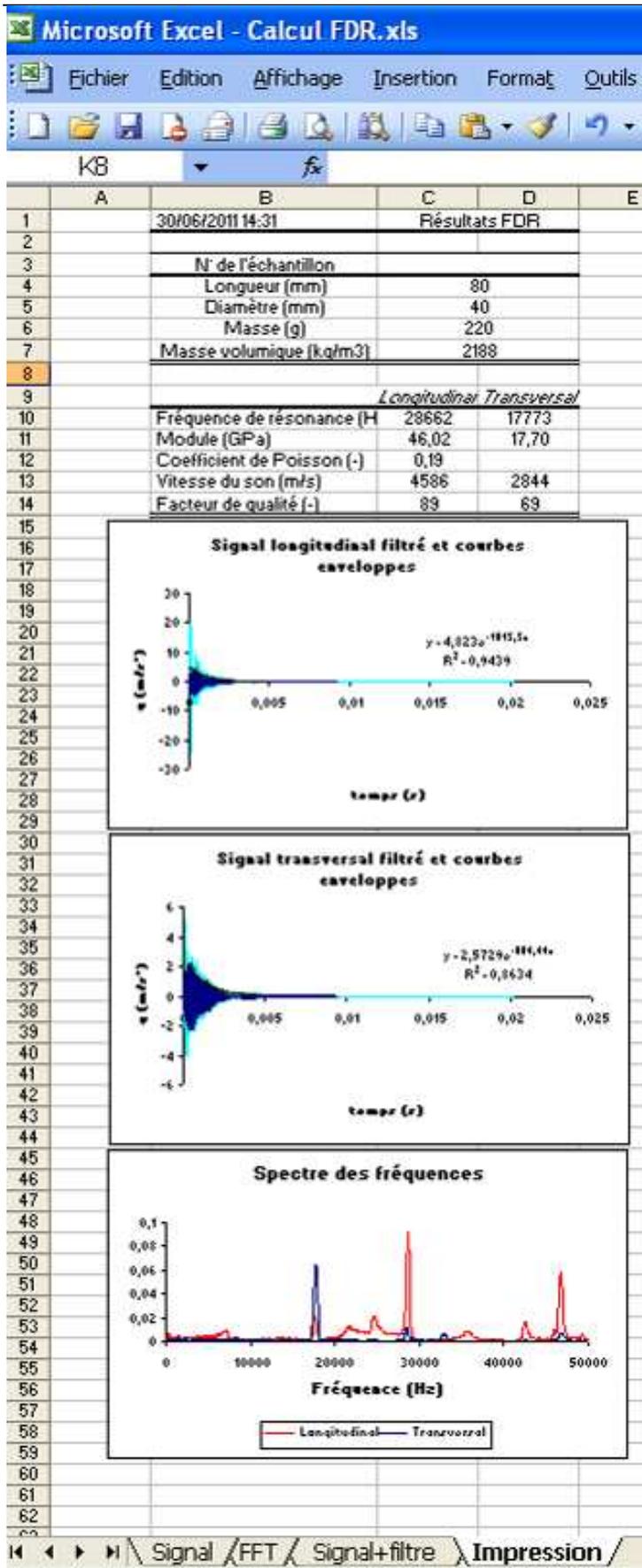
Fréquence (Hz)

Signal longitudinal filtré et courbes enveloppes

amplitude (m/s²) vs temps (s)

Signal transversal filtré et courbes enveloppes

amplitude (m/s²) vs temps (s)



Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
Sub tout_1_2()  
' AjoutLignes Macro  
' Supprime les lignes de calcul en trop et ajoute les lignes de calcul manquantes  
  NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row  
  Range(Cells(NbLignes + 1, 4), Cells(NbLignes + 1, 6)).Select  
  Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
  Selection.ClearContents  
  Cells(NbLignes + 1, 2).Select  
  Selection.Interior.ColorIndex = xlNone  
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
  Cells(NbLignes + 1, 3).Select  
  Selection.Interior.ColorIndex = xlNone  
  ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"  
  Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(NbLignes + 1, 3)).Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(2068, 3)), Type:=xlFillDefault  
  Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(NbLignes, 1)).Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(2068, 1))  
  Range("D19:F19").Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(19, 4), Cells(2068, 6))  
  NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row  
  ' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)  
  ActiveWindow.ScrollRow = 1  
' TransformFourierLong Macro  
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne B (Feuille Signal)  
' Pour avoir 512 points : ligne 529  
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041  
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065  
  Sheets("Signal").Select  
  Dim a As Double  
  NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row  
  a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17  
  ' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & a)  
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 4), Cells(a, 4)) _  
    , "", False, False  
  Selection.Copy  
  Sheets("FFT").Select  
  Range("A3").Select  
  ActiveSheet.Paste  
  Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT  
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés  
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes  
  Range("C3:D3").Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))  
  Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select  
  ActiveWindow.SmallScroll Down:=30  
  Range("E6").Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))  
  Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select  
  ActiveWindow.SmallScroll Down:=30  
  Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select  
  Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
  Selection.ClearContents  
  Sheets("Feuil1").Select  
  ActiveWindow.SelectedSheets.Delete  
  ActiveWindow.ScrollRow = 1  
  Sheets("Signal").Select  
  ActiveWindow.ScrollRow = 1  
' TransformFourierTrans Macro  
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne C (Feuille Signal)  
' Pour avoir 512 points : ligne 529  
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041  
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065  
  Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 5), Cells(a, 5)) _  
    , "", False, False  
  Selection.Copy  
  Sheets("FFT").Select  
  Range("B3").Select  
  ActiveSheet.Paste  
  Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT  
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés  
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes  
  Range("C3:D3").Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))  
  Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select  
  ActiveWindow.SmallScroll Down:=30  
  Range("E6").Select  
  Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))  
  Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select  
  ActiveWindow.SmallScroll Down:=30  
  Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select  
  Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select  
  Selection.ClearContents  
  Sheets("Feuil2").Select  
  ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```

ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("Signal+filtre").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' Filtre longitudinal
Dim b As Single
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
b = NbLignes - 8
' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.FormulaArray = "=bpass(R8C2:R2000C2,R4C2,R5C2)"
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
' Filtre transversal
' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
Range(Cells(8, 5), Cells(NbLignes, 5)).Select
Selection.FormulaArray = "=bpass(R8C4:R2000C4,R4C5,R5C5)"
Range(Cells(8, 5), Cells(NbLignes, 5)).Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
' CourbAttLong Macro
Range("k9:l9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 10).Value > 0) Then
Cells(j, 11).Value = Cells(i, 6).Value
Cells(j, 12).Value = Cells(i, 10).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
Dim ValMin As Single
ValMin = Application.InputBox("A partir de quelle valeur considérez-vous qu'il faut arrêter le calcul (0 ; 0.1 ; 0.2 ; ...)", "Valeur minimale", 0, , , , 1)
Range("m9:n9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 12).Value > Cells(i + 1, 12).Value) And Cells(i, 12).Value > ValMin Then
Cells(j, 13).Value = Cells(i, 11).Value
Cells(j, 14).Value = Cells(i, 12).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
' CourbAttTrans Macro
Range("S9:T9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 18).Value > 0) Then
Cells(j, 19).Value = Cells(i, 6).Value
Cells(j, 20).Value = Cells(i, 18).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
Dim ValMin2 As Single
ValMin2 = Application.InputBox("A partir de quelle valeur considérez-vous qu'il faut arrêter le calcul (0 ; 0.1 ; 0.2 ; ...)", "Valeur minimale", 0, , , , 1)
Range("U9:V9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 20).Value > Cells(i + 1, 20).Value) And Cells(i, 20).Value > ValMin2 Then
Cells(j, 21).Value = Cells(i, 19).Value
Cells(j, 22).Value = Cells(i, 20).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
' Calcul de l'amortissement longitudinal
Dim l As Integer
Dim l1 As Integer
Dim l0 As Integer
Sheets("Signal+filtre").Select
l0 = Range("N9").End(xlDown).Row
On Error Resume Next
Application.DisplayAlerts = False

```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
l = Application.InputBox _
(Prompt:="Quelle est la dernière ligne de données?", _
Title:="Dernière ligne de données", Default:=l0, Type:=1)
On Error GoTo 0
Application.DisplayAlerts = True
l1 = l - 9
DataY = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 14), Worksheets("Signal+filtre").Cells(l1, 14))
DataX = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 13), Worksheets("Signal+filtre").Cells(l1, 13))
Sheets("FFT").Select
Range("H15").Value = Application.WorksheetFunction.LogEst(DataY, DataX)
'Calcul de l'amortissement transversal
Dim k As Integer
Dim k1 As Integer
Dim k0 As Integer
Sheets("Signal+filtre").Select
k0 = Range("v9").End(xlDown).Row
On Error Resume Next
Application.DisplayAlerts = False
k = Application.InputBox _
(Prompt:="Quelle est la dernière ligne de données?", _
Title:="Dernière ligne de données", Default:=k0, Type:=1)
On Error GoTo 0
Application.DisplayAlerts = True
k1 = k - 9
DataY = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 22), Worksheets("Signal+filtre").Cells(k1, 22))
DataX = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 21), Worksheets("Signal+filtre").Cells(k1, 21))
Sheets("FFT").Select
Range("i15").Value = Application.WorksheetFunction.LogEst(DataY, DataX)
Sheets("FFT").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
MsgBox ("Vérifiez les valeurs et procédez manuellement si elles sont fausses sinon allez sur la feuille 'Impression'")
End Sub
Sub CalcAtt_Long()
Dim a As Single
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
a = NbLignes - 8
MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.FormulaArray = "=bpass(R8C2:R2000C2,R4C2,R5C2)"
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("k9:l9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 10).Value > 0) Then
Cells(j, 11).Value = Cells(i, 6).Value
Cells(j, 12).Value = Cells(i, 10).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
Dim ValMin As Single
ValMin = Application.InputBox("A partir de quelle valeur considérez-vous qu'il faut arrêter le calcul (0 ; 0.1 ; 0.2 ; ...)", "Valeur minimale", 0, , , , 1)
Range("m9:n9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 12).Value > Cells(i + 1, 12).Value) And Cells(i, 12).Value > ValMin Then
Cells(j, 13).Value = Cells(i, 11).Value
Cells(j, 14).Value = Cells(i, 12).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
End Sub
Sub CalcAtt_Trans()
Dim a As Single
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
a = NbLignes - 8
MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
Range(Cells(8, 5), Cells(NbLignes, 5)).Select
Selection.FormulaArray = "=bpass(R8C4:R2000C4,R4C5,R5C5)"
Range(Cells(8, 5), Cells(NbLignes, 5)).Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
Range("S9:T9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 18).Value > 0) Then
    Cells(j, 19).Value = Cells(i, 6).Value
    Cells(j, 20).Value = Cells(i, 18).Value
    j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
Dim ValMin As Single
ValMin = Application.InputBox("A partir de quelle valeur considérez-vous qu'il faut arrêter le calcul (0 ; 0.1 ; 0.2 ; ...)", "Valeur minimale", 0, , , , 1)
Range("U9:V9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 20).Value > Cells(i + 1, 20).Value) And Cells(i, 20).Value > ValMin Then
    Cells(j, 21).Value = Cells(i, 19).Value
    Cells(j, 22).Value = Cells(i, 20).Value
    j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
End Sub

Sub FFT()
' FFT Macro
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne B
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Dim a As Double
NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row
a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17
MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & a)
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 4), Cells(a, 4)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("A3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil1").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("FFT").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
End Sub

Sub FFT2()
' FFT2 Macro
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne C
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Dim a As Double
NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row
a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17
MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & a)
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 5), Cells(a, 5)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("B3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil2").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("FFT").Select
