



**HAL**  
open science

# Fluage et endommagement des roches argileuses : évolution de la microstructure et modélisation phénoménologique

Géraldine Fabre

► **To cite this version:**

Géraldine Fabre. Fluage et endommagement des roches argileuses : évolution de la microstructure et modélisation phénoménologique. Géologie appliquée. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005. Français. NNT: . tel-00009830

**HAL Id: tel-00009830**

**<https://theses.hal.science/tel-00009830>**

Submitted on 25 Jul 2005

**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.

# THESE

présentée par

**Géraldine FABRE**

pour obtenir le titre de DOCTEUR de

**L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER-GRENOBLE I**

(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Sciences de la Terre

---

## **FLUAGE ET ENDOMMAGEMENT DES ROCHES ARGILEUSES**

**Evolution de la microstructure et modélisation phénoménologique**

---

Date de soutenance : 2 juin 2005

Composition du Jury

Présidente	Anne-Marie Boullier	Directrice de Recherche - LGIT UJF - Grenoble
Directeur de thèse	Frédéric Pellet	Maître de Conférences - 3S UJF - Grenoble
Rapporteurs	Pierre Bérest	Professeur - Ecole Polytechnique - Palaiseau
	Irini Djéran-Maigre	Professeur - INSA - Lyon
Examineurs	Alexandre Dimanov	Chargé de Recherche - Ecole Polytechnique - Palaiseau
	Nicolas Gatelier	Ingénieur d'études - Géostock - Rueil-Malmaison
	Patrick Lebon	Direction scientifique - ANDRA - Châtenay-Malabry

Thèse préparée au sein du Laboratoire Sols, Solides, Structures

UMR 5521 : UJF – INPG - CNRS



## Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit n'aurait pu être accompli sans l'aide, le soutien et les encouragements de nombreuses personnes que je suis heureuse de pouvoir remercier ici.

J'aimerais exprimer ma reconnaissance à Monsieur **Frédéric Pellet** qui m'a permis de réaliser cette thèse, au laboratoire 3S. La confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années m'a permis de développer autonomie, rigueur et persévérance.

Je remercie très sincèrement Madame **Anne-Marie Boullier** (LGIT) pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse. Sans ses encouragements, je n'aurais pu achever ce travail.

Je remercie également Madame **Irini Djéran-Maigre** (INSA Lyon) et Monsieur **Pierre Bérest** (Ecole polytechnique) pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de mon travail en acceptant la charge de rapporteur.

Monsieur **Nicolas Gatelier** (Géostock) m'a fait le plaisir de participer à l'évaluation de mon travail. Qu'il sache combien je lui suis reconnaissante pour m'avoir transmis ses compétences expérimentales au cours de mon DEA. Sa rigueur m'a souvent servi de modèle.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur **Alexandre Dimanov** (Ecole polytechnique) et Monsieur **Patrick Lebon** (Direction scientifique de l'ANDRA) pour leur participation à mon jury. Leur relecture si pointilleuse de mon manuscrit m'a permis d'en améliorer la précision et la clarté.

J'exprime ma plus vive reconnaissance à Monsieur **Antoine Miras** (3S) et Monsieur **Yves Orenge** (LIRIGM) sans qui la réalisation de la partie expérimentale de cette thèse n'aurait pu être possible. Leur aide m'a été précieuse. J'ai énormément appris auprès d'eux. Les heures que nous avons passées ensemble resteront parmi mes meilleurs souvenirs.

Je veux également remercier Monsieur **André Giraud** (Polytech'Grenoble) qui en acceptant d'être mon tuteur de monitorat ne se doutait sûrement pas qu'il devrait également devenir mon 'psy'. Je le remercie pour son écoute, ses conseils, son soutien et sa disponibilité.

Enfin, je remercie celui sans qui la qualité des photographies de ce manuscrit n'aurait pas été louée, **Florent Martin Michiellot**. Merci d'avoir supporté au quotidien, toujours avec le sourire, mes doutes et mes angoisses. J'espère qu'après avoir traversé ce 'pire', nous allons maintenant partager le meilleur.

Je terminerai en remerciant mes parents, **Doris et Daniel Fabre** et ma sœur, **Amandine**, pour leur amour, leur confiance et leurs encouragements tout au long de ces – parfois dures – années. Merci de m'avoir permis d'atteindre mon but même s'il m'a éloignée géographiquement de vous, merci d'avoir toujours cru en moi.

Je dédie ce manuscrit à celle qui aurait été si fière de me voir achever cette thèse et qui sera toujours présente malgré sa disparition trop soudaine, ma grand-mère Madame **Jeanne Mortelecq**.

## Résumé

La durée d'exploitation des ouvrages de stockage souterrain, en particulier de déchets radioactifs, dépasse de très loin les échelles de temps habituelles en génie civil et rend donc leur dimensionnement délicat. Pour ces projets de construction, la prise en compte du temps devient primordiale et la prévision des déformations irréversibles à long terme est indispensable pour assurer leur pérennité et leur sûreté. Dans ce but, les études expérimentales et modélisations numériques du comportement différé tentent d'évaluer, à proximité de la cavité, l'extension de la zone endommagée, EDZ (*Excavation Damage Zone*) et surtout de prévoir son évolution dans le temps.

Au cours de cette thèse, nous avons étudié, au moyen d'essais de fluage de longue durée et d'essais de chargement à vitesse lente, la viscosité de trois roches argileuses : l'argilite du Callovo-Oxfordien, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. Etant données leur aptitude au fluage, leur très faible perméabilité et leur forte capacité de rétention des radioéléments, ces trois roches ont les qualités essentielles pour constituer de potentielles couches hôtes pour les stockages de déchets radioactifs. Le but de cette étude est de mieux comprendre les mécanismes régissant le développement des déformations et de l'endommagement différés de ce type de roche. A l'échelle de la microstructure, ces déformations sont dues à des mouvements irréversibles des défauts du réseau cristallin (dislocations). L'étude expérimentale a donc été complétée par une analyse microstructurale sur lames minces des échantillons testés. En simulant analytiquement le comportement mécanique des trois roches étudiées, les résultats de l'étude expérimentale nous ont permis d'identifier les paramètres utilisés dans différents modèles viscoplastiques. La meilleure simulation du comportement a été obtenue avec un modèle proposé par *Hajdu* (2003) prenant en compte le développement des déformations volumiques irréversibles de la roche et l'anisotropie d'endommagement.

### Mots clés

Roches argileuses, fluage, comportement mécanique différé, viscoplasticité, chargement quasi statique, endommagement, dislocations, microstructure, identification de paramètres, modèles viscoplastiques, stockage souterrain de déchets radioactifs.

## Abstract

The underground radioactive waste disposal far exceeds the period of exploitation of common civil engineering works. These specific projects require to predict the irreversible deformations over a large time scale (several centuries) in order to assess the extension and to forecast the evolution of the EDZ (Excavation Damage Zone) around the cavity.

In this study, the viscosity of three sedimentary argillaceous rocks has been studied under different conditions of uniaxial compression: static or cyclic creep tests, monotonic and quasistatic tests, performed across various strata orientations. Argillaceous rocks are studied as a possible host layer for radioactive waste disposals. Indeed, they present some of the physical characteristics and mechanical properties, which are essential for being a natural barrier: low permeability, high creep potential and important holding capacity of radioactive elements. The purpose of the experimental study was to shed some light over the mechanisms governing the development of delayed deformations and damage of argillaceous rocks. It relates three rocks: an argillite from East of France, a Tournemire argillite and a marl from Jurassic Mountains. On atomic scale, viscoplastic deformations are due to irreversible displacements of crystalline defects, called dislocations. The experimental study was also supplemented with observations on thin sections extracted from the argillite and marl samples using a SEM. The aim was to identify the mechanisms responsible for the time-dependent behaviour on a microstructural scale. Analytical simulations of the mechanical behaviour of the three rocks gave parameters used in different viscoplastic models. The best modeling was obtained with the viscoplastic model proposed by *Hajdu* (2003), which take account of the development of volumetric strains and of the damage anisotropy.

### Keywords

Argillaceous rocks, creep, time-dependent behaviour, viscoplasticity, quasistatic test, damage, dislocations, microstructural changes, viscoplastic models, identification of parameters, underground radioactive waste storage.



# Table des matières

## Chapitre 1

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre 2

Déformation viscoplastique et endommagement des roches .....	5
2.1 Introduction .....	6
2.2 Observations expérimentales du comportement différé des roches .....	6
2.2.1 <i>Historique</i> .....	6
2.2.2 <i>Essais de fluage sous chargement statique et cyclique</i> .....	7
2.2.3 <i>Essais de relaxation</i> .....	15
2.2.4 <i>Essais de chargement monotone à vitesse lente ou quasi statique</i> .....	16
2.3 Mécanismes de déformation sous sollicitation mécanique .....	18
2.3.1 <i>Éléments de cristallographie</i> .....	18
2.3.2 <i>Défauts cristallins</i> .....	20
2.3.3 <i>Mouvements des défauts du réseau cristallin</i> .....	22
2.3.4 <i>Mécanismes d'écoulement visqueux à l'échelle des grains</i> .....	26
2.3.5 <i>Mécanismes de déformations viscoplastiques à température ambiante</i> .....	28
2.3.6 <i>Synthèse</i> .....	28
2.3.7 <i>Développement de la microfissuration et mécanique de la rupture</i> .....	31
2.4 Paramètres influençant le comportement différé .....	35
2.4.1 <i>Potentiel de fluage</i> .....	35
2.4.2 <i>Influence de l'état de contrainte</i> .....	37
2.4.3 <i>Influence de la vitesse de sollicitation</i> .....	40
2.4.4 <i>Influence de la température</i> .....	42
2.4.5 <i>Paramètres intrinsèques</i> .....	43
2.5 Déformations des roches anisotropes et mode de rupture en compression simple .....	46
2.5.1 <i>Types d'anisotropie</i> .....	47
2.5.2 <i>Modules directionnels élastiques</i> .....	50
2.5.3 <i>Déformations irréversibles et modes de rupture</i> .....	53
2.6 Détection de l'endommagement.....	59
2.6.1 <i>Analyse de la courbe contrainte-déformation en compression simple</i> .....	59
2.6.2 <i>Apport des mesures de vitesses de propagation des ondes P</i> .....	61



2.6.3	<i>Microfissuration et émission acoustique</i> .....	65
2.6.4	<i>Résistance à long terme</i> .....	68
2.7	Modélisation phénoménologique des comportements différés .....	69
2.7.1	<i>Principes généraux</i> .....	69
2.7.2	<i>Lois de fluage</i> .....	70
2.7.3	<i>Modèle analogique de Bingham</i> .....	71
2.7.4	<i>Théorie de Perzyna et lois viscoplastiques à potentiel</i> .....	72
2.7.5	<i>Modélisation de l'endommagement</i> .....	77
2.7.6	<i>Viscoplasticité couplée à l'endommagement</i> .....	79
2.7.7	<i>Modèle viscoplastique endommageable avec prise en compte du comportement volumique et de l'anisotropie</i> .....	80
2.7.7.1	Hypothèses .....	81
2.7.7.2	Prise en compte de la déformation volumique.....	81
2.7.7.3	Modèle viscoplastique endommageable et anisotrope d'Hajdu .....	82
2.8	Conclusion .....	86

### Chapitre 3

Etude expérimentale du comportement mécanique différé des roches argileuses .....		89
3.1	Introduction .....	90
3.2	Description des roches étudiées.....	90
3.2.1	<i>Argilite de l'Est</i> .....	90
3.2.2	<i>Marne du Mont d'Or</i> .....	93
3.2.3	<i>Argilite de Tournemire</i> .....	95
3.3	Description des dispositifs expérimentaux.....	97
3.3.1	<i>Presse de chargement lent</i> .....	97
3.3.2	<i>Bâtis de fluage</i> .....	98
3.3.3	<i>Presse Schenck</i> .....	100
3.3.4	<i>Cellules d'essais</i> .....	101
3.3.5	<i>Capteurs piézo-électriques</i> .....	103
3.3.6	<i>Préparation des échantillons</i> .....	104
3.3.7	<i>Identification physique</i> .....	107
3.3.8	<i>Mesures de vitesse sonique et évaluation du degré d'anisotropie</i> .....	110
3.3.9	<i>Instrumentation des échantillons à l'aide de jauges de déformation</i> .....	110
3.3.10	<i>Acquisition des données</i> .....	112
3.4	Réalisation des essais .....	113

3.4.1	<i>Programmes d'essais</i> .....	113
3.4.2	<i>Traitement des données</i> .....	114
3.5	Présentation et discussion des résultats expérimentaux .....	118
3.5.1	<i>Essais de chargement quasi statique</i> .....	118
3.5.1.1	Argilite de l'Est.....	118
3.5.1.2	Marne du Mont d'Or.....	127
3.5.1.3	Argilite de Tournemire.....	136
3.5.1.4	Conclusions sur les essais de chargement quasi statique .....	146
3.5.2	<i>Essais de fluage</i> .....	147
3.5.2.1	Fluage de l'argilite de l'Est.....	147
3.5.2.2	Fluage de la marne du Mont d'Or.....	149
3.5.2.3	Fluage de l'argilite de Tournemire.....	158
3.5.2.4	Conclusions sur les essais de fluage .....	174
3.6	Conclusions de l'étude expérimentale .....	175

## Chapitre 4

	Analyse microstructurale de la déformation différée des roches argileuses.....	179
4.1	Introduction.....	180
4.2	Éléments d'analyse du comportement mécanique des roches argileuses .....	180
4.2.1	<i>Minéralogie, structure et propriétés des argiles</i> .....	180
4.2.2	<i>Autres cristaux présents dans les roches argileuses étudiées</i> .....	184
4.2.3	<i>Observations microscopiques antérieures</i> .....	185
4.3	Techniques d'imprégnation des échantillons et réalisation des lames minces .....	190
4.3.1	<i>Argilite de l'Est</i> .....	190
4.3.2	<i>Marne du Mont d'Or</i> .....	190
4.3.3	<i>Préparation pour les observations au MEB</i> .....	191
4.4	Observations au microscope optique de l'argilite de l'Est .....	191
4.4.1	<i>Essai de fluage</i> .....	192
4.4.2	<i>Essais de compression uniaxiale</i> .....	194
4.4.2.1	Influence de la vitesse de sollicitation.....	194
4.4.2.2	Influence de l'orientation des éprouvettes .....	197
4.4.3	<i>Premières conclusions</i> .....	201
4.5	Observations de la marne du Mont d'Or sous Ultraviolets.....	201
4.5.1	<i>Introduction</i> .....	201
4.5.2	<i>Observations au microscope optique</i> .....	202

4.6	Observations au Microscope Electronique à Balayage de l'argilite de l'Est .....	207
4.6.1	<i>Essai de fluage</i> .....	207
4.6.2	<i>Essais de compression uniaxiale</i> .....	210
4.6.2.1	Essai de compression/relaxation.....	210
4.6.2.2	Influence de la vitesse de sollicitation.....	212
4.6.2.3	Influence de l'anisotropie .....	214
4.6.3	<i>Discussion</i> .....	214
4.7	Conclusions.....	216

## Chapitre 5

Modélisation phénoménologique du comportement viscoplastique endommageable des roches argileuses.....217

5.1	Modèle viscoplastique de Lemaitre .....	218
5.1.1	<i>Expression générale</i> .....	218
5.1.2	<i>Loi de déformation en fluage</i> .....	219
5.1.3	<i>Expression de la relaxation des contraintes</i> .....	220
5.1.4	<i>Loi de comportement en chargement quasi statique</i> .....	220
5.1.5	<i>Récapitulatif des différents paramètres et formulations de la loi viscoplastique de Lemaitre</i> ....	221
5.2	Méthodes d'identification des paramètres du modèle VP.....	223
5.2.1	<i>Identification à partir des résultats d'un essai de chargement quasi statique en compression uniaxiale</i> .....	223
5.2.2	<i>Identification à partir des résultats d'un essai de fluage en compression uniaxiale</i> .....	224
5.2.3	<i>Simulation d'un essai de relaxation</i> .....	225
5.3	Simulation des résultats expérimentaux .....	226
5.3.1	<i>Comportement de l'argilite de l'Est</i> .....	226
5.3.2	<i>Comportement de la marne du Mont d'or</i> .....	229
5.3.3	<i>Comportement de l'argilite de Tournemire</i> .....	231
5.3.4	<i>Analyse statistique des résultats</i> .....	236
5.4	Modèles viscoplastiques endommageables en condition uniaxiale.....	242
5.4.1	<i>Modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre en condition uniaxiale</i> .....	242
5.4.2	<i>Modèle viscoplastique de Lemaitre avec prise en compte de la déformation volumique en condition uniaxiale</i> .....	244
5.4.3	<i>Loi constitutive viscoplastique avec dilatance et endommagement anisotrope proposée par Hajdu en configuration uniaxiale</i> .....	245
5.5	Procédures d'identification des paramètres du modèle VPDEA.....	248
5.5.1	<i>Identification des paramètres du modèle VPDEA à partir d'un essai de fluage</i> .....	248

5.5.2	<i>Identification des paramètres à partir d'un essai de compression uniaxiale quasi statique.....</i>	255
5.6	Simulation du comportement mécanique des roches argileuses avec le modèle VPDEA .....	260
5.6.1	<i>Essais de fluage .....</i>	260
5.6.2	<i>Essais de chargement quasi statique .....</i>	271
5.6.3	<i>Analyse statistique des résultats et discussion .....</i>	275
5.7	Conclusion .....	279
<b>Chapitre 6</b>		
	Conclusions générales et perspectives.....	281
6.1	Conclusions.....	281
6.2	Perspectives.....	283
	 Bibliographie .....	 285
	 Annexes .....	 297

## Notations

Le système de notations utilisé aux cours de cette thèse est présenté ci-dessous. La convention adoptée pour définir les contraintes et les déformations correspond à celle de la géomécanique (contraintes de compression positives).

D'une manière générale, la dérivée d'une quantité  $x$  par rapport au temps est notée  $\dot{x}$ .

### Notations générales

$\delta_{ij}$	Symbole de Kroneker qui vaut 1 pour $i=j$ et 0 si $i \neq j$ .
$\mathbf{I}$	Tenseur identité
$\vec{v}$	vecteurs (lettres minuscules de l'alphabet latin, avec flèche)
$\vec{v}_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )	vecteurs propres définissant les directions principales d'un tenseur
$x_i$ ( $i = 1, 2, 3$ )	valeurs propres d'un vecteur ou d'un tenseur
$x_0$	valeur initiale ou instantanée
$\dot{x}$	dérivée par rapport au temps
$\tilde{x}$	valeur effective (couplée avec endommagement)
$x_t$	grandeur à l'instant $t$
$x_{t+\Delta t}$	grandeur à l'instant $t + \Delta t$
$\mathbf{S}, \boldsymbol{\sigma}$	tenseur d'ordre deux (lettres majuscules de l'alphabet latin et lettres minuscules de l'alphabet grec, en caractère gras)

### Opérateurs

$\langle x \rangle$	fonction de Macaulay définie par : $\langle x \rangle = x$ si $x > 0$ et $\langle x \rangle = 0$ si $x \leq 0$
$\mathbf{A} + \mathbf{B}$	somme des tenseurs $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$ définie par : $\mathbf{A} + \mathbf{B} = A_{ij} + B_{ij} = C_{ij}$
$\mathbf{A} - \mathbf{B}$	différence des tenseurs $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$ définie par : $\mathbf{A} - \mathbf{B} = A_{ij} - B_{ij} = C_{ij}$
$\mathbf{A} : \mathbf{B}$	produit contracté du tenseur $\mathbf{A}$ par le tenseur $\mathbf{B}$ défini par : $\mathbf{A} : \mathbf{B} = A_{ij} B_{ij}$
$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$	produit du tenseur $\mathbf{A}$ par le tenseur $\mathbf{B}$ défini par : $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_{ik} B_{kj} = C_{ij}$
$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$	produit tensoriel du tenseur $\mathbf{A}$ par le tenseur $\mathbf{B}$ défini par : $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = A_{ij} B_{kl} = C_{ijkl}$
$\ \mathbf{A}\ $	norme euclidienne du tenseur $\mathbf{A}$ définie par : $\ \mathbf{A}\  = \sqrt{A_{ij} A_{ij}}$

## Symboles

A	coefficient de ténacité dans le modèle VPDEA
$\bar{b}$	vecteur de Burgers
d	diamètre moyen des grains d'une roche
D	variable d'endommagement scalaire
<b>D</b>	matrice des souplesses élastiques
$D_n$	variable d'endommagement d'une section S repérée par sa normale $\bar{n}$
E	module d'Young
F	surface de charge et fonction de surcontrainte dans le modèle de Perzyna
G	module de cisaillement
G	taux de restitution de l'énergie
$I_1$	premier invariant du tenseur des contraintes
<b>I</b>	tenseur identité du second ordre
$I_c$	indice de continuité
$J_3$	troisième invariant du tenseur déviateur des contraintes
K	coefficient de résistance dans le modèle VPDEA
K	module de compressibilité volumique
M	paramètre d'écrouissage de la loi viscoplastique
n	porosité
n	paramètre de la loi simple de Lemaitre
$\bar{n}$	vecteur normal
N	exposant de viscosité de la loi d'Hajdu
p	contrainte hydrostatique
p	premier invariant du tenseur des contraintes
p	déformation viscoplastique cumulée
q	déviateur du tenseur des contraintes
Q	énergie d'activation de la réaction thermique
r	exposant d'endommagement de la loi d'Hajdu
R	constante universelle des gaz parfaits
$R_c$	coefficient d'anisotropie
<b>S</b>	tenseur déviateur des contraintes
$\tilde{S}$	déviateur de la contrainte effective
S	section
$S_D$	section endommagée
$\tilde{S}$	section effective : $\tilde{S} = S - S_D$

$S_D$	aire de l'ensemble des microfissures induites par l'endommagement
$t$	temps
$t_{rupt}$	temps à la rupture en fluage
$\Delta t$	pas de temps
$T$	température
$T_f$	température de fusion
$V$	volume
$\Delta V$	variation de volume
VER	Volume Élémentaire Représentatif
$V_{lc}$	vitesse théorique maximale des ondes P mesurée dans un cristal parfait
$V_p$	vitesse de propagation des ondes P
$V_s$	vitesse de propagation des ondes S
$W_{elas}$	énergie de déformation élastique
$W_{cin}$	énergie cinétique liée à la propagation d'une fissure
$\alpha$	paramètre de contractance/dilatance viscoplastique
$\beta$	paramètre d'anisotropie d'endommagement dans le modèle proposé par Hajdu
$\gamma$	viscosité du matériau
$\boldsymbol{\varepsilon}$	tenseur des déformations
$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$	tenseur des déformations effectives
$\boldsymbol{\varepsilon}^e$	déformation élastique
$\boldsymbol{\varepsilon}^{ve}$	déformation viscoélastique
$\boldsymbol{\varepsilon}^p$	déformation plastique
$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$	déformation viscoplastique
$\boldsymbol{\varepsilon}^{irr}$	déformation irréversible
$\boldsymbol{\varepsilon}^{tot}$	déformation totale
$\boldsymbol{\varepsilon}_{axi.}$	déformation axiale
$\boldsymbol{\varepsilon}_{lat.}$	déformation latérale
$\boldsymbol{\varepsilon}_{vol.}$	déformation volumique
$\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp}$	déformation axiale viscoplastique
$\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp}$	déformation transversale viscoplastique
$\boldsymbol{\varepsilon}_{vol}^{vp}$	déformation volumique viscoplastique

$\dot{\epsilon}$	vitesse de déformation
$\dot{\epsilon}^{vp}$	vitesse de déformation viscoplastique
$\kappa$	fonction d'écroûissage dans le modèle de Perzyna
$\nu$	coefficient de Poisson
$\xi$	paramètre de la fonction seuil de l'endommagement
$\eta$	viscosité
$\rho$	masse volumique
$\sigma$	tenseur des contraintes
$\tilde{\sigma}$	tenseur des contraintes effectives
$\hat{\sigma}$	tenseur des contraintes motrices de l'endommagement :
$\sigma_i$	contraintes principales ( $i = 1,2,3$ )
$\sigma_1$	contrainte principale majeure
$\sigma_2$	contrainte principale intermédiaire
$\sigma_3$	contrainte principale mineure
$\sigma_c$	résistance à la compression simple
$\sigma_{cc}$	contrainte de fermeture de la fissuration initiale
$\sigma_{ci}$	contrainte marquant le début de la non-linéarité de la déformation transversale
$\sigma_{cd}$	contrainte de contraction maximale
$\sigma_f$	contrainte de rupture
$\sigma_m$	contrainte normale moyenne
$\tilde{\sigma}_m$	contrainte moyenne effective
$\sigma_{\text{éq}}$	contrainte équivalente de von Misès
$\sigma_{cc}$	seuil de fermeture des microfissures pré-existantes
$\sigma_{ci}$	seuil d'initiation de la microfissuration
$\sigma_{cd}$	seuil de microfissuration instable
$\rho$	masse volumique
$\theta$	angle d'orientation des plans de litage de la roche par rapport à la génératrice de l'échantillon
$\tau$	contrainte de cisaillement
$\varphi$	angle de frottement interne
$\Phi$	fonction de surcontrainte dans le modèle de Perzyna
$\Omega$	potentiel de dissipation thermodynamique





## Introduction générale

L'auscultation des ouvrages souterrains profonds, des anciennes mines, laisse apparaître un développement parfois très important des déformations différées, pouvant mener à la rupture de la roche. Ces phénomènes témoignent d'un comportement visqueux et d'un endommagement progressif du matériau qui se manifestent après la redistribution des contraintes due au creusement et au développement d'une zone endommagée autour de la cavité. La rupture différée éventuelle survient alors parfois plusieurs heures, voire plusieurs années après la réalisation de l'ouvrage. Le développement des déformations différées est donc un phénomène important dont il faut tenir compte dans la conception, l'exploitation et la sécurisation des ouvrages souterrains, mines, tunnels ou cavités de stockage.

Préoccupation environnementale de notre époque, le principal problème de l'industrie nucléaire est liée à la gestion des déchets radioactifs. Les décisions relatives au traitement et au stockage des déchets à faible et moyenne activité et vie courte (FMA) et des déchets à haute activité et vie longue (HAVL) ne sont pas encore prises mais plusieurs solutions sont étudiées. En 1991, une procédure de réflexion de quinze ans a été ouverte par le gouvernement français. En 2006, elle devrait permettre de choisir entre trois solutions possibles : le stockage réversible ou irréversible des déchets dans les formations géologiques profondes, la transmutation ou l'entreposage.

La solution d'un stockage en couches géologiques profondes, peu perméables et tectoniquement stables est une des solutions privilégiées par de nombreux pays. Bien qu'elle pose de nombreuses questions pour ces déchets dont la durée de vie peut atteindre plusieurs milliers d'années, cette solution semble très sûre à l'échelle de quelques générations. Les formations envisagées pour ces stockages géologiques sont principalement des mines de sel comme par exemple aux USA ou en Allemagne, des couches argileuses (Belgique, France, Suisse...), ou des zones granitiques (Suisse, Suède, Japon, Canada).

Ces trois types de roches présentent des caractéristiques physiques et des propriétés mécaniques qui leur confèrent certaines qualités essentielles à une barrière naturelle. La viscoplasticité du sel permettrait la cicatrization des microfissures et garantit un isolement hydrique des déchets. Cependant, le sel est aussi une ressource minérale exploitable par l'homme et sa solubilité

poserait des problèmes en cas de failles sismiques majeures et d'arrivées d'eau. Les couches argileuses sont très peu perméables ; leur stabilité physico-chimique est importante et leur pouvoir de rétention des éléments radioactifs élevé mais l'argile peut perdre ces qualités en cas de forte augmentation de température ou d'arrivée d'eau. Le granite possède une forte capacité d'isolation et la résistance de cette roche permettrait la réalisation d'installations de stockage de grandes dimensions dans ces massifs. Mais le granite est sensible à la fissuration.

Dans le cadre de ses recherches sur la faisabilité d'un stockage en formation géologique profonde, la France a sélectionné une couche d'argilites du Callovo-oxfordien située à la limite de la Haute-Marne et de la Meuse. La construction d'un laboratoire souterrain est en cours entre ces deux départements. Les études en laboratoire réalisées depuis quelques années, qui ont mis en évidence le comportement différé de ces argilites et le couplage thermo-hydro-mécanique, seront ainsi complétées par des mesures *in situ*.

La difficulté essentielle dans le dimensionnement et la construction de ces ouvrages de stockage souterrains vient de leur durée d'exploitation qui dépasse de très loin les échelles de temps habituelles en génie civil. Les déchets radioactifs HAVL proviennent essentiellement des produits de fission issus du retraitement des combustibles nucléaires usés. Ils contiennent en quantité significative des éléments radioactifs dont la période est supérieure à 30 ans et souvent de l'ordre du millier d'années, voire du milliard d'années pour le Césium 135. Ils ne représentent que 1% du volume total des déchets radioactifs mais doivent être complètement isolés de la biosphère, afin de protéger l'homme et son environnement de toute émission ou dissémination radioactives. Pour ces projets de construction, la prise en compte du temps devient donc primordiale et la prévision des déformations irréversibles à long terme est indispensable pour assurer la pérennité et la sûreté de tels ouvrages souterrains. Dans ce but, les modélisations tentent d'évaluer, à proximité de la cavité, l'extension de la zone endommagée, EDZ (*Excavation Damage Zone*) et surtout de prévoir son évolution dans le temps.

De nombreux programmes de recherche internationaux sont aujourd'hui financés afin de mieux connaître et donc prévoir les phénomènes liés à la viscoplasticité des roches. Ils associent généralement différents organismes européens, américains, japonais, canadiens et/ou suisses. En France, l'Andra (Agence pour la gestion des déchets radioactifs) travaille en collaboration avec de nombreux partenaires : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Electricité de France (EDF), Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Institut Français du Pétrole (IFP), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). De même, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) qui réalise des recherches dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la protection contre les rayonnements ionisants et du contrôle des matières nucléaires, a développé des partenariats avec ses homologues étrangers. Il est donc difficile de faire un inventaire exhaustif de toutes les études entreprises par ces organismes internationaux (NEA, *Nuclear Energy Agency* ; AIEA, *Agence Internationale de l'Energie Atomique* ; projet européen SELFRAC, *SELF-healing and FRActure...*) concernant les comportements mécaniques différés des roches comme le gypse, le sel, le granite ou l'argilite, mais également du béton, de la glace, et des aciers.

Au cours de cette thèse, nous avons étudié, principalement au moyen d'essais de fluage de longue durée et d'essais de chargement à vitesse lente, la viscosité de trois roches argileuses : l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or, qui étant données leur forte teneur en argile, leur aptitude au fluage et leur très faible perméabilité, présentent les mêmes qualités que les roches envisagées comme de potentielles couches hôtes pour les stockages de déchets radioactifs.

Le but de ce travail de recherche est d'améliorer la compréhension des mécanismes régissant le développement des déformations et de l'endommagement différés de ce type de roche. A

l'échelle de la microstructure, les déformations viscoplastiques sont généralement dues à des mouvements irréversibles des défauts de la structure cristalline (dislocations) engendrés par des variations de contrainte ou des modifications de l'état hydrique et/ou thermique. Ces déplacements, existants peut être dans les particules d'argiles, sont difficiles à observer. L'étude expérimentale a tout de même été complétée par une analyse microstructurale sur lames minces des échantillons testés afin de repérer les modifications induites par les essais et une simulation analytique du comportement mécanique à l'aide de modèles viscoplastiques.

Ce travail se divise en trois parties :

- Une étude expérimentale du comportement mécanique différé de l'argilite de Tournemire, de l'argilite de l'Est et de la marne du Mont d'Or testées principalement sous contrainte constante (fluage) et à vitesses de chargement très lentes (essais quasi statiques),
- Une analyse de l'évolution de la microstructure et des mécanismes de déformations viscoplastiques et d'endommagement des roches argileuses par des observations aux microscopes optique et électronique à balayage,
- Une modélisation analytique du comportement mécanique à l'aide du modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre modifié par *Hajdu* (2003), pour tenir compte de la déformation volumique et de l'anisotropie d'endommagement.

Le **chapitre 2** résume les connaissances actuelles sur le comportement mécanique différé des roches. Les principaux essais de laboratoire visant à leur étude sont décrits et analysés. L'influence, sur la viscosité des roches, de certains paramètres intrinsèques comme la composition minéralogique, la teneur en eau, la porosité, et extrinsèques comme l'état de contrainte, la vitesse de sollicitation, la température sont rappelés.

À l'échelle atomique, l'apparition et le développement des déformations visqueuses sont intimement liés à l'existence et aux déplacements de défauts du réseau cristallin : les dislocations. Ce développement des déformations différées peut être couplé à un endommagement progressif qui conduit à la rupture de la roche. Différentes techniques expérimentales sont présentées afin de détecter et de mesurer l'initiation et la propagation des microfissures responsables de cette dégradation des caractéristiques mécaniques.

La présentation des trois roches argileuses étudiées, des techniques expérimentales utilisées, du programme d'essais réalisés est l'objet du **chapitre 3**, consacré à l'étude du développement des déformations différées et de l'endommagement des roches argileuses.

La forte teneur argileuse de ces roches et leur sensibilité à l'eau nous a contraints à concevoir de nouveaux équipements qui sont également décrits dans ce chapitre. Le programme expérimental mis en œuvre a permis d'évaluer l'influence de la vitesse de chargement, de l'anisotropie de structure de ces roches sédimentaires et du niveau de déviateur imposé sur le développement des déformations viscoplastiques et le mode de rupture. Les comportements mécaniques différés de l'argilite de l'Est, la marne du mont d'Or et de l'argilite de Tournemire ont également pu être comparés.

Le **chapitre 4** est consacré aux observations à l'échelle microscopique des déformations différées. Nous avons cherché dans la microstructure de l'argilite de l'Est et de la marne du mont d'Or les modifications induites par la viscosité de ces roches. Après avoir expliqué brièvement les techniques particulières utilisées pour réaliser des lames minces dans ces matériaux très sensibles aux conditions hydriques, nous présentons les principales conclusions de cette étude menée sur cinq lames minces d'argilite de l'Est observées au microscope optique et au microscope électronique à balayage (MEB) et cinq tranches fines de marne du Mont d'Or imprégnées de

résine fluorescente observées au microscope optique sous lampe UV.

Dans le **chapitre 5**, les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du mont d'Or ont été utilisés pour ajuster les différents paramètres du modèle viscoplastique de Lemaitre et déterminer un jeu caractéristique pour chaque roche. Cependant, ce modèle viscoplastique simple qui ne prend pas en compte le comportement volumique particulier de ces roches ne permet pas de modéliser correctement leur réponse mécanique aux sollicitations imposées. Le modèle proposé par *Hajdu* (2003) qui introduit un paramètre  $\alpha$  exprimant la dilatance du matériau, et une variable  $\beta$  traduisant l'anisotropie d'endommagement, a donné de bien meilleurs résultats.

Le **chapitre 6** présente les conclusions générales. Des perspectives de recherche sur la partie expérimentale, un développement des analyses microstructurales sur lames minces à partir des échantillons testés et une exploitation, dans des modélisations numériques, des paramètres rhéologiques de la loi d'*Hajdu* déterminés pour chaque roche sont notamment proposés.

## Déformation viscoplastique et endommagement des roches

**Objet :** Dans ce chapitre, nous décrirons brièvement les différents essais de laboratoire qui permettent d'étudier le comportement mécanique fonction du temps ainsi que les paramètres intrinsèques et extrinsèques qui influencent la viscosité des roches. A l'échelle de la microstructure de la roche, le développement des déformations viscoplastiques est essentiellement dû aux déplacements irréversibles des défauts du réseau cristallin, que sont les dislocations, engendrés par des variations de contrainte ou des modifications de l'état hydrique et/ou thermique. Le développement des déformations différées peut parfois mener à la rupture de la roche, ce phénomène est donc couplé à un endommagement progressif. Des mesures complémentaires de propagation d'ondes soniques ou d'émissions acoustiques durant les essais de compression peuvent permettre de détecter et mesurer l'initiation et la propagation des microfissures responsables de cette dégradation des caractéristiques mécaniques.

La modélisation phénoménologique du comportement différé des roches est indispensable pour le dimensionnement des ouvrages souterrains. Elle nécessite l'utilisation de lois de comportement viscoplastique. Nous rapellons donc à la fin de ce chapitre la théorie de Perzyna sur laquelle se basent les différents modèles que nous utiliserons dans le chapitre 5 comme le modèle viscoplastique et viscoplastique endommageable de Lemaitre. Nous présentons également un modèle viscoplastique endommageable proposé par Hajdu (2003) qui, pour tenir compte de la déformation viscoplastique volumique et de l'anisotropie d'endommagement, a modifié le modèle de Lemaitre en introduisant deux nouveaux paramètres :  $\alpha$  et  $\beta$ .

## 2.1 Introduction

L'effet du temps sur les propriétés d'une roche se manifeste lors de différents phénomènes qui peuvent être d'origine mécanique, hydraulique, chimique et/ou thermique, comme :

- La **consolidation** : diminution de volume dans le temps suite à un drainage du matériau (phénomène *hydro-mécanique*).
- Le **gonflement** : augmentation de volume liée une modification *chimique* de la structure de la roche, comme la sorption de molécules d'eau entre les feuillets d'argile, ou l'hydratation de l'anhydrite en gypse.
- Le **fluage** : déformation différée due à l'application d'une charge constante ; et la **relaxation** : relâchement des contraintes à déformation constante, qui sont liés aux *propriétés viscoplastiques* du matériau.
- Le **vieillessement** : détérioration des caractéristiques mécaniques suite à une *altération chimique* des minéraux constitutifs de la roche
- La **catrisation** : phénomène *physico-chimique* de recristallisation par lequel la roche retrouve ses propriétés.