    ActiveWindow.ScrollRow = 1
End Sub

Sub AjustLignes()
' AjustLignes Macro
' Supprime les lignes de calcul en trop et ajoute les lignes de calcul manquantes
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
Range(Cells(NbLignes + 1, 4), Cells(NbLignes + 1, 6)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Cells(NbLignes + 1, 2).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Cells(NbLignes + 1, 3).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(NbLignes + 1, 3)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(2068, 3)), Type:=xlFillDefault
Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(NbLignes, 1)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(2068, 1))
Range("D19:F19").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(19, 4), Cells(2068, 6))
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
ActiveWindow.ScrollRow = 1
End Sub

Sub tout_sansQ_1_2()
' Supprime les lignes de calcul en trop et ajoute les lignes de calcul manquantes
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
Range(Cells(NbLignes + 1, 4), Cells(NbLignes + 1, 6)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Cells(NbLignes + 1, 2).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Cells(NbLignes + 1, 3).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(NbLignes + 1, 3)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(2068, 3)), Type:=xlFillDefault
Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(NbLignes, 1)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(2068, 1))
Range("D19:F19").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(19, 4), Cells(2068, 6))
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' FFT Macro
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne B
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Sheets("Signal").Select
Dim a As Double
NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row
a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17
' MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & a)
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 4), Cells(a, 4)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("A3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil1").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("Signal").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' FFT2 Macro
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne C
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 5), Cells(a, 5)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("B3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil2").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("Signal+filtre").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("FFT").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
MsgBox ("Vérifiez les valeurs et procédez manuellement si elles sont fausses sinon allez sur la feuille 'Impression")
End Sub

Sub tout_1()
' AjustLignes Macro
' Supprime les lignes de calcul en trop et ajoute les lignes de calcul manquantes
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
Range(Cells(NbLignes + 1, 4), Cells(NbLignes + 1, 6)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Cells(NbLignes + 1, 2).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Cells(NbLignes + 1, 3).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(NbLignes + 1, 3)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(2068, 3)), Type:=xlFillDefault
Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(NbLignes, 1)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(2068, 1))
Range("D19:F19").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(19, 4), Cells(2068, 6))
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' FFT Macro
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne B
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Sheets("Signal").Select
Dim a As Double
NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row
a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 4), Cells(a, 4)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("A3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```

Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil1").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1
Sheets("Signal+filtre").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' Filtre longitudinal
Dim b As Single
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
b = NbLignes - 8
' A remettre si on veut : MsgBox ("Les données utilisées pour le calcul s'arrêtent à la ligne " & NbLignes)
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.FormulaArray = "=bpass(R8C2:R2000C2,R4C2,R5C2)"
Range(Cells(8, 3), Cells(NbLignes, 3)).Select
Selection.Copy
Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
:=False, Transpose:=False
' CourbAtt Macro
Range("k9:i9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 10).Value > 0) Then
Cells(j, 11).Value = Cells(i, 6).Value
Cells(j, 12).Value = Cells(i, 10).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
' CourbAtt Macro
Dim ValMin As Single
ValMin = Application.InputBox("A partir de quelle valeur considérez-vous qu'il faut arrêter le calcul (0 ; 0.1 ; 0.2 ; ...)", "Valeur minimale", 0, , , , 1)
Range("m9:n9").Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
j = 9
For i = 9 To 7298
If (Cells(i, 12).Value > Cells(i + 1, 12).Value) And Cells(i, 12).Value > ValMin Then
Cells(j, 13).Value = Cells(i, 11).Value
Cells(j, 14).Value = Cells(i, 12).Value
j = j + 1
End If
Next i
ActiveWindow.ScrollColumn = 6
' Calcul de l'amortissement longitudinal
Dim l As Integer
Dim l1 As Integer
Dim l0 As Integer
Sheets("Signal+filtre").Select
l0 = Range("N9").End(xlDown).Row
On Error Resume Next
Application.DisplayAlerts = False
l = Application.InputBox _
(Prompt:="Quelle est la dernière ligne de données?", _
Title:="Dernière ligne de données", Default:=l0, Type:=1)
On Error GoTo 0
Application.DisplayAlerts = True
l1 = l - 9
DataY = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 14), Worksheets("Signal+filtre").Cells(l1, 14))
DataX = Range(Worksheets("Signal+filtre").Cells(9, 13), Worksheets("Signal+filtre").Cells(l1, 13))
Sheets("FFT").Select
Range("H15").Value = Application.WorksheetFunction.LogEst(DataY, DataX)
Sheets("FFT").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
MsgBox ("Vérifiez les valeurs et procédez manuellement si elles sont fausses sinon allez sur la feuille 'Impression'")
End Sub
Sub tout_sansQ_1()
' AjustLignes Macro
' Supprime les lignes de calcul en trop et ajoute les lignes de calcul manquantes
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
Range(Cells(NbLignes + 1, 4), Cells(NbLignes + 1, 6)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Cells(NbLignes + 1, 2).Select