Dans la suite, nous nous limiterons à l'étude des comportements différés d'origine mécanique dont témoignent le fluage et la relaxation des contraintes.

## 2.2 Observations expérimentales du comportement différé des roches

### 2.2.1 Historique

Les premières études du comportement visqueux des roches datent de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Les géologues cherchaient alors à comprendre les processus de genèse et d'évolution des formations géologiques. En observant la rupture fragile des roches de l'écorce terrestre, Mallet<sup>1</sup> (1874) comme l'ensemble des géologues pensaient jusque dans les années 1880 que : “*les roches sont absolument dépourvues de plasticité dans le sens propre du terme*”. Pourtant, Hodgkinson<sup>1</sup> (1853) et Miall<sup>1</sup> (1869), avaient déjà réussi à mettre en évidence des déformations permanentes faibles sur des échantillons de roches.

Les premières expériences mettant en évidence des déformations différées sur une roche sont dues à Kick<sup>1</sup> (1892) : il réussit à imprimer dans un disque de marbre, l'écriture en relief figurant sur un dé en acier, en appliquant une pression croissante sur le dé par l'intermédiaire d'un piston. A la fin de l'essai, la reproduction de l'écriture était bien lisible sur le disque de marbre, sans rupture macroscopique.

En 1901, Adams et Nicolson (1901) publièrent les résultats de la première campagne d'essais de fluage réalisés avec un protocole expérimental similaire à celui utilisé de nos jours. Grâce à une série d'essais triaxiaux sur des échantillons de marbre et de calcaire, ils étudièrent l'influence de la pression de confinement, de la température jusqu'à 400°C et de l'hygrométrie sur le comportement différé de ces deux roches. Avec des durées d'essais variant de 10 minutes à 64 jours, ils ont observé des déformations différées importantes même à température ambiante et

---

<sup>1</sup> Les auteurs non référencés ont été cités par Adams et Nicolson (1901).

hygrométrie faible. De plus, les auteurs émettent déjà l'hypothèse que ces déformations différées sont dues à des mouvements de glissement au sein des cristaux composant les roches.

Au début de 20<sup>ème</sup> siècle, Andrade s'intéresse au fluage des métaux et en 1910 dans la publication du résultat de ses études, il introduit les notions nouvelles de *fluage primaire, secondaire et tertiaire*, toujours utilisées aujourd'hui pour décrire les différentes phases du comportement différé. Plus tard, Norton (1929) étudiera l'influence de la contrainte et de la température sur ce comportement afin de déterminer leurs éventuelles valeurs seuils.

Différents types d'essais sont utilisés pour étudier l'influence du temps sur le comportement mécanique d'un matériau. Leurs principes sont décrits dans les paragraphes suivants.

### 2.2.2 Essais de fluage sous chargement statique et cyclique

Les roches, maintenues sous charge constante, continuent à se déformer après une déformation élastique instantanée. L'importance de cette déformation différée dépend de la roche étudiée et des conditions d'essai (déviateur imposé, température, teneur en eau,...) et peut devenir, avec le temps, supérieure aux déformations instantanées. Lorsque des déformations différées très importantes sont mesurées en laboratoire, dans des conditions expérimentales proches de celles de la construction et de l'exploitation d'un ouvrage, la prise en compte de la viscosité de la roche devient indispensable pour assurer la sûreté de l'ouvrage.

L'influence du temps sur le comportement d'une roche peut être étudiée, au moyen d'*essais de fluage*. Relativement facile à réaliser en compression simple, l'essai de fluage présente l'avantage de donner directement l'évolution de la déformation en fonction du temps. Le principe consiste à imposer à un échantillon, un déviateur de contrainte,  $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ , constant, dans des conditions de température contrôlée. Pendant une durée variant de quelques jours à quelques mois voire plusieurs années, les déformations différées qui se développent sont mesurées en continu. La déformation viscoplastique, qui ne peut être mesurée de façon directe, est généralement déduite de la déformation totale en lui retranchant la partie instantanée, supposée élastique.

La courbe de fluage obtenue peut comporter trois phases comme illustré à la Figure 2.1 :

- Un fluage *primaire* pendant lequel la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  décroît, ce qui correspond à un écrouissage positif du matériau (augmentation de la résistance).
- Un fluage *secondaire* au cours duquel la vitesse de déformation est constante. Le matériau se comporte alors comme un fluide visqueux.
- Un fluage *tertiaire* caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation qui traduit l'apparition d'un endommagement progressif du matériau. Ce type de fluage n'est observé que pour des contraintes élevées, proches de la résistance de la roche testée et/ou pour des durées de chargement suffisamment longues.

Dans cet essai, plusieurs paramètres influencent directement la réponse du matériau, en particulier le déviateur de contrainte appliqué et la température. Ces paramètres seront inventoriés et leurs influences analysées dans le paragraphe 2.4.



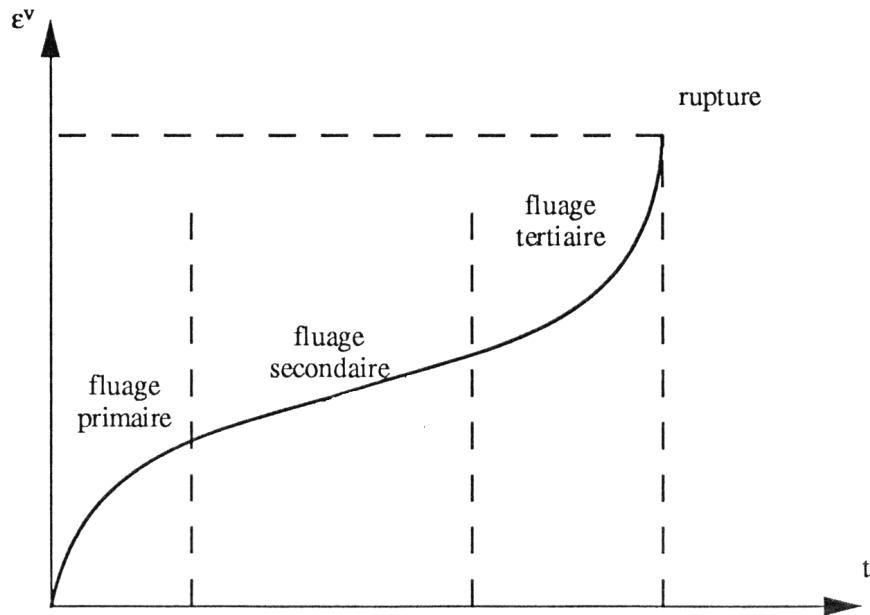


Figure 2.1 : Allure classique de la courbe de fluage d'une roche soumise un déviateur  $q$  constant. Évolution de la déformation viscoplastique,  $\epsilon^v$ , en fonction du temps,  $t$ , d'après François et al. (1995).

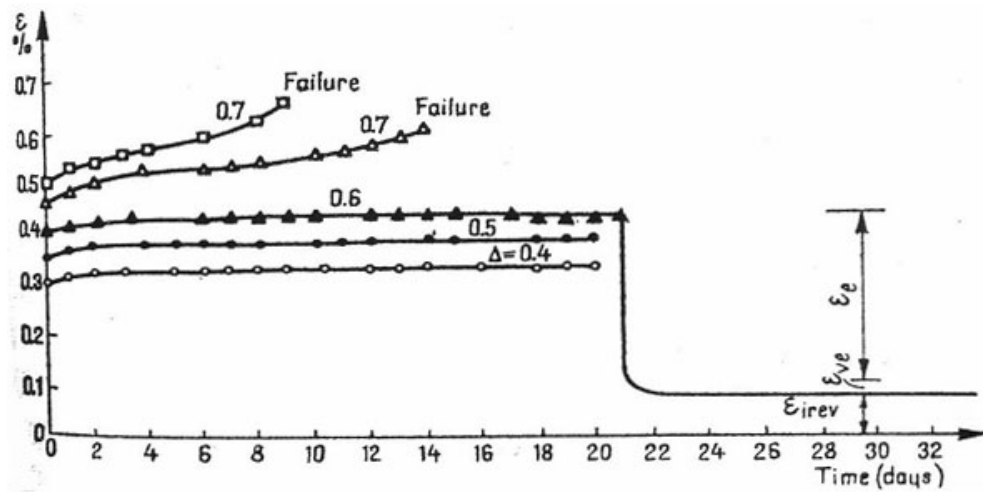


Figure 2.2 : Essai de fluage sur un schiste à différents niveaux de déviateur, d'après Cristescu et Suliciu (1982).  $\Delta$  est le rapport entre le déviateur de contrainte appliqué et la résistance à la compression simple de la roche.

*Cristescu et Suliciu* (1982) ont réalisé une série d'essais de fluage sur un schiste en faisant varier le rapport entre le déviateur et la résistance à la compression simple de cette roche (Figure 2.2). Alors que la déformation se stabilise après quelques jours d'essais, pour de valeurs faibles de ce rapport ( $\Delta < 0,6$ ), une valeur élevée du rapport  $\Delta$  augmente le taux de déformation et mène rapidement l'échantillon à la rupture après une phase de fluage tertiaire.

Remarquons, à la fin de l'essai pour lequel  $\Delta < 0,6$ , l'existence d'une partie viscoélastique de la déformation ; elle sera discutée plus loin.

Il semble donc que pour un déviateur inférieur à une valeur limite, définie comme le seuil de fluage, seul le fluage primaire soit observé. Ce seuil est en pratique difficile à déterminer mais pour *Morlier* (1966), cette valeur serait inférieure à 80 % de la résistance à la compression simple du matériau. *Dayre* (1974), a confirmé qu'elle se situe à 60 – 70 % de la résistance en compression simple de la roche. En théorie, ce seuil peut être relié à la *courbe limite* comme nous le verrons dans le paragraphe 2.2.4.

Le but principal de l'essai de fluage est de permettre une prévision du comportement du matériau sur des durées supérieures à celles des essais de laboratoire. Cependant, les résultats de cet essai ne semblent pas suffisants pour le calage d'un modèle de comportement, si bien que l'extrapolation des courbes sur des échelles de temps longues reste hasardeuse. En effet, l'augmentation progressive des déformations s'accompagne de changements dans la microstructure et notamment d'un endommagement du matériau dont il faut tenir compte pour pouvoir prévoir le seuil de fluage tertiaire et la rupture différée de la roche.

Dans le sel gemme ou dans la glace, le fluage secondaire semble prépondérant, tandis que dans les roches dures, dites "fragiles" (granite, gneiss, dolomie...) le fluage primaire est immédiatement suivi de la phase de fluage tertiaire. D'après *Dusseault et Fordham* (1993), le fluage secondaire n'est alors qu'apparent et se confond avec le passage du fluage primaire au fluage tertiaire.

Cette constatation a fait douter certains auteurs de l'existence d'un fluage secondaire pour les roches dures. Dans tous les essais qu'il a réalisés sur des roches (granite, schiste) ou sur des aciers, en condition uniaxiale ou triaxiale, en compression ou en flexion, *Gonze*, (1988) n'a pu observer de phase de fluage secondaire, entre les phases de fluage primaire et tertiaire, alors qu'il l'avait nettement identifiée sur le sel.

Sur ses courbes de fluage, le point d'inflexion,  $m$ , marquant le passage de la décroissance à la croissance des vitesses de déformation définit un instant  $t_m$  auquel correspond la vitesse de déformation minimale,  $\dot{\epsilon}_m$ . En traçant, dans un repère bilogarithmique l'évolution de la vitesse de déformation en fonction du temps, *Gonze* remarque que ces points  $(\ln t_m, \ln \dot{\epsilon}_m)$  s'alignent sur une droite pour ses essais sur les sols gelés (Figure 2.3). La déformation caractéristique,  $\epsilon_m$  s'exprime par :

$$\epsilon_m = \dot{\epsilon}_m \cdot t_m \quad [2.1]$$

Elle ne dépend donc pas, pour une température donnée, du niveau de contrainte imposé.

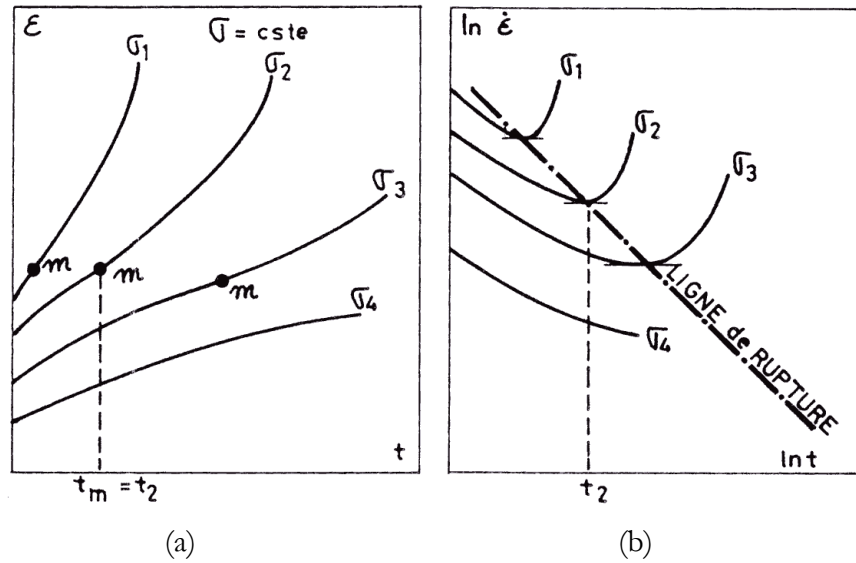


Figure 2.3 : Essais de fluage sur des échantillons de sol gelé sous différents déviateurs ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$ ), d'après Gonze (1988) : (a) : Evolution de la déformation axiale en fonction du temps ; (b) : Evolution de la vitesse de déformation axiale en fonction du temps dans un diagramme bilogarithmique.

Quelques variantes de cet essai classique sont parfois réalisées pour étudier les différentes phases de fluage et leurs caractéristiques. L'essai de décharge partielle (*dip test*) est une des variantes de l'essai de fluage classique (Figure 2.4). Il s'effectue selon un trajet de chargement plus élaboré, qui permet de délimiter le domaine d'élasticité et parfois de mettre en évidence l'existence d'un seuil de viscoplasticité. Pour y parvenir, il suffit, dans la phase de fluage secondaire sous la contrainte  $\sigma_0$ , d'appliquer des décharges plus ou moins importantes, suivies d'un retour à la contrainte  $\sigma_0$ . Les observations classiques sont les suivantes :

- Pour une faible décharge, l'écoulement viscoplastique se poursuit, éventuellement après un temps de latence, appelé *hésitation au fluage*. (phase AA' sur la Figure 2.4)
- Pour une décharge plus importante, il n'y a plus d'écoulement viscoplastique, la contrainte est à l'intérieur du domaine d'élasticité. (phase BB' sur la Figure 2.4)
- Pour une chute de contrainte encore plus grande, il est possible de trouver un écoulement plastique en compression, tout en conservant une contrainte appliquée positive (phase CC' sur la Figure 2.4).

Cet essai tend à prouver qu'une bonne représentation du matériau ne peut se faire qu'au travers de lois de comportement à seuil.

D'autre part, lorsqu'un essai de fluage se termine par le déchargement de la contrainte appliquée conduisant au changement de sens des déformations mesurées, on parle alors de *recouvrance*.

A la fin de l'essai de fluage réalisé par Cristescu et Siliciu (1982) sur un schiste soumis à un fort déviateur (le rapport entre la déviateur appliqué et la résistance à la compression simple de la roche était de 0,6), une décharge complète du matériau a été imposée (Figure 2.5). La chute instantanée de la déformation correspond à la décharge élastique du matériau,  $\epsilon_e$ . La déformation continue ensuite à diminuer avec le temps du fait de sa viscoélasticité,  $\epsilon_{ve}$ , jusqu'à atteindre la valeur de la déformation irréversible,  $\epsilon_{irrev}$ .

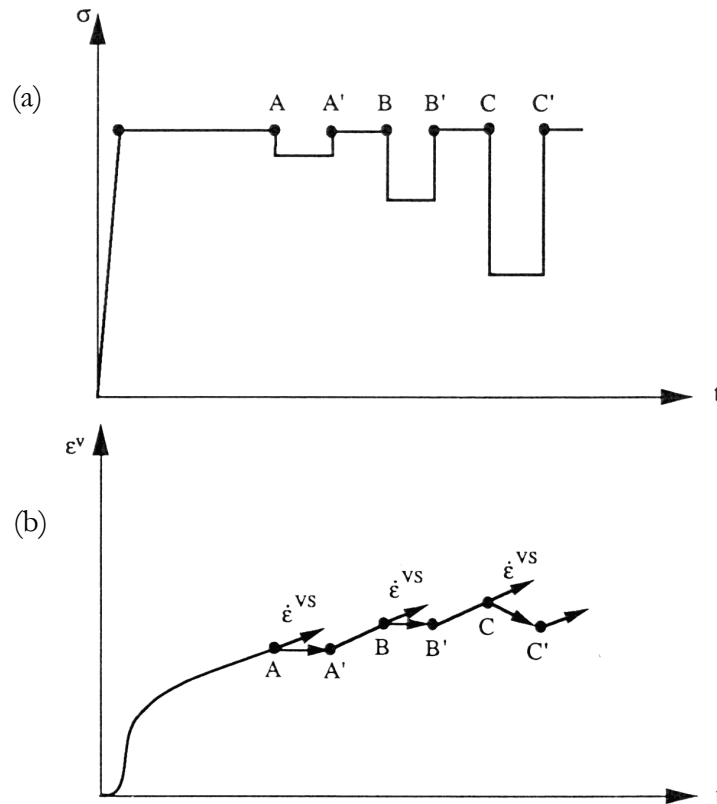


Figure 2.4 : Les différentes étapes d'un essai de décharges partielles en fluage, d'après François et al. (1995)  
 (a) : étapes de chargement ; (b) : réponse en fluage.

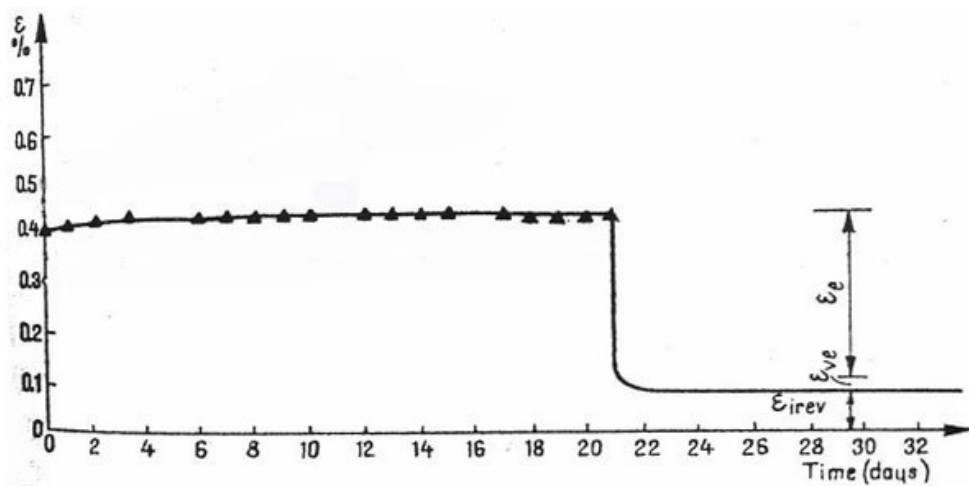


Figure 2.5 : Phase de reconance après un essai de fluage de plusieurs jours réalisé sur un schiste, d'après Cristescu et Siliciu (1982).

Dans les années 70-80, *Martin* (1972), *Scholz* (1972), *Attenvel et Farmer* (1973) puis *Haimson et Kim* (1972, 1977) et *Mora* (1982) ont étudié le comportement des roches sous chargement cyclique et ont observé, lors de leurs essais pilotés en contrainte, le développement des trois phases de fluage caractéristiques. En effet, si, lors d'un essai cyclique, dans le repère des déformations en fonction du temps, on considère l'enveloppe de la déformation acquise à chaque pic de charge, on retrouve l'allure classique de la courbe de fluage (Figure 2.6). Il semblerait donc que les roches réagissent à un chargement cyclique de façon comparable à un chargement statique.

Cependant, pour un niveau de charge fixé, ce fluage paraît *accélééré* : lors d'un essai cyclique, bien que la contrainte moyenne soit inférieure, le temps à la rupture est plus court que celui mesuré lors d'un essai monotone réalisé sous la même contrainte maximale (*Goodall et al.*, 1980). Lors de leurs essais de fluage cyclique réalisés sur différents aciers, à température élevée ( $T = 600^{\circ}\text{C}$ ), *Goodall et al.* (1980) ont également observé que le chargement cyclique réduit la durée de la phase de fluage primaire. Le cyclage semble donc *a priori* un moyen d'accélérer le développement des déformations irréversibles et d'observer dans un temps d'essai plus court les trois phases de fluage.

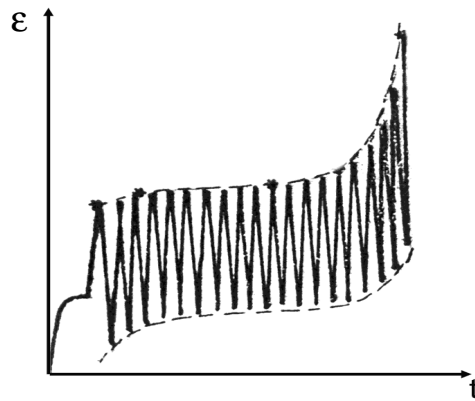


Figure 2.6 : Courbe type de la déformation en fonction du temps obtenue lors d'un essai de chargement cyclique contrôlé en contrainte.

Le fait qu'une roche ou un alliage, soumis à un chargement cyclique, à des contraintes inférieures à sa résistance ultime, arrive à la rupture après un temps déterminé, laisse supposer que ces matériaux se fatiguent par accumulation progressive de l'endommagement, provoqué par chaque cycle. Les expériences en laboratoire ont montré que sous chargement cyclique en compression uniaxiale, la résistance à la rupture peut être inférieure de 40 % à la résistance sous chargement monotone.

Les premières études concernant le chargement cyclique des roches avaient pour but de déterminer la courbe d'endurance, dite courbe S-N, donnant la contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture. La limite d'endurance, capacité de la roche à résister à l'endommagement par fatigue cyclique, appelée aussi seuil de fatigue, est alors défini comme le niveau de chargement pour lequel la longévité à la fatigue est infinie et la détérioration du matériau négligeable pour un nombre de cycles infini. On observe généralement que le nombre de cycles à la rupture est inversement proportionnel au chargement maximal appliqué et que la courbe d'endurance dépend des caractéristiques du chargement : fréquence, charges minimale et maximale, valeur moyenne, amplitude et forme.

En étudiant l'influence de la fréquence des cycles sur le comportement des roches en fatigue,

*Attenwell et Farmer* (1973) ont constaté que la rupture est plus rapidement atteinte avec des cycles à basse fréquence et forte amplitude plutôt que des cycles à haute fréquence et faible amplitude, à condition de rester au-dessus du seuil de fatigue. De plus, comme on peut le voir sur la Figure 2.8, l'augmentation de la charge cyclique maximale par rapport à la résistance en compression simple augmente la vitesse de déformation.

Leur étude du comportement mécanique du granite de Westerly sous chargement cyclique a permis à *Scholz et Koczyński* (1979) de distinguer trois mécanismes de déformation et d'activation de la fissuration, dus respectivement :

- à l'application de la contrainte (comme pour le fluage statique),
- au cyclage,
- à la corrosion (activation en régime sous-critique), mécanisme responsable de la dépendance du comportement à la vitesse de chargement et sera d'autant plus important que celle-ci sera lente.

Ils arrivèrent donc à la conclusion que le rapprochement des résultats des essais de fluage statique et cyclique est très délicat puisque les phénomènes de déformation qui interviennent dans ces deux types d'essai ne sont en effet pas les mêmes. Si l'essai de fluage cyclique accélère le fluage et permet donc d'atteindre et d'observer plus rapidement le fluage tertiaire, il ne permet pas de prévoir le comportement de la roche soumise à un fluage statique. Il est donc très difficile de prévoir le temps à la rupture d'un essai de fluage statique à partir des résultats d'un essai de fluage cyclique, et réciproquement.

*Scholz et Koczyński* montrèrent tout de même que pour des contraintes moyennes faibles, le temps à la rupture augmente lorsque l'amplitude diminue, et qu'il augmente pour des valeurs de contraintes moyennes plus élevées. Ces résultats ont été confirmés par l'étude de *Graiss et al.* (2000) sur différents métaux et alliages soumis à une contrainte constante à laquelle a été surimposée une contrainte cyclique. *Graiss et al.* ont ainsi pu observer que les phases de fluage primaire et secondaire étaient influencées par le cyclage. En effet, non seulement la vitesse de déformation est plus rapide lors de l'essai cyclique que lors de l'essai statique mais la déformation est aussi plus importante, pour une contrainte maximale identique. La Figure 2.7 montre nettement l'augmentation linéaire de la vitesse de déformation avec l'amplitude du cycle,  $\sigma_C$ . Cette augmentation a été observée sur des éprouvettes d'aluminium, de cuivre, de plomb et d'alliage Al-Zn. De plus, certains auteurs ont rapporté, dans le cas du cuivre, l'existence d'un seuil de contrainte pour l'apparition de cette accélération de la déformation à température fixée. *Graiss* a défini ce seuil,  $\sigma_{th}$  comme la réduction minimale de contrainte à appliquer pour initier l'augmentation de la vitesse de déformation. Pour obtenir la valeur de  $\sigma_{th}$  à partir de ces essais, il a extrapolé les droites de régression linéaire correspondantes à chaque température. Leur intersection avec un axe horizontale correspondant à la valeur de la vitesse de déformation lors d'un essai monotone définit  $\sigma_{th}$ , qui est donc fonction de la température.

Récemment, quelques rapprochements quantitatifs entre essais statiques et essais cycliques ont tout de même été obtenus à partir d'essais de fluage réalisés sur des sables injectés. *Ribay-Delfosse* (2001) a en effet montré, bien que la nature du coulis soit importante, que pour ces matériaux les pentes de fluage et les charges limites sont du même ordre de grandeur lors d'essais cyclique et statique et que la fréquence n'a d'influence que sur la phase de fluage tertiaire.

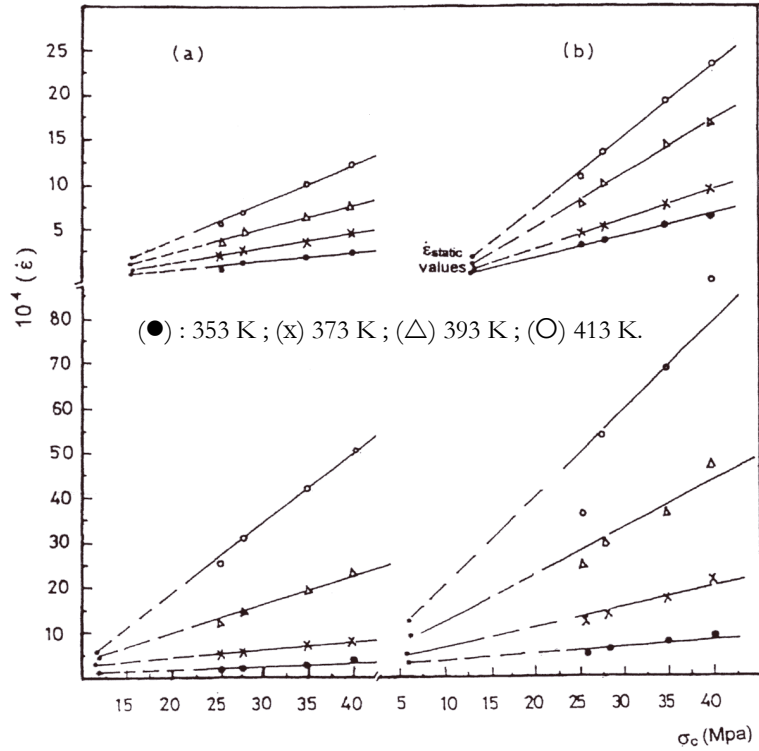


Figure 2.7 : Relation entre la vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  et l'amplitude du cycle de contrainte,  $\sigma_c$  pour deux alliages (a) et (b) sous différentes températures, d'après Graiss et al. (2000).

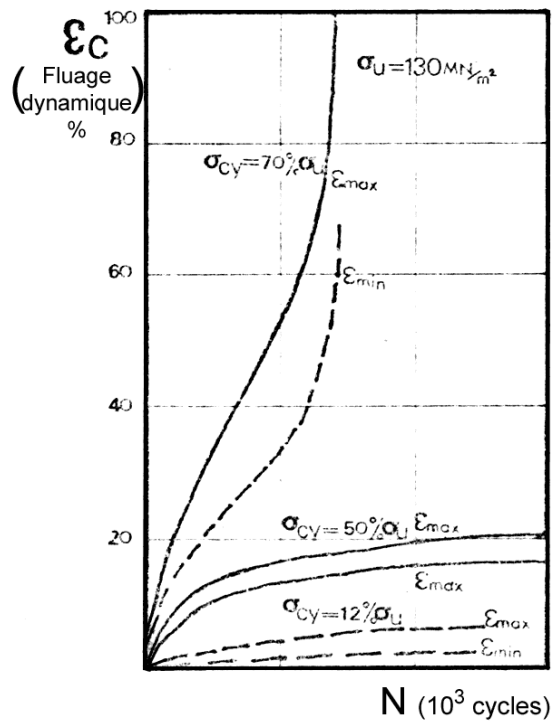


Figure 2.8 : Essais de fluage cyclique à différents niveaux de contrainte sur des éprouvettes de calcaire dolomitique, d'après Attewell et Farmer (1973)

Lors d'essais de chargement cyclique, on observe généralement des boucles d'hystérésis probablement dues à la viscosité du matériau, au développement et à la propagation de microfissures, et au cycle d'ouverture et de fermeture qu'elles subissent pendant les phases de charge et de décharge. *Nishimatsu et Heroesevojo* (1974) ont donc proposé une classification des roches en interprétant leur comportement rhéologique d'après la forme des boucles d'hystérésis (Figure 2.9). Ils ont classé ces boucles en trois familles selon leurs formes : ligne (comportement élastique), ellipse (comportement viscoélastique linéaire) et croissant (comportement viscoélastique non linéaire).

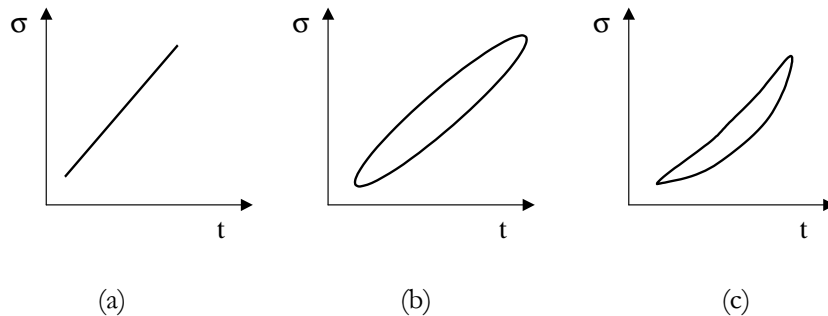


Figure 2.9 : Formes des boucles d'hystérésis lors d'essais de chargement cyclique et comportement viscoélastique, d'après *Nishimatsu et Heroesevojo* (1974).

- (a) : Boucle linéaire : comportement quasi élastique (granite et calcaire microcristallin).  
 (b) : Boucle elliptique : comportement viscoélastique linéaire (tufs et grès).  
 (c) : Boucle en croissant : viscoélastique non linéaire (andésite).

### 2.2.3 Essais de relaxation

Les mesures *in situ* dans des ouvrages souterrains mettent généralement en évidence une diminution avec le temps de la pression exercée par le massif rocheux sur le revêtement. A déformation imposée, ce relâchement des contraintes correspond au phénomène de relaxation. Pour l'étudier en laboratoire, l'échantillon de roche testé est soumis, suite à une mise en charge, généralement à vitesse contrôlée, à une déformation axiale, que l'on maintient ensuite constante. L'évolution des contraintes est mesurée en continu.

Lors de cet essai, la contrainte chute et les déformations élastiques diminuent alors que la déformation viscoplastique continue à augmenter. Ce relâchement des contraintes correspond pour la roche à la recherche d'un nouvel état d'équilibre caractérisé par un seuil de contrainte  $\sigma_s$  (Figure 2.10). La valeur résiduelle de la contrainte atteinte à la fin de la chute de contrainte correspond à la limite supérieure du domaine d'élasticité  $\sigma_s$ . Classiquement, pour un matériau donné, cette limite est d'autant plus faible que la température est élevée.



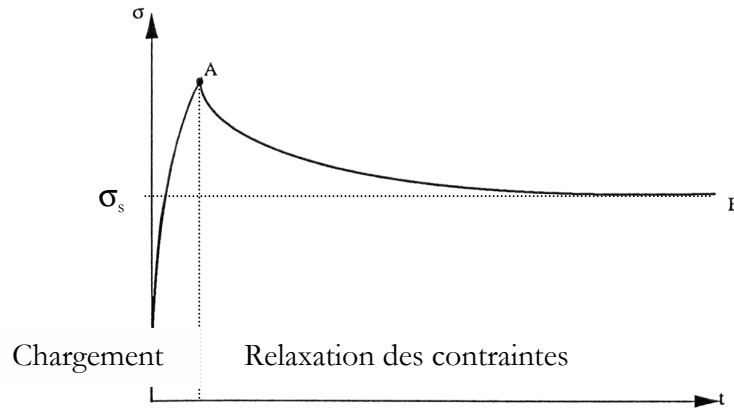


Figure 2.10 : Essai de relaxation et définition de la contrainte seuil  $\sigma_s$  atteinte en fin d'essai.

#### 2.2.4 Essais de chargement monotone à vitesse lente ou quasi statique

L'essai de chargement monotone permet d'évaluer l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement de la roche testée. Il consiste à imposer à un échantillon une vitesse de déformation constante et à suivre l'évolution des contraintes et des déformations qui en résultent. Comme le montre la Figure 2.11, plus la vitesse de déformation est lente, plus les déformations sont importantes pour un même niveau de contrainte.

En réalisant plusieurs essais monotones à des vitesses de déformations décroissantes, il est possible de mettre en évidence l'existence d'une courbe limite. Cette courbe est obtenue pour un essai où la vitesse de déformation imposée est suffisamment lente pour que la viscoplasticité du matériau puisse se développer en temps réel, de sorte que la vitesse de déformation viscoplastique tend vers la vitesse de déformation totale. En théorie, la courbe limite est obtenue pour une vitesse de déformation infiniment lente. On l'estime en pratique proche de  $10^{-10} \text{ s}^{-1}$  pour certaines argilites, ce qui correspond souvent à la limite de précisions des mesures. Son existence a été mise en évidence sur certains métaux.

Cette courbe définit en théorie le lieu des points atteints en fin de fluage ou de relaxation comme l'explique le graphique de la Figure 2.11. En effet, la déformation finale lors d'un essai de fluage correspondrait à la valeur de la déformation mesurée sur la courbe limite sous le même déviateur (chemin AB). De même, le seuil de contrainte atteint en fin de relaxation correspondrait à la valeur de la contrainte atteinte sur la courbe limite pour le même taux de déformation (Chemin AC).

La Figure 2.11 montre que l'existence d'une courbe limite impose lors d'essais de fluage, pour des déviateurs de contrainte faibles, une évolution asymptotique de la déformation vers une valeur maximale. Pour des déviateurs supérieurs à la résistance de la roche mesurée en compression infiniment lente (point D), l'évolution à long terme de la déformation en fluage n'est plus déterminée par la courbe limite. La résistance de la roche en compression infiniment lente définirait donc le seuil de fluage, en deçà duquel les déformations viscoplastiques finiraient par s'amortir et seul le fluage primaire serait observé.

En revanche, en relaxation, l'équilibre à long terme est toujours atteint : la contrainte évolue avec le temps de manière asymptotique vers la valeur de la contrainte atteinte sur la courbe limite pour le même taux de déformation. Cette correspondance a été exploitée lors d'un essai de relaxation par paliers réalisé par *Rousset et Giraud* (1996) sur l'argile de Boom pour tracer la courbe limite : la courbe du comportement mécanique à long terme relie les points atteints à la stabilisation de

chaque palier de relaxation (Figure 2.12).

Finalement, les essais de chargement quasi statique permettent d'obtenir des informations importantes sur le comportement à long terme du matériau testé lorsque la courbe limite est atteinte.

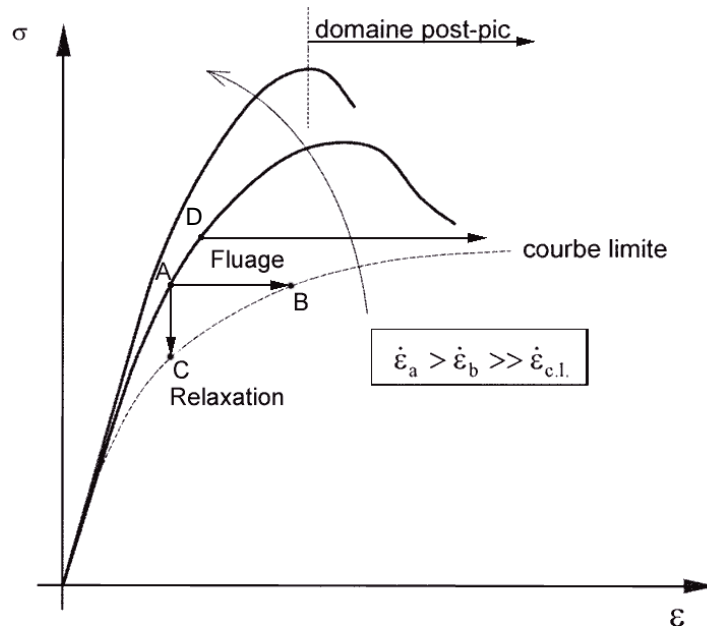


Figure 2.11 : Mise en évidence d'une courbe limite et liens avec les chemins de fluage et de relaxation.

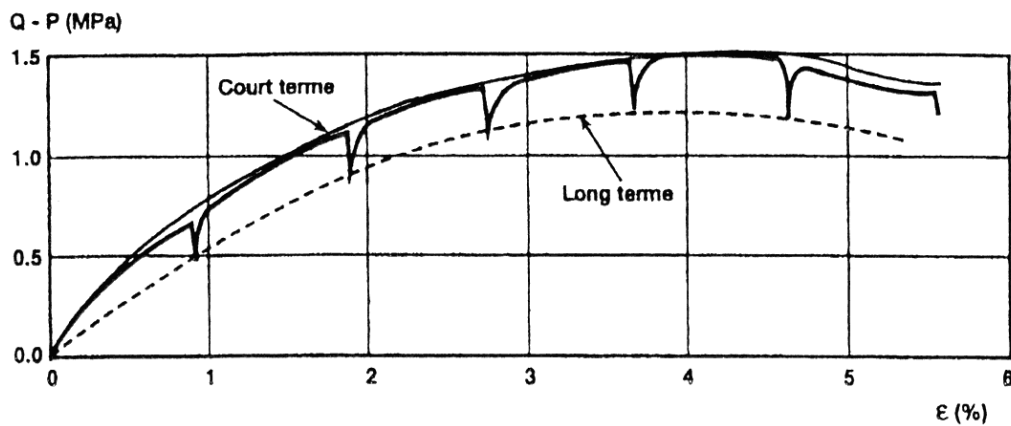


Figure 2.12 : Essai de relaxation par palier sur l'argile de Boom, d'après Rousset et Giraud (1996) : évolution de la déformation axiale en fonction de  $(q-p)$ .

## 2.3 Mécanismes de déformation sous sollicitation mécanique

Les matériaux rocheux sont des milieux polycristallins, poreux, hétérogènes et très souvent anisotropes. Leur comportement mécanique est intimement lié à l'évolution de leur microstructure. Afin de mieux comprendre le comportement macroscopique d'une roche, et en particulier son comportement différé, il est donc important d'étudier les phénomènes qui se produisent à l'échelle atomique.

Nous rappelons dans ce paragraphe quelques notions de cristallographie dont nous aurons besoin dans l'étude microstructurale (chapitre 4) ainsi que les principaux mécanismes responsables à cette échelle de la viscoplasticité des roches.

### 2.3.1 *Eléments de cristallographie*

Un cristal est caractérisé par une maille élémentaire, motif parallélépipédique décrivant l'arrangement des atomes ou molécules et se répétant périodiquement dans les trois directions de l'espace.

Chaque cristal est défini par les paramètres de son système cristallin : ses dimensions  $a$ ,  $b$ ,  $c$  suivant trois axes  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  et par les angles  $\alpha$  (entre  $\bar{y}$  et  $\bar{z}$ ),  $\beta$  (entre  $\bar{x}$  et  $\bar{z}$ ) et  $\gamma$  (entre  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$ ). Les sept systèmes cristallins existants sont présentés dans le Tableau 2.1. L'arrangement particulier des atomes, ions, ou molécules à l'intérieur de ces systèmes constitue la maille du cristal. On dénombre 14 configurations appelées réseaux de Bravais ; trois d'entre eux sont représentés à la Figure 2.13.

Ces mailles élémentaires possèdent des axes et des plans de symétrie qui sont aussi des plans de densité maximale d'atomes présentant donc une résistance au cisaillement plus faible. Pour les repérer, on utilise conventionnellement les indices de Miller : le plan à caractériser est repéré par ses intersections avec les axes d'un repère orthonormé. L'inverse de ces coordonnées, réduites aux trois plus petits nombres ayant le même rapport, fournit les indices de Miller pour le plan considéré : le plan hachuré sur la Figure 2.14 est donc repéré par  $\langle 10\bar{1} \rangle$ . De la même manière, une direction cristallographique est définie par une droite issue de l'origine du repère, passant par la position d'un atome et est désignée par les coordonnées de cet atome exprimées en distances interatomiques : la direction OD de la Figure 2.14 est désignée par  $\langle 01\bar{1} \rangle$ .

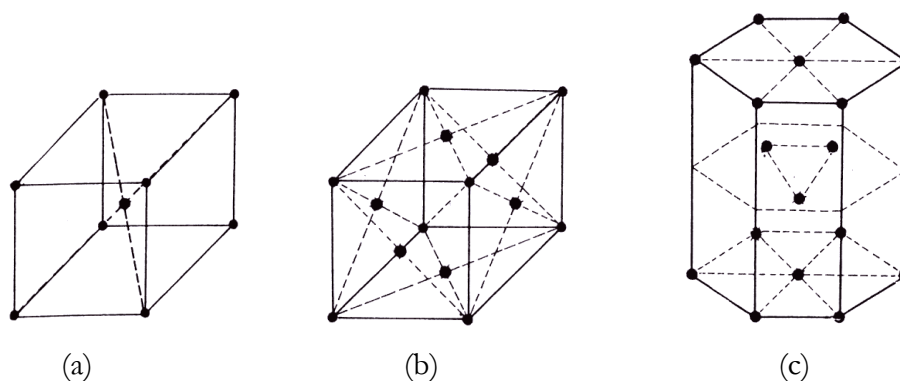


Figure 2.13 : Mailles élémentaires :  
 a) cubique centré ; b) cubique face centré ; c) hexagonal centré.

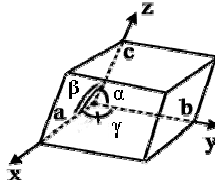
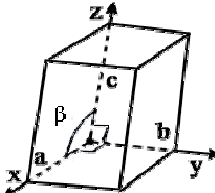
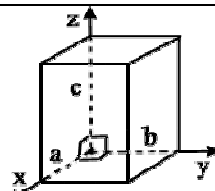
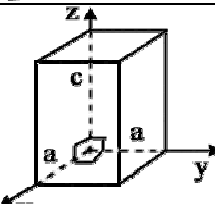
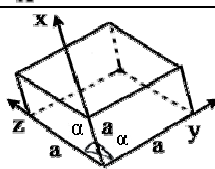
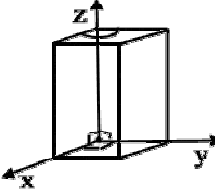
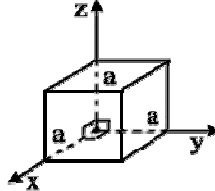
Système cristallin	Caractéristiques de la maille		Symétrie	Schéma théorique
Triclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$	aucune	
Monoclinique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	1 plan, 1 axe	
Orthorhombique	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3 plans, 3 axes	
Quadratique	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	5 plans, 5 axes	
Rhomboédrique	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	7 plans, 7 axes	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	7 plans, 7 axes	
Cubique	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	9 plans, 13 axes	

Tableau 2.1 : Caractéristiques géométriques des sept systèmes cristallins, d'après Foucault et Raoult (2001).

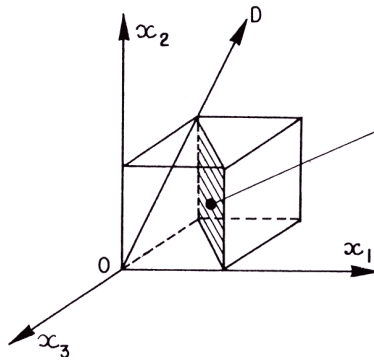


Figure 2.14 : Indices de Miller, d'après Lemaitre et Chaboche (1996).

### 2.3.2 Défauts cristallins

Les roches sont constituées d'agrégats de minéraux dont les conditions de cristallisation (pression, température, présence de fluides...) et l'historique des sollicitations subies ont généré des discontinuités macroscopiques, des fissures microscopiques et des irrégularités atomiques. A l'échelle de l'échantillon, on distingue 3 types de discontinuités :

- les pores : espaces vides entre grains dont les dimensions peuvent être variables selon la nature de la roche.
- les fissures : pores dont une ou deux dimensions caractéristiques sont plus petites que la troisième. Couramment, les fissures ont une longueur de 100 à 1000  $\mu\text{m}$ .
- les plans de clivage : plans de faiblesse entre deux plans cristallographiques.

A l'échelle microscopique, les défauts du réseau cristallin peuvent être ponctuels, linéiques ou surfaciques. Les défauts ponctuels sont des perturbations locales provoquées par une insertion ou, au contraire, par une lacune d'atome dans la maille du réseau cristallin. Les principaux types de défauts ponctuels sont schématisés sur la Figure 2.15. La surface de séparation entre cristaux ou parties de cristaux, différentes par les orientations ou la nature des phases (joints de grains, joints de macle...) constitue un des défauts de type surfacique. Il ne crée qu'une distorsion locale du réseau cristallin.

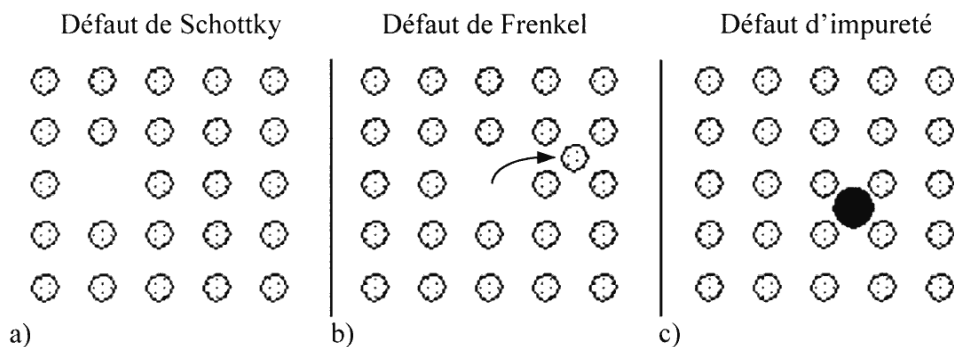


Figure 2.15 : Les différents défauts ponctuels :  
 (a) : Lacune ; (b) : insertion d'un atome ; (c) : impureté interstitielle.

Les défauts cristallins peuvent être également linéiques et dans ce cas, ils sont désignés sous le terme de *dislocations*. Le concept de dislocations a été imaginé par Taylor et Orowan<sup>2</sup> pour rendre compte de la faible résistance au cisaillement des monocristaux.

Il existe deux types de dislocations : les *dislocations vis* et les *dislocations coin*. Dans un réseau cristallin cubique simple où elles sont facilement représentables (Figure 2.16), le défaut généré par une dislocation coin est créé par une translation de la partie supérieure du cristal ; dans le cas des dislocations vis, le défaut est dû à une rotation locale de la partie supérieure du cristal. Dans un cristal, les dislocations sont rarement isolées : l'association de dislocations vis et coin forment des boucles de dislocation. Pour donner un ordre de grandeur, la densité des dislocations, qui sont créées dès la formation des cristaux varie dans la plupart des métaux de  $10^6 \text{ km/cm}^3$  à  $10^7 \text{ km/cm}^3$  (Lemaitre et Chaboche, 1996).

Une dislocation peut être caractérisée par un vecteur *défaut de fermeture*, appelé aussi vecteur de Burgers. Dans le cas d'un cristal cubique simple parfait et du même cristal comportant une dislocation coin, la définition de ce vecteur est illustrée sur la Figure 2.17. Le contour fermé dans le cristal imparfait entoure la dislocation ; pour fermer le même contour dans le cristal parfait, il faut ajouter le vecteur  $\vec{b}$ . Le vecteur de Burgers ainsi défini est indépendant du contour. Il est identique sur toute la ligne de dislocation.

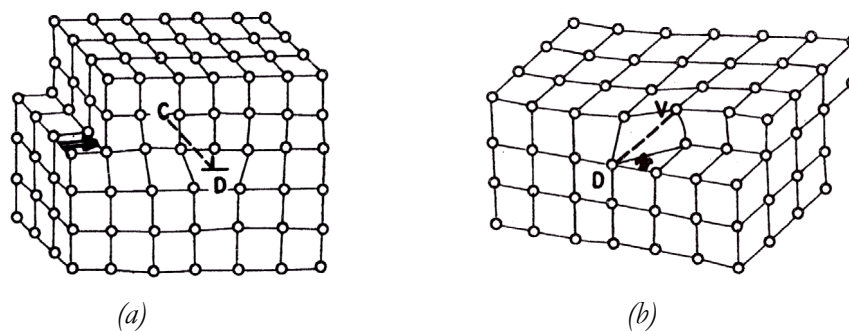


Figure 2.16 : (a) : Dislocation coin de ligne DC ; (b) : Dislocation vis de ligne DV, d'après Lemaitre et Chaboche (1996).

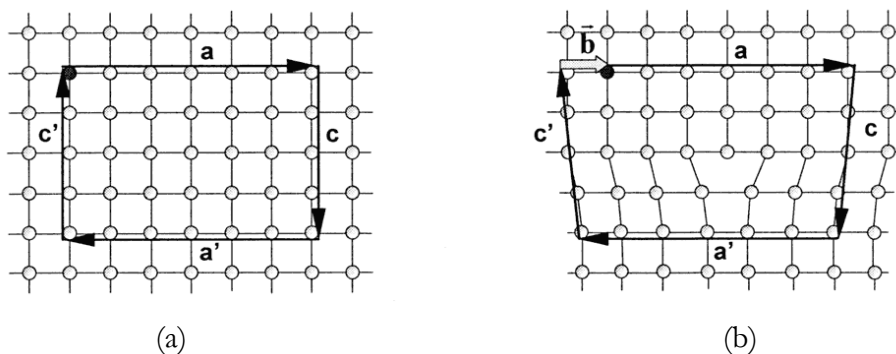


Figure 2.17 : Définition du vecteur de Burgers,  $\vec{b}$ , dans une dislocation coin.  
(a) : cristal parfait, (b) : cristal contenant une dislocation coin.

<sup>2</sup> Cités par Jouffrey (1979)

### 2.3.3 Mouvements des défauts du réseau cristallin

A l'échelle du réseau cristallin, l'apparition et le développement des déformations visqueuses sont intimement liés à l'existence et au déplacement des défauts du réseau cristallin (Lemaitre et Chaboche, 1996).

En effet, sous sollicitation mécanique externe, les défauts linéiques se déplacent, se propagent et se multiplient. En particulier, lorsqu'un segment de dislocation de vecteur de Burgers  $\vec{b}$  se trouve ancré (en A et B sur la Figure 2.18) est sollicité par une contrainte tangentielle  $\sigma_{12}$  de même direction, celle-ci oblige la dislocation à se déplacer jusqu'à entourer les points A et B. Lorsque les deux branches se rejoignent en C, elles s'attirent et se donnent naissance à une grande boucle et un nouveau segment AB qui peut à son tour générer une autre boucle. Ce développement des dislocations par le *mécanisme de Frank-Read* a été couramment observé dans les cristaux. L'augmentation de la densité des défauts par empilement à l'intérieur d'un cristal rend les processus de déformation plus difficile. La manifestation macroscopique de ce phénomène est connue sous le terme d'*écrouissage*.

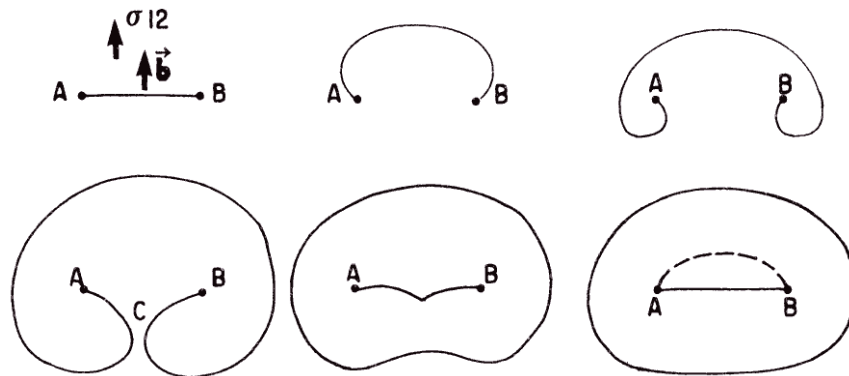


Figure 2.18: Source de dislocation par le mécanisme de Frank-Read, d'après Lemaitre et Chaboche (1996).

Comme nous le verrons dans les paragraphes qui suivent, la réponse différée d'une roche à une sollicitation mécanique ou thermique externe est fonction de nombreux paramètres intrinsèques (composition minéralogique, teneur en eau, taille des grains et porosité) et extrinsèques (état de contrainte, vitesse de chargement, température). Cependant, les processus microscopiques responsables de la déformation de la roche sont dus uniquement à des mouvements fondamentaux des défauts cristallins que Poirier (1995) a récapitulé. Les déformations permanentes plastiques ou viscoplastiques correspondent à des déplacements relatifs d'atomes qui restent stables après cessation de la sollicitation. Nous décrivons ici deux processus simples de déplacement des dislocations, qui peuvent ensuite être associés et donner lieu à des déplacements plus compliqués de *glissement dévié*.

#### - Le déplacement des dislocations par glissement suivant un plan

La Figure 2.19 illustre ce mécanisme dans le cas d'une déformation coin au sein d'un cristal cubique simple monoatomique soumis à une contrainte tangentielle  $\sigma_{12}$ . Les ruptures de liaison ne se produisent qu'au voisinage de la ligne de dislocation. Le glissement se propage progressivement d'une extrémité à l'autre du cristal. Il est gouverné par la contrainte de cisaillement locale  $\sigma_{12}$  si celle-ci dépasse le seuil, caractéristique intrinsèque du cristal, nécessaire

pour activer le mécanisme. Une augmentation de la température diminue ce seuil, mais le processus de glissement peut avoir lieu à basse température si le niveau de contrainte locale est suffisamment élevé.

Pour une dislocation coin, le plan de glissement est unique et défini par la direction du vecteur de Burgers. Pour une dislocation vis, le vecteur de Burgers étant colinéaire au plan de glissement, tous les plans passant par la ligne de dislocation sont de potentiels plans de glissement.

Les plans de glissement sont en général les plans les plus denses du cristal, comme les plans  $\langle 111 \rangle$  dans les structures cubiques à faces centrées, mais le glissement est facilité par la proximité des atomes du plan considéré.

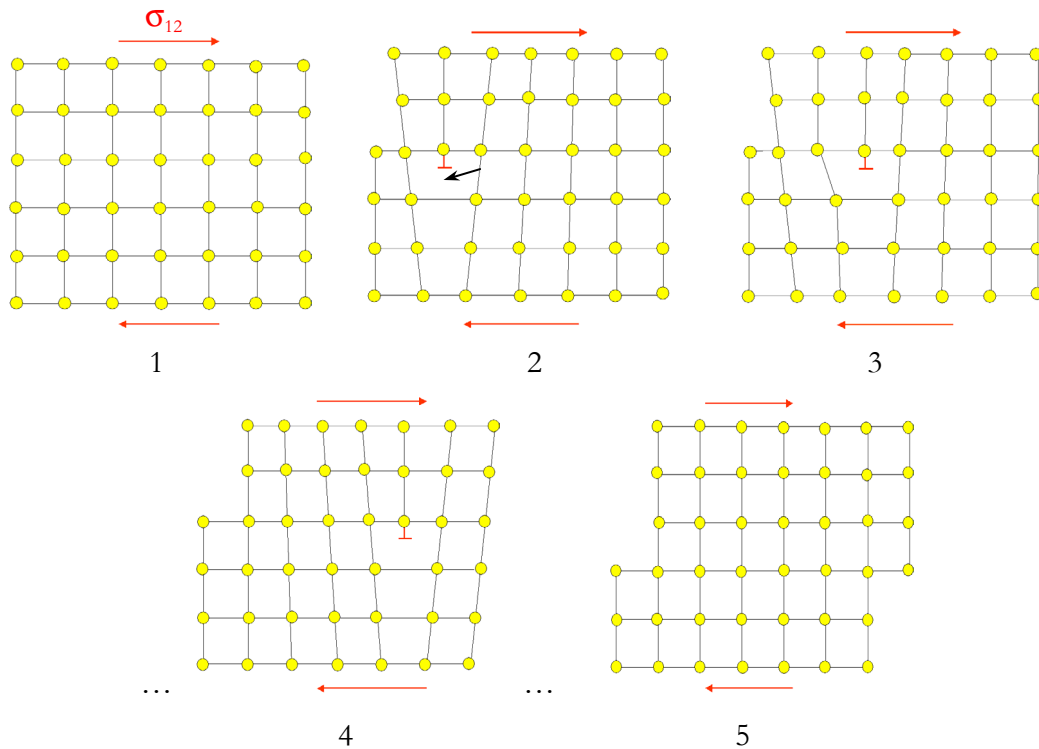


Figure 2.19 : Déplacement par glissement d'une dislocation sous l'action d'une contrainte de cisaillement  $\sigma_{12}$ , d'après Lemaitre et Chaboche (1996) : Le cristal est soumis à une contrainte de cisaillement  $\sigma_{12}$  (1) suffisante pour rompre localement une liaison atomique et générer une dislocation (2) qui se déplace dans le cristal (3et 4). Chaque étape élémentaire requiert le basculement d'une seule liaison atomique, jusqu'au cisaillement du cristal (5).

Si l'on considère un cristal de hauteur  $h$  et de longueur  $l$  contenant une dislocation localisée en  $A$  et qui sous l'action d'une contrainte de cisaillement  $\sigma_{12}$  se déplace en  $A'$ , il est possible d'évaluer la vitesse de déformation du cristal,  $\dot{\epsilon}$ . En effet, lorsque que celle-ci aura traversé le cristal, il en résultera un cisaillement  $\epsilon = \frac{b}{h}$ , avec  $b$ , l'épaisseur de la couche ; donc en se déplaçant de  $A$  en  $A'$ , seule une fraction  $\delta\epsilon$  de  $\epsilon$  a été réalisée :

$$\delta\epsilon = \frac{b}{h} \frac{\delta x}{l} \quad [2.2]$$



Si  $\delta t$  est la durée du déplacement  $\delta x$ , on peut écrire :

$$\dot{\epsilon} = \frac{b}{hl} V \quad [2.3]$$

avec  $V = \frac{\delta x}{\delta t}$  : vitesse de glissement de la dislocation.

En généralisant ce résultat à une distribution de  $N$  dislocation sur la surface  $S = hl$ , avec  $\rho$  la densité de dislocations ( $\rho = \frac{N}{S}$ ), on obtient l'équation de transport d'Orowan :

$$\dot{\epsilon} = \rho b V \quad [2.4]$$

- *Le déplacement des dislocations par montée*

Ce déplacement est lié à la diffusion de lacunes atomiques. Une lacune proche d'une ligne de dislocation sous l'action d'une force extérieure peut recevoir un atome qui appartenait initialement à la dislocation. Toute la rangée d'atomes ayant permuté, la dislocation est montée d'un espace interatomique (Figure 2.20). Contrairement au mécanisme de glissement, le déplacement par montée est indépendant du niveau de contrainte. Le taux de déformation est déterminé par la capacité de diffusion des atomes constituant le minéral.

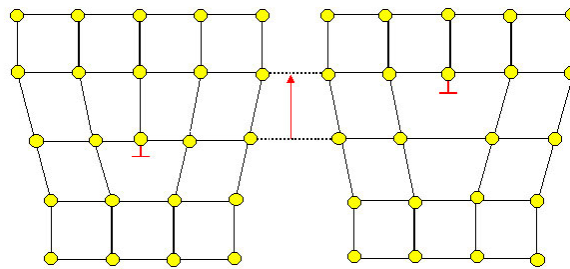


Figure 2.20 : Déplacement d'une dislocation par montée, d'après Lemaitre et Chaboche (1996).

L'activation thermique favorise le déplacement des dislocations ; ces phénomènes se manifestent donc plutôt pour des températures élevées, supérieures à 1/3 de la température de fusion,  $T_f$ . Dans les roches où les liaisons entre atomes sont fortes et empêchent le déplacement des dislocations, ces mécanismes ne peuvent être observés que dans des conditions de température élevée, généralement de 50 % à 90 % de la température de fusion mais parfois même inférieure, suivant la nature de la roche, ses minéraux, et sa teneur en eau structurale comme l'a rappelé Gatelier (2001).

Dans les polycristaux dont les grains sont de petites tailles, on observe une diffusion de ses défauts *intragranulaire* ou *intergranulaire*.

Lors de la diffusion intragranulaire, appelé également fluage de Nabarro-Herring, les éléments du réseau cristallin, ions ou atomes, se déplacent à l'intérieur de celui-ci, générant un mouvement en sens inverse des lacunes du réseau. Ce mécanisme n'est important qu'à température élevée, proche de la température de fusion du minéral. Dans ces conditions, les atomes sont

suffisamment mobiles pour générer une déformation non négligeable par déplacement de matière des zones en compression vers les zones en extension (Figure 2.21).

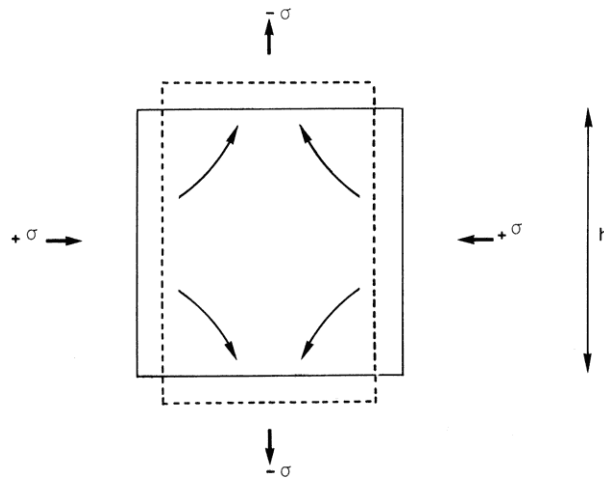


Figure 2.21 : Diffusion des atomes depuis les faces comprimées du cristal vers les faces tendues, d'après Guéguen et Palciauskas (1992).

Il est possible de calculer la vitesse du fluage de Nabarro-Herring ; la démonstration est rappelée par Guéguen et Palciauskas (1992).

Les concentrations de lacunes sur chaque face du cristal sont différentes ; elles valent :

- faces en compression :

$$C_1 = C_0 \exp(-\sigma v / RT) \quad [2.5]$$

- faces en extension :

$$C_2 = C_0 \exp(\sigma v / RT) \quad [2.6]$$

avec :  $C_0$  la concentration à l'équilibre en l'absence de contrainte

$V$ , le volume atomique

$T$ , la température

$R$ , la constante des gaz parfaits

Si le transport de matière s'effectue en sens inverse de la migration des lacunes, le flux de lacunes entre 2 faces vaut d'après l'équation de Fick ( $D_v$  est le coefficient de diffusion des lacunes en volume) :

$$J_v = - D_v \left( \frac{C_2 - C_1}{h} \right) \quad [2.7]$$

Le nombre de lacunes transportées d'une face à l'autre par seconde est :

$$N = - J_v h^2 = D_v (C_2 - C_1) h \quad [2.8]$$

Lorsqu'une couche atomique entière, d'épaisseur  $b$ , est déplacée, il en résulte une déformation :

$$\Delta \varepsilon = \frac{b}{h} \quad [2.9]$$

Une couche représente un nombre de lacunes égal à :

$$n = \frac{bh^2}{b^3} \quad [2.10]$$

Donc pour N lacunes, la déformation produite en 1 seconde s'écrit :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{b^3}{h^3} N = \frac{Nv}{h^3} \quad [2.11]$$

v représentant le volume atomique.

Si la contrainte est faible et la température élevée, on peut écrire :

$$N = D_v(C_2 - C_1) h \cong \frac{2\sigma D}{RT} h \quad [2.12]$$

Avec  $D = C_0 v D_v = D_0 \exp(-E/RT)$

D'où l'expression de la vitesse de fluage de Nabarro-Herring (diffusion) :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\sigma v}{RT} \frac{D}{h^2} \quad [2.13]$$

$\dot{\varepsilon}$  est donc une fonction linéaire de  $\sigma$  mais varie avec l'inverse du carré de la hauteur du cristal et de façon exponentielle avec la température dans l'expression de D. Le fluage par diffusion domine donc à haute température et pour des grains de petite taille.

Lors de la diffusion intergranulaire, ou fluage de Coble, les atomes se déplacent dans les joints de grains. Ce mécanisme plus rapide, qui intervient à des températures moins élevées que le fluage de Nabarro-Herring, engendre des déformations plus importantes.

Les mécanismes décrits ici se manifestent lors d'essais de fluage et de chargement quasi statique. Il est important de noter que d'après *Cristescu et Hunsche* (1997), la relaxation des contraintes ne génère pas de modification de la microstructure du matériau.

### **2.3.4 Mécanismes d'écoulement visqueux à l'échelle des grains**

Alors qu'à l'échelle atomique, les déformations viscoplastiques s'expliquent par des déplacements des défauts du réseau cristallin, à l'échelle des grains, d'autres mécanismes peuvent être identifiés : le fluage granulaire, le fluage cataclastique, les phénomènes de dissolution-recristallisation ou le mûlage.

La qualité et la quantité du ciment liant les grains d'une roche peuvent permettre des glissements et des rotations des grains les uns par rapport aux autres et donc une déformation des agrégats. Le frottement interne qui ralentit le processus lui confère un aspect visqueux, appelé fluage granulaire.

Le fluage cataclastique se manifeste par le développement d'un réseau de microfissures dû au broyage des grains sous l'effet d'un chargement (Figure 2.22). Comme le fluage granulaire, ce mécanisme de déformation ne nécessite pas d'activation thermique et peut donc se produire à température ambiante.

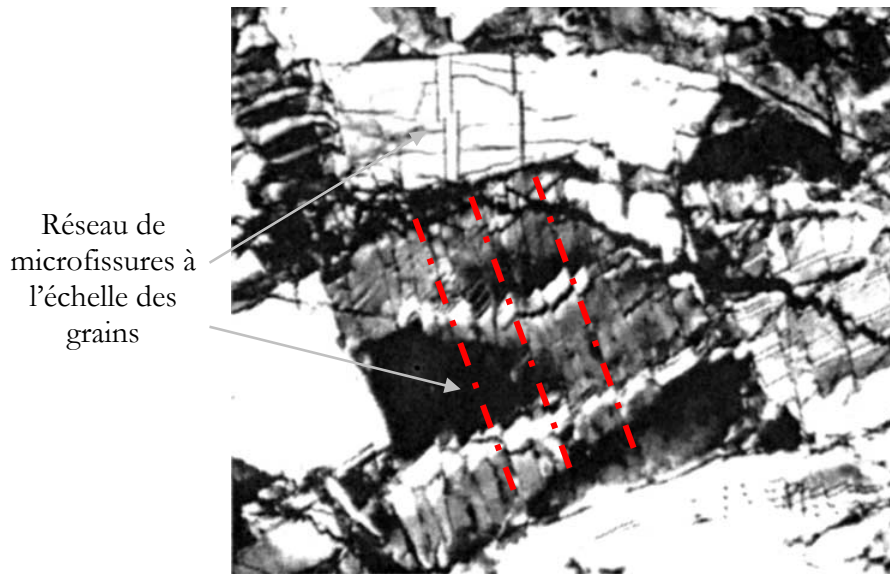


Figure 2.22 : Fluage cataclastique mis en évidence dans une roche quartzo-feldspathique, agrandissement  $\times 20$ , d'après Tullis et Yund (1987).

Le phénomène de dissolution-recristallisation se produit en présence d'un fluide interstitiel, dans des conditions de pression et de température permettant la dissolution sous contrainte des grains au niveau de leurs points de contact. Le fluide interstitiel formant un film d'épaisseur microscopique entre les grains, sans circulation, suffit à provoquer une dissolution des minéraux sur les faces les plus comprimées. La matière dissoute est transportée par diffusion et une recristallisation est possible sur les faces les moins comprimées (Gratier, 1983).

Le mécanisme de déformation viscoplastique par mâclage mécanique est illustré à la Figure 2.23. Ce mécanisme est couramment observé dans les cristaux de calcite. Toute une partie du cristal est déformée par le déplacement d'une ou plusieurs rangées d'atomes. Ce mécanisme modifie donc partiellement la structure même du réseau cristallin.

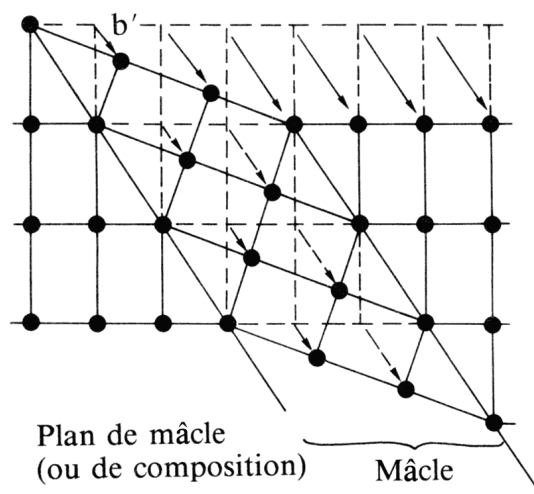


Figure 2.23 : Formation d'une macle mécanique, d'après Adda et al. (1979).

### 2.3.5 Mécanismes de déformations viscoplastiques à température ambiante

D'après les phénomènes explicités dans les paragraphes précédents, à température ambiante le comportement mécanique différé des roches peut s'expliquer par le déplacement de dislocations, par le phénomène de dissolution/recristallisation, ainsi que par la détérioration différée de la microstructure c'est-à-dire le fluage cataclastique et granulaire.

En effet, même à température ambiante, certains minéraux, comme la calcite, l'halite, le gypse ou le pyroxène, montrent une mobilité importante des dislocations (*Carter et al.*, 1981). Dans le quartz et la calcite, *Du Bernard et Labaume* (2002) ont pu observer des phénomènes d'écoulement par dissolution/recristallisation même à basse température. Cependant, la plupart des cristaux à température ambiante, et à une pression de l'ordre du MPa, se déforment par broyage des grains. Le fluage cataclastique est donc prédominant à cette température.

### 2.3.6 Synthèse

*Keary et Vine* (1991) ont synthétisé les différents types d'écoulement visqueux pouvant se manifester dans les roches. Sur la Figure 2.24, on retrouve :

- l'écoulement fragile dont les mécanismes dominant sont le fluage granulaire et le fluage cataclastique,
- l'écoulement ductile, plastique dû aux déplacements de dislocations par glissement ou montée,
- l'écoulement ductile viscoplastique caractérisé par des glissements le long des joints de grains, diffusion d'atomes (fluage de Coble) et une recristallisation sur les surfaces perpendiculaires à la contrainte majeure,
- l'écoulement viscoplastique par diffusion avec, à température élevée, une diffusion intragranulaire (fluage de Nabarro-Herring) qui s'ajoute à la diffusion intergranulaire.

Il est possible de tracer pour chaque minéral un diagramme des mécanismes de déformation dominants en fonction du déviateur de contrainte appliqué et de la température (diagramme d'Ashby). Ces diagrammes obtenus de façon expérimentale pour les matériaux monophasés sont très difficiles à tracer pour les roches dont la composition minéralogique est polycristalline (*Frost et Ashby*, 1982). De plus, des phénomènes liés à leur composition, leur anisotropie de structure, leur hétérogénéité peuvent venir se superposer aux mécanismes décrits ci-dessus, si bien que l'étude individuelle de chacun de ses minéraux constitutifs ne permet pas de prévoir le comportement mécanique différé d'une roche.

Sur la Figure 2.25, sont représentés les mécanismes de déformations du sel gemme en fonction de la température et du niveau de contrainte du logarithme de  $\sigma/\mu$ , avec  $\sigma$  la contrainte déviatorique et  $\mu$  le module de cisaillement. On y distingue quatre zones où les mécanismes sont bien identifiés : écoulement sans défaut pour de forts déviateurs de contrainte, glissement des dislocations, montrée des dislocations, fluage par diffusion, et une zone où les mécanismes sont indéfinis pour de faibles températures et de faibles déviateurs. La Figure 2.26 et la Figure 2.27 présentent respectivement les cartes des mécanismes de déformation des cristaux de calcite et de quartz en fonction de la température et du déviateur de contrainte.