```

Annexe 4. Calcul de la fréquence de résonance

```
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Cells(NbLignes + 1, 3).Select
Selection.Interior.ColorIndex = xlNone
ActiveCell.FormulaR1C1 = "0"
Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(NbLignes + 1, 3)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes + 1, 2), Cells(2068, 3)), Type:=xlFillDefault
Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(NbLignes, 1)).Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(NbLignes - 1, 1), Cells(2068, 1))
Range("D19:F19").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(19, 4), Cells(2068, 6))
NbLignes = Range("B19").End(xlDown).Row
ActiveWindow.ScrollRow = 1
' FFT Macro
' Macro enregistrée le 10/12/2008 par lcp
' Calcul de la transformée de Fourier des valeurs de la colonne B
' Pour avoir 512 points : ligne 529
' Pour avoir 1024 points : ligne 1041
' Pour avoir 2048 points : ligne 2065
Sheets("Signal").Select
Dim a As Double
NbLignes = Range("B18").End(xlDown).Row
a = 2 ^ Int(Log(NbLignes - 18.5) / Log(2)) + 17
Application.Run "ATPVBAEN.XLA!Fourier", ActiveSheet.Range(Cells(18, 4), Cells(a, 4)) _
, "", False, False
Selection.Copy
Sheets("FFT").Select
Range("A3").Select
ActiveSheet.Paste
Range("H1").Value = a - 17 'Reporte le nombre de points utilisés pour la FFT
' Ajustement des lignes en fonction du nombre de points utilisés
' (suppression des lignes en trop et comblement des lignes manquantes
Range("C3:D3").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4))
Range(Cells(3, 3), Cells(a - 15, 4)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range("E6").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5))
Range(Cells(6, 5), Cells(a - 15, 5)).Select
ActiveWindow.SmallScroll Down:=30
Range(Cells(a - 15, 1), Cells(a - 15, 5)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Sheets("Feuil1").Select
ActiveWindow.SelectedSheets.Delete
ActiveWindow.ScrollRow = 1

Sheets("FFT").Select
ActiveWindow.ScrollRow = 1
ActiveWindow.ScrollColumn = 4
MsgBox ("Vérifiez les valeurs et procédez manuellement si elles sont fausses sinon allez sur la feuille 'Impression'")
End Sub
```

```
' This program was written by Kurt Annen, see www.web-reg.de'
' If you like the program, please send me an email: annen@web-reg.de'
Option Explicit
Option Base 1
'This Filter computes the default Band-Pass-Filter using an approximation as discussed in'
'"The Band Pass Filter" by Lawrence J. Christiano and Terry J. Fitzgerald (1999)'
'This Filter assumes a Random-Walk time-series with drift'
'data = time-series'
'pl = minimum period'
'pu = maximum period'
'Quarterly data: pl=6, pu=32 returns component with periods between 1.5 and 8 yrs.
'Monthly data: pl=2, pu=24 returns component with all periods less than 2 yrs.'
Function bpass(data As Range, pl As Double, pu As Double)
Dim nobs As Integer, k As Integer, drift As Double, a As Double, b As Double
Dim bnot As Double, bhat As Double, AA() As Double, AAt() As Double
Dim l As Integer
Const pi As Double = 3.14159265358979
Dim datanew() As Double, BB() As Double
nobs = data.Rows.Count
ReDim datanew(nobs, 1)
For k = 1 To nobs Step 1
datanew(k, 1) = data(k, 1)
Next k
'Removing drift'
drift = (datanew(nobs, 1) - datanew(1, 1)) / (nobs - 1)
For k = 1 To nobs Step 1
datanew(k, 1) = datanew(k, 1) - (k - 1) * drift
Next k
'Create the ideal B's then construct the AA matrix'
b = 2 * pi / pl
a = 2 * pi / pu
bnot = (b - a) / pi
```

```
bhat = bnot / 2
ReDim BB(nobs, 1)
For k = 1 To nobs - 1 Step 1
    BB(k + 1, 1) = (Sin(k * b) - Sin(k * a)) / (k * pi)
Next k
BB(1, 1) = bnot
ReDim AAt(2 * nobs, 2 * nobs)
ReDim AA(nobs, nobs)
For k = 1 To nobs Step 1
    For l = 1 To nobs Step 1
        AAt(k, l + k - 1) = BB(l, 1)
        AAt(k + l - 1, k) = BB(l, 1)
    Next l
Next k
For k = 1 To nobs Step 1
    For l = 1 To nobs Step 1
        AA(k, l) = AAt(k, l)
    Next l
Next k
AA(1, 1) = bhat
AA(nobs, nobs) = bhat
For k = 1 To nobs - 1 Step 1
    AA(k + 1, 1) = AA(k, 1) - BB(k, 1)
    AA(nobs - k, nobs) = AA(k, 1) - BB(k, 1)
Next k
ReDim BB(nobs, 1)
'Computes the Filter using AA'
For k = 1 To nobs Step 1
    For l = 1 To nobs Step 1
        BB(k, 1) = BB(k, 1) + AA(k, l) * datanew(l, 1)
    Next l
Next k
bpass = BB
End Function
```

Résumé

Ce travail de thèse consiste à déterminer l'influence du climat sur le processus d'altération. Cette étude concernant le climat, le choix a été fait de n'étudier qu'un seul type de roche. Une roche largement présente sur le territoire français a été choisie : il s'agit des calcaires. Le sujet comprend différents aspects.

Tout d'abord, il implique l'étude d'une composante temporelle et donc l'étude d'une cinétique d'altération. Celle-ci se base sur la propagation de la fissuration des calcaires jusqu'à leur rupture (définie comme l'instant où le calcaire se sépare en plusieurs morceaux). Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser le terme « durée de vie » pour qualifier le temps écoulé jusqu'à la rupture. Pour l'estimation de cette durée de vie, nous avons choisi de réaliser une étude de laboratoire, ce qui permet un suivi temporel de la fissuration. Par ailleurs, les vieillissements en laboratoire ont été effectués sur des blocs issus de carrière, considérés comme sains. Ils représentent l'état initial des calcaires.

Le deuxième aspect du sujet concerne la prise en compte des nombreuses variables liées au climat et au calcaire et à leur interaction. Le terme variable est utilisé en statistique pour qualifier les données d'un système, c'est pour cette raison qu'il est utilisé ici. Nous avons décomposé les variables influençant la durée de vie des calcaires en trois types : les variables liées au climat, les variables liées au calcaire et les variables liées au climat et au calcaire à la fois. Ce dernier type de variables concerne l'interaction entre le climat et le calcaire, elles sont donc propres au site étudié. Pour l'étude de ces variables, nous avons donc choisi de nous baser sur des sites d'étude réels. Par ailleurs, pour la prise en compte de ces variables pour estimer la durée de vie des calcaires, nous avons choisi d'utiliser un outil statistique prenant en compte les probabilités conditionnelles associées à chaque variable d'une part et les interactions entre ces variables d'autre part : il s'agit de la statistique bayésienne. Celle-ci repose sur l'établissement d'un réseau bayésien. Il se compose d'un graphe acyclique orienté et d'un ensemble de probabilités conditionnelles associées à chaque variable. Pour notre étude, nous avons donc établi ce réseau bayésien en partant des trois types de variables influençant la durée de vie des calcaires.

Le dernier aspect du sujet concerne l'étude du processus d'altération, c'est-à-dire de l'altération globale. Or, le processus d'altération se compose d'un ensemble de phénomènes d'altération chimiques, tels que la dissolution (attaque acide des calcaires par l'eau) ou physico-mécaniques, tels que la gélivation (fatigue des calcaires suite à des cycles de gel-dégel). Ces phénomènes d'altération sont étudiés de façon indépendante dans la littérature. Pour cette étude, nous souhaitons étudier le processus d'altération dans sa globalité, c'est ce qui fait entre autres son originalité. Ainsi nous avons choisi de prendre en compte des phénomènes d'altération de manière successive. Par ailleurs les phénomènes d'altération les plus répandus en France, en l'absence de conditions particulières, sont la dissolution et la gélivation pour les calcaires. Ces deux phénomènes d'altération composent donc le processus d'altération de notre étude.

Nous avons donc défini la façon dont nous avons choisi de traiter l'ensemble des aspects du sujet. L'objectif de cette étude est donc d'estimer la durée de vie des calcaires sous les conditions climatiques présentes en France métropolitaine. Cette étude concerne l'apparition et la propagation des fissures dans les calcaires. Des allers-retours entre le terrain (sites d'étude réels) et le laboratoire (vieillissement accéléré) en font un point d'intérêt particulier. L'étude est divisée en trois parties. Tout d'abord, elle concerne la mise en place d'une simulation du climat en laboratoire grâce aux choix de sites d'étude réels puis à l'établissement de vieillissement accéléré en fonction de données climatiques réelles. Ensuite, il s'agit, à partir des résultats de la simulation du climat en laboratoire, d'étudier l'influence des variables (liées au climat et/ou au calcaire) sur la durée de vie des calcaires. Enfin, cette analyse permet de proposer une méthode de prévision de la durée de vie des calcaires à l'aide de la statistique bayésienne.

Pour la simulation du climat en laboratoire, les sites d'étude ont été choisis pour reproduire en laboratoire des conditions climatiques réelles et pouvoir comparer les échantillons vieillis en laboratoire avec des faciès d'altération réels. Nous avons donc choisi des zones géographiques françaises avec des climats contrastés afin de cerner l'influence des conditions climatiques. Les deux zones choisies sont : une zone de climat océanique à tendance continentale et une zone de climat méditerranéen. De plus sachant qu'un des phénomènes d'altération majeurs est la gélivation, les zones géographiques ont été affinées en fonction de la fréquence et de l'intensité des températures négatives. Il existe une norme (NF B 10-601, 2006) qui définit des zones géographiques en fonction de l'intensité du gel. Cette norme s'applique aux pierres naturelles. Nous nous sommes donc basés sur cette classification. Ainsi, pour le climat océanique à tendance continentale, nous avons choisi une zone avec un gel modéré et pour le climat méditerranéen, une zone avec un gel faible. Plus précisément, pour le climat océanique à tendance continentale, la carrière de Chamesson et son calcaire ont été choisis et pour le climat méditerranéen, la carrière de Moulézan et sa Pierre de Lens ont été choisies. Concernant les caractéristiques des calcaires, le critère qui a guidé leur choix a été d'avoir des calcaires dans lesquels l'eau puisse être présente en quantité suffisante pour qu'elle puisse avoir des effets altérants mais également que la proportion d'eau dans le

Résumé

calcaire reste modérée pour éviter une désagrégation trop rapide du calcaire et au contraire pour favoriser la fissuration. Nous avons donc choisi des valeurs de porosité (proportion de vides dans le calcaire) comprises en 10 et 20%. Par ailleurs, les calcaires choisis sont composés à plus de 99% de calcite et sont des calcaires oolithiques. Les oolithes sont de petites sphères de diamètre de 0,5 à 2 mm en moyenne. Le choix de ces deux sites d'étude va permettre d'établir le vieillissement accéléré en laboratoire basé sur des données climatiques réelles.