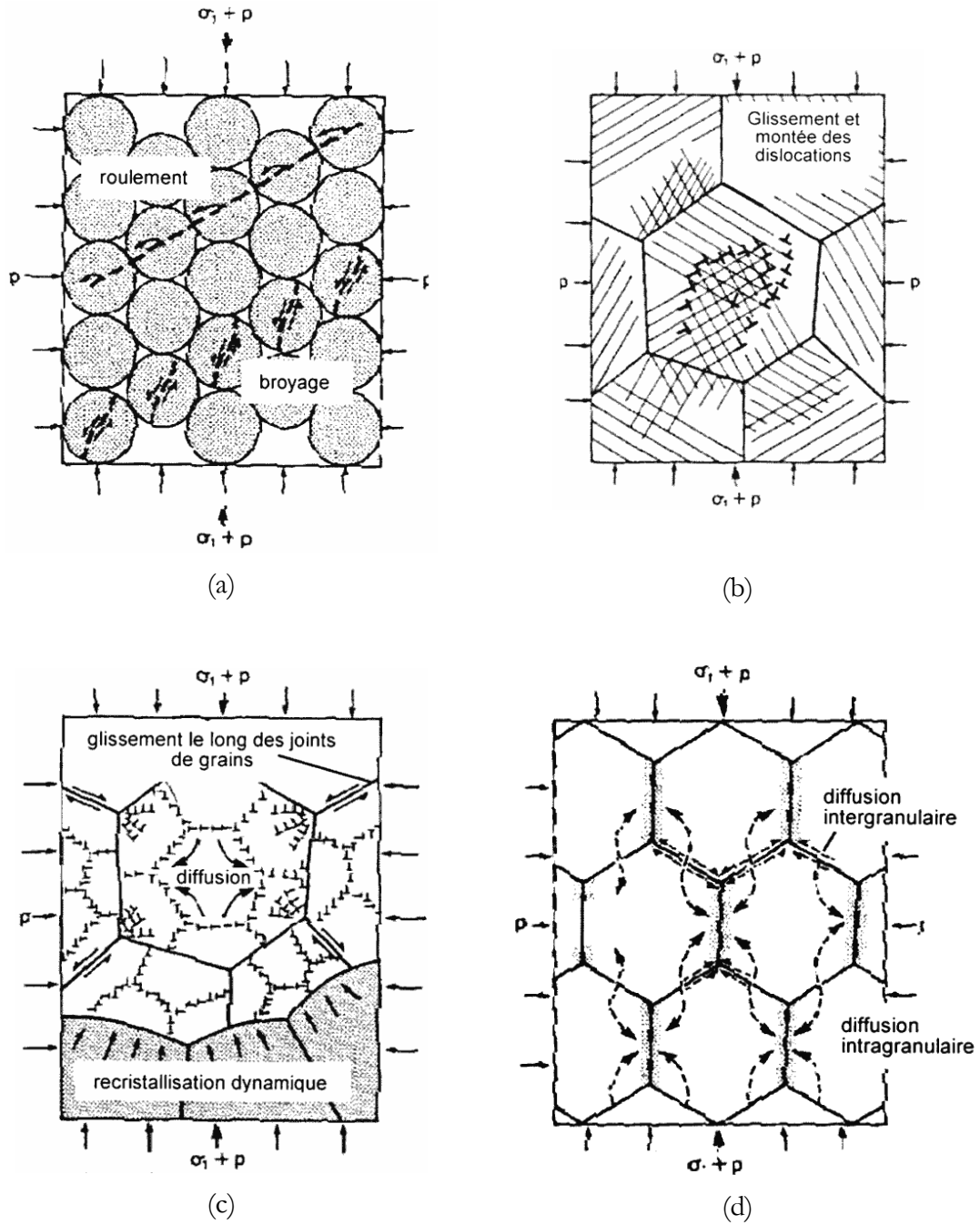


Figure 2.24 : Mécanismes d'écoulement anélastiques dans les roches d'après Keary et Vine (1991) :  
 (a) : écoulement fragile ; (b) : écoulement ductile, plastique ;  
 (c) : écoulement ductile viscoplastique ; (d) : écoulement viscoplastique

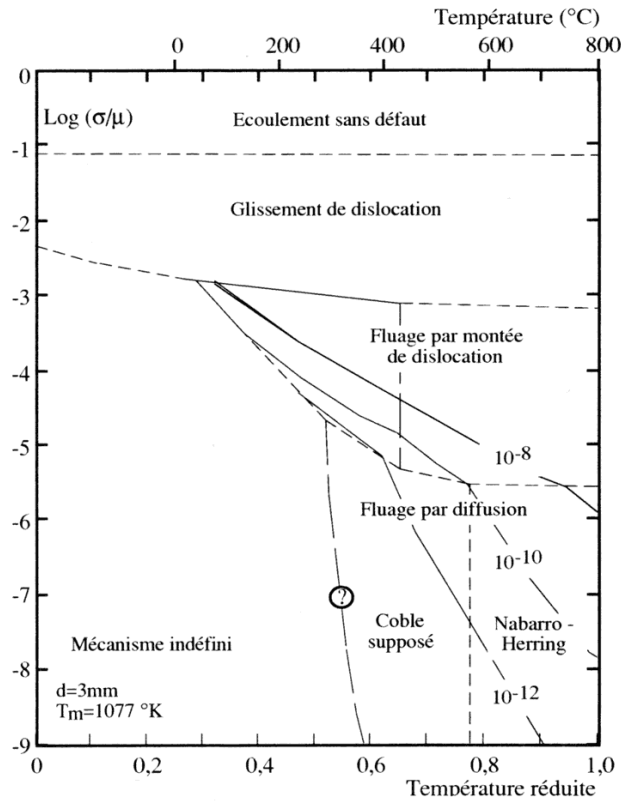


Figure 2.25 : Mécanismes de déformations du sel gemme en fonction de la température et du logarithme de  $\sigma/\mu$ , avec  $\sigma$  la contrainte déviatorique et  $\mu$  le module de cisaillement, d'après Munson et Dawson (1982).  $d$  est la taille des grains et  $T_m$  la température de fusion.

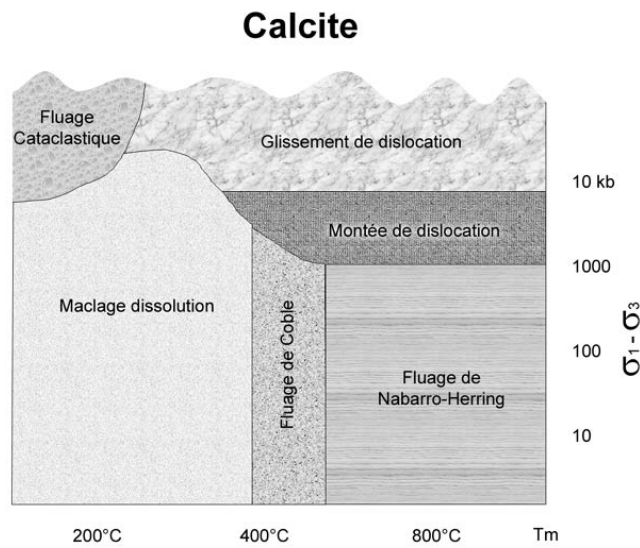


Figure 2.26 : Mécanismes de déformation de la calcite en fonction du déviateur de contrainte et de la température, d'après Knipe et Rutter (1990).

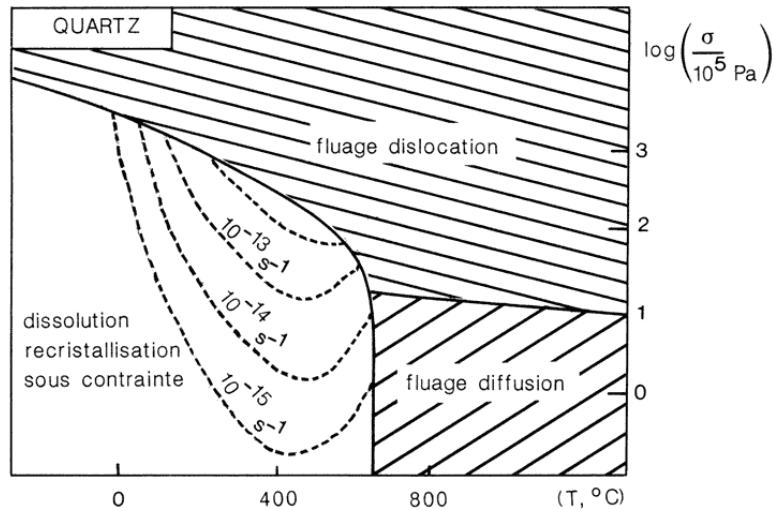


Figure 2.27 : Carte simplifiée des mécanismes de déformations du quartz en fonction de la température et du déviateur de contrainte, d'après Rutter (1976) cité par Guéguen et Palciauskas (1992).

### 2.3.7 Développement de la microfissuration et mécanique de la rupture

Entre les différents cristaux de minéraux constituant une roche, s'établissent des liaisons métalliques, covalentes, ioniques ou électrostatiques qui assurent la stabilité de l'ensemble. Comme nous l'avons vu, cette structure granulaire peut comporter certains défauts (dislocations) qui sont alors la source du développement de microfissures. De plus, lorsqu'un matériau, contenant déjà des discontinuités (*pré-existantes*) est soumis à une contrainte déviatoire croissante, de nouvelles fissures, dites *secondaires*, apparaissent et se propagent dans le matériau. La nucléation et la croissance de ces microfissures conduisent, après coalescence, à la rupture macroscopique de la roche bien avant que le seuil de contrainte de rupture des liaisons atomiques ne soit atteint.

Griffith (1924) a expliqué cette observation expérimentale en étudiant le problème de la rupture des solides avec une approche énergétique. Il a démontré qu'au voisinage des défauts la concentration de contrainte peut atteindre la limite théorique de rupture des liaisons atomiques. En effet, au cours de leur déplacement, les dislocations peuvent venir buter contre les obstacles que constituent pour elles les joints de grains ou les inclusions au sein de la roche. Elles s'accumulent alors sur l'obstacle engendrant, au niveau de la tête de l'empilement, une forte concentration de contrainte. Selon la théorie de Griffith, les surfaces de séparation granulaire qui concentrent les contraintes internes aux extrémités des microfissures permettent la nucléation de nouvelles fissures ou l'amorce de propagation de fissures existantes. Ce mécanisme est schématisé sur la Figure 2.28 pour une fissure elliptique inclinée arbitrairement par rapport à la direction principale de compression. Dans un milieu élastique linéaire, isotrope, en déformation plane, la contrainte locale critique de traction se concentre en des points situés sur les lèvres de la fissure près de ses deux extrémités. Lorsque le déviateur dépasse un seuil critique, deux fissures secondaires apparaissent en ces points et se propagent en s'orientant dans la direction de stabilité maximale, c'est-à-dire dans la direction de la contrainte principale majeure de compression. Cette amplification de la microfissuration s'accompagne généralement d'une augmentation de volume.



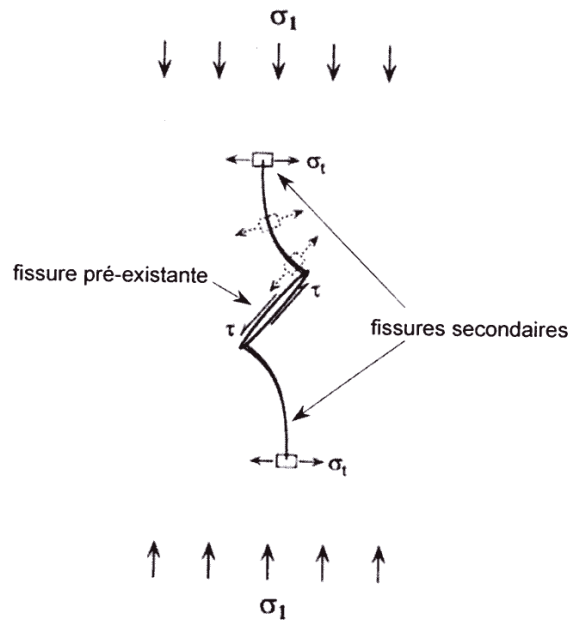


Figure 2.28 : Schéma de propagation d'une fissure pré-existante, d'après Eberhardt et al. (1999).  $\sigma_1$  est la contrainte principale majeure de compression,  $\sigma_t$  la contrainte locale en traction et  $\tau$  la contrainte locale en cisaillement.

Le critère de Griffith est basé sur une relation linéaire entre l'énergie dissipée par la propagation d'une fissure et la longueur de la fissure nouvellement créée lors de la propagation :

$$dW_s = 4\gamma \cdot dc \quad [2.14]$$

avec :  $dW_s$  l'énergie dissipée par la propagation de la fissure

$\gamma$ , l'énergie spécifique de surface, caractéristique du matériau

$dc$ , la longueur de fissure créée.

Dans son analyse, Griffith considère que l'énergie dissipée par la propagation de la fissure est uniquement due à la création de nouvelles surfaces, comme si la rupture était instantanée. En réalité, d'autres formes de dissipation d'énergie doivent être prises en compte au cours de la propagation de la fissure, en particulier l'énergie cinétique liée à son accélération. Cette extension de l'analyse de Griffith a été proposée par Mott (1948).

Pour un solide élastique contenant une fissure, le bilan énergétique du système conduit à exprimer l'énergie totale  $W$  comme la somme des efforts extérieurs,  $W_{ext}$ , de l'énergie de déformation élastique  $W_{elas}$ , de l'énergie de surface  $W_s$  dissipée par la création de nouvelles surfaces de fissure et de  $W_{cin}$ , l'énergie cinétique liée à la propagation de la fissure :

$$W = W_{ext} + W_{elas} + W_s + W_{cin} \quad [2.15]$$

Au cours de la propagation d'une fissure de la longueur  $2c$  à la longueur  $2(c+dc)$ , la conservation de l'énergie totale s'écrit :

$$\frac{\partial W}{\partial c} = \frac{\partial W_{ext}}{\partial c} + \frac{\partial W_{elas}}{\partial c} + \frac{\partial W_s}{\partial c} + \frac{\partial W_{cin}}{\partial c} = 0 \quad [2.16]$$

Le taux de restitution d'énergie,  $G$ , est défini par :

$$G = -\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial c} (W_{\text{elas}} + W_{\text{ext}} + W_{\text{cin}}) \quad [2.17]$$

La propagation de la fissure sera stable si l'énergie cinétique reste constante au cours de la propagation, soit :

$$\frac{\partial W_{\text{cin}}}{\partial c} = 0 \quad [2.18]$$

Les équations [2.2] et [2.5] donne la condition de stabilité :

$$G = 2\gamma \quad [2.19]$$

La propagation devient instable si l'énergie cinétique croit :

$$\frac{\partial W_{\text{cin}}}{\partial s} > 0 \quad [2.20]$$

$$\text{soit : } G > 2\gamma \quad [2.21]$$

Selon l'évolution de  $G$  au cours de l'avancement de la fissure, le mode de propagation peut rester stable ou devenir instable (Figure 2.29). Dans le plan force-déplacement,  $F-u$ , la courbe  $G=2\gamma$  donne donc la limite entre la zone de propagation stable et la zone de propagation instable des fissures.

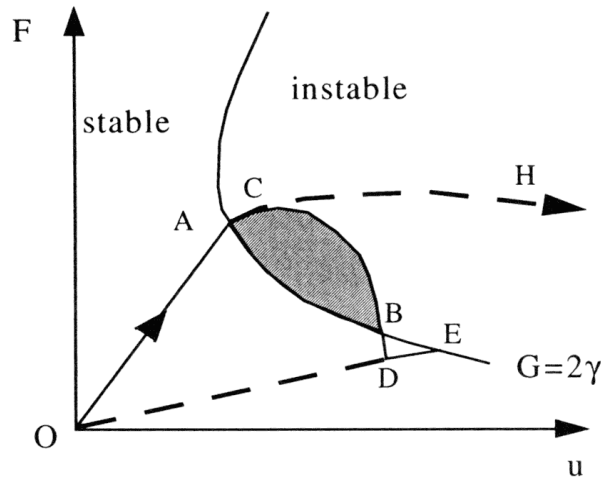


Figure 2.29 : Représentation dans le plan force-déplacement  $F-u$  des modes de propagation d'une fissure, d'après Amitrano (1999).

La limite de propagation est donnée par la courbe  $G = 2\gamma$ . Tant que la charge reste faible, la courbe suit la loi d'élasticité linéaire,  $F=K.u$  avec  $K$ , la rigidité du solide (chemin  $OA$ ). Si la courbe de charge dépasse le critère (point  $C$ ), la propagation devient instable et peut mener l'échantillon à la rupture (chemin  $CH$ ) ou la fissure peut retrouver un état de stabilité après une certaine propagation (chemin  $CBD$ ). La propagation reprendra alors dès que le critère sera de nouveau atteint (point  $E$ ).

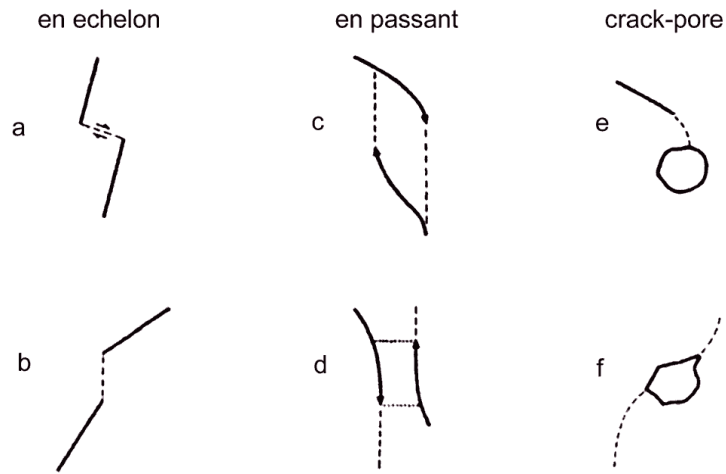


Figure 2.30 : Schéma des principaux modes d'interaction de microfissures, d'après Kranz (1979).  
La contrainte déviatoire est verticale.

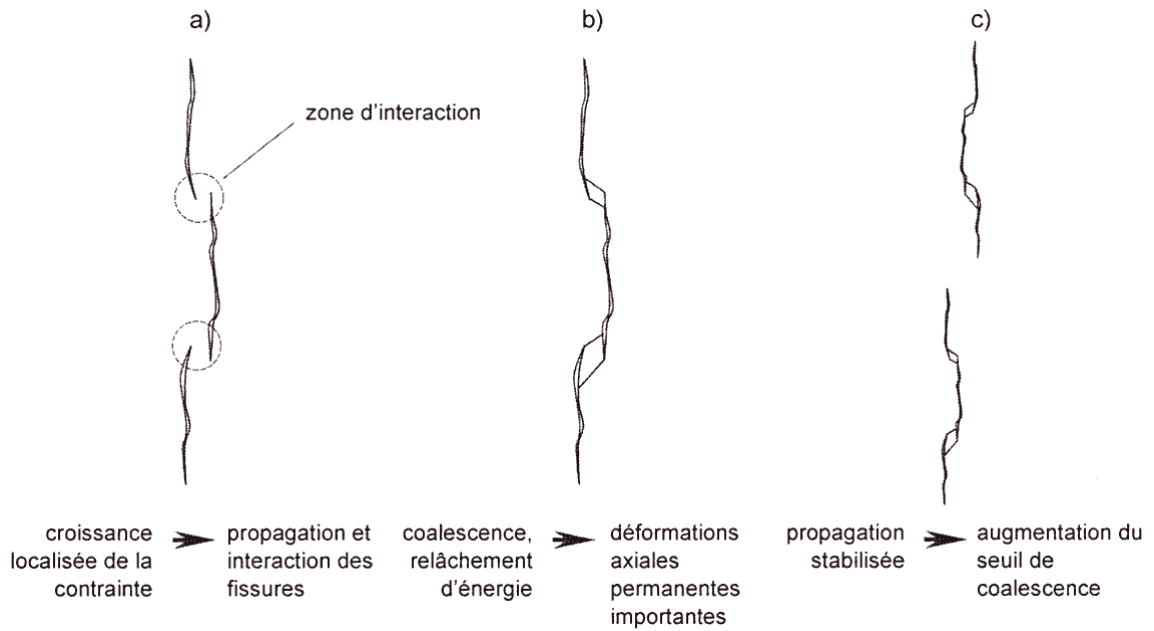


Figure 2.31 : Concept de coalescence des microfissures accompagnée de déformations permanentes axiales importantes, d'après Eberhardt et al. (1999)

Cependant, l'apparition d'une fissure macroscopique dans une roche soumise à un état de contraintes de compression ne résulte pas de la propagation d'une seule microfissure pré-existante mais de l'interaction et de la coalescence d'un ensemble de micro-discontinuités. Trois mécanismes fondamentaux d'interaction ont été observés dans le granite de Barre par *Kranz* (1979) ; leurs représentations schématiques sont données à la Figure 2.30.

*Eberhardt et al.* (1999) ont soumis des échantillons de granite du Lac du Bonnet à une sollicitation uniaxiale cyclique. Alors que le niveau de contrainte excédait à chaque cycle le seuil d'endommagement de la roche, la nucléation de nouvelles fissures n'a pas été observée. En revanche, la propagation et la coalescence des microfissures pré-existantes ont généré des fissures de taille plus importante et une rupture selon un plan bien défini. Pour expliquer cette observation, les auteurs ont émis l'hypothèse que la coalescence des petites fissures pré-existantes pouvait engendrer des fissures longues dont la pointe se trouverait dans des zones potentiellement plus stables ce qui augmenterait le seuil de propagation (Figure 2.31).

## **2.4 Paramètres influençant le comportement différé**

### ***2.4.1 Potentiel de fluage***

La connaissance de la composition minéralogique ne suffit pas pour prévoir l'aptitude au fluage d'une roche. Cependant, son comportement rhéologique lors d'essais de compression simple permet d'estimer son potentiel de fluage en la classant dans l'une des trois types de roches définies par *Morlier* (1966) :

- les roches élasto-fragiles
- les roches viscoélastiques avec serrage
- les roches viscoplastiques

Les roches élasto-fragiles sont des roches dures, telles que les granites, gneiss ou calcaires qui ne présentent pas de propriétés visqueuses à l'échelle des durées d'utilisation des ouvrages de génie civil. Jusqu'à une contrainte égale à 80 % de leur résistance à la compression simple, seul un fluage primaire se développe et la déformation tend rapidement vers une asymptote horizontale.

L'amplitude des déformations des roches viscoélastiques avec serrage, comme les gypses, marnes ou calcaires tendres, est beaucoup plus importante et peut atteindre 40 % des déformations instantanées. De plus, après un déchargement complet de ces roches, on observe souvent une restitution progressive des déformations différées (recouvrance) qui ne sont donc pas complètement irréversibles.

Lors d'essais de fluage sur des roches viscoplastiques comme la craie ou le sel gemme, les trois phases de fluage sont couramment observées, avec une dilatation de l'échantillon initialisée au cours du fluage secondaire. Les déformations différées peuvent avoir une amplitude bien supérieure à celle des déformations instantanées et elles sont de plus quasiment irréversibles.

S'inspirant de la classification rhéologique de *Morlier* pour évaluer le potentiel de fluage d'une roche, *Özgenoğlu* (1998) a utilisé un diagramme ternaire sur les côtés duquel les déformations élastiques, plastiques et visqueuses sont quantifiées (Figure 2.32). Le positionnement d'une roche dans ce diagramme donne une idée de sa rhéologie en évaluant l'amplitude des déformations instantanées par rapport aux déformations différées. L'étude du comportement différé des roches nécessite souvent des essais de fluage de longue durée pour évaluer le potentiel de fluage.

Cependant, selon Özgenoğlu, une roche peut être considérée comme visqueuse si la vitesse de fluage lors de la phase secondaire dépasse  $3,3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

Des essais de fluage réalisés sur onze roches différentes lui ont permis de classer celles-ci en fonction de leur comportement différé. Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 2.2.

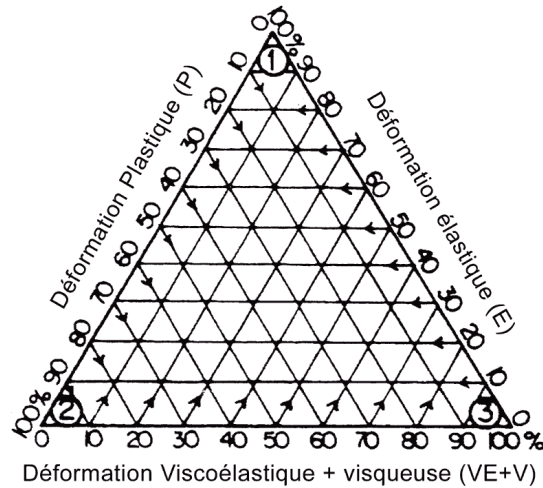


Figure 2.32 : Diagramme ternaire de Özgenoğlu (1998).

Roche	Déformations [%]			Classification
	Elastiques	Plastiques	Viscoélastiques et visqueuses	
Andésite	90,26	0,72	9,03	Elastique
Basalte	93,48	0,95	5,57	Elastique
Gabbro	92,48	1,73	5,79	Elastique
Gypse	83,63	4,21	12,16	Visco-élastique
Marbre 1	95,95	1,82	2,23	Elastique
Marbre 2	95,11	1,33	3,56	Elastique
Marne 1	87,44	0,75	11,81	Visco-élastique
Marne 2	67,46	5,21	27,33	Visco-élastique
Grès	69,17	8,92	21,91	Visco-élastique
Travertine	90,43	1,55	8,02	Elastique
Tuff	90,00	1,97	8,03	Elastique

Tableau 2.2 : Classification rhéologique de différentes roches, d'après Özgenoğlu (1998).

Le comportement différé d'une roche est influencé par différents paramètres. Pour le sel gemme, roche isotrope de minéralogie homogène, *Dusseault et Fordham* (1993), citent :

- Paramètres extrinsèques : le tenseur de contrainte appliqué  
la vitesse de déformation  
la température
- Paramètres intrinsèques : la taille des grains  
la porosité

A cette liste, on peut ajouter pour d'autres roches : la teneur en eau et la composition minéralogique.

### 2.4.2 Influence de l'état de contrainte

L'influence de la pression de confinement, qui permet de reproduire les contraintes *in situ*, sur le mode de déformation et de rupture des roches en compression, n'est plus à démontrer. Il détermine en particulier le mode de rupture de l'échantillon et la transition fragile-ductile, comme on peut le voir sur la Figure 2.33. La rupture fragile se manifeste par apparition de bandes de cisaillement ou de colonnettes. La rupture ductile est caractérisée un écoulement cataclastique sans phénomène de localisation ainsi que, généralement, une déformation de l'échantillon en tonneau dû au frettage sur ses bases.

Au niveau microscopique, l'application d'un confinement important a un effet stabilisateur sur la propagation des fissures. La rupture fragile résulte de la coalescence des microfissures alors que l'écoulement cataclastique se manifeste par une microfissuration homogène de l'échantillon. Les observations sur lames minces d'un calcaire de l'Indiana faites par *Myer et al.* (1992) ont montré que l'application d'un confinement limite à la fois la propagation et l'interaction des fissures. En l'absence de confinement, ils notent une densité élevée de longues fissures qui interagissent pour former les macroruptures. Avec l'application d'un confinement, la densité de fissures devient plus faible ; elles sont aussi plus courtes et distribuées de manière homogène dans l'échantillon.

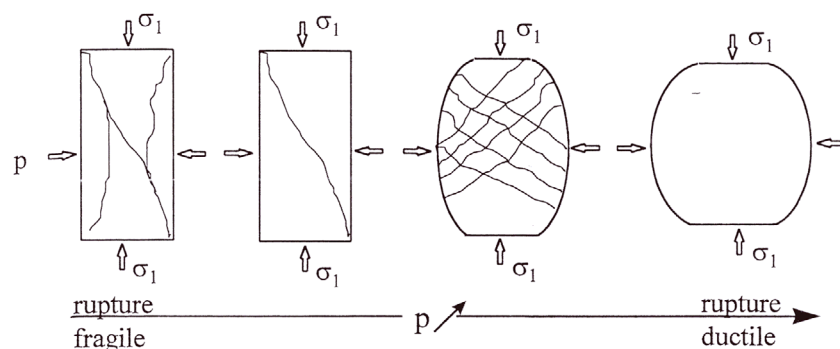


Figure 2.33 : Influence de l'augmentation de la pression de confinement sur le mode de rupture, d'après Gatelier (2001)

Mais l'état de contrainte n'influence pas uniquement le mode de rupture de l'échantillon, il

détermine également le comportement mécanique de la roche.

Lors d'essais de fluage réalisés sur l'argile de Boom (Mol – Belgique), Rousset et Giraud (1996) ont mis en évidence l'existence d'un seuil viscoplastique non nul en deçà duquel il n'y a pas d'effets différés durables (Figure 2.34). Au-delà de ce seuil, une phase de fluage secondaire se développe après stabilisation de la vitesse de déformation. Le niveau de contrainte imposé détermine donc également la réponse mécanique de la roche.

Lors d'un essai de fluage, le déviateur de contrainte appliqué influence le comportement du matériau, mais également la durée de l'essai. Cette observation expérimentale a pu être réalisée sur différents matériaux et par de nombreux auteurs. Gonze (1988), en particulier, est arrivé à cette conclusion d'après les résultats de ses essais de fluage sur le sel (Figure 2.35) : l'augmentation du déviateur de contrainte imposé à cette roche diminue la durée du fluage primaire, fait apparaître le fluage secondaire puis tertiaire en accélérant progressivement la vitesse de déformation.

De la même manière, Lemaitre et Chaboche ont observé qu'une augmentation de la contrainte de fluage imposée à un alliage diminuait le temps nécessaire pour atteindre la rupture de l'échantillon (Figure 2.36). Ils obtinrent des relations linéaires entre  $\sigma$ , la contrainte imposée et le logarithme en base 10 du temps à la rupture,  $t_c$ . De plus, cette diminution de  $t_c$  était bien plus sensible à forte température.

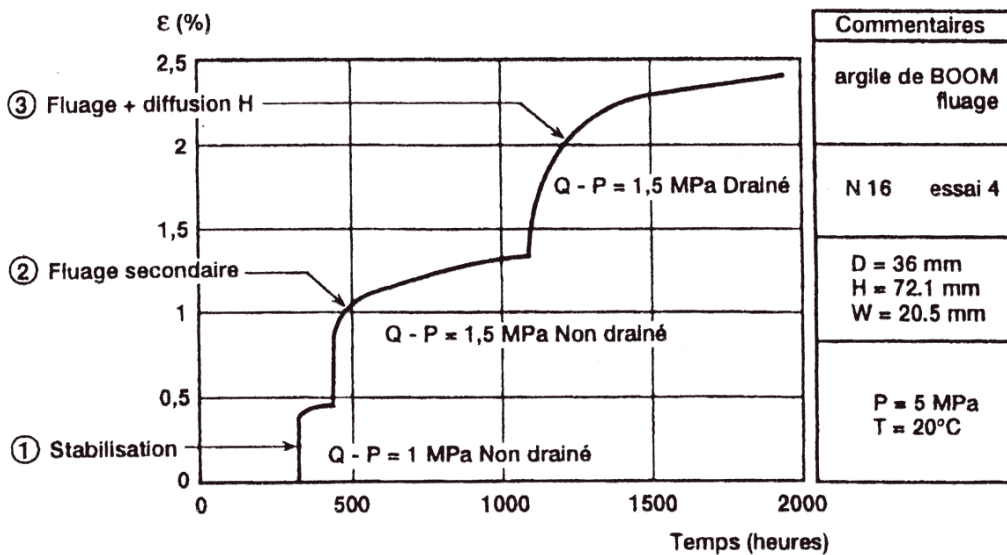


Figure 2.34 : Essai de fluage sur l'argile de Boom d'après Rousset et Giraud (1996).

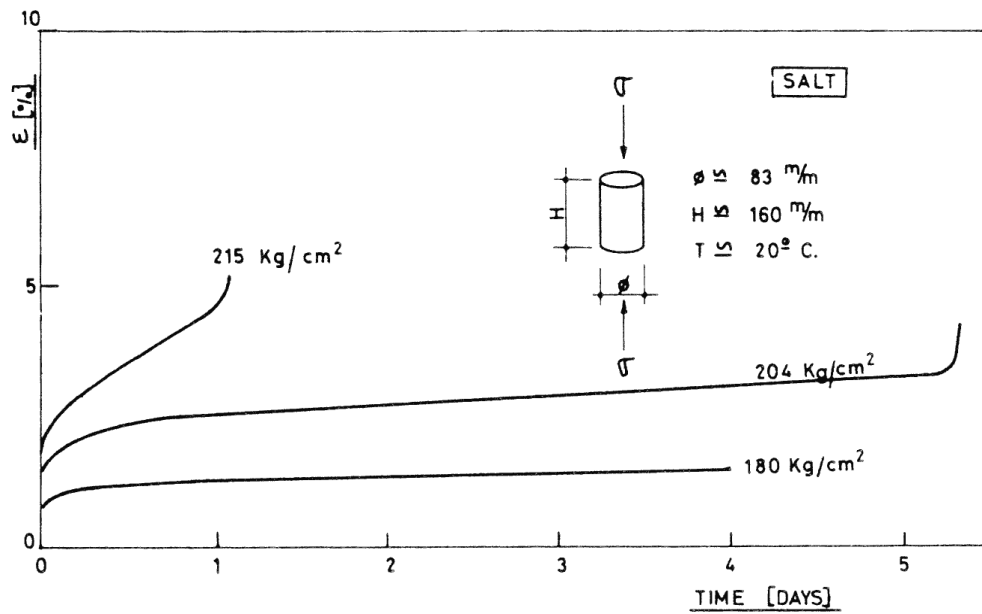


Figure 2.35 : Essai de fluage sur un échantillon de sel gemme, d'après Gonze (1988).

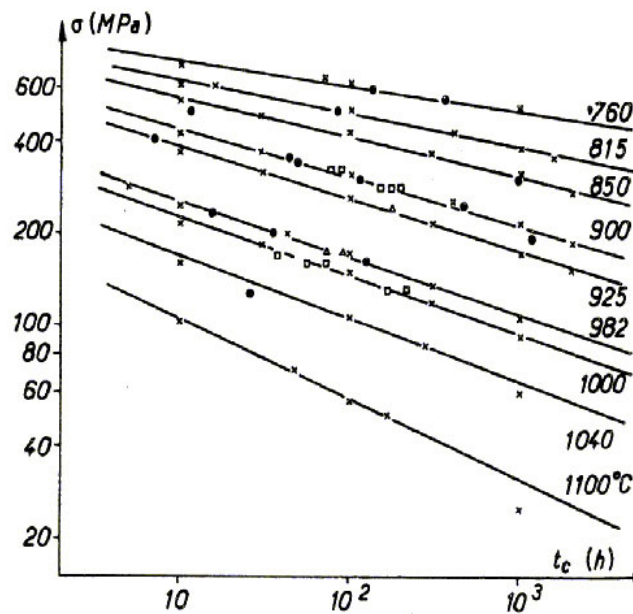


Figure 2.36: Temps à la rupture en fonction de la contrainte de fluage et de la température. Alliage IN 100 (non protégé), d'après Lemaitre et Chaboche (1996).



### 2.4.3 Influence de la vitesse de sollicitation

Même si le comportement différé des roches peut être lié à divers phénomènes physico-chimiques, il est généralement associé à la notion de viscosité qui n'est que la traduction au niveau mécanique de la sensibilité vis à vis de la vitesse de sollicitation. En effet, la vitesse de chargement influence fortement la courbe de réponse contrainte-déformation d'une roche testée en compression, et notamment la résistance maximale mais aussi le comportement pré et post-pic (modules de déformation et chute de contrainte).

Pour mettre en évidence le rôle joué par ce paramètre, *Peng et Podnieks* (1972) ont réalisé une série d'essais de compression simple sur des éprouvettes cylindriques de tuf qu'ils ont testées sur une plage de vitesse de déformation très étendue :  $10^{-7}$  à  $10^{-2}$  s<sup>-1</sup>. Les résultats de ses essais font apparaître une augmentation du pic de contrainte avec la vitesse de déformation ainsi qu'une modification du comportement post-pic (Figure 2.37). Une étude similaire a été réalisée par *Li, Zhao et Li* (1999), sur des échantillons de granite testés en compression triaxiale, en faisant varier la vitesse de déformation et la pression de confinement, notée *c*. Les résultats de cette étude sont présentés sur la Figure 2.38. Ils montrent que pour un confinement, *c*, constant, le déviateur de contrainte à la rupture augmente avec la vitesse de déformation dans un facteur qui dépend de la pression de confinement. Plus le confinement est élevé, moins le déviateur de contrainte est sensible à l'augmentation de la vitesse de déformation. A 20 MPa de confinement, l'augmentation est de 50% lorsque la vitesse de déformation est multipliée par 10 000. Elle n'est que de 5% sous un confinement de 170 MPa.

*Lama et Vutukuri* (1978) ont résumé sur des graphes schématiques l'influence de la vitesse de chargement sur le comportement mécanique de différentes roches testées en compression uniaxiale (Figure 2.39). Cette synthèse tirée des études antérieures montre que les roches homogènes très peu poreuses ayant un comportement élastique sont très peu affectées par une variation de la vitesse de déformation. Pour les autres roches, non seulement le module élastique augmente mais le comportement post pic, la déformation à la rupture et la résistance à la compression simple peuvent également être affectés.

Il est généralement admis que l'augmentation de la vitesse de déformation accroît la fragilité de la roche, diminue la déformation à la rupture, augmente la résistance à la rupture et accentue la chute de contrainte après le pic.