Pour la prise en compte de l'altération globale en fonction du temps (processus d'altération), nous avons choisi de mettre en place des cycles de vieillissement accéléré en laboratoire. Ces cycles s'appellent des « cycles annuels d'altération accélérés ». Les enjeux de ce vieillissement en laboratoire sont donc de simuler le climat pour étudier le processus d'altération (en deux étapes successives : une étape de dissolution puis une étape de gélivation), de suivre la fissuration dans le temps, d'accélérer le processus d'altération et enfin de valider les résultats obtenus sur les échantillons vieillis avec des prélèvements sur le terrain. Pour répondre à ces enjeux, nous avons déterminé les paramètres mesurables et contrôlables en laboratoire pour composer ces cycles annuels d'altération accélérés. Il existe deux types de facteurs influençant le processus d'altération : les facteurs de site, c'est-à-dire les facteurs liés aux conditions propres au terrain (altitude, orientation, ...) et les facteurs climatiques qui correspondent aux facteurs liés aux conditions météorologiques (température, précipitations, ...). Ces facteurs peuvent être reliés à des paramètres mesurables et contrôlables en laboratoire qui sont : la température de la roche, le degré d'altération, la qualité de l'eau avant percolation, le temps de percolation et le débit de l'apport en eau. Ces paramètres vont servir pour l'établissement des cycles annuels d'altération accélérés. Pour ce faire, nous les avons reliés aux deux étapes composant ces cycles : la dissolution et la gélivation. La température de la roche et le degré de saturation ont un impact sur l'étape de gélivation. Le degré de saturation, la qualité de l'eau avant percolation, le temps de percolation et le débit de l'apport en eau jouent un rôle dans l'étape de dissolution. La détermination des relations entre les paramètres et les étapes des cycles annuels d'altération accélérés nous a permis de proposer une méthodologie permettant de simuler le climat en laboratoire pour l'étude du processus d'altération des calcaires. Cette simulation s'appuie sur les données climatiques suivantes : les précipitations, et plus précisément le nombre de jours de précipitations par an et les températures et en particulier le nombre de cycles de gel-dégel par an. Ce nombre a été déterminé en regardant les températures minimale et maximale journalières. Lorsque la température minimale est inférieure à la température de gel de l'eau dans les calcaires étudiés et la température maximale est positive, nous avons considéré qu'il y a eu un cycle de gel-dégel. A partir de ces données, nous avons pu associer à chaque paramètre une valeur. Pour le degré de saturation, l'étude expérimentale des vitesses de saturation et de séchage des calcaires étudiés, nous a permis de déterminer que le degré de saturation réel se rapproche du degré de saturation obtenu par saturation à 48h (procédure de saturation normée), c'est donc la valeur que nous avons choisi d'attribuer au degré de saturation. Pour le temps de percolation lors de l'étape de dissolution, il dépend du nombre de jours de précipitations. Nous avons accéléré l'étape de dissolution en diminuant le pH de l'eau de percolation à 3 (sachant que le pH de l'eau de pluie est de 5). Et pour le débit de l'apport en eau, nous avons souhaité que, durant l'étape de dissolution, la surface de l'échantillon soit constamment humide et nous avons donc renouvelé la solution en fonction de la capacité d'absorption des calcaires étudiés. Ainsi, l'apport en eau est de 5 mL jusqu'à percolation de la solution. Concernant le nombre de cycles de gel-dégel, il correspond au nombre calculé à partir des températures minimale et maximale journalières. La température de gel a été fixée à -5°C et la température de dégel à 10°C à partir des moyennes des températures minimale et maximale journalières. Cette méthodologie permet d'établir les cycles annuels d'altération accélérés pour les sites d'étude. Pour la Pierre de Lens, en climat méditerranéen, l'étape de dissolution dure 7 jours et l'étape de gélivation dure 8 cycles de gel-dégel, en d'autres termes, il faut 7 jours de dissolution et 8 cycles de gel-dégel pour reproduire une année climatique en laboratoire. Pour le calcaire de Chamesson, en climat océanique à tendance continentale, l'étape de dissolution dure 14 jours et l'étape de gélivation dure 28 cycles de gel-dégel, en d'autres termes, il faut 14 jours de dissolution et 28 cycles de gel-dégel pour reproduire une année climatique en laboratoire. D'un point de vue pratique, les échantillons sont entourés d'une membrane de hauteur supérieure à la hauteur des échantillons qui permet de placer sur leur surface l'eau acide pour l'étape de dissolution. Cette membrane permet également de se rapprocher du confinement hydrique présent dans un massif puisqu'elle empêche toute évaporation latérale. Les cycles de gel-dégel sont réalisés dans une enceinte climatique. Les cycles annuels d'altération accélérés ont été effectués sur 40 échantillons pour chacun des deux calcaires étudiés, soit un total de 80 échantillons au départ. Pour le calcaire de Chamesson, une année climatique correspond à 42 jours d'altération en laboratoire et pour la Pierre de Lens, elle correspond à 15 jours d'altération en laboratoire. Il a été nécessaire de simuler 12 années en laboratoire pour le calcaire de Chamesson et 24 années en laboratoire pour la Pierre de Lens pour pouvoir étudier les cinétiques d'altération de ces calcaires dans leurs climats respectifs. Les résultats de ces vieillissements ont permis l'étude des variables (liées au climat et/ou au calcaire) influençant la durée de vie des calcaires.

Pour la mesure des cinétiques d'altération des calcaires étudiés, nous avons cherché une méthode de mesure permettant de quantifier l'endommagement au cours des cycles annuels d'altération accélérés successifs. Cette

méthode répond à 5 critères : il s'agit d'une méthode non destructive, présentant une bonne répétabilité, décrivant des propriétés mécaniques, sensible à la fissuration et permettant de connaître le moment de rupture, c'est-à-dire l'instant où l'échantillon se sépare en plusieurs morceaux. Une des mesures répondant à l'ensemble de ces critères est la mesure de la fréquence de résonance. Elle consiste à exciter mécaniquement un échantillon et à mesurer, à l'aide d'un accéléromètre, son oscillation libre. La fréquence de résonance diminue lorsque la fissuration augmente. Cette mesure a permis d'obtenir l'évolution de la cinétique d'altération au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés. L'étude de la fréquence de résonance relative en fonction de ces cycles, associée à l'étude d'autres mesures (mécaniques et physiques) (Figure i), fait apparaître 3 phases d'altération pour les deux calcaires étudiés. Tout d'abord, nous observons une phase où la fréquence de résonance relative diminue légèrement avec les cycles annuels d'altération accélérés, cette phase est qualifiée de phase de cinétique d'altération lente. Puis nous observons une phase où la fréquence de résonance relative diminue fortement avec les cycles annuels d'altération accélérés, cette phase est qualifiée de phase de cinétique d'altération rapide. Enfin, nous observons une phase où la fréquence de résonance relative n'évolue plus avec les cycles annuels d'altération accélérés, cette phase est qualifiée de phase de cinétique d'altération nulle. Deux différences apparaissent entre les deux calcaires : le point de départ de la cinétique d'altération rapide apparaît plus tardivement pour la Pierre de Lens que pour le calcaire de Chamesson et la valeur de fréquence de résonance relative lors de la phase de cinétique d'altération nulle n'est pas la même pour les deux calcaires.

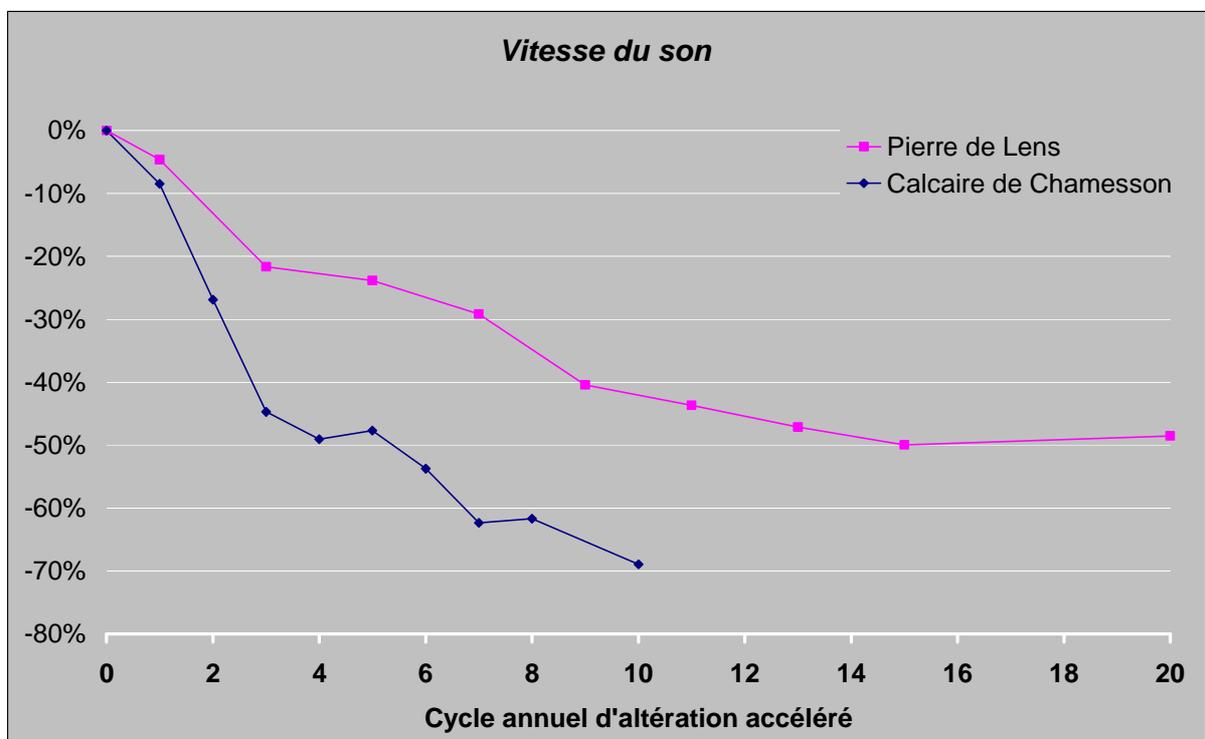


Figure i Evolution de la vitesse du son relative obtenue en fonction du nombre de cycles annuels d'altération accélérés pour les deux calcaires de l'étude

Pour étudier le décalage entre le point de départ de la cinétique d'altération rapide du calcaire de Chamesson et celui de la Pierre de Lens, il est nécessaire de les comparer avec une abscisse identique, les cycles annuels d'altération accélérés des deux calcaires étant différents. Pour ce faire, nous avons représenté l'évolution de la fréquence de résonance relative en fonction du nombre de jours d'altération (Pour rappel, un cycle annuel d'altération accéléré correspond à 42 jours d'altération pour le calcaire de Chamesson et à 15 jours d'altération pour la Pierre de Lens). Cette représentation indique la disparition du décalage entre les deux points de départ de la cinétique d'altération rapide. Ceci permet donc de mettre en évidence le fait que c'est le climat qui est à l'origine du point de départ de la cinétique d'altération rapide et donc de l'endommagement du calcaire. Ces résultats concernent l'analyse des variables liées au climat influençant la durée de vie des calcaires : à partir du climat, nous avons pu déterminer un nombre de jours de précipitations et un nombre de cycles de gel-dégel qui ont abouti à un nombre de jours d'altération et c'est ce nombre de jours d'altération qui a une influence direct sur la durée de vie des calcaires. Nous avons donc compléter la première partie du réseau bayésien concernant les variables liées au climat.

Nous avons vu que les deux calcaires atteignent des valeurs de fréquence de résonance relative différentes pour la dernière phase de cinétique d'altération nulle, cette observation nous amène à l'étude des variables liées au

calcaire. Cette dernière phase présente un palier avant la rupture des échantillons, nous qualifions donc ce palier de seuil de rupture. Pour la Pierre de Lens, ce seuil vaut 20% de la fréquence de résonance initiale et pour le calcaire de Chamesson, il vaut 10% de la fréquence de résonance initiale. Quelle caractéristique du calcaire entraîne une telle différence dans le seuil de rupture ? Pour répondre, nous avons eu recours à une mesure liée au comportement du calcaire vis-à-vis de la fissuration. Il s'agit de la mesure de la ténacité qui correspond à la mesure de la résistance à la propagation des fissures. Cette mesure n'est pas courante pour les calcaires mais quelques études trouvées dans la littérature montrent que la valeur de ténacité des calcaires est inférieure à $1,50 \text{ MPa.m}^{1/2}$. Nos essais ont été réalisés selon les préconisations de l'ISRM sur des éprouvettes CCNBD (disque d'épaisseur B et de rayon R avec deux entailles circulaires en son centre). Les résultats donnent des valeurs significativement différentes pour les deux calcaires. Le calcaire de Chamesson a une ténacité de $0,64 \pm 0,05 \text{ MPa.m}^{1/2}$ (moyenne sur 3 essais) et la Pierre de Lens a une ténacité de $0,50 \pm 0,06 \text{ MPa.m}^{1/2}$ (moyenne sur 3 essais). Ceux-ci montrent donc que la Pierre de Lens résiste moins bien à la propagation des fissures que le calcaire de Chamesson. C'est aussi la Pierre de Lens qui a le seuil de rupture le plus haut, ce qui signifie qu'elle atteint la rupture avec une fissuration moins importante que le calcaire de Chamesson. La mesure de ténacité permet donc d'expliquer les différents seuils de rupture des deux calcaires. Nous avons regardé s'il existait une différence au niveau de la microstructure de ces deux calcaires oolithiques qui permettrait d'expliquer leurs comportements vis-à-vis de la fissuration. Ces deux calcaires ont une porosité globale proche, par contre, la distribution de cette porosité est différente. En effet, la Pierre de Lens présente des vides autour de ces oolithes, visibles sur les images obtenues au MEB, alors que le calcaire de Chamesson a des oolithes complètement solidaires au ciment. La solidarisation de l'oolithe au ciment permet donc à la structure de mieux résister à la propagation des fissures car les éléments qui la constituent sont soudés entre eux. Au contraire, la présence de vides autour des oolithes génère des zones de « faiblesse » où la propagation des fissures est facilitée car ces vides désolidarisent les oolithes de son ciment et donc une fissure peut s'y propager sans que la contrainte générée soit importante. Donc, concernant les variables liées au calcaire, nous avons observé des différences au niveau de la résistance à la propagation de la fissuration qui ont une influence sur le seuil de rupture des calcaires, ce seuil de rupture étant relié directement à la durée de vie des calcaires. Ces résultats complètent donc le réseau bayésien au niveau des variables liées au calcaire.