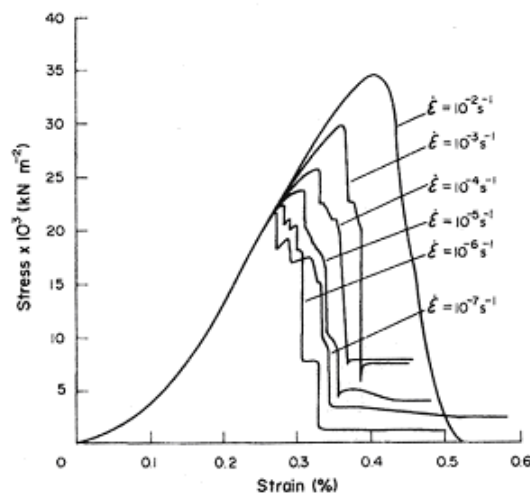


Figure 2.37 : Essais de compression simple sur un tuf : influence de la vitesse de déformation, d'après *Peng et Podnieks* (1972)

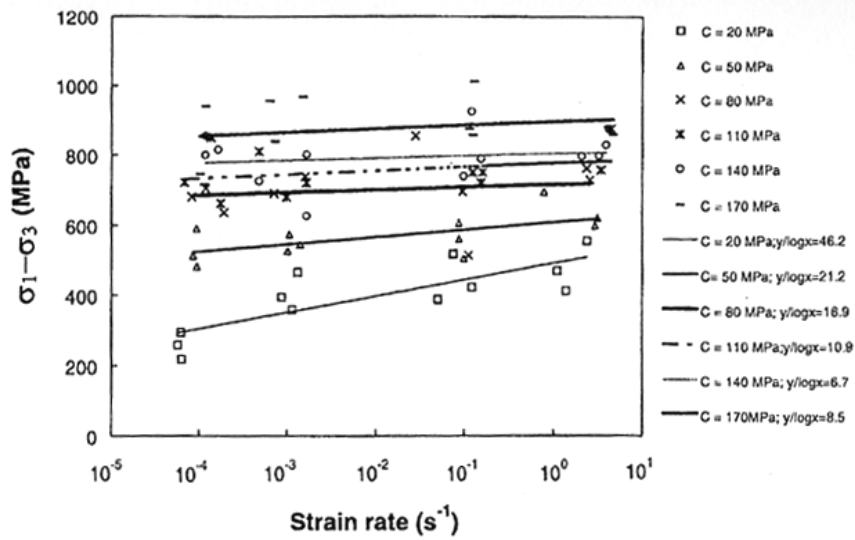


Figure 2.38 : Variation de la résistance à la rupture avec la vitesse de déformation pour différentes pressions de confinement, d'après Li et al. (1999).

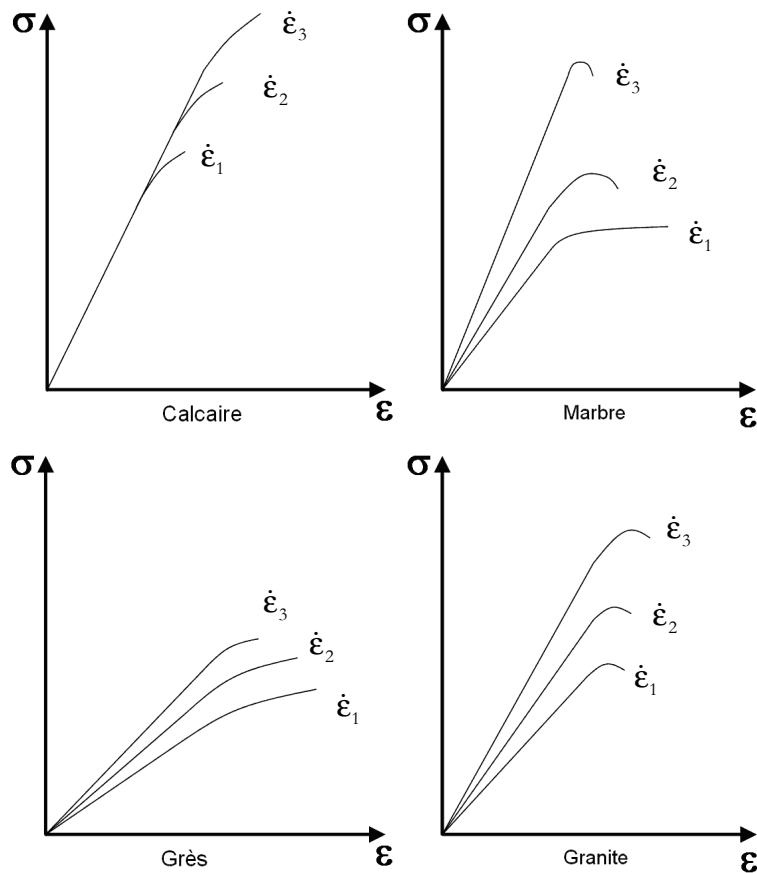


Figure 2.39 : Influence de la vitesse de chargement sur la courbe contrainte-déformation pour différents types de roches, d'après Lama et Vutukuri (1978) :  $\dot{\epsilon}_1 < \dot{\epsilon}_2 < \dot{\epsilon}_3$ .

### 2.4.4 Influence de la température

Des essais de fluage réalisés en laboratoire sur des échantillons de granite, à différentes températures ont permis de mettre en évidence l'influence de la température sur l'amplitude des déformations différées (Figure 2.40). *Push* (1993), précise que des températures comprises entre 20°C (température ambiante) et 100°C ont un effet peu significatif sur les déformations différées mesurées sur les échantillons de granite testés en fluage. En revanche au-dessus de cette limite, l'influence de la température ne peut être négligée. La température augmente très sensiblement l'amplitude des déformations mesurées sous un même déviateur.

De la même manière, une campagne d'essais réalisée en 2001 par l'Andra sur des échantillons d'argilite de l'Est testés en fluage a montré que la température tendait à augmenter l'amplitude des déformations différées et les vitesses de déformation. Ces essais ont été réalisés sous un confinement de 12 MPa, correspondant aux conditions supposées en place (490 à 500 m de profondeur). La Figure 2.41 présente une comparaison des déformations obtenues en fluage, à température ambiante et à 80°C, qui montre clairement l'amplification des phénomènes visqueux par l'augmentation de la température. De plus, sur la Figure 2.42, on constate non seulement une augmentation des vitesses de déformation avec palier déviatorique imposé à l'échantillon mais aussi une augmentation de la vitesse de déformation avec la température pour un palier de déviateur donné. Cependant, il faut noter que les premiers résultats obtenus sur l'argilite de l'Est ont prouvé que l'influence de la température sur les caractéristiques mécaniques de déformabilité, de résistance et d'endommagement n'est pas significative en dessous de 80°C.

La température joue donc un rôle important sur le comportement mécanique visqueux des roches en influençant directement l'amplitude de leurs déformations différées. Elle peut également exercer une influence chimique et accélérer les réactions entre les minéraux constitutifs de la roche et l'eau interstitielle, conduisant à une diminution de la résistance du matériau au cours du temps (*Whittaker et al.*, 1992).

De plus, *Homand-Etienne* (1989), sur la base d'essais réalisés sur des échantillons de granite, marbre, calcaire et grès a pu mettre en évidence un lien entre la porosité des échantillons et la température. Les échantillons sont d'autant moins sensibles à l'augmentation de la température que leur porosité initiale, de pores et de fissures, est grande. En effet, il semble que leur porosité initiale absorbe les inégalités de dilatation et freine donc le développement de nouvelles fissures. L'influence de cette variable peut donc être couplée à d'autres paramètres intrinsèques ou extrinsèques.

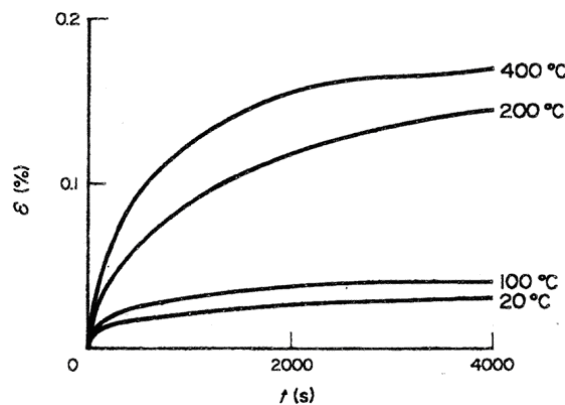


Figure 2.40 : Essais de fluage à différentes températures réalisés sur des échantillons de granite, d'après *Push* (1993).

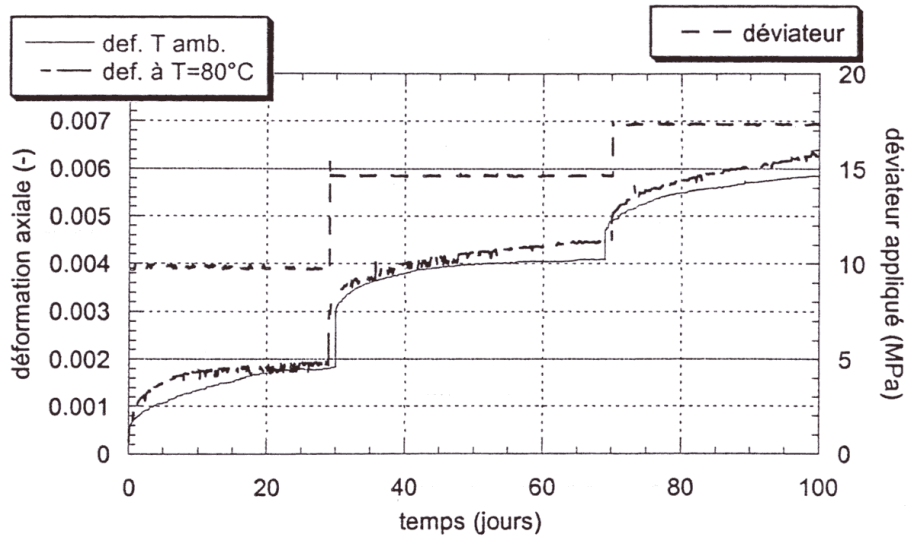


Figure 2.41 : Influence de la température sur le fluage de l'argilite de l'Est, d'après Gasc-Barbier (2002).

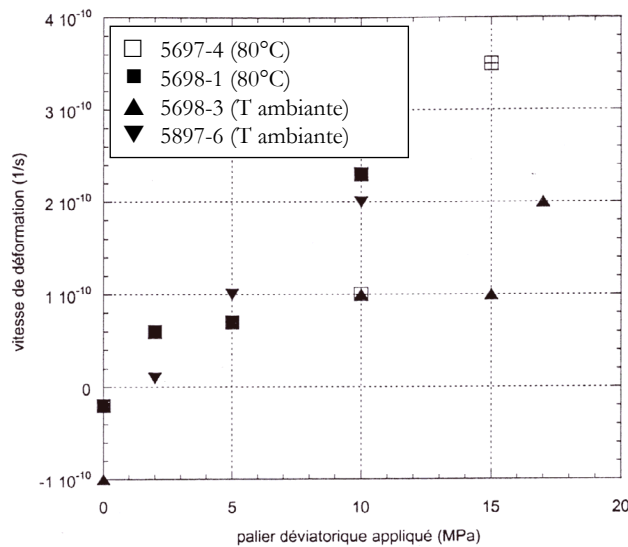


Figure 2.42 : Influence de la température sur les vitesses de fluage de l'argilite de l'Est, d'après Gasc-Barbier (2002).

### 2.4.5 Paramètres intrinsèques

La composition minéralogique d'une roche, la taille des grains qui la composent et sa teneur en eau influencent également son comportement différé.

Poirier (1995) rappelle que le taux de déformation viscoplastique est inversement proportionnel au carré de la taille moyenne des grains pour le fluage de Nabarro-Herring (diffusion intragranulaire) et au cube de la taille moyenne pour le fluage de Coble (diffusion dans les joints de grains). Cependant, la viscosité par diffusion n'est activée que lorsque la température est élevée

( $T > 1/3T_g$ ) et dans des roches dont les polycristaux sont de petite taille. Les déformations viscoplastiques des roches à température ambiante et sous fort déviateur qui sont dues aux déplacements de dislocations semblent être indépendantes de la taille des grains.

En étudiant l'influence de la taille des grains du sel gemme sur le développement de la déformation viscoplastique lors d'essais de fluage, *Lecomte* (1965), a pu observer une diminution du taux de déformation anélastique avec la croissance de la taille des grains : une augmentation de la taille de 0,1mm à 0,63mm réduit l'amplitude des déformations différées d'un facteur 2 environ (Figure 2.43).

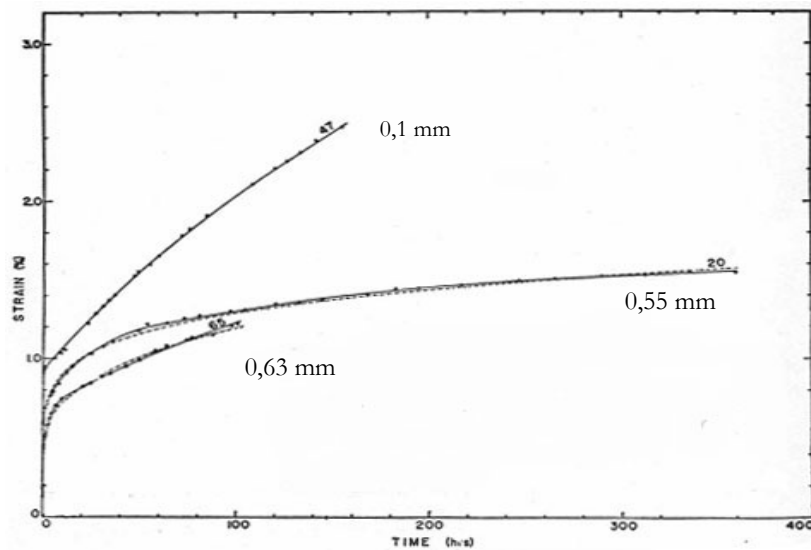


Figure 2.43 : Influence de la taille moyenne des grains sur le fluage du sel gemme, d'après *Lecomte* (1965).

Même peu perméables, les roches présentent une grande sensibilité aux conditions hydriques dans lesquelles elles se trouvent et leur aptitude au fluage augmente avec leur teneur en eau et l'hygrométrie. L'eau peut être présente sous trois formes au sein d'une roche. On distingue généralement :

- L'eau libre qui peut circuler même lorsque la perméabilité de la roche est très faible ( $10^{-8}$  à  $10^{-10}$  m/s).
- L'eau adsorbée à la surface des grains et fortement liée aux particules argileuses pouvant être contenues dans la roche.
- L'eau de constitution qui appartient à la structure moléculaire.

L'eau exerce diverses actions qui dépendent de la composition minéralogique de la roche et de sa porosité. Il n'existe pas de relation directe entre la porosité et la perméabilité des roches. Deux roches de même porosité peuvent avoir des capacités de transfert très différentes selon la taille et la forme de leurs pores et selon le degré de connectivité du réseau poreux. La microporosité ne favorise pas l'écoulement de l'eau libre mais permet la diffusion de l'eau adsorbée par les microstructures et les frontières granulaires. L'eau étant une substance chimiquement agressive, sa présence, même négligeable en volume, cause une altération des liaisons chimiques intercrystallines et lubrifie les frontières granulaires. Elle peut ainsi contrôler la cinétique d'ouverture des fissures, l'adsorption de molécules d'eau pouvant entraîner l'hydrolyse des liaisons covalentes en tête des fissures dans les minéraux silicatés.

Dans les roches silicatées, l'eau agit comme un catalyseur chimique. L'hydrolyse des liaisons silice-oxygène se produit suivant la réaction :



Cette réaction provoque un radoucissement des cristaux de silicates et augmente l'aptitude de la roche au fluage, les liaisons  $\text{H} \cdot \text{H}$  étant moins fortes que les liaisons  $\text{Si}-\text{O}$ . (Griggs, 1967). Ce remplacement de liaisons fortes par des liaisons plus faibles conduit à une altération de la texture, à une augmentation locale des contraintes puis à la rupture.

Dans les roches argileuses, certains minéraux, comme les smectites ou les interstratifiés illites-smectites, permettent l'infiltration de molécules d'eau entre leurs feuillets ce qui augmente sensiblement l'amplitude des déformations différées (gonflement). De plus, les ions compensateurs, comme le potassium  $\text{K}^+$ , qui ont parfois pris place entre deux feuillets d'argile, participent à la résistance au cisaillement jusqu'au dépassement d'un certain taux de déformation.

Les interactions entre particules argileuses et l'eau chargée d'ions peuvent être interprétées physiquement avec le modèle de la double couche développé par Gouy et Chapman au début du siècle. La théorie de la double couche dans les roches argileuses repose sur l'existence d'une couche dite *diffuse* à proximité de la surface chargée négativement des feuillets d'argile. Dans cette couche diffuse, la concentration et la distribution en ions compensateurs sont déterminées par les interactions électrostatiques et les mécanismes de diffusion liés à l'agitation thermique. À l'équilibre, la distribution des cations a la forme d'une double couche électrique avec un gradient de concentration négatif vers l'extérieur des cristallites (Figure 2.44).

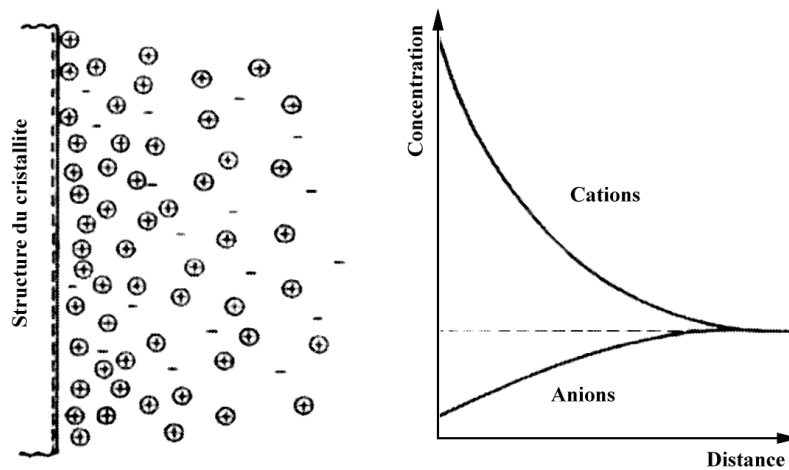


Figure 2.44 : Distribution des ions près de la surface des particules argileuse selon la théorie de la double couche, d'après Mitchell (1991) cité par CFMR (2000).

Valès *et al.* (2004) ont mis en évidence l'influence du degré de saturation sur les propriétés mécaniques de l'argilite de Tournemire. En réalisant notamment des essais de compression triaxiale sur des échantillons présentant des degrés de saturation variant de 20 à 95%, ils ont observé une augmentation de la résistance de la roche pour des degrés de saturation faibles, lorsque la contrainte principale est perpendiculaire aux plans de stratification de la roche. De la même manière, Zhang *et Rothfuchs* (2004) ont observé que la résistance d'un échantillon d'argilite de l'Est séché à l'air libre peut être presque deux fois supérieure à celle d'un échantillon saturé

(41,7 MPa pour l'échantillon sec contre 24,5 MPa pour l'échantillon saturé).

Si la présence d'eau diminue donc la résistance de la roche, elle influence également son comportement visqueux. Dans la plupart de ces essais de fluage, réalisés sur des échantillons de gypse prélevés dans la carrière souterraine de Grozon (Jura), *Hoxha et al.* (2003) ont observé une phase de fluage primaire, suivie par un fluage secondaire qui, en fonction de l'âge de la roche, de l'hygrométrie et de la contrainte, s'est parfois développé jusqu'à une rupture. La Figure 2.45 illustre bien l'influence de l'hygrométrie,  $H_r$ , sur la vitesse des déformations viscoplastiques et l'apparition de la dilatance. L'influence du degré d'hygrométrie sur l'apparition du fluage tertiaire a été également démontrée expérimentalement.

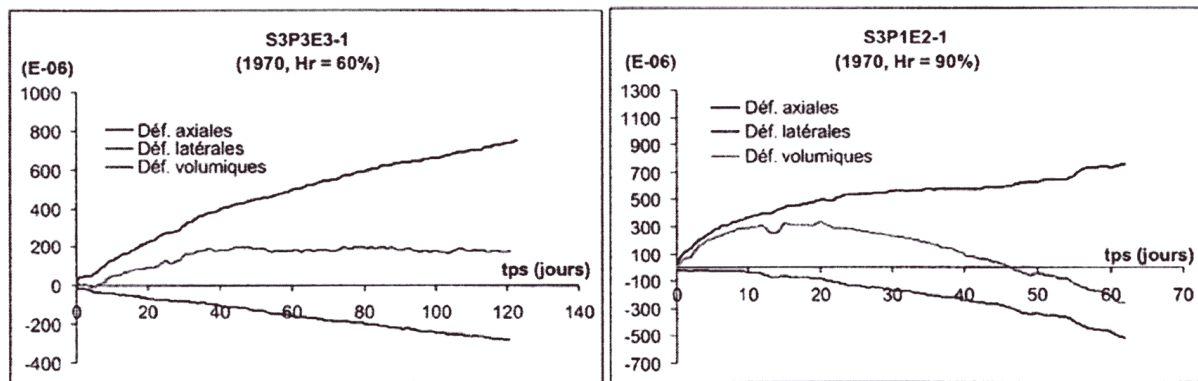


Figure 2.45 : Influence de l'hygrométrie sur le comportement différé d'un gypse, d'après Hoxha et al. (2003).

## 2.5 Déformations des roches anisotropes et mode de rupture en compression simple

De part leurs modes de formation, les roches sédimentaires ou détritiques, et les roches métamorphiques sont généralement anisotropes. Cette anisotropie de structure, souvent assimilable à une orthotropie de révolution, se répercute sur leurs propriétés mécaniques et les essais de laboratoire mettent souvent en évidence des anisotropies de résistance et de modules de déformation dues à la présence de ces plans de stratification, de schistosité ou de foliation.

De manière générale, le comportement d'une roche anisotrope lors d'un essai mécanique dépend de l'orientation du chargement par rapport aux plans d'isotropie et de la résistance à l'interface de ces plans de faiblesse. Pour les roches orthotropes de révolution, l'angle d'orientation des plans d'isotropie peut être défini de deux manières différentes, suivant la convention choisie (Figure 2.46). Dans cette thèse, nous utiliserons l'angle  $\theta$  pour repérer l'orientation de nos échantillons, mais nous avons gardé les notations utilisées dans les travaux des auteurs cités en références qui parfois lui préfèrent l'angle  $\beta$ .

Avant de poursuivre, il faut préciser que les isotropies ou anisotropies décrite ici sont valables à l'échelle de l'échantillon.

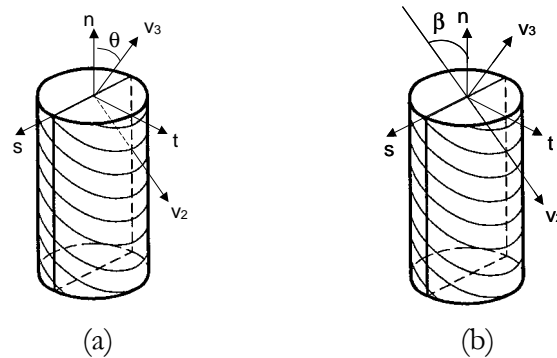


Figure 2.46 : Définition de l'angle d'orientation des plans d'isotropie d'une roche orthotrope de révolution : (a) : angle  $\theta$  entre la normale aux plans d'isotropie et l'axe de révolution de l'éprouvette ; (b) : angle  $\beta$  entre les plans d'isotropie et l'axe de révolution de l'éprouvette.

Lorsque les plans d'isotropie sont perpendiculaires à l'axe de révolution de l'éprouvette,  $\theta = 0^\circ$  et  $\beta = 90^\circ$ .

### 2.5.1 Types d'anisotropie

Les premières études expérimentales sur le comportement des roches anisotropes ont été réalisées à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. On peut trouver un bref historique de ces études dans la synthèse bibliographique de *Kwasniewski* (1993).

En 1930, Müller<sup>2</sup> soumit des échantillons parallélépipédiques et cylindriques de grès et d'argilite à des essais de compression simple avec un chargement parallèle ou perpendiculaire au litage. Comme Bauschinger<sup>3</sup> (1884), Föppl<sup>2</sup> (1900), Prandtl et Rinne<sup>2</sup> (1909), avant lui, il observa l'influence de l'anisotropie sur le comportement élastique et la résistance à la rupture. Il constata, pour ces deux roches, une variation de la résistance à la compression simple et du module d'Young en fonction de la direction de la contrainte par rapport aux plans d'isotropie. En 1949, Lepper et Griggs<sup>2</sup> aboutirent aux mêmes conclusions pour un marbre : la résistance  $\sigma_c$  mesurée perpendiculairement au litage est supérieure à la résistance mesurée parallèlement à ces plans.

A l'aide d'essais triaxiaux, Price<sup>2</sup> (1958) montra que, pour l'argilite de Snowdown, les résultats sont similaires sous un confinement allant jusqu'à 35 MPa. De plus, il observa que la résistance à la rupture et le module d'Young augmentent avec la pression de confinement. Hobbs<sup>2</sup> (1960) mit en évidence pour le charbon d'Oakdale que certaines propriétés anisotropes de cette roche qui se manifestent en compression uniaxiale et à faibles pressions de confinement (inférieures à 7 MPa), disparaissent en augmentant la pression de confinement.

*Donath* (1960 à 1964) a réalisé une étude très importante du comportement mécanique des roches anisotropes. En soumettant des échantillons cylindriques d'ardoise de Martinsburg, d'argilite de Longwood et de calcaire de Manlius, d'orientation  $\beta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  et  $90^\circ$ , à des essais de compression triaxiale à des pressions de 3,5 ; 10,5 ; 35 ; 50 ; 100 et 200 MPa, il a montré que dans ce type de roches la résistance à la compression est maximale pour  $\beta = 90^\circ$  (charge perpendiculaire aux strates) et minimale lorsque  $\beta = 30^\circ$ . Il observe également qu'une augmentation de la pression de confinement réduit l'effet de l'anisotropie : dans le cas de l'ardoise de Martinsburg, le coefficient d'anisotropie (voir sa définition plus loin), est égal à 10 pour un confinement de 3,5 MPa et vaut 4,5 sous un confinement de 200 MPa.

<sup>3</sup> Les auteurs non référencés sont cités par *Kwasniewski* (1993).



Quantitativement, de nombreuses études réalisées par différents auteurs, (*Allirot* (1976), diatomite ; *Millien* (1993), grès ; *Niandou* (1994), argilite de Tournemire) ont montré que la résistance à la compression simple des roches orthotropes de révolution est généralement maximale pour  $\beta = 0^\circ$  ou  $90^\circ$  et que le minimum se situe autour de  $\beta = 30^\circ$ .

L'évolution de la résistance à la compression simple  $\sigma_c$  en fonction de la direction du chargement par rapport à l'orientation des plans d'isotropie est souvent utilisée pour définir le type d'anisotropie. Cependant, la résistance à la traction, les modules d'élasticité, le coefficient de Poisson ou la déformation à la rupture pourraient être aussi bien utilisés. Avec  $\sigma_c$ , le coefficient d'anisotropie,  $R_C$ , est défini comme le rapport :

$$R_C = \frac{\sigma_{c90^\circ}}{\sigma_{c\min}} \quad [2.23]$$

Le Tableau 2.3 présente une classification des roches en fonction de leur coefficient d'anisotropie, basée sur des données disponibles dans la littérature. D'après la forme de la courbe de résistance à la compression simple en fonction de l'orientation des plans de litage de la roche, l'anisotropie est qualifiée de différentes manières. Comme le rappelle *Ramamurthy* (1993) (Figure 2.46), en anglais, on parle de :

- 1) *U type anisotropy* (anisotropie en U)
- 2) *Shoulder type anisotropy* (anisotropie en épaule)
- 3) *Undulatory type anisotropy* (anisotropie « ondulée »)

Dans le *U type anisotropy*,  $\sigma_c$  est maximale pour  $\beta = 90^\circ$  et minimale pour  $\beta = 30^\circ$  ce qui est généralement mesurée sur des roches dont l'anisotropie a pour origine des plans de faiblesse comme les schistes ardoisiers ou les ardoises. Les roches possédant une *shoulder type anisotropy* présentent un maximum de  $\sigma_c$  pour  $\beta = 0^\circ$  et un minimum pour  $\beta = 15^\circ$  à  $30^\circ$ .

*The undulatory type* a été observé sur des charbons ou des roches très litées comme la diatomite. Le maximum de  $\sigma_c$  se situe à  $\beta = 90^\circ$  et le minimum autour de  $\beta = 30^\circ$ . Ce type d'anisotropie est généralement due à la présence de plusieurs plans de faiblesse qui s'entrecroisent ; l'anisotropie n'est donc dans ce cas pas de type orthotrope de révolution.

Toutes les roches sédimentaires qui, après leur formation n'ont pas subi de contrainte tectonique et ont gardé une stratification subhorizontale, présentent une résistance maximale à la compression simple dans la direction perpendiculaire aux plans d'isotropie. Ce sera le cas des trois roches sédimentaires argileuses étudiées dans cette thèse : l'argilite de Tournemire, l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or.

Idéalement, pour caractériser correctement l'anisotropie d'une roche, il faut connaître la forme de sa courbe de résistance à la compression simple en fonction de l'orientation  $\beta$  ou  $\theta$  des plans d'isotropie par rapport au chargement, mais aussi la nature de cette anisotropie (plans de faiblesse, microfissuration, stratification, schistosité, foliation).

*Niandou* (1994) lors de sa thèse de doctorat a étudié l'anisotropie de l'argilite de Tournemire. Grâce à une série d'essais de compression triaxiale sur des échantillons d'orientation différentes, il a pu tracer l'évolution du module élastique et du déviateur à la rupture en fonction de l'angle  $\beta$  et du confinement. Les résultats de cette étude sont présentés sur la Figure 2.48 et la Figure 2.49. On constate que pour de faible confinement, la résistance à la compression est maximale pour  $\beta = 90^\circ$  et minimale pour  $\beta = 30^\circ$  (*U type anisotropy*), alors qu'à plus fort confinement, le minimum évolue vers  $\beta = 45^\circ$  et le maximum pour  $\beta = 0^\circ$ .

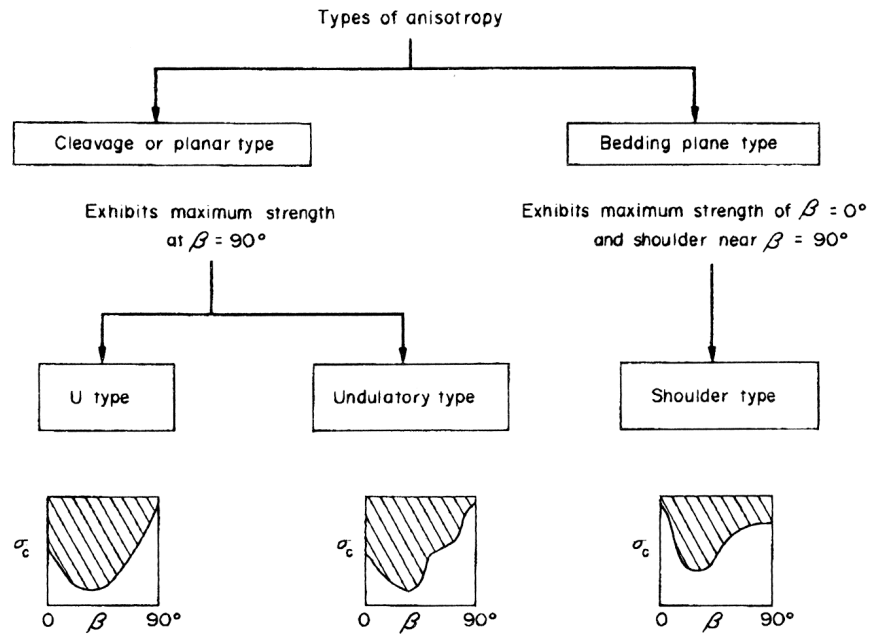


Figure 2.47 : Classification de l'anisotropie d'une roche en fonction de sa résistance à la compression simple suivant différentes orientations, d'après Ramamurthy (1993).

Coefficient d'anisotropie $R_c$	Anisotropie	Exemples de roches
1,0 - 1,1	Isotrope	Grès
1,1 - 2,0	Faible	
2,0 - 4,0	Moyenne	Schistes
4,0 - 6,0	Forte	Ardoises
> 6,0	Très forte	

Tableau 2.3 : Classification des anisotropies en fonction de  $R_c$ , d'après Ramamurthy (1993).

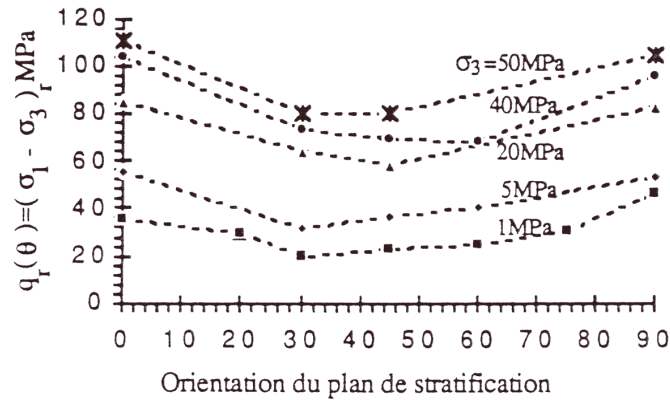


Figure 2.48 : Evolution des déviateurs mesurés à la rupture de l'argilite de Tournemire en fonction de l'orientation  $\beta$  pour différentes pressions de confinement, d'après Niandou (1994).

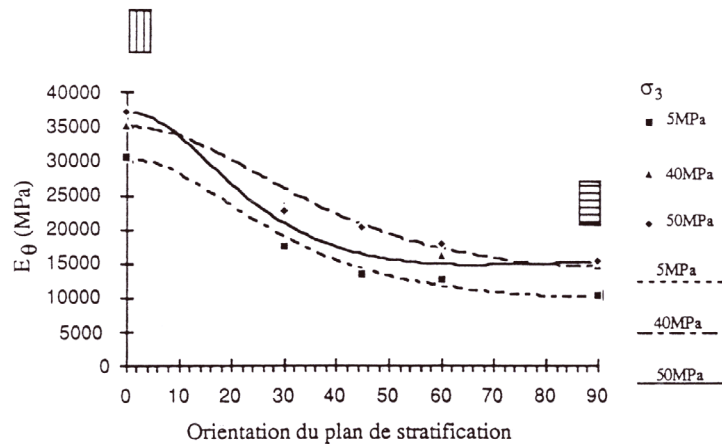


Figure 2.49 : Valeurs du module élastique de l'argilite de Tournemire en fonction de l'orientation  $\beta$ , d'après Niandou (1994).

### 2.5.2 Modules directionnels élastiques

Comme la plupart des roches sédimentaires, les trois roches étudiées dans cette thèse, l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'or, présentent des plans de litage, orientation privilégiée de leurs grains constitutifs, qui induisent des variations directionnelles de leurs propriétés mécaniques. Cette symétrie est de type orthotrope de révolution et ses axes sont *a priori* connus.

En faisant l'hypothèse que les symétries élastiques sont de même type, le nombre de coefficients indépendants qui permettent de décrire le comportement élastique de ces roches se réduit de 21, à 5 dans le cas particulier de l'orthotropie de révolution. Il s'agit des :

- module d'Young  $E_1$  : rigidité dans le plan des strates,
- module d'Young  $E_3$  : rigidité dans le plan perpendiculaire aux strates,
- coefficient de Poisson  $\nu_1$  : coefficient d'expansion latérale dans le plan perpendiculaire aux strates sous l'action d'une compression parallèle aux strates,

- coefficient de Poisson  $\nu_3$  : coefficient d'expansion latérale dans le plan des strates sous l'action d'une compression normale à ce plan,
- module de cisaillement  $G$  dans le plan des strates.

Dans ces conditions, la matrice des souplesses élastiques,  $\mathbf{D}$ , s'écrit (chap. 3, *CFMR*, 2000) :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_3} & -\frac{\nu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_3}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_3)}{E_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}}_{\mathbf{D}} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} \quad [2.24]$$

Si l'on considère le repère  $(\vec{s}, \vec{t}, \vec{n})$  des directions principales du tenseur de contraintes  $\sigma$ , l'axe  $\vec{n}$  coïncidant avec l'axe de l'éprouvette, et le repère  $(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3)$  formés par les axes privilégiés du matériau avec  $\vec{v}_3$  l'axe de révolution de l'orthotropie et  $\vec{v}_2, \vec{v}_3$  les axes du plan d'isotropie l'angle  $\theta$  est l'angle entre l'axe de révolution de l'orthotropie et l'axe de l'éprouvette (Figure 2.50).

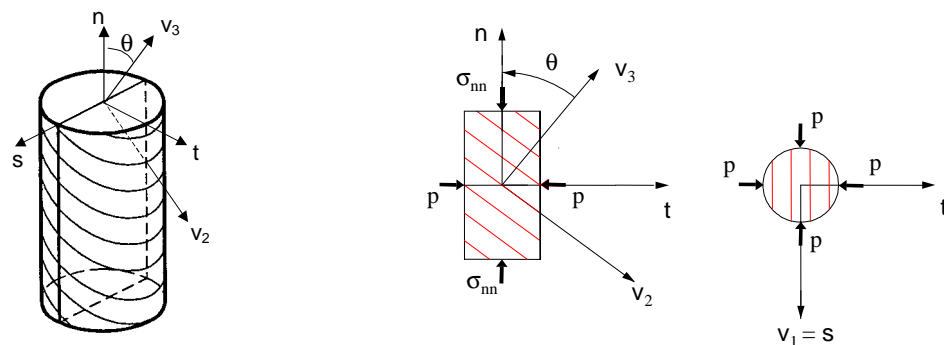


Figure 2.50 : Définition des axes de symétrie d'une éprouvette.

Pour un essai de compression uniaxiale, où seule  $\sigma_1 \neq 0$ , on a alors :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{I}]^t \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot [\mathbf{I}] \quad [2.25]$$

où  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , le tenseur des déformations exprimées dans le repère  $(\vec{n}, \vec{t}, \vec{s})$  s'écrit :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{nn} & \boldsymbol{\varepsilon}_{nt} & 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{tn} & \boldsymbol{\varepsilon}_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_{ss} \end{bmatrix} \quad [2.26]$$

et T, la matrice de transformation orthogonale vaut :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \cos^2 \theta & 0 & \sin^2 \theta & 0 & 0 & -2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & 0 & \cos^2 \theta & 0 & 0 & 2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ -\sin \theta \cos \theta & 0 & \sin \theta \cos \theta & 0 & 0 & \sin^2 \theta - \cos^2 \theta \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \quad [2.27]$$

On peut en déduire pour chaque orientation  $\theta$  les modules directionnels grâce aux relations :

$$- \frac{1}{E_{ss}} = -\frac{\nu_1}{E_1} \sin^2 \theta - \frac{\nu_3}{E_3} \cos^2 \theta \quad [2.28]$$

$$- \frac{1}{E_{nn}} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta + \frac{1}{E_3} \cos^4 \theta + \left( \frac{1}{G} - \frac{2\nu_3}{E_3} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad [2.29]$$

$$- \frac{1}{E_{tt}} = \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} - \frac{1}{G} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\nu_3}{E_3} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \quad [2.30]$$

$$- \frac{1}{G_{nt}} = \left[ \frac{1}{E_3} \cos^2 \theta + \frac{1}{E_1} \sin^2 \theta + \left( \frac{\nu_3}{E_3} - \frac{1}{2G} \right) (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \right] \sin \theta \cos \theta \quad [2.31]$$

La détermination des composantes de la matrice des souplesses élastiques nécessite donc la mesure de modules directionnels sur des éprouvettes d'orientations  $\theta$  différentes, par rapport aux axes de la symétrie matérielle. Pour un matériau orthotrope de révolution :

$$- \text{si } \theta = 0^\circ : \boldsymbol{\varepsilon}_{ss} = \boldsymbol{\varepsilon}_{tt} = -\frac{\nu_3}{E_3} \boldsymbol{\sigma} \quad \text{et } \boldsymbol{\varepsilon}_{nn} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{E_3} \quad [2.32]$$

$$- \text{si } \theta = 90^\circ : \boldsymbol{\varepsilon}_{ss} = -\frac{\nu_1}{E_1} \boldsymbol{\sigma} \quad \text{et } \boldsymbol{\varepsilon}_{nn} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{E_1} \quad [2.33]$$

$$- \text{si } \theta = 45^\circ : \boldsymbol{\varepsilon}_{nn} = \left( \frac{1}{4E_1} + \frac{1}{4E_3} - \frac{\nu_3}{2E_3} + \frac{1}{4G} \right) \boldsymbol{\sigma} \quad [2.34]$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{tt} = \left( \frac{1}{4E_1} + \frac{1}{4E_3} - \frac{\nu_3}{2E_3} - \frac{1}{4G} \right) \boldsymbol{\sigma} \quad [2.35]$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{nn} - \boldsymbol{\varepsilon}_{tt} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{2G} \quad [2.36]$$

Ainsi, le prélèvement d'éprouvettes suivant différentes orientations connues, par rapport aux directions de symétrie apparente, permet de déterminer les modules directionnels axial et transversal à l'aide d'essais de compression simple ou de compression sous pression de confinement. La mesure des déformations axiales,  $\epsilon_{nn}$ , et latérales,  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{ss}$ , permet ensuite de retrouver les composantes élastiques indépendantes du matériau à partir de la loi d'élasticité anisotrope (Léreau *et al.* (1981) ; Millien (1993)).

Comme nous le verrons dans un des paragraphes suivants, les mesures par propagation d'ondes soniques sont bien adaptées à la détermination des anisotropies et certains paramètres de la matrice de raideur difficilement accessibles par des essais mécaniques peuvent être calculés simplement (module de cisaillement).

### 2.5.3 Déformations irréversibles et modes de rupture

Bien que peu nombreuses, toutes les études sur des roches orthotropes de révolution concernant leur comportement inélastique révèlent l'importance de l'anisotropie de structure sur le développement des déformations irréversibles.

Lors d'essais de compression isotrope réalisés sur des échantillons de diatomite à symétrie orthotrope de révolution, Alliot *et al.* (1977) ont mis en évidence le développement de déformations irréversibles à déviateur non nul. Lorsque l'axe de révolution des éprouvettes ne coïncide pas avec les axes de symétrie matérielle de la roche, les échantillons initialement cylindriques à section circulaire se déforment en cylindres obliques à section elliptique (Figure 2.51). Cette roche anisotrope soumise à une pression isotrope subit donc des distorsions.

Lors d'essais de fluage de longue durée, Zhang *et Rothfuchs* (2004) ont comparé les courbes de déformations en fonction du temps de deux échantillons d'argilite de l'Est, chargés l'un parallèlement et l'autre perpendiculairement aux plans de litage de la roche. Ils ont observé une déformation totale supérieure lorsque le déviateur de contrainte est perpendiculaire au litage. Cependant, l'amplitude des déformations viscoplastiques et la vitesse de déformation différée ne semblent pas influencées par la direction du chargement, comme on peut le voir sur la Figure 2.52. Ils confirmèrent ainsi les résultats déjà obtenus par Rejeb (2003) : ces essais de fluage triaxiaux sur des échantillons d'argilite de Tournemire d'orientations différentes ( $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  et  $90^\circ$ ) ont montré que la déformation axiale d'un échantillon d'orientation  $\theta = 90^\circ$  est en moyenne 30% inférieure à celle d'un échantillon d'orientation  $\theta = 0^\circ$  sous le même déviateur de contrainte. Elle est maximale pour  $\theta = 45^\circ$ .

Gatellier (2001) a réalisé une série d'essais de compression cyclique sous différentes pressions de confinement afin de déterminer si l'endommagement du grès des Vosges est influencé par l'anisotropie structurale de la roche. Les résultats obtenus montrent que sous une pression de confinement supérieure à la moitié de la résistance à la compression simple, l'influence de l'anisotropie sur l'endommagement est négligeable. En revanche, en compression uniaxiale, l'évolution des modules directionnels et des déformations irréversibles dépendent fortement de l'anisotropie de la roche. Les plans des strates agissent comme des plans de faiblesse où se développent la microfissuration.

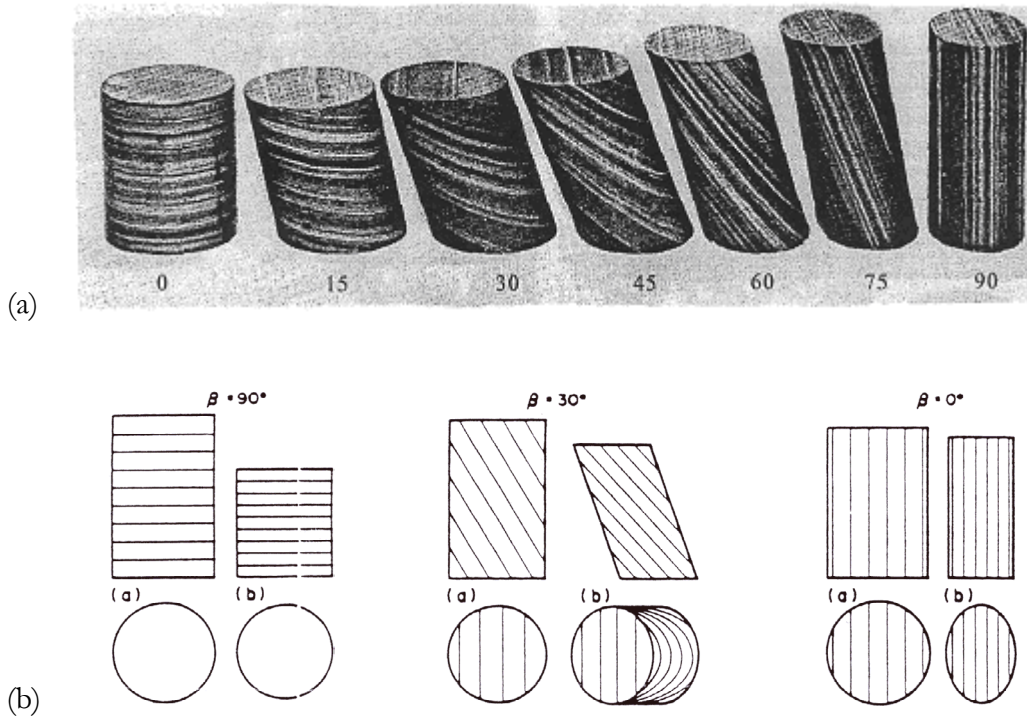


Figure 2.51 : (a) : Anisotropie des déformations irréversibles d'échantillons cylindriques de diatomite sous une contrainte hydrostatique de 100 MPa (le chiffre sous chaque échantillon correspond à l'orientation  $\theta$  de l'échantillon), d'après Alliot et al., 1977.

(b) : Schémas réalisés par Kwasniewski (1993) sur la base de ces photos (orientation  $\beta$ )

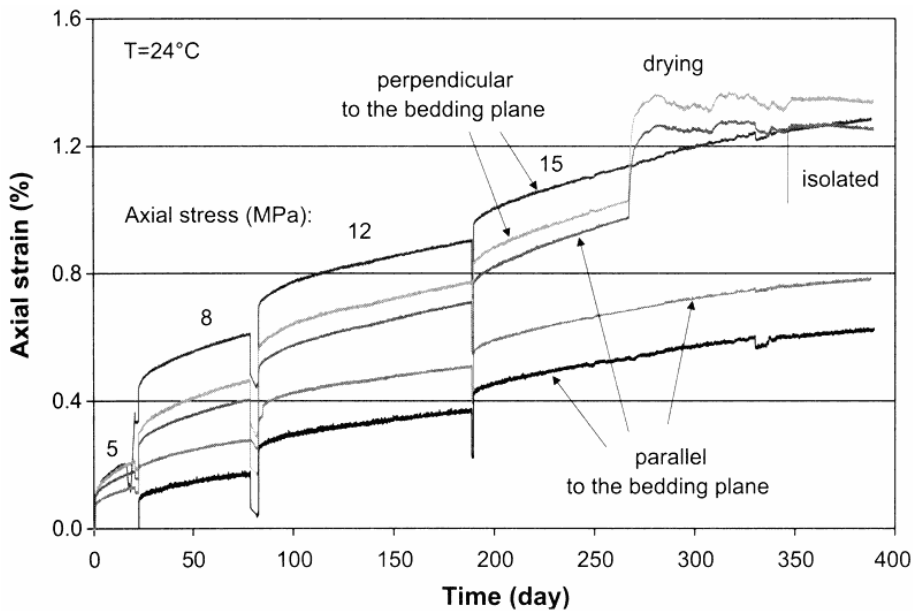


Figure 2.52 : Influence de l'anisotropie sur le comportement en fluage de l'argilite de l'Est : essais de fluage sous différents déviateurs de contrainte orientés parallèlement ou perpendiculairement au litage de la roche, d'après Zhang et Rothfuchs (2004).

Comme pour les roches isotropes, le mode de rupture des roches anisotropes dépend de la pression de confinement (transition fragile-ductile). Il dépend également fortement de l'orientation des plans de litage par rapport à la contrainte principale majeure. En effet, l'orientation d'une fissure par rapport au champ de contraintes détermine son mode de sollicitation et donc de propagation. Trois modes élémentaires de propagation existent ; ils sont décrits sur la Figure 2.53.

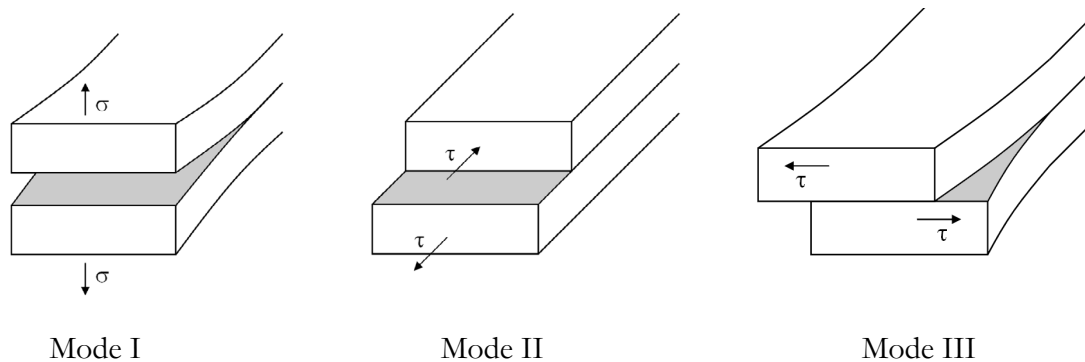


Figure 2.53 : Modes de propagation d'une fissure.

Le mode I de propagation conduit facilement à la rupture de l'échantillon car il n'induit pas de frottement sur les lèvres de la fissure qui se propage donc dans son propre plan de symétrie (rupture en traction). Dans le cas des essais de compression, les modes II et III deviennent prépondérants à l'approche de la rupture. Pour un chargement quelconque, plusieurs modes élémentaires peuvent se superposer ; on parle alors de mode de rupture *mixte*.

L'anisotropie des matériaux rocheux est généralement planaire, induite par des caractères génétiques comme la stratification dans le cas des matériaux sédimentaires ou la foliation et la schistosité dans le cas des matériaux métamorphiques. On distingue trois positions principales d'une fissure par rapport à la structure anisotrope de la roche (Figure 2.54).

Pour une rupture en traction (mode I), l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure dans le cas (b) sera plus élevée que dans le cas (c). Le cas (a) est un cas intermédiaire. *Whittaker et al.* (1992) expliquent ces observations par le fait que dans le cas (c) la fissuration se développe selon un plan d'isotropie qui présentent généralement une résistance mécanique plus faible alors que dans les cas (a) et (b), les dissipations d'énergie se font en dehors du plan d'avancée de la fissure.

Dans le cas de rupture en mode II ou III, c'est l'orientation de la contrainte principale par rapport aux plans d'anisotropie qui conditionne la propagation de la fissuration. Cette influence se traduit généralement par une résistance à la rupture plus élevée quand la direction de la contrainte principale de compression est parallèle ou perpendiculaire à la direction principale de l'anisotropie.



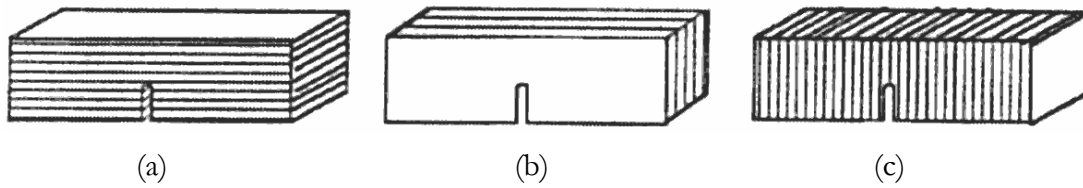


Figure 2.54 : Positions principales d'une fissure par rapport à la structure anisotrope d'un matériau rocheux, d'après Schmidt (1976), cité par Whittaker et al, (1992).

L'étude du comportement mécanique des roches anisotropes réalisée par Donath (1960-1964) et l'analyse du mécanisme de rupture de l'ardoise de Martinsburg ont permis de préciser le rôle joué par ce paramètre sur le mode de rupture de la roche. Pour des angles  $\beta$  compris entre  $15^\circ$  et  $60^\circ$ , Donath a observé que la rupture se produit généralement parallèlement aux plans de litage. En revanche, pour des angles  $\beta = 60-90^\circ$ , la surface de rupture recoupe les plans de stratification, formant un angle de  $45^\circ$  à  $60^\circ$  avec la direction de la contrainte principale maximale (Figure 2.55). Niandou (1994) en réalisant le même genre d'étude sur l'argilite de Tournemire est arrivé aux mêmes conclusions. Comme d'autres, il a observé lors de ses essais de compression triaxiale :

- des ruptures par glissement le long des plans de stratification pour  $\beta = 15^\circ$  à  $45^\circ$ .
- des ruptures par cisaillement pour  $\beta = 60$  à  $90^\circ$ : les plans de rupture forment en général un angle le  $20$  à  $30^\circ$  avec la direction de la contrainte principale majeure quelle que soit l'orientation de l'échantillon.
- des glissements 'plastiques' le long d'un plan de stratification pour  $\beta = 40^\circ-90^\circ$ , surtout sous confinement élevé.
- des écoulements déviés : rotation du plan de faiblesse pour  $\beta = 0^\circ-30^\circ$ .

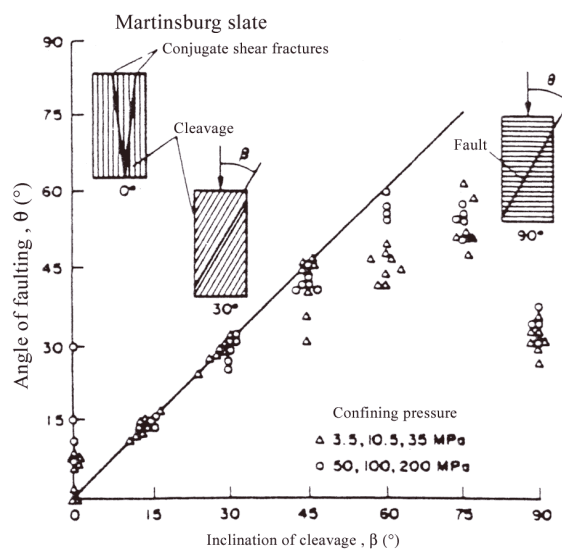


Figure 2.55 : Angle et mode de rupture de l'ardoise de Martinsburg suivant l'orientation de la contrainte principale majeure par rapport à la stratification, d'après Donath (1964).

Toutes les études antérieures sur ce sujet ont montré que le mode de rupture des roches anisotropes varie continûment suivant l'orientation  $\beta$  et la pression de confinement.

En compression simple, on observe des plans de rupture par extension structurale (le long des plans de stratification) pour les orientations  $\theta$  proche de  $90^\circ$ , par extension astructural pour  $\theta$  proche de  $0^\circ$  et des ruptures par cisaillement le long des plans de litage pour les orientations  $\theta$  telles que  $45^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ . Sous faible pression de confinement, la rupture survient par cisaillement structural pour  $45^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$  et par cisaillement astructural pour les autres orientations. Sous fort confinement, on observe des ruptures cataclastiques. La Figure 2.56 illustre ces différents modes de rupture pour des échantillons de diatomite testés en compression simple et triaxiale (*Allirot et Boehler, 1979*).

Entre 1995 et 1998, une série d'essais de fluage a été réalisée par l'ANDRA afin d'étudier l'influence de l'anisotropie de l'argilite de l'Est sur ces propriétés mécaniques à long terme. Les résultats obtenus ont mis clairement en évidence que les vitesses de fluage à long terme étaient similaires sur des échantillons carottés perpendiculairement et parallèlement au litage. (cité par *Gasc-Barbier, 2002*). Bien que l'anisotropie de structure de cette roche induise une anisotropie des caractéristiques mécaniques à court terme, tel que le module d'élasticité, il semblerait donc qu'elle n'influence pas la vitesse des déformations viscoplastiques de la roche à long terme.

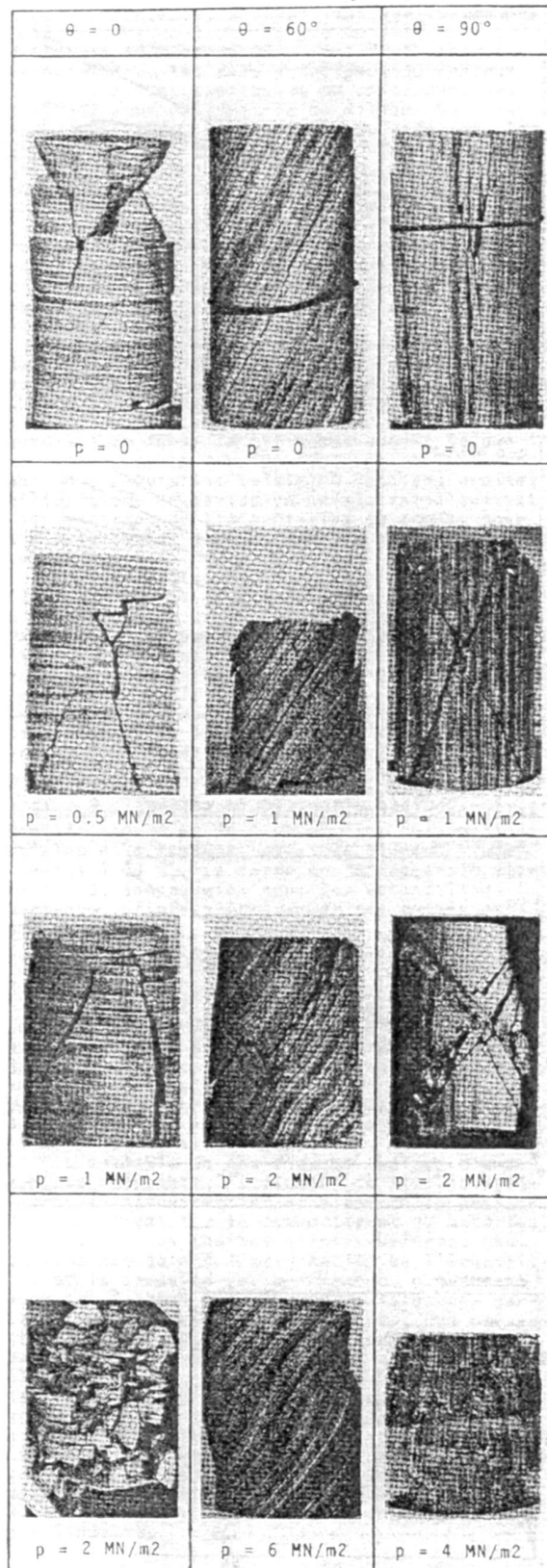


Figure 2.56 : Influence de l'orientation  $\theta$  et de la pression de confinement sur le mode de rupture de la diatomite en compression, d'après Alliot et Boehler (1979).

## 2.6 Détection de l'endommagement

Lemaitre et Chaboche (1978) ont défini l'endommagement comme la « *détérioration progressive de la cohésion de la matière sous l'action de sollicitations monotones, ou répétées, conduisant à la rupture de l'élément de volume considéré* ». Plus généralement, l'endommagement peut être défini comme une détérioration progressive et irréversible de la microstructure sous l'effet d'un chargement. Il se traduit donc par des dégradations de la cohésion responsables de la diminution de la résistance du matériau. Différentes méthodes d'analyse ou de mesure permettent de détecter l'initiation de l'endommagement et de suivre son évolution lors d'essais effectués en laboratoire. Nous présentons ici celles que nous utiliserons dans l'étude expérimentale (chapitre 3).

### 2.6.1 Analyse de la courbe contrainte-déformation en compression simple

Lors d'un essai de compression uniaxiale, la réponse d'une roche isotrope, dans un graphe contrainte-déformation, est décomposable en cinq phases caractéristiques de déformation (Bieniasmski (1967), Houpert (1979)), permettant de définir quatre contraintes caractéristiques, (Figure 2.57) :

- $\sigma_{cc}$  marque le début de la phase linéaire de la déformation axiale  $\epsilon_{nn}$ .
- $\sigma_{ci}$  marque le début de la non-linéarité de la déformation transversale  $\epsilon_{tt}$ .
- $\sigma_{cd}$  est atteinte lors de la contraction maximale de l'échantillon.
- $\sigma_f$  est la contrainte maximale au pic, ou contrainte de rupture.

L'expression des contraintes et déformations ici, suit les conventions usuelles de la mécanique des roches à savoir :

- Contraintes de compression positives et contraintes de traction négatives
- Diminution de volume positive et dilatance négative.

La phase 1 ( $0 < \sigma < \sigma_{cc}$ ) correspond à la fermeture des fissures qui se sont ouvertes lors du prélèvement de la roche, suite au relâchement des contraintes in situ. C'est une phase de **serrage** durant laquelle le module d'Young apparent croît et l'échantillon se contracte, sa déformation axiale étant non-linéaire.

En l'absence de confinement, ce serrage concerne essentiellement les fissures orientées perpendiculairement à la direction de la contrainte de compression et le module de fermeture des fissures qu'elle permet de définir n'a donc qu'une valeur indicative qui dépend de leur densité et de leur ouverture.

La phase 2 ( $\sigma_{cc} < \sigma < \sigma_{ci}$ ) est linéaire : le module d'Young et le coefficient de Poisson apparents sont constants. C'est au cours de cette phase que la déformation est supposée **élastique** et que l'on assimile les modules apparents au module élastique et au coefficient de Poisson  $E$  et  $\nu$ . La déformation volumique est contractante.

Le début de la phase 3 ( $\sigma_{ci} < \sigma < \sigma_{cd}$ ) est repérée par la perte de la linéarité de la déformation transversale. Au cours de cette phase, le coefficient de Poisson apparent augmente et la déformation volumique diminue par rapport à la déformation volumique que subirait le matériau obéissant à une loi élastique linéaire. C'est le phénomène de **dilatance**, lié à l'endommagement de l'échantillon, qui s'initie : à la déformation volumique contractante, supposée élastique, subie par

la partie solide du matériau, s'ajoute la déformation volumique dilatante des fissures qui s'ouvrent. La propagation des fissures est stable lors de cette phase ; elle s'arrête si l'éprouvette est déchargée.

La quatrième phase ( $\sigma_{cd} < \sigma < \sigma_f$ ) débute avec la contractance maximale de l'échantillon et est associée à la croissance instable, à l'interaction et la coalescence des fissures (endommagement). La contrainte  $\sigma_{cd}$  caractérise la résistance à long terme de la roche et définirait le déviateur minimal qui conduit à la rupture lors d'un essai de fluage. En effet, *Martin et Chandler* (1994) ont effectué des essais de compression uniaxiale sur des échantillons de granite du Lac du Bonnet à des vitesses de  $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ MPa.s}^{-1}$ , mille fois inférieures aux vitesses couramment imposées en laboratoire. Ils ont observé que le matériau se rompt pour une contrainte proche de  $\sigma_{cd}$  avec un mode de rupture suivant un plan de cisaillement différent du mode de rupture par extension observé pour des vitesses de chargement courantes.

La résistance à la compression simple correspond conventionnellement au pic de contrainte  $\sigma_f$  mesuré juste avant la rupture.

La phase 5 post-pic conduit à la ruine de l'échantillon et se caractérise par une diminution de la contrainte, du fait de la rupture fragile en compression simple.

L'analyse de la courbe contrainte-déformation permet donc de connaître facilement  $\sigma_{ci}$ , contrainte à partir de laquelle l'endommagement de l'échantillon débute, et  $\sigma_{cd}$  contrainte à partir de laquelle la fissuration devient instable. Ces contraintes caractéristiques sont fonction des conditions d'essai (vitesse de chargement, température, orientation du chargement) et des paramètres intrinsèque de la roche (teneur en eau, porosité).

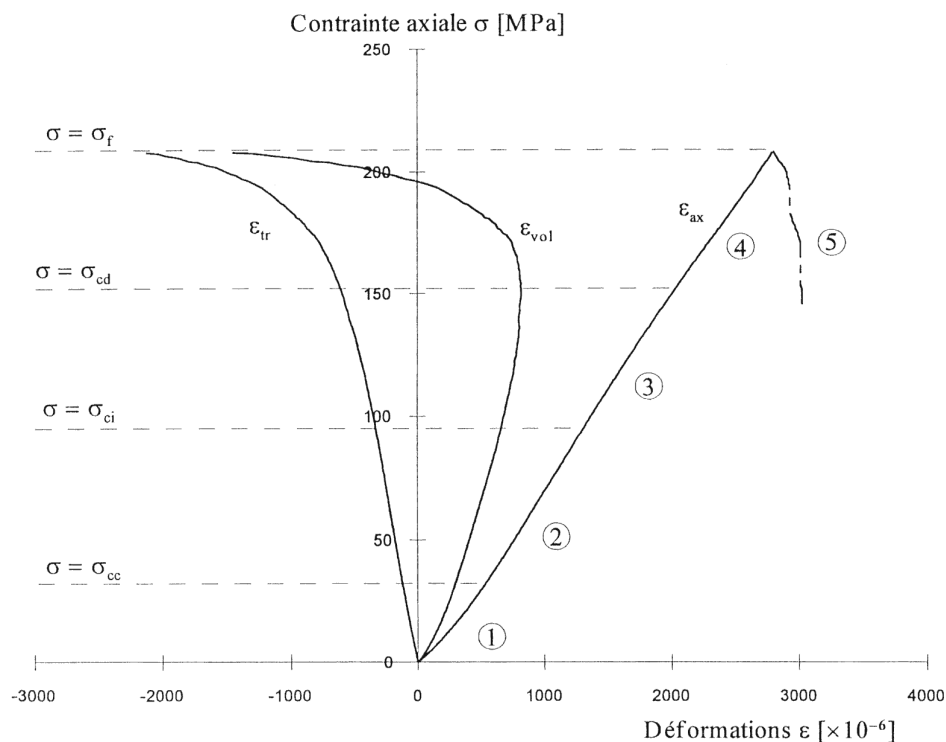


Figure 2.57 : Courbe de réponse contrainte – déformation d'une roche isotrope lors d'un essai de compression simple, d'après Gatelier (2001).

### 2.6.2 Apport des mesures de vitesses de propagation des ondes P

Lors d'un essai de compression, il est possible de détecter l'initiation de l'endommagement et de suivre son évolution par des observations et mesures indirectes, comme la mesure des vitesses de propagation d'ondes.

L'auscultation ultrasonique d'échantillons de roches consiste à émettre un signal ultrasonore (fréquence supérieure à 20kHz) sous forme d'une impulsion (Dirac) et d'analyser sa propagation dans l'échantillon. On mesure le temps de parcours,  $\Delta t$ , de l'onde entre deux capteurs piézo-électriques, un émetteur et un récepteur, placés au contact de l'échantillon, distant de la longueur  $L$  de l'échantillon et on en déduit la vitesse de l'onde :

$$V \text{ [m.s}^{-1}\text{]} = \frac{L}{\Delta t} \quad [2.37]$$

avec  $L$  : distance entre l'émetteur et le récepteur.

$\Delta t$  : temps de parcours de l'onde.

Deux types d'ondes sont couramment utilisés : les ondes de compression (P, premières ou longitudinales) et les ondes de cisaillement (S, secondes ou transversales). La vitesse de propagation de ces ondes est étroitement liée aux caractéristiques physiques du matériau (composition minéralogique, porosité, état de saturation, anisotropie) mais également à ses caractéristiques mécaniques (résistance, caractéristiques élastiques). Cette méthode est donc également utilisée pour évaluer l'homogénéité d'un lot d'échantillons avant essais.

Le temps de propagation  $\Delta t$  est mesuré par le pointage de la première arrivée. Cette onde directe est la plus rapide mais elle n'a pas forcément transité en ligne droite de l'émetteur vers le récepteur. En réalité, l'onde directe traverse les discontinuités de la roche, pores et fissures, qui constituent des 'ralentisseurs' (vitesse des ondes dans l'air : 330 m.s<sup>-1</sup> et vitesse dans l'eau : 1400 m.s<sup>-1</sup>). Sa vitesse est donc surestimée puisque son parcours est sous-évalué.

La vitesse des ondes P et des ondes S est affectée par la porosité de la roche et sa nature (porosité de pores ou de fissures). Expérimentalement, sur des roches de même composition minéralogique, on a observé que la vitesse des ondes décroît lorsque la porosité augmente, mais cette diminution de la vitesse est aussi fonction de la nature des discontinuités : pores ou fissures. Ces mesures peuvent donc permettre de quantifier et qualifier la porosité d'une roche.

Dans les roches poreuses, la première arrivée passe généralement par les ponts de ciment entre grains et transite à une vitesse constante bien supérieure à celle mesurée dans l'eau ou l'air, mais son trajet est d'autant plus long que la porosité est élevée. Pour les roches fissurées, la première arrivée a généralement traversé les fissures qui de part leur morphologie très allongée et peu épaisse ne sont pas contournées par la première onde arrivée.

A partir d'observations empiriques sur différentes familles de roches poreuses et fissurées Fourmaintraux (1975) a construit des abaques établissant les corrélations entre la vitesse des ondes P et la porosité. Afin de s'affranchir des caractéristiques minéralogiques, Fourmaintraux a utilisé un paramètre adimensionnel basé sur la mesure de vitesse et la composition de la roche testée : l'indice de continuité,  $I_C$  exprimé en % et calculé avec la formule suivante :

$$I_C = \frac{V_l}{V_{lc}} \times 100 \quad [2.38]$$

où  $V_l$  est la vitesse mesurée et  $V_{lc}$  la vitesse théorique maximale que l'on aurait dans le même matériau à porosité nulle.

Lorsque la roche est monocristalline,  $V_{lc}$  est la vitesse mesurée dans le minéral constitutif. Si la

roche est polyminérale,  $V_{lc}$  est la somme des vitesses mesurées dans chaque minéral pondérées par sa proportion dans la roche. Dans le Tableau 2.4, sont données à titre d'exemples quelques valeurs de vitesses des ondes P mesurées dans différents minéraux.

Des mesures de vitesses sur des échantillons secs permettent avec l'abaque de Fourmaintraux, présenté sur la Figure 2.58, d'identifier et de quantifier la nature de la porosité de la roche.

L'augmentation de la porosité de fissures a une influence plus importante sur la vitesse des ondes P que l'augmentation de la porosité de pores. En théorie, le développement de fissuration due à l'endommagement peut donc être mesuré au cours d'un essai grâce à cette méthode. L'évolution de l'endommagement est ainsi suivie de manière indirecte.

Minéraux	$V_{lc}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Minéraux	$V_{lc}$ [m.s <sup>-1</sup> ]
Quartz	6050	Muscovite	5800
Calcite	6660	Amphibole	7200
Dolomite	7500	Gypse	5200
Feldspaths	5800-6250	Magnétite	7400
Biotite	5150	Pyrite	8000

Tableau 2.4 : Quelques valeurs de vitesses d'ondes ultrasoniques dans différents minéraux.

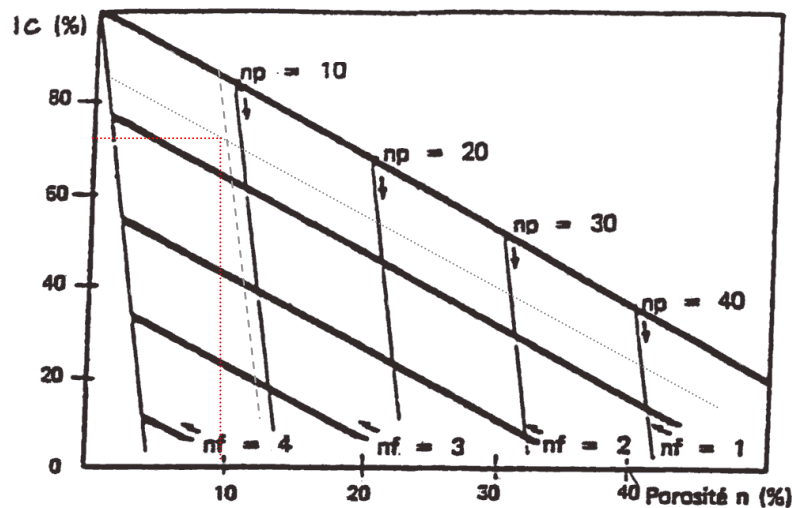


Figure 2.58 : Abaque de Fourmaintraux : Détermination de la porosité.

Si pour une roche, on mesure  $I_c = 70\%$  et  $n = 10\%$ , alors la porosité de pores,  $np = 9,3\%$  et la porosité de fissures,  $nf = 0,7\%$  de sorte que  $n = np + nf$ .

Dans un milieu solide, la vitesse des ondes est fonction des caractéristiques élastiques du matériau. Si on suppose le milieu homogène, isotrope et élastique, les expressions du coefficient de Poisson et du module d'Young en fonction des vitesses  $V_p$  et  $V_s$  des ondes P et S sont :

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2} \quad [2.39]$$

$$E = \rho \frac{V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad [2.40]$$

Lorsque l'on ne peut mesurer que  $V_p$ , E est calculé en supposant  $\nu = 0,25$ .

De plus, la vitesse des ondes P et S s'écrit également :

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad [2.41]$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [2.42]$$

avec : G, le module de cisaillement

K, le module de compressibilité

$\rho$ , la masse volumique

Le module d'Young,  $E_d$ , dit *dynamique* déduit par cette méthode est généralement plus élevé que le module d'Young,  $E_{stat}$ , dit *statique* mesuré à partir d'un essai mécanique. En mesurant la vitesse des ondes P et S au cours d'un essai mécanique, il est en théorie possible de suivre l'évolution de E et  $\nu$  en fonction de la contrainte appliquée ou du temps. La diminution de ces caractéristiques élastiques traduit l'endommagement de la roche.

D'une manière similaire, pour les roches anisotropes, des mesures de vitesses soniques peuvent permettre de calculer les paramètres élastiques. Cette méthode a été appliquée sur l'argilite de l'Est par Cuxac *et al.* (1992) qui ont réalisé des mesures de vitesses dans différentes directions (Figure 2.59) et ont pu déterminer à partir de l'équation de Christoffel (élasticité dynamique), les modules élastiques de l'argilite de l'Est qui sont répertoriés dans le Tableau 2.5.

$E_1 = 7,885 \text{ GPa}$	$G_{21} = 5,995 \text{ GPa}$	$\nu_{12} = 0,05$
$E_2 = 29,290 \text{ GPa}$		$\nu_{23} = 0,08$

Tableau 2.5 : Modules élastiques dynamiques de l'argilite de l'Est déterminés par mesures des vitesses des ondes P et S, d'après Cuxac *et al.* (1992).



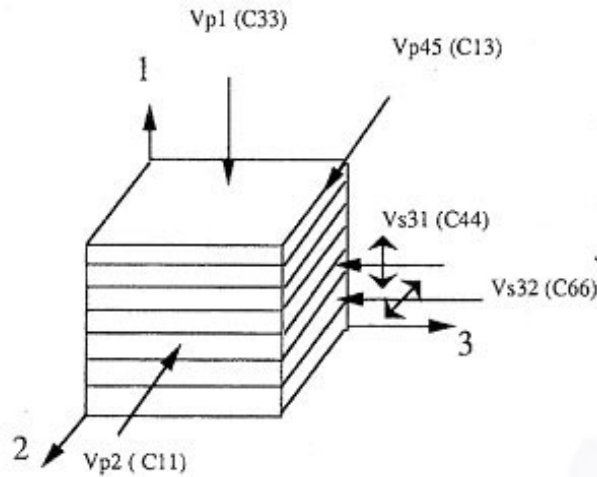


Figure 2.59 : Directions de propagation et de polarisation minimales nécessaires au calcul de la matrice de raideur d'une roche orthotrope de révolution, d'après Cuxac et al. (1992).

Sammonds et al. (1989) ont suivi la variation des ondes P et S, mesurée suivant l'axe de chargement dans le grès de Darley Dale, testé en compression avec une pression de confinement de 50 MPa (Figure 2.60). Ils ont ainsi observé une augmentation initiale des vitesses qui correspond à la phase de serrage puis une décroissance due à l'ouverture de nouvelles fissures principalement verticales. En effet, alors que les ondes P sont surtout affectées par des fissures perpendiculaires à la direction de propagation, les ondes S le sont davantage par des fissures parallèles à cette même direction. Les variations de vitesses soniques révèlent donc l'anisotropie de la distribution des fissures.

Sur les courbes de la Figure 2.60, on constate que les vitesses des ondes P et S commencent à diminuer dans la phase élastique de la déformation axiale mais  $\sigma_{ci}$  marquant le début de l'endommagement est définie par la perte de linéarité de la déformation transversale, courbe non donnée ici.

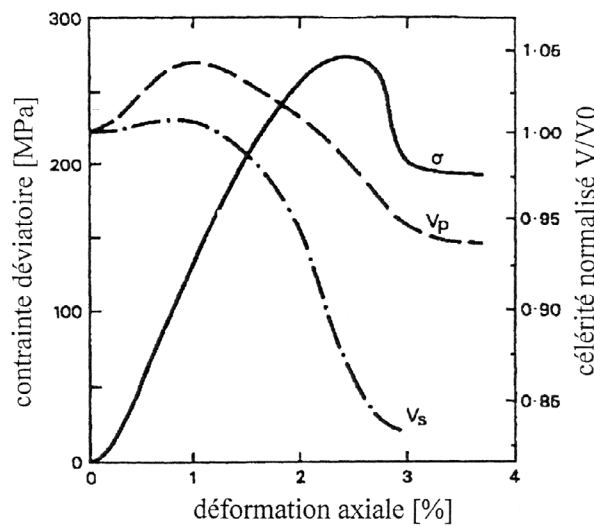


Figure 2.60 : Variation des vitesses des ondes de compression,  $V_p$ , et de cisaillement,  $V_s$  sur le grès de Darley Dale sous 50 MPa de confinement, d'après Sammonds et al. (1989).

Par une méthode d'analyse inverse des vitesses des ondes de compression et de cisaillement mesurées suivant les trois directions orthogonales d'un échantillon cubique de grès de Berea, *Sayers et al.* (1990) ont retrouvé sa densité de fissures, supposées circulaires, et leur distribution. Le résultat de leur étude confirme que les fissures se propagent préférentiellement dans la direction parallèle à la contrainte de compression maximale.

*Cuxac et al.* (1992) se sont servis de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques pour déterminer les paramètres élastiques de différentes roches anisotropes, notamment un schiste, un gneiss et une argilite. S'étant limité à la phase élastique dans la plupart de leurs expériences, ils n'ont pas détecté de diminution de vitesse liée à l'endommagement de la roche. Lors de ces essais mécaniques, ils ont tout de même observé une augmentation des vitesses avec la contrainte du fait de la fermeture des fissures, plus sensible pour les roches orthotropes de révolution lorsque l'onde se propage perpendiculairement au plan du litage, qui correspond généralement au plan de fissuration.

*Nur et al.* (1969) ont mis en évidence que la formation de microfissures parallèles à la direction de la contrainte principale majeure de compression, uniformément réparties dans l'échantillon, provoque une augmentation de l'atténuation du signal alors que la vitesse de propagation reste stable. Mais, à la localisation, l'atténuation croît brutalement et la vitesse chute.

*Pettitt et al.* (2002) ont utilisé la mesure de propagation d'ondes soniques *in situ* pour étudier l'impact du creusement de forages sur le granite du laboratoire souterrain d'Äspö (Suède). Ils mirent en évidence l'homogénéité et l'isotropie de la roche intacte puis observèrent une variation de vitesse des ondes P et S due à l'excavation. Ces variations ont ensuite pu être corrélées avec la fracturation de la zone endommagée par le champ de contrainte induit par ce creusement. Les informations apportées par ces mesures ont donc permis d'estimer quantitativement l'endommagement de la roche à proximité des forages.

Les variations de la vitesse des ondes soniques étant assez faibles au cours d'un essai, la mesure de l'atténuation de l'énergie transmise pendant le temps de parcours de l'onde est souvent un paramètre plus significatif. Cette méthode a été utilisée par *Couvreur et Thimus* (1998) pour étudier la rupture progressive d'un calcaire en compression uniaxiale cyclique.

### **2.6.3 Microfissuration et émission acoustique**

L'émission acoustique lors d'essais de compression est liée à des processus de ruptures microscopiques au sein de la roche, des nucléations ou des propagations de fissures. La restitution subite de l'énergie de déformation élastique emmagasinée génère des ondes élastiques qui se propagent du point d'origine jusqu'à la frontière du matériau où elles sont détectées sous forme d'émissions acoustiques. L'enregistrement de l'émission acoustique permet donc de relier les paramètres macroscopiques aux paramètres microscopiques. Comme en sismologie, puisque ces émissions acoustiques peuvent être considérées comme de petits séismes à l'échelle de l'échantillon, les sources d'émissions (hypocentres) peuvent être localisées dans l'espace à partir des signaux reçus par plusieurs capteurs et les mécanismes de ces sources peuvent être identifiés grâce à l'analyse fréquentielle des ondes.

Nous avons vu que le comportement d'une roche sollicitée en compression uniaxiale est décomposable en cinq phases successives.

La phase 1 correspond à la fermeture des fissures perpendiculairement à la direction de sollicitation : la raideur de l'éprouvette augmente. L'émission acoustique enregistrée au cours de cette phase est généralement attribuée au frottement sur les fissures fermées et au contact des

grains (Lockner, 1993). Scholz (1968) a étudié la réponse acoustique de plusieurs roches de porosités différentes, du tuff (n=41%) au granite (n=0,9%) et a observé, pour toutes les roches testées en compression uniaxiale, une fréquence des événements acoustiques au cours de la phase de fermeture de la fissuration initiale d'autant plus importante que la porosité de la roche est élevée (Figure 2.61).

La phase 2 correspond au comportement élastique linéaire : les déformations axiale, transversale et volumique sont linéairement corrélées à la contrainte de compression. L'émission acoustique est très peu active dans cette phase.

La phase 3 correspond à l'initiation de la dilatance. En compression uniaxiale, les fissures se propagent parallèlement à la direction de la contrainte principale. Les déformations transversales et volumiques ne sont plus linéaires. Lors de cette phase, l'activité acoustique augmente de manière significative. Cette initialisation de la dilatance est plus facilement observable en compression simple, qu'en compression triaxiale où la pression de confinement a tendance à réduire l'étendue de la phase de dilatance.

La phase 4 correspond à la perte de linéarité de la déformation axiale. L'activité acoustique est importante dans cette phase au cours de laquelle apparaît la localisation de la déformation, lorsqu'elle se produit.

L'émission acoustique varie donc suivant la phase de comportement dans laquelle l'échantillon se trouve (Figure 2.61) et son enregistrement peut permettre de suivre l'évolution de l'endommagement.

Cette technique de mesure permet de plus d'obtenir une cartographie de la microfissuration grâce à une localisation des émissions acoustiques dans l'espace et le temps. Elle est donc particulièrement adaptée, à plus grande échelle, à l'évaluation de la zone endommagée (EDZ, *Excavation Damage Zone*). Pettitt *et al.* (2002) l'ont utilisée dans le granite du laboratoire souterrain d'Åspö (Suède), et ont enregistré *in situ* l'émission acoustique. Dans le but de caractériser l'influence du creusement de forages sur l'endommagement de la roche, l'EDZ a pu ainsi être délimitée et la cartographie des sources d'EA a été superposée à celle des fractures initialement présentes. À l'aide de cette comparaison, les auteurs ont émis l'hypothèse que les émissions acoustiques enregistrées étaient essentiellement dues aux perturbations du champ de contrainte, causées par leur creusement, autour des fissures macroscopiques préexistantes, à proximité des forages, plutôt qu'à de nouvelles microfissures de la matrice rocheuse.

L'effet Kaiser, découvert par Wilhelm Kaiser en 1950 décrit un phénomène de mémoire de la roche mesurable par émission acoustique. En effet, au cours d'essais de chargement cyclique, l'émission acoustique n'est perceptible qu'une fois le niveau de contrainte atteint lors d'une précédente charge est dépassé. L'effet Kaiser se manifeste tant que la contrainte appliquée n'induit pas de dilatance dans l'échantillon et il se conserve après plusieurs dizaines de jours de latence entre deux cycles de chargement. Cet effet d'abord mis en évidence dans les métaux a été également observé dans les roches. Larrov *et al.* (2002) qui ont utilisé l'émission acoustique pour suivre l'endommagement de l'argile de Boom lors d'essais de compression uniaxiale, l'ont mesuré sur cette roche tendre. Leurs essais cycliques ont montré que l'argile de Boom présente un effet Kaiser très prononcé comme on peut le voir sur la Figure 2.62.

Cependant, l'activité acoustique de l'argile de Boom s'est révélée beaucoup moins intense que celle mesurée dans d'autres roches salines ou granitiques. Si bien que les auteurs considérant de plus la forte atténuation des ondes dans cette roche, préconisent l'utilisation d'autres méthodes de surveillance de l'endommagement à l'échelle du massif rocheux.

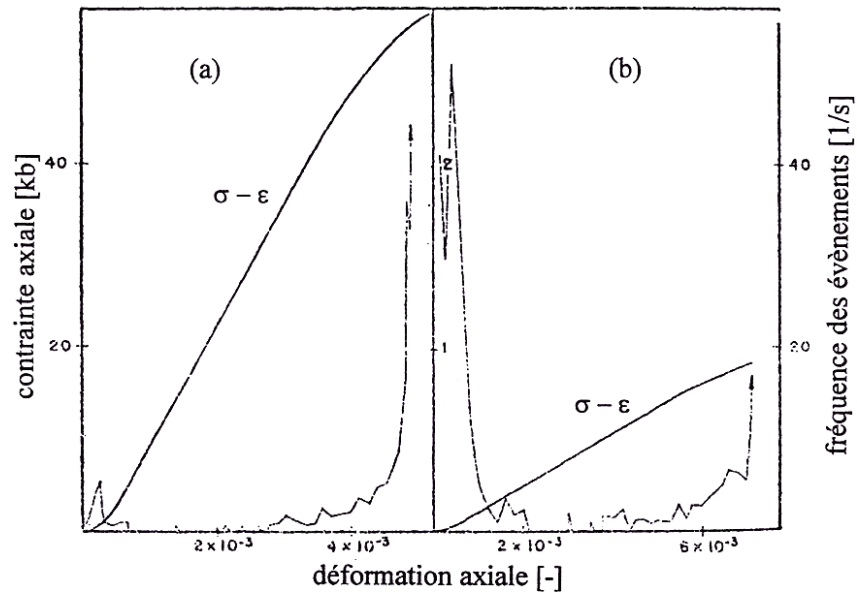


Figure 2.61 : Déformation et fréquence des émissions acoustiques lors d'essais de compression uniaxiale sur (a) : le granite de Weterly et (b) : un tuf du Colorado, d'après Scholz (1968).

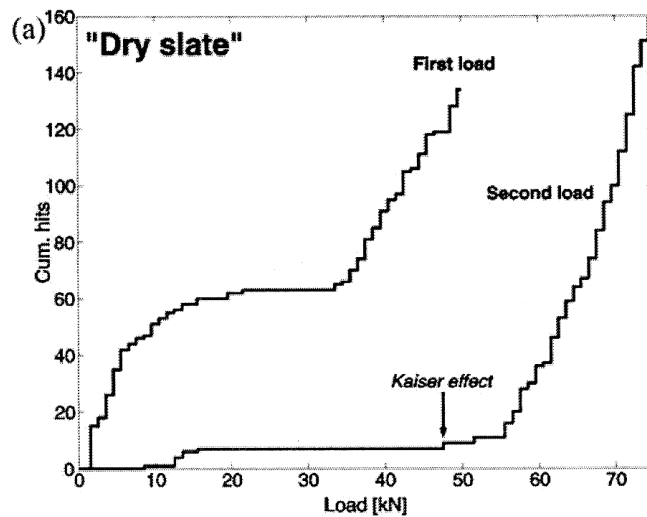


Figure 2.62 : Enregistrement cumulé de l'émission acoustique durant un essai de compression uniaxial sur l'argile de Boom : entre les deux phases de chargement, un mois s'est écoulé, d'après Lavrov et al. (2002).

### 2.6.4 Résistance à long terme

Nous avons vu au cours des paragraphes précédents que différentes contraintes caractéristiques pouvaient en théorie être rapprochées de la résistance à long terme de la roche étudiée. Il est donc intéressant de synthétiser ces résultats et de comparer ces valeurs.

Les essais de fluage réalisés sous différents déviateurs mettent en évidence l'existence d'un seuil de fluage, déviateur de contrainte en deçà duquel les déformations viscoplastiques finissent par s'amortir et où seul le fluage primaire est observé. Certains auteurs estiment que sa valeur n'excède pas 60 à 70% de la résistance en compression simple de la roche. Ces observations concordent avec l'hypothèse de l'existence d'une courbe limite, obtenue pour un essai de compression avec une vitesse infiniment lente. L'existence de cette courbe implique que, lors d'un essai de fluage, la déformation viscoplastique évolue vers une valeur asymptotique tant que le déviateur imposé reste inférieur à la résistance de la roche en compression infiniment lente. Cette contrainte représenterait donc le seuil de fluage.

L'analyse de la courbe contrainte-déformation lors d'un essai de compression uniaxiale permet de définir une contrainte de contraction maximale à partir de laquelle la croissance, l'interaction et la coalescence des fissures deviennent instable. Cette contrainte  $\sigma_{cd}$  caractériserait également la résistance à long terme de la roche car elle correspondrait à la résistance en compression infiniment lente, comme ont pu l'observer *Martin et Chandler* (1994) sur le granite du Lac du Bonnet. La résistance à la compression infiniment lente, assimilable au seuil de fluage, serait donc équivalente à la contrainte de contraction maximale.

Cependant, *a priori*, pour les roches très poreuses, comme le grès des Vosges, la correspondance ne semble pas si évidente puisque ce type de roches présente une phase de contractance à laquelle succède une phase de dilatance très marquée même en compression infiniment lente, comme nous avons pu l'observer (*Fabre*, 2001). Lors d'essais de chargement quasi statique sur des échantillons de grès des Vosges, nous avons atteint la courbe limite avec une vitesse de déformation de  $10^{-9} \text{ s}^{-1}$ . La contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd} = 23 \text{ MPa}$ , était alors bien inférieure à la résistance en compression infiniment lente,  $\sigma_f = 37 \text{ MPa}$ .

A partir des résultats d'essais de compression cyclique, il est possible de déterminer un seuil de fatigue,  $\sigma_E$ , appelé aussi limite d'endurance, qui n'est autre que le niveau de chargement pour lequel la longévité à la fatigue est infinie et donc le déviateur minimal à appliquer pour observer une phase de fluage tertiaire. Comparons maintenant cette valeur à la contrainte de contraction maximale.

*Mora* (1982) a déterminé les courbes d'endurance du granite de Senones, du granite de la Clarté, du marbre de Carrare et du grès de Voltzia et les limites d'endurance de ces quatre roches. Pour les granites, ces données confirment l'hypothèse d'une équivalence entre la résistance à long terme de la roche, la limite d'endurance et le seuil de dilatance comme on peut le voir dans le Tableau 2.6 (*Gatelier*, 2001). En revanche pour le marbre de Carrare et le grès de Voltzia, la correspondance n'est pas vérifiée. Il semble donc que la composition minéralogique et la structure de la roche (taille des grains, porosité) joue un rôle important.

De ces comparaisons, il ressort malgré tout une assez bonne correspondance entre la résistance de la roche en compression infiniment lente et le seuil de fluage. En première approximation, ce seuil peut aussi être approché par la contrainte de contraction maximale mesurée lors d'essais de chargement monotone ou du seuil de fatigue déterminé à partir d'essais cycliques.

Roches	$\sigma_{cd}$	$\sigma_E$	$\sigma_E/\sigma_{cd}$
Granite de Senones	139	137-138	0,99
Granite de la Clarté	138	128-130	0,93-0,94
Marbre de Carrare	73	88-92	1,21-1,26
Grès de Voltzia	24	33-34	1,37-1,42

Tableau 2.6 : Comparaison entre le limite d'endurance  $\sigma_E$  et le seuil de dilatance  $\sigma_{cd}$  en compression uniaxiale pour différentes roches, d'après Gatelier (2001).

## 2.7 Modélisation phénoménologique des comportements différés

### 2.7.1 Principes généraux

Une loi de comportement est une relation tensorielle qui relie à chaque instant  $t$ , le tenseur des contraintes au tenseur des déformations. Les formulations mathématiques de ces lois doivent obéir à trois principes généraux :

- le principe de déterminisme,
- le principe d'objectivité matérielle,
- le principe d'action locale.

Le principe de déterminisme stipule que l'histoire des déformations depuis le début du chargement jusqu'à l'instant  $t$  détermine l'état de contrainte à l'instant  $t$ . La réciproque est en général fautive : il n'y a de bijection entre les déformations et les contraintes qu'en élasticité.

Le principe d'objectivité matérielle impose à toute loi tensorielle de comportement d'être indépendante de tout changement de référentiel dans lequel elle est exprimée. Ce principe relativement trivial est généralement vérifié, notamment pour les lois de comportement ne faisant intervenir que les tenseurs de contrainte, de déformations et leurs invariants.

Le principe d'action locale précise que la détermination du tenseur des contraintes en un point d'un milieu continu ne nécessite que les déformations locales en ce point.

Ces trois principes, rappelés notamment par *Chambon* (2000), sont nécessaires pour valider l'approche théorique des lois de comportement visqueux.

De manière générale, une loi de comportement non linéaire associe un critère de plasticité, une loi d'écrouissage et une loi d'écoulement qui permettent de décrire les déformations du solide considéré. Pour l'étude des comportements différés, la définition de la loi d'écoulement est particulièrement importante.

Dans l'étude du comportement mécanique différé des géomatériaux, les lois utilisées font intervenir de manière explicite ou implicite par le biais des dérivées des tenseurs de contraintes et/ou de déformations, l'effet d'un paramètre qui n'est pas pris en compte dans les comportements instantanés : le temps. Il est possible de classer ces différentes lois de comportement, notamment en fonction de leurs formulations. On distingue, en effet, les lois explicites fonction du temps (modèles empiriques du type :  $\varepsilon^{vp}=f(t)$  ou  $q=f(t)$  ; modèles

analogiques ; modèles isochrones vérifiant  $f(q, \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}, t)=0$ ) des lois élastoplastiques qui elles, vérifient les principes généraux énoncés plus haut (modèles à plasticité différée,  $f(\boldsymbol{\varepsilon}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}})=0$  ; lois incrémentales du premier ordre,  $f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}})=0$ , ou du second ordre,  $f(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}, \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}})=0$ ).

### 2.7.2 Lois de fluage

Les premières lois de comportement viscoplastiques ont été établies de manière empirique. Basées sur des observations expérimentales, ces lois de fluage font intervenir le temps de manière explicite et décrivent la phase de fluage primaire ou secondaire. C'est le cas, par exemple, de la loi d'Andrade (1910), proposée pour décrire le fluage primaire des métaux mous :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = A t^{1/3} \quad [2.43]$$

$t$  est le temps,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$  la déformation viscoplastique et  $A$  est une constante caractéristique du matériau, fonction de la contrainte appliquée et de la température. Cette loi puissance a été généralisée plus tard sous la forme :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = B t^\alpha \quad [2.44]$$

D'autres lois de type logarithmique ont été utilisées pour décrire le fluage des métaux à faible température (*Lemaitre et Chaboche, 1996*). Ce type de loi prend classiquement la forme :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} (t \geq t_0) = A \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad [2.45]$$

$$\text{ou : } \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} (t \geq 0) = A \ln(1 + Ct) \quad [2.46]$$

avec  $A$  et  $C$  deux paramètres fonction du matériau et de la contrainte appliquée.

L'utilisation de ces lois est souvent justifiée par de très bons calages expérimentaux sur les roches (*Sabli, 1988, Kharbafî et Descoedres, 1995*) ou les bétons (*Bazant et Chern, 1984*). Cependant, ces modèles n'ont pas de validité générale, car comme l'a souligné *Bérest (1987)*, une loi de comportement où le temps figure explicitement ne peut avoir pour ambition que de décrire une expérience particulière.

La phase de fluage secondaire peut être modélisée par la loi de *Norton (1929)*, développée pour l'étude des déformations viscoplastiques des aciers soumis à haute température :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{vp} = A_0 q^n \quad [2.47]$$

où  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$  est la vitesse de déformation viscoplastique,  $A$  et  $n$  sont des constantes positives et  $q$  est le déviateur de contrainte. Cette expression est souvent complétée par le terme d'Arrhenius permettant la prise en compte de l'influence de la température sur le paramètre  $A$  :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{vp} = \left(\frac{A_0 q^n}{d^b T}\right) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad [2.48]$$

où :  $A_0$ ,  $n$  et  $b$  sont des constantes positives.

$d$  est le diamètre des grains.

$Q$  représente l'énergie d'activation de la réaction thermique [ $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ].

R est la constante universelle des gaz parfaits ( $R = 8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ ).

T est la température absolue (exprimée en degré Kelvin).

Dans le Tableau 2.7 sont répertoriés quelques valeurs des exposants n et b ainsi que les mécanismes d'écoulement associés.

Mécanisme d'écoulement	Exposant n	Exposant b
Fluage par diffusion (Nabarro-Herring)	1	2
Fluage par diffusion (Coble)	1	3
Glissement au contact des grains	1 à 5	2 à 3
Mouvement des dislocations	3 à 9	0

Tableau 2.7: Relation entre les mécanismes de fluage dominants et les paramètres de la loi de Norton généralisée, d'après Dussault et Fordham (1993) et Dowling (1998).

### 2.7.3 Modèle analogique de Bingham

Différents modèles analogiques ont été développés dans le but de modéliser le plus simplement possible le comportement différé des solides. Parmi ces modèles analogiques, on peut citer :

- le modèle visqueux de Newton : la viscosité modélisée par un amortisseur.
- le modèle viscoélastique de Maxwell : l'amortisseur (viscosité) est mis en série avec un ressort (élasticité)
- le modèle viscoélastique de Kelvin : l'amortisseur (viscosité) est mis en parallèle avec un ressort (élasticité).
- le modèle de Burger : mise en série des modèles de Kelvin et Maxwell.

Dans ce paragraphe, nous ne nous décrivons pas tous ces modèles. On pourra, cependant, se référer à la thèse de *Boidy* (2002) qui en fait une description détaillée. Nous nous limitons ici à l'étude du modèle analogique de Bingham qui est à la base de la plupart des modèles phénoménologiques développés actuellement dans l'étude des comportements différés.

Le modèle analogique de Bingham considère que les déformations différées ne se développent qu'au-delà d'un seuil de contrainte,  $\sigma_0$ . Ce modèle associe donc en parallèle :

- un patin parfait représentant ce seuil de contrainte :

$$\varepsilon^{vp} = 0 \text{ si } |\sigma| < \sigma_0 \quad [2.49]$$

- un amortisseur matérialisant la viscosité linéaire :

$$\sigma_v = \eta \dot{\varepsilon}^{vp} \quad [2.50]$$



Très souvent, il est complété par un ressort associé en série, permettant de prendre en compte la déformation instantanée réversible (élastique) (Figure 2.63) :

$$\sigma = E.\varepsilon^e \quad [2.51]$$

Dans les éléments viscoplastiques (patin et amortisseur), l'équilibre des contraintes s'écrit :

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_v = \sigma_0 + \eta \dot{\varepsilon}^{vp} \quad [2.52]$$

Or dans le ressort, l'état de contrainte est identique, donc :

$$\sigma = E.\varepsilon^e = E(\varepsilon - \varepsilon^{vp}) \quad [2.53]$$

En dérivant par rapport au temps, on obtient :

$$\dot{\sigma} = E \left( \dot{\varepsilon} - \frac{\sigma - \sigma_0}{\eta} \right) \quad [2.54]$$

ce qui permet d'écrire l'équation d'évolution du système lors d'un écoulement viscoplastique sous la forme suivante :

$$\eta.\dot{\sigma} + E.(\sigma - \sigma_0) = E \eta.\dot{\varepsilon} \quad [2.55]$$

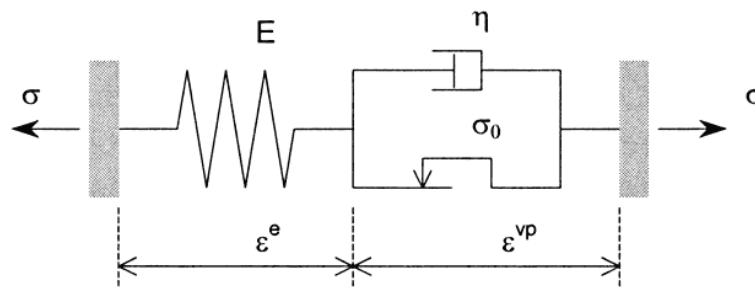


Figure 2.63 : Représentation du modèle analogique de Bingham.

#### 2.7.4 Théorie de Perzyna et lois viscoplastiques à potentiel

La théorie de la viscoplasticité de Perzyna fut initialement développée pour les métaux, avant d'être étendue à la modélisation des comportements viscoplastiques des géomatériaux. De nombreuses lois de comportement s'appuient sur cette théorie, comme la loi viscoplastique de Cristescu (*Cristescu et Hunsche, 1997*) ou la loi de Lemaitre que nous développerons plus loin et exploiterons dans le chapitre 5.

L'apparition de déformations irréversibles est généralement conditionnée par le dépassement d'un seuil de contrainte. Cette constatation amène à considérer l'existence d'une fonction limite  $f$  qui associe au tenseur des contraintes un nombre réel. Lorsque le comportement modélisé est de type élastoplastique, seules les valeurs négatives ou nulles de  $f(\sigma)$  sont admissibles. En revanche, dans le cas de la viscoplasticité, les états tels que  $f(\sigma) > 0$  sont possibles. Le point représentatif de l'état de contrainte dans l'espace des contraintes principales appartient alors à une surface

paramétrée par la norme du taux de déformations viscoplastique,  $\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}\|$ , d'équation  $f(\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}\|) = 0$  le long de laquelle le potentiel de dissipation est constant. Ces équipotentielles définissent une famille de surfaces, comprises entre la surface de charge plastique correspondant à une vitesse de d'écoulement infiniment lente ( $F=0$ ) et la surface de charge correspondant à un écoulement infiniment rapide ( $F=\infty$ ) (Figure 2.64).

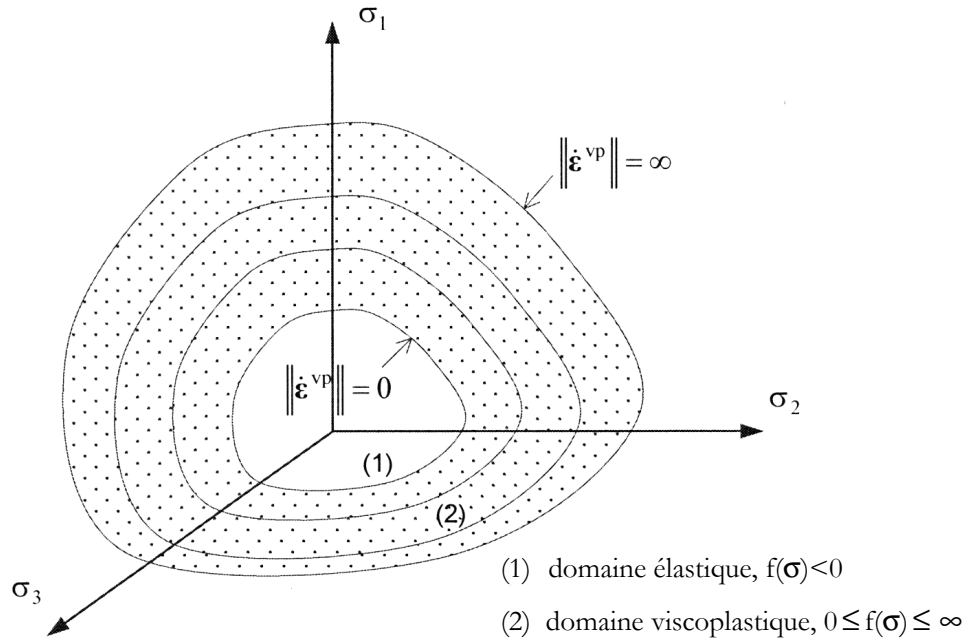


Figure 2.64 : Définition des équipotentielles du domaine viscoplastique pour un matériau isotrope dans l'espace des contraintes principales.

Comme nous l'avons rappelé dans les paragraphes précédents, le comportement des géomatériaux dépend entre autres de la vitesse de sollicitation. Cette sensibilité a conduit Perzyna (1966) à proposer une loi prenant la vitesse de déformation viscoplastique comme variable principale. Pour exprimer cette vitesse de déformation viscoplastique, Perzyna utilise le principe de partition du tenseur des vitesses de déformation totale, qui s'écrit :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{totale} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \quad [2.56]$$

où  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el}$  est la partie élastique du tenseur des vitesses de déformation et  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$  est assimilée à la partie viscoplastique de ce tenseur. En supposant que le matériau est purement viscoplastique, c'est-à-dire que sa viscosité ne se manifeste pas dans son domaine élastique, il est possible de définir, comme en plasticité, une surface de charge de référence,  $F = 0$ . Pour la fonction de charge,  $F$ , qui caractérise la surcontrainte, Perzyna suggère l'expression suivante :

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{f(\boldsymbol{\sigma})}{\boldsymbol{\kappa}(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})} - 1 \quad [2.57]$$

$f$  ne dépend que de l'état de contrainte et  $\boldsymbol{\kappa}$  est une fonction d'écrouissage.

En faisant l'hypothèse d'une surface de charge,  $F = 0$ , continue et convexe, Perzyna propose une loi d'écoulement viscoplastique de la forme :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.58]$$

où :  $\gamma$  représente la viscosité du matériau, exprimée en  $s^{-1}$ .

$\Phi(F)$  représente la fonction d'écoulement.

$$\langle . \rangle \text{ correspondent aux crochets de Macauly définis par : } \langle \Phi(F) \rangle = \frac{1}{2} (\Phi(F) + |\Phi(F)|)$$

D'après l'expression de  $F$ , on en déduit que :

$$\frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = K(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}) \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.59]$$

La loi viscoplastique de Perzyna peut donc être considérée comme une loi *associée* par analogie avec la théorie de la plasticité. En appliquant la règle de normalité, la vitesse de déformation viscoplastique peut donc s'écrire :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{\partial \Omega(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^{vp})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.60]$$

où  $\Omega(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^{vp})$  correspond au potentiel de dissipation thermodynamique.

Au cours du temps, le paramètre d'écrouissage évolue selon un processus qui reste à définir. L'hypothèse d'un écrouissage positif implique que la fonction  $f$  ne dépend que de l'état de contrainte et peut donc être exprimée dans l'espace des contraintes principales sous la forme :

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = f(p, q, J_3) \quad [2.61]$$

où  $p, q, J_3$  sont respectivement les premier, second et troisième invariants du tenseur des contraintes. Le troisième invariant sera toujours négligé dans un souci de simplification des lois. De plus, si l'on suppose que les déformations viscoplastiques se développent à volume constant, la fonction  $f$  ne dépend plus que de  $q$ . Elle peut donc se mettre sous la forme (critère de Von Mises) :

$$f(\boldsymbol{\sigma}) = q \quad [2.62]$$

Finalement, avec l'hypothèse d'un écrouissage positif, la loi d'écoulement définie par Perzyna vérifie :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi \left( \frac{q}{\kappa} - 1 \right) \right\rangle \frac{\partial q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.63]$$

$$\text{soit : } \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{3}{2} \gamma \left\langle \Phi \left( \frac{q}{\kappa(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})} - 1 \right) \right\rangle \frac{\mathbf{S}}{q} \quad [2.64]$$

avec  $\mathbf{S}$  le déviateur du tenseur des contraintes.

Etudiant le comportement différé des sols, *Olszak et Perzyna* (1964) ont observé une dilatance des matériaux au cours de leur écoulement. Pour tenir compte de cette observation

expérimentale, ils ont proposé un modèle utilisant une fonction  $f$  de type Drucker-Prager :

$$f(\sigma) = \alpha p + q \quad [2.65]$$

L'équation [2.63] devient :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi \left( \frac{\alpha p + q}{\kappa} - 1 \right) \right\rangle \left( \alpha \frac{\partial p}{\partial \sigma} + \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right) \quad [2.66]$$

où  $\alpha$  caractérise les déformations volumiques de fluage :  $\alpha = \text{tg}(\Psi)$ , avec  $\Psi$  l'angle de dilatance différée. Finalement, la loi d'écoulement définie par Perzyna dans le cas de l'élasto-viscoplasticité parfaite avec dilatance s'écrit :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \left\langle \Phi \left( \frac{\alpha p + q}{\kappa} - 1 \right) \right\rangle \left( \frac{1}{3} \alpha \delta_{ij} + \frac{3}{2} \frac{s_{ij}}{q} \right) \quad [2.67]$$

Les modélisations du comportement différé des géomatériaux développées au cours des dernières années sont très souvent des variantes de la théorie de Perzyna. Afin de mieux tenir compte des observations expérimentales, notamment du comportement volumique des roches, l'utilisation de lois non associées et une adaptation de la loi d'écoulement,  $\Phi(F)$  sont nécessaires.

*Cristescu et Hunsche* (1997) ont observé, en étudiant le comportement différé en fluage du sel gemme sous chargement triaxial, un comportement volumique de la roche fonction de l'état de contrainte, ce qui les a amenés à définir différents domaines dans le plan  $\tau$ - $\sigma$ . Comme on peut le voir sur la Figure 2.65, le matériau n'est considéré incompressible que dans un domaine de contrainte bien défini. Au-dessous de ce domaine, son comportement est contractant, au-dessus, l'état de contrainte génère une dilatance du matériau. Les états de contrainte admissibles par la roche sont délimités par la courbe de rupture.

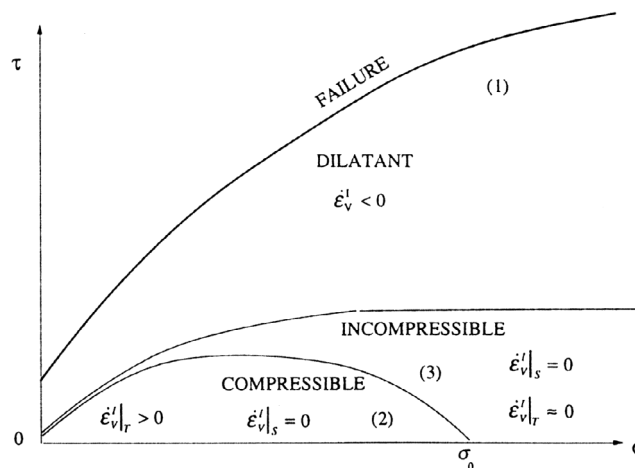


Figure 2.65 : Définition dans le plan  $\tau$ - $\sigma$  des différents comportements volumiques d'une roche, d'après *Cristescu et Hunsche* (1997)

L'expression générale de la loi de Cristescu est la suivante (*Cristescu et Hunsche, 1997*) :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{\dot{\boldsymbol{\sigma}}}{2G} + \left( \frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) \dot{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{I} + k_t \left\langle 1 - \frac{W(t)}{H(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\tau})} \right\rangle \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + k_s \frac{\partial S}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.68]$$

où  $G$  et  $K$  sont respectivement le module de cisaillement et le module de compressibilité volumique,  $H(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\tau})$  est la fonction d'écoulement,  $F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\tau})$  est le potentiel viscoplastique,  $S(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\tau})$  est le potentiel viscoplastique du fluage secondaire,  $k_t$  et  $k_s$  sont les coefficients de viscosité correspondants et  $W(t)$  est le travail viscoplastique. Les deux premiers termes de cette formule expriment donc la partie élastique de la déformation, les deux derniers la partie viscoplastique.

Le modèle de Lemaitre représente le comportement du solide élasto-viscoplastique avec écrouissage isotrope. Il utilise le critère de plasticité de von Misès et une loi d'écoulement de type puissance :

$$\Phi(F) = \left( \frac{F}{F_0} \right)^n \quad [2.69]$$

avec  $n \geq 1$  et  $F_0 = 1$  MPa (unité de référence). Mais au lieu d'utiliser le travail viscoplastique comme variable d'écrouissage, Lemaitre choisit la déformation viscoplastique  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$  qu'il écrit sous la forme :

$$\kappa(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}) = \left( \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \right)^{-m/n} \quad [2.70]$$

avec  $n$  et  $m$ , paramètres caractéristiques du matériau.

La loi de Lemaitre repose sur plusieurs hypothèses fondamentales :

- On se situe dans le domaine des petites déformations, en conditions isothermes.
- La déformation totale peut être décomposée en une partie élastique réversible et une partie viscoplastique irréversible (hypothèse de la partition des déformations) :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{totalc} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \quad [2.71]$$

- Les déformations viscoplastiques se développent à volume constant.

Pour Lemaitre, le fluage dépend de l'état de contrainte déviatorique appliqué au matériau et non de la surcontrainte définie par Perzyna. Cette hypothèse revient à considérer une surface de charge  $F$  de type :

$$F(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}) = \frac{f(\boldsymbol{\sigma})}{\kappa(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})} \quad [2.72]$$

Son étude des comportements des matériaux métalliques conduit Lemaitre à utiliser le critère de plasticité de von Misès ( $f = q$ ). Il définit intuitivement le potentiel de dissipation viscoplastique sous la forme suivante :

$$\Omega = \frac{K}{n+1} \left\langle \frac{q - \sigma_s}{K} \right\rangle^{n+1} \left( \boldsymbol{\varepsilon}^{vp} \right)^m$$

La loi constitutive s'obtient alors par application de la règle de normalité :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad [2.73]$$

L'équation de la loi d'écoulement donnée par Perzyna se simplifie donc et la loi viscoplastique de Lemaitre s'écrit finalement :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \gamma \cdot (q - \sigma_s)^n \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^m \quad [2.74]$$

où :  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$  est la déformation viscoplastique équivalente  $= \int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \otimes \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \right)^{\frac{1}{2}}$

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$  est la vitesse de déformation viscoplastique équivalente  $= \left( \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{\partial t} \right)_{q=\text{cste}}$

$q$  est la contrainte déviatorique équivalente  $= \left( \frac{3}{2} \mathbf{S} \otimes \mathbf{S} \right)^{\frac{1}{2}}$  avec  $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S} - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I}$

$n$  et  $m$  sont paramètres caractéristiques du matériau.

$\gamma$  est la viscosité, souvent notée  $A$ .

$\sigma_s$  est la contrainte seuil au-dessus de laquelle les déformations viscoplastiques se développent.

Le modèle rhéologique (Figure 2.66) associé à la loi de Lemaitre est constitué d'un ressort représentant l'élasticité du matériau placé en série avec un amortisseur conique qui traduit l'augmentation de la rigidité (écrouissage). La viscosité non linéaire de cet amortisseur conique peut ne s'exprimer qu'au-delà d'un certain seuil,  $\sigma_s$ , représenté par un patin.

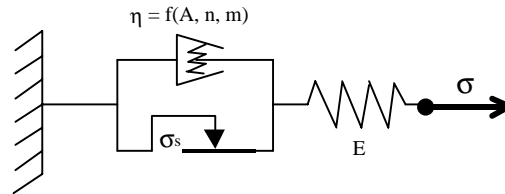


Figure 2.66: Modèle rhéologique représentant à la loi viscoplastique de Lemaitre, d'après Boidy (2002).

### 2.7.5 Modélisation de l'endommagement

Nous avons vu dans les paragraphes précédents qu'un matériau soumis à un chargement peut, lorsque le niveau de contrainte est suffisamment élevé, subir des modifications irréversibles de sa microstructure. Cet endommagement se traduit par la nucléation, la croissance et la coalescence de microfissures menant souvent à la rupture de l'échantillon. La compréhension et la modélisation de ces phénomènes est l'étude de la mécanique des milieux continus endommagés.

Les travaux de *Chaboche* (1977), de *Lemaitre et Chaboche* (1978), *Dragon et Mroz* (1978) et de *Hult* (1979) ont contribué à l'établissement des bases thermodynamiques de l'endommagement, en s'inspirant des travaux réalisés notamment par *Sidoroff* (1975, 1976) sur la modélisation du comportement inélastique sans endommagement des matériaux standards. En effet, comme le rappelle *Hajdu* (2003) une modélisation phénoménologique de l'endommagement impose les

hypothèses suivantes :

- le milieu est considéré continu et homogène à l'échelle de l'observation malgré les discontinuités microstructurales qu'il contient. Les notions courantes de mécanique des milieux continus sont donc applicables.
- L'évolution de l'état thermodynamique du milieu est considérée comme une succession d'états d'équilibre, ce qui assure la validité du principe d'action locale.

L'intégration de l'endommagement dans un modèle viscoplastique nécessite la définition d'une variable d'endommagement (*Kachanov*, 1958). Pour cela, considérons, dans un solide endommagé, un Élément de Volume Représentatif du milieu (EVR) et  $S$ , l'aire d'une section de ce volume repérée par sa normale  $\vec{n}$  (Figure 2.67). L'aire de l'ensemble des microfissures induites par l'endommagement de ce volume est notée  $S_D$ . Par définition, la variable d'endommagement est alors :

$$D_n = \frac{S_D}{S} \quad [2.75]$$

- $D_n = 0$  correspond à l'état non endommagé.
- $D_n = 1$  correspond à la rupture de l'élément en deux parties selon un plan normal à  $\vec{n}$ .
- $0 < D_n < 1$  caractérise l'état d'endommagement.

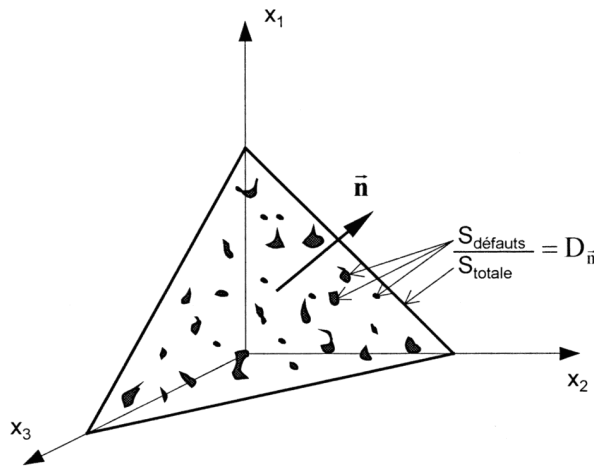


Figure 2.67 : Définition de la variable d'endommagement,  $D_n$ .

Si on se limite au cas de l'endommagement isotrope pour lequel l'orientation des microfissures est uniformément distribuée dans toutes les directions, la variable  $D_n$  ne dépend pas de  $\vec{n}$  et le scalaire  $D$  caractérise complètement l'endommagement.

$$D_n = D \quad \forall \vec{n}$$

Dans ce cas, au sein du matériau endommagé, la section qui résiste effectivement aux efforts est alors :

$$\tilde{S} = S - S_D = S (1 - D) \quad [2.76]$$

ce qui permet de définir la contrainte effective supportée par cette section :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad [2.77]$$

On a évidemment :  $\tilde{\sigma} \geq \sigma$

$\tilde{\sigma} = \sigma$  pour un matériau non endommagé

$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$  au moment de la rupture

La Figure 2.68 donne une illustration du concept d'endommagement élastique à une dimension. Pour un matériau suivant la loi de l'élasticité linéaire, le module effectif en fonction de l'état d'endommagement vaut :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1+\nu}{E} \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \left( \frac{\text{tr}\boldsymbol{\sigma}}{1-D} \right) \mathbf{I} \quad [2.78]$$

soit :  $\tilde{E} = (1-D) \cdot E \quad [2.79]$

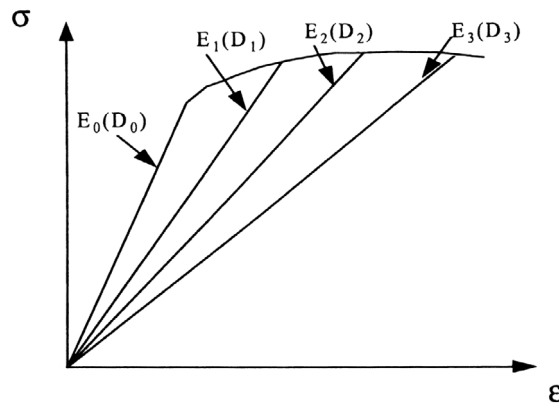


Figure 2.68 : Module élastique pour différents stades d'endommagement.

$E_0$  est le module élastique initial ; le module élastique décroît  $E_0 > E_1 > E_2 > E_3$  à mesure que l'endommagement augmente  $D_0 = 0 < D_1 < D_2 < D_3$ .

### 2.7.6 Viscoplasticité couplée à l'endommagement

Pour modéliser le comportement différé d'une roche et prévoir sa rupture, il est indispensable de coupler l'endommagement et la viscoplasticité. La notion de contrainte effective permet d'écrire très simplement les lois de comportement couplées, puisqu'il suffit de remplacer la contrainte usuelle  $\sigma$  par la contrainte effective  $\tilde{\sigma}$ , suivant le principe d'équivalence en déformation.

Dans la suite, nous présentons le développement d'un modèle viscoplastique couplé à l'endommagement connu sous le nom de modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre. En effet, lorsque le déviateur appliqué est important, le domaine de validité de la loi viscoplastique de Lemaitre est limité par le fait qu'elle ne prend pas en compte l'endommagement du matériau. Un couplage de l'endommagement et de la viscosité est donc nécessaire pour prévoir la rupture.

Ce modèle est valable pour des matériaux isotropes.



Les variables thermodynamiques du modèle viscoplastique endommageable retenues par *Lemaitre et Chaboche* (1996) sont :

- la déformation totale,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tot}}$ ,
- la température,  $T$ ,
- la déformation viscoplastique,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}}$ ,
- une variable d'écrouissage supposé isotrope,  $r$  (scalaire),
- une variable d'endommagement isotrope,  $D$  (scalaire).

Les hypothèses du modèle viscoplastique sont toujours retenues : domaine des petites déformations, conditions isothermes, partition des déformations et développement des déformations viscoplastiques à volume constant.

En substituant la contrainte  $\boldsymbol{\sigma}$  par la contrainte effective  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$  :

$$\boldsymbol{\sigma} \rightarrow \tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-D} \quad [2.80]$$

$$\text{soit : } \tilde{\mathbf{q}} = \left( \frac{3}{2} \tilde{\mathbf{S}} \otimes \tilde{\mathbf{S}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2.81]$$

$$\text{et : } \tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\sigma}}) \mathbf{I} \quad [2.82]$$

Le potentiel viscoplastique s'écrit donc :

$$\Omega = \frac{K}{n+1} \left\langle \frac{\tilde{\mathbf{q}} - \boldsymbol{\sigma}_s}{K} \right\rangle^{n+1} (\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}})^m \quad [2.83]$$

La loi constitutive est obtenue par simple application de la règle de normalité :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{vp}} = \frac{3}{2} \frac{1}{1-D} \left[ \frac{\mathbf{q}}{(1-D)\kappa(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}})^{\frac{1}{M}}} \right]^N \frac{\mathbf{S}}{q} \quad [2.84]$$

Pour représenter l'évolution de la variable d'endommagement  $D$ , *Rabotnov* (1969), a proposé la fonction :

$$\dot{D} = \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{A} \right)^r (1-D)^{-k} \quad [2.85]$$

où  $A$ ,  $r$  et  $k$  sont des caractéristiques de l'endommagement de fluage du matériau.

### **2.7.7 Modèle viscoplastique endommageable avec prise en compte du comportement volumique et de l'anisotropie**

Le défaut principal du modèle de Lemaitre est qu'il ne tient pas compte du développement de la déformation volumique irréversible puisqu'il suppose un développement des déformations viscoplastique à volume constant. *Hajdu* (2003) a donc modifié la loi viscoplastique endommageable de Lemaitre en introduisant deux nouveaux paramètres,  $\alpha$  et  $\beta$ , qui traduisent respectivement le comportement volumique du matériau (contractance, dilatance) et l'anisotropie

d'endommagement. Nous présentons ici succinctement ce modèle développé dans sa thèse de doctorat (*Hajdu, 2003*).

### 2.7.7.1 Hypothèses

La loi viscoplastique endommageable de *Hajdu* se base sur les hypothèses déjà utilisées pour le modèle de Lemaitre :

- La partition des déformations : la déformation totale peut être décomposée en une partie réversible (élastique) et une partie irréversible (anélastique).
- L'hypothèse des petites déformations : la déformation totale peu être considérée comme la partie symétrique de l'opérateur gradient du déplacement.

On suppose également que l'on se trouve en conditions isothermes : la dérivée temporelle de la température étant nulle, la dissipation d'énergie est purement mécanique.

Selon la convention utilisée sur le signe des contraintes, les contraintes de compression sont considérées comme positives.

### 2.7.7.2 Prise en compte de la déformation volumique

Pour tenir compte de la déformation volumique dans la définition de cette loi viscoplastique, comme *Olszak et Perzyna (1964)*, *Hajdu (2003)* substitue au critère initial, von Mises, le critère de Drucker-Prager (Figure 2.69). En faisant intervenir la contrainte hydrostatique, le comportement volumique peut alors être pris en compte par l'introduction du paramètre  $\alpha$  qui traduit la contractance ou la dilatace du matériau. Dans ces conditions, la surface de charge s'écrit :

$$f(J_2, I_1) = \sigma_{eq} + \alpha \sigma_m = 0 \quad [2.86]$$

avec : 
$$\sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\sigma}$$

La loi de Lemaitre modifiée se met donc sous la forme :

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{9} \alpha^2 + 1}} \dot{p} \left( \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{\sigma_{eq}} + \frac{\alpha \mathbf{I}}{3} \right) \quad [2.87]$$

où  $\mathbf{S}$ , est la partie déviatorique du tenseur des contraintes :

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I} \quad [2.88]$$

et  $p$ , la déformation viscoplastique cumulée :

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} \quad [2.89]$$

Une valeur positive de  $\alpha$  engendre un comportement contractant ; une valeur négative de  $\alpha$  traduit la dilatace du matériau. Avec  $\alpha = 0$ , on retrouve la loi viscoplastique de Lemaitre. En examinant les cas de chargement uniaxiaux (compression et traction), *Hajdu (2003)* rappelle que

les valeurs mathématiquement admissibles pour  $\alpha$  appartiennent à l'intervalle  $]-3 ; 1,5[$  en compression et  $]-1,5 ; 3[$  en traction.

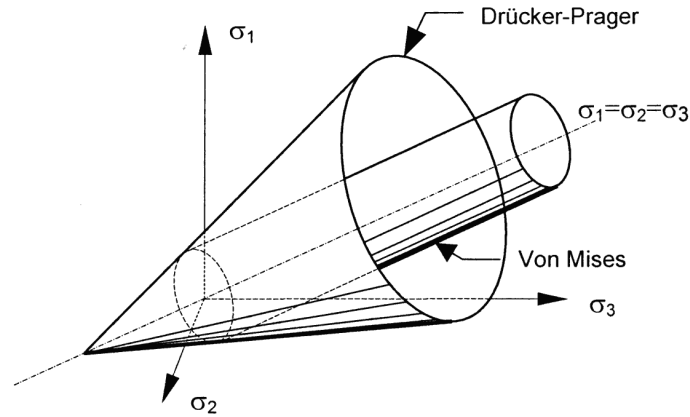


Figure 2.69 : Représentation des critères de Von Mises et de Drücker-Prager dans l'espace des contraintes principales.

### 2.7.7.3 Modèle viscoplastique endommageable et anisotrope d'Hajdu

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la loi de Lemaitre peut être couplée à un endommagement isotrope traduit par une variable d'endommagement scalaire,  $D$ . Cependant, cette simplification des mécanismes d'endommagement ne permet pas de décrire correctement l'état anisotrope du matériau endommagé. En effet, l'endommagement progressif de la structure de la roche, l'apparition de microfissures orientées suivant des directions préférentielles, engendre une dilatance globale et conduit à une rupture différée directionnelle. Hajdu (2003) a donc introduit une variable d'endommagement tensorielle suivant une loi d'évolution anisotrope dans l'objectif de décrire de manière plus fidèle les mécanismes d'endommagement.

Dans ce modèle, la contrainte effective a été définie par :

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1/2} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1/2} \quad [2.90]$$

où  $\mathbf{I}$  est le tenseur Identité du second ordre et  $\boldsymbol{\sigma}$  le tenseur des contraintes. Cette expression est identique à celle proposée par Cordebois et Sidoroff (1982).

Afin de décrire le comportement d'un matériau viscoplastique endommageable, il suffit d'appliquer le principe d'équivalence en remplaçant la contrainte  $\boldsymbol{\sigma}$  par la contrainte effective  $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ . Cette modification s'applique à toutes les relations constitutives. Ainsi le comportement élastique isotrope est décrit par la loi de Hooke couplée :

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^e = \frac{1+\nu}{E} \dot{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\dot{\tilde{\boldsymbol{\sigma}}}) \cdot \mathbf{I} \quad [2.91]$$

Dans le formalisme viscoplastique, le seul terme affecté par ce changement est le potentiel de dissipation, les autres variables du modèle viscoplastique restent inchangées.

$$\Omega^{vp} = \frac{K}{N+1} \left\langle \frac{f(\tilde{J}_2; \tilde{I}_1)}{K} \right\rangle^{N+1} p^{-N/M} \quad [2.92]$$

La contrainte effective est substituée à la contrainte dans le calcul des invariants. Une nouvelle surface équipotentielle est ainsi définie en fonction de l'état de contrainte. Les phénomènes visqueux sont couplés à l'endommagement :

$$f(\tilde{J}_2; \tilde{I}_1) = \tilde{\sigma}_{eq} + \alpha \tilde{\sigma}_m \quad [2.93]$$

avec  $\tilde{\sigma}_{eq}$ , la contrainte équivalente effective :

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \tilde{\mathbf{S}} : \tilde{\mathbf{S}}} \quad [2.94]$$

$\tilde{\mathbf{S}}$  est le déviateur de la contrainte effective :

$$\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{I} \quad [2.95]$$

$\tilde{\sigma}_m$  est la contrainte moyenne effective :

$$\tilde{\sigma}_m = \frac{1}{3} \text{tr} \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \quad [2.96]$$

*Hajdu* souligne que le paramètre  $\alpha$  n'est pas modifié par le couplage, ce qui suppose que l'endommagement se superpose à la viscosité. Cette séparation des effets permet de simuler des comportements volumiques complexes comme un comportement contractant au début de l'essai puis dilatant.

Le paramètre  $\beta$  intervient dans la loi d'évolution de la variable d'endommagement, que *Hajdu* a mise sous forme :

$$\dot{\mathbf{D}} = \overset{=4=}{\mathbf{S}} : \mathbf{Y} = \left( (\beta - 1) \overset{=4=}{\mathbf{I}} + \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} \right) : \sum_{i=1}^3 \left\langle \frac{t \hat{\sigma}_i}{\Lambda} \right\rangle^r \vec{\hat{\mathbf{s}}}_i \otimes \vec{\hat{\mathbf{s}}}_i \quad [2.97]$$

avec :  $\Lambda$  et  $r$ , des paramètres matériels,

$\mathbf{Y}$ , la force thermodynamique associée à l'endommagement (tenseur d'ordre 2)

$\overset{=4=}{\mathbf{S}}$ , un tenseur du quatrième ordre, nommé tenseur de structure

$\hat{\sigma}_i$  et  $\vec{\hat{\mathbf{s}}}_i$  les valeurs propres et les vecteurs propres de  $\mathbf{s}$  et  $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ , tenseur des contraintes motrices de l'endommagement

$\hat{\boldsymbol{\sigma}}$  est le tenseur des contraintes motrices de l'endommagement :

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \left[ \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{D})}{\det(\mathbf{I} - \mathbf{D})} \right]^{\frac{q}{2}} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \left[ \frac{(\mathbf{I} - \mathbf{D})}{\det(\mathbf{I} - \mathbf{D})} \right]^{\frac{q}{2}} \quad [2.98]$$

$t$  exprime l'état de triaxialité des contraintes :

$$t = \frac{\sigma_{eq}}{3\sigma_m} \quad [2.99]$$

L'influence du paramètre  $\beta$  sur l'évolution de l'endommagement est illustrée à la Figure 2.70.

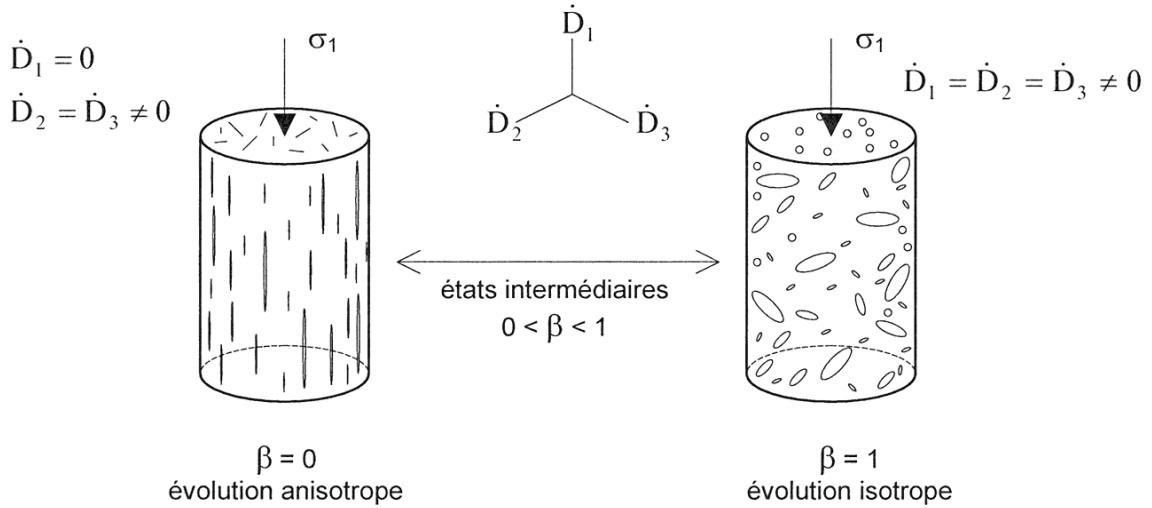


Figure 2.70 : Evolution de l'endommagement en fonction du paramètre d'anisotropie  $\beta$ , d'après Hajdu (2003).

Le taux de déformation viscoplastique se déduit de l'application de la règle de normalité au potentiel de dissipation. Avec le couplage, on obtient :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{\partial \Omega^{vp}}{\partial \sigma} = \frac{\partial \Omega^{vp}}{\partial \tilde{\sigma}_{eq}} \frac{\partial \tilde{\sigma}_{eq}}{\partial \sigma} + \frac{\partial \Omega^{vp}}{\partial \tilde{\sigma}_m} \frac{\partial \tilde{\sigma}_m}{\partial \sigma} \quad [2.100]$$

En développant cette équation et en introduisant la notation :

$$\tilde{\tilde{\mathbf{S}}} \equiv (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1/2} \cdot \tilde{\mathbf{S}} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1/2} \quad [2.101]$$

on obtient l'expression du taux de déformation viscoplastique :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \left\langle \frac{\tilde{\sigma}_{eq} + \alpha \tilde{\sigma}_m}{K_p^{1/M}} \right\rangle^N \left( \frac{3}{2} \frac{\tilde{\tilde{\mathbf{S}}}}{\tilde{\sigma}_{eq}} + \frac{\alpha (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}}{3} \right) \quad [2.102]$$

L'état d'écrouissage, caractérisé par la déformation viscoplastique, est donné par la formule :

$$\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\epsilon}^{vp} : \dot{\epsilon}^{vp} \quad [2.103]$$

ce qui permet d'écrire la loi constitutive du modèle viscoplastique endommageable d'Hajdu sous la forme :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \sqrt{\frac{3}{2}} \dot{p} \frac{\left( \frac{3}{2} \frac{\tilde{\tilde{\mathbf{S}}}}{\tilde{\sigma}_{eq}} + \frac{\alpha (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}}{3} \right)}{\left\| \left( \frac{3}{2} \frac{\tilde{\tilde{\mathbf{S}}}}{\tilde{\sigma}_{eq}} + \frac{\alpha (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}}{3} \right) \right\|} \quad [2.104]$$

Le modèle d'Hajdu (2003) fait intervenir 10 paramètres en couplant l'élasticité, la viscoplasticité et l'endommagement des roches. L'ensemble de ces paramètres sont répertoriés dans le Tableau 2.8.

Comportements associés	Paramètres
Elasticité	$E, \nu$
Viscoplasticité	$M, N, K$ et $\alpha$
Endommagement	$A, r, q$ et $\beta$

Tableau 2.8 : Paramètres du modèle viscoplastique endommageable d'Hajdu (2003).

Hajdu a réalisé une étude paramétrique afin d'évaluer l'influence de chacun des paramètres de sa loi viscoplastique endommageable avec prise en compte de la déformation volumique et de l'anisotropie d'endommagement. Il met ainsi en évidence que :

- Le paramètre  $N$  traduit la *sensibilité de l'évolution des déformations visqueuses à une variation de contrainte*. La réponse du modèle avec une valeur plus élevée de  $N$  par rapport à une valeur de référence  $N_{ref}$  montre des déformations viscoplastiques plus importantes suite à un accroissement de la contrainte.
- Le paramètre  $M$  traduit l'*écrouissage* du matériau.
- Le paramètre  $K$ , qui s'exprime en MPa.s, ne modifie pas la courbure de la réponse en fluage mais ajuste l'amplitude des déformations viscoplastique. Il représente donc la *raideur viscoplastique* du modèle.
- Le paramètre  $r$  traduit la *sensibilité de l'évolution de la variable d'endommagement à une variation de la contrainte*. Son influence est la même que celle de  $N$  en viscoplasticité.
- Le paramètre  $q$  joue sur la *progressivité de l'endommagement*. Il a un rôle similaire au paramètre  $M$  en viscoplasticité.
- Le paramètre  $A$ , qui s'exprime en MPa.s, traduit la *résistance à l'endommagement*.

Finalement, Hajdu nomme chacun de ces paramètres en fonction de leur rôle dans la réponse du modèle :

- $N$  : exposant de viscosité.
- $M$  : paramètre d'écrouissage.
- $K$  : coefficient de raideur viscoplastique
- $r$  : exposant d'endommagement
- $q$  : paramètre de progressivité de l'endommagement
- $A$  : coefficient de ténacité.

A l'aide des paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  qui modélisent respectivement le comportement volumique du matériau (contractance, dilatance) et l'anisotropie de l'endommagement, Hajdu a pu reproduire un vaste éventail de comportement volumique. En simulant des essais de chargement quasi statique, il a remarqué que pour une évolution complètement anisotrope de l'endommagement, le comportement simulé de la roche est de type fragile. En augmentant progressivement  $\beta$  le comportement devient ductile avec une phase post-pic de plus en plus marquée.

Le cas  $\alpha = 0$  (évolution de la déformation viscoplastique à volume constant) et  $\beta = 1$  (endommagement isotrope) permet de retrouver la loi de Lemaitre qui définit le modèle viscoplastique endommageable.

## 2.8 Conclusion

Dans cette thèse consacrée à l'étude des comportements mécaniques différés des roches argileuses, nous nous intéressons aux déformations différées dues à leur *viscosité*. Ces déformations fonction du temps s'accompagnent généralement d'un *endommagement différé*, diminution de la résistance mécanique causée par la détérioration progressive de la microstructure de la roche.

Nous avons présenté dans ce chapitre bibliographique une synthèse de l'état des connaissances actuelles dans le domaine des comportements mécaniques différés des roches. Expérimentalement, ces comportements sont étudiés principalement au moyen d'essais de fluage, d'essais de chargement quasi statique et d'essais de relaxation, laissant s'exprimer les propriétés visqueuses des matériaux. Nous avons détaillé les principes de tous ces essais et analysé leurs résultats.

Alors qu'il est souvent observé sur la glace, le sel ou divers alliages métalliques, le fluage secondaire, phase intermédiaire au cours de laquelle la vitesse de déformation est constante et qui précède l'initiation du fluage tertiaire, semble difficilement observable lors d'essais sur les roches. Certains auteurs (*Gonze*, 1988) doutent même de son existence. Cependant, d'après les résultats obtenus sur d'autres matériaux, le déviateur de contrainte augmenterait la vitesse de fluage secondaire, laissant supposer l'existence d'une valeur seuil en deçà de laquelle seul le fluage primaire se développerait, les déformations viscoplastiques s'amortissant à long terme. Pour les roches, ce seuil, s'il existe, est en théorie, défini par la résistance en compression infiniment lente de la roche et peut être assimilé en première approximation à la contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$ .

Le comportement mécanique différé des roches est influencé par de nombreux paramètres intrinsèques (minéralogie, porosité, teneur en eau) ou extrinsèques (état de contrainte, vitesse de sollicitation, température). Lors d'un essai de fluage en laboratoire sur une roche donnée, il est possible d'augmenter l'amplitude des déformations en augmentant la température, l'hygrométrie ou le déviateur de contrainte imposé. Nous utiliserons ce dernier paramètre pour accélérer les déformations dans le but d'observer les phases de fluage secondaire et tertiaire. L'exploration de ces phases est en effet indispensable pour extrapoler le comportement de la roche sur les durées d'exploitation des ouvrages souterrains de stockage et assurer leur pérennité et leur sûreté. Avec une augmentation progressive du déviateur de contrainte, la détection du seuil d'initiation du fluage secondaire doit être possible.

Les essais de chargement cycliques ont montré que les roches réagissent à un chargement cyclique de façon comparable à un chargement statique. En effet, l'enveloppe de la déformation acquise à chaque pic de charge, lors d'un essai cyclique présente les mêmes phases caractéristiques que la courbe de fluage. Il semble de plus, que le cyclage réduise la durée de la phase de fluage primaire, augmente la vitesse de déformation du fluage primaire et l'amplitude des déformations. On mesure en effet, une augmentation linéaire de la vitesse de déformation avec l'amplitude du cycle. Le fluage tertiaire est également plus rapidement atteint avec des cycles à basse fréquence et forte amplitude.

Nous essaierons donc dans notre étude expérimentale du comportement mécanique différé des roches argileuses d'exploiter ces résultats, en réalisant des essais de fluage oligo-cyclique avec des cycles de forte amplitude et de fréquence très faible. Ces essais devraient nous permettre d'observer plus rapidement qu'avec un essai de fluage statique la phase de fluage tertiaire et de quantifier l'influence du cyclage sur le comportement mécanique différé de ces roches.

Ce développement différé des déformations viscoplastiques est généralement couplé à un endommagement progressif du matériau qui peut mener à la rupture macroscopique de la roche.

Différentes techniques d'observations et de mesures permettent de détecter l'initiation de cet endommagement et de suivre son évolution. En effet, l'allure de la courbe contrainte-déformation lors d'un essai de compression uniaxiale permet de visualiser l'initiation de la dilatance associée à la nucléation, la propagation stable ou instable et la coalescence de microfissures au sein du matériau. La porosité influençant la vitesse de propagation des ondes P, des mesures de vitesses soniques peuvent également être corrélées au développement de la microfissuration. Elles permettent aussi de calculer et de suivre l'évolution des modules élastiques sécants,  $E$  et  $\nu$  dont la diminution témoigne de l'endommagement de la roche. Enfin, l'enregistrement de l'émission acoustique lors d'essais de compression est un moyen d'évaluer l'intensité des ruptures microscopiques au sein de la roche dont les sources (hypocentres) peuvent être localisées dans l'espace à partir des signaux reçus par plusieurs capteurs. Nous utiliserons ces diverses méthodes pour suivre et quantifier l'endommagement de nos échantillons lors des essais de l'étude expérimentale.

A l'échelle de la microstructure, les déformations viscoplastiques sont dues à des déplacements irréversibles des dislocations, défauts du réseau cristallin des minéraux constitutifs de la roche. Ces phénomènes sont difficilement observables en temps réel, lors d'essais de compression. Cependant, à l'aide de lames minces réalisées dans les échantillons rompus, les modifications de la microstructure, éventuellement liées à ces phénomènes, peuvent être observées après essai. Si l'on rapproche le phénomène de compaction qui a lieu lors de la diagenèse et le mécanisme de compression d'un essai de chargement lent, on peut s'attendre à observer les mêmes processus de déformations, c'est-à-dire des glissements, des réorientations préférentielles et des fracturations de grains (Coquinot, 2000). En effet, à température ambiante, le comportement mécanique différé des roches est essentiellement dû aux phénomènes de fluage cataclastique et granulaire. Nous observerons donc au microscope optique et électronique des lames minces issues des échantillons testés en fluage et chargement quasi statique lors de l'étude expérimentale afin de mettre en évidence au sein de la microstructure les modifications induites par les essais mécaniques.

Le but des études expérimentales est de permettre une extrapolation des résultats sur des échelles de temps plus longues et comparables à la durée d'exploitation des ouvrages, afin de prévoir à long terme les déformations et l'évolution de la zone endommagée par le creusement. Les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du mont d'Or seront donc simulés au moyen de modèles phénoménologiques basés sur la théorie de Perzyna. Nous exploiterons en particulier le modèle proposé par Hajdu (2003) prenant en compte le comportement volumique de la roche ainsi que l'anisotropie d'endommagement.





## Etude expérimentale du comportement mécanique différé des roches argileuses

**Objet :** *Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du développement des déformations différées et de l'endommagement de trois roches argileuses : l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. De par leur formation, ces trois roches sédimentaires sont anisotropes et considérées comme orthotropes de révolution.*

*Après avoir présenté ces roches en décrivant succinctement leurs compositions minéralogiques et leurs structures pétrographiques, nous présentons le dispositif expérimental utilisé pour cette étude. La forte teneur argileuse de ces roches et donc leur sensibilité à l'eau nous a contraints à concevoir de nouveaux équipements et à mettre en œuvre de nouvelles techniques de préparation des échantillons ; ils sont décrits dans ce chapitre.*

*Nous détaillons ensuite le programme expérimental réalisé, composé essentiellement d'essais de chargement quasi statique et d'essais de fluage de longue durée. L'influence de la vitesse de chargement, de l'anisotropie de structure de ces roches, du niveau de déviateur imposé sur le développement des déformations viscoplastiques et le mode de rupture a été évaluée. Les comportements mécaniques différés de ces trois roches argileuses ont également pu être comparés.*

### 3.1 Introduction

Pour leur aptitude au fluage et leur très faible perméabilité, les roches argileuses sont de potentielles couches hôtes pour les stockages de déchets radioactifs.

L'objectif de ce chapitre est de caractériser expérimentalement et de comparer le développement des déformations différées et l'endommagement de trois roches sédimentaires argileuses soumises à des essais de compression uniaxiale en fluage ou chargement quasi statique. Il s'agit de :

- l'**argilite de l'Est** (ANDRA – Meuse/Haute Marne),
- l'**argilite de Tournemire** (IRSN – Tournemire)
- la **marne du Mont d'Or** (SNCF – tunnel Dijon-Vallorbe).

D'un point de vue expérimental, nous avons fait en sorte de nous affranchir des phénomènes chimiques, thermiques et hydrauliques (désaturation, pertes hydriques) qui peuvent être couplés au comportement mécanique différé. Pour cela, certaines précautions ont été prises dans le protocole expérimental :

- La salle d'essais a été climatisée et la température ambiante maintenue à  $T = 20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$ . La température et l'hygrométrie de la salle ont été enregistrées en continu durant les essais.
- Tous échantillons ont été placés dans des membranes étanches lors des essais mécaniques (en particulier fluage de longue durée),
- Les échantillons non saturés n'ont pas été resaturés pour ne pas modifier chimiquement la microstructure de la roche (gonflement...) et s'affranchir de l'influence du fluide de resaturation sur le comportement mécanique. La teneur en eau a été calculée systématiquement.

### 3.2 Description des roches étudiées

#### 3.2.1 Argilite de l'Est

Dans le département de la Meuse, sur la commune de Bure, l'Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, l'ANDRA, a entrepris la construction d'un laboratoire souterrain dans une couche d'argilite du Callovo-Oxfordien datant du Jurassique supérieur - Jurassique moyen, soit âgée de 154 millions d'années (Figure 3.1). La coupe géologique du terrain est présentée sur la Figure 3.2. La composition de l'argilite de l'Est varie avec la profondeur. Des analyses minéralogiques réalisées sur plusieurs échantillons ont donné les proportions moyennes suivantes :

Argiles (kaolinite, illite, chlorite, I/S)	Quartz (SiO <sub>4</sub> )	Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )	Autres minéraux (Feldspaths, micas, pyrite)	Matières organiques
40 à 45 %	20 à 30 %	20 à 33 %	Moins de 5 %	1%

Tableau 3.1: Composition minéralogique de l'argilite de l'Est, d