Concernant maintenant les variables liées au climat et au calcaire à la fois, il est nécessaire de passer à l'échelle du terrain pour étudier les faciès d'altération présents sur les sites d'étude. Nous nous sommes donc rendus sur ces deux sites et nous y avons prélevé trois faciès d'altération différents : un faciès peu altéré, un faciès altéré et un faciès très altéré. Par exemple, pour la Pierre de Lens, nous avons prélevé des échantillons présentant un faciès peu altéré dans une zone de discontinuité présente dans la carrière encore en exploitation de Moulézan. Pour les échantillons au faciès altéré, nous les avons récupérés dans la partie sommitale de cette même carrière et enfin pour les échantillons au faciès très altéré, nous les avons prélevés dans une carrière abandonnée située à proximité de la carrière de Moulézan. De retour au laboratoire, différentes mesures et observations ont été effectuées. Pour étudier la fissuration des échantillons, nous avons mis au point une méthode de mesure permettant de connaître l'orientation et la longueur des fissures visibles à l'œil nu. Le procédé consiste à scanner la surface latérale des échantillons fissurés puis à analyser l'image obtenue à l'aide d'un logiciel adapté. Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés sur le terrain montrent que la fissuration augmente avec le degré d'altération. Donc le degré d'altération au moment du prélèvement va avoir une influence sur la durée de vie des calcaires. Cette observation permet de compléter la dernière partie du réseau bayésien concernant les variables liées au climat et au calcaire à la fois.

L'ensemble des variables influençant la durée de vie des calcaires ont été précisées et donc le réseau bayésien est constitué. Nous avons souhaité valider les conclusions faites sur ces résultats de laboratoire en étudiant un troisième calcaire oolithique sous un autre climat présent en France métropolitaine. Il s'agit du calcaire de Vilhonneur dans un climat à dominante océanique avec une classe de gel faible. Il a une porosité comprise entre 10 et 12%. Le cycle annuel d'altération accéléré correspondant à ce site d'étude et déterminé grâce à la méthodologie mise en place dans cette étude se compose de 14 jours de dissolution et de 14 cycles de gel-dégel. Les mesures de fréquence de résonance relative au fur et à mesure des cycles annuels d'altération accélérés valident la conclusion au niveau des variables liées au climat puisqu'en effet, c'est encore une fois le nombre de jours d'altération qui déterminent le point de départ de la cinétique d'altération rapide. Par ailleurs, des mesures de ténacité sur ce calcaire ont confirmé le lien entre la résistance à la propagation des fissures et la présence ou non de vides autour des oolithes. En effet, le calcaire de Vilhonneur présentant des vides autour de ces oolithes a une valeur de ténacité très proche de celle de la Pierre de Lens qui présente également des vides autour de ces oolithes. Par contre, nous n'avons pas réalisé un nombre de cycles annuels d'altération accélérés suffisants pour pouvoir valider le lien entre le seuil de rupture et la résistance à la propagation des fissures. Les résultats obtenus en laboratoire sont donc en grande partie validés. Nous avons également cherché à valider la méthodologie de vieillissement en laboratoire. Pour cela, nous avons comparé les échantillons altérés sur le terrain (prélevés sur les sites d'étude) avec les échantillons vieillissés en laboratoire (suite aux cycles annuels d'altération accélérés).

Des points communs ont pu être observés : la fissuration augmente avec le degré d'altération dans les deux cas et des traces de dissolution (oxydes de manganèse se formant en présence d'eau acide) ont été visualisées pour la Pierre de Lens sur le terrain et en laboratoire. Deux différences ont également été observées. Tout d'abord, la fissuration sur le terrain est moins importante que celle obtenue en laboratoire. Ceci peut être dû aux conditions de confinement différentes entre le terrain et le laboratoire. Il pourrait donc être intéressant de modifier le cycle annuel d'altération accéléré en plaçant les échantillons dans des conditions de confinement se rapprochant plus des conditions réelles. De plus, sur les échantillons aux faciès très altérés prélevés sur le terrain, nous avons observé que les fissures étaient remplies de matière (calcite re-précipitée ou argiles) alors qu'en laboratoire, les fissures sont restées vides. Cette différence est due à des transports de matière mais il sera intéressant d'essayer de l'atténuer en ajoutant une étape de séchage au cycle annuel d'altération accéléré. La méthodologie mise en place pour simuler le climat en laboratoire pour le processus d'altération des calcaires est donc satisfaisante mais perfectible.

Le réseau bayésien établi est donc en grande partie validé. Nous proposons donc de l'utiliser pour une prévision de la durée de vie des calcaires. Celle-ci se base sur un calcul des probabilités conditionnelles associées à chaque variable composant le réseau bayésien. Pour pouvoir aboutir à des calculs satisfaisants, nous avons besoin de données plus nombreuses et il est donc nécessaire de poursuivre l'étude entreprise ici sur d'autres calcaires et dans d'autres climats.

En conclusion, cette étude a abouti à la mise en place d'une méthodologie de simulation du climat en laboratoire pour le processus d'altération des calcaires se basant sur des données de températures et de précipitations réelles. Les échantillons vieillissés en laboratoire par cette méthode ont été comparés à des échantillons altérés naturellement. Au niveau du comportement des calcaires oolithiques vis-à-vis de la fissuration, nous avons mis en évidence le lien entre la présence ou non de vides autour des oolithes sur la résistance à la propagation des fissures et sur le seuil de rupture. Enfin nous avons observé un décalage du processus d'altération dans le temps dû au climat et nous avons proposé une méthode de calcul de probabilités permettant de prévoir la durée de vie des calcaires reprenant les conclusions de cette étude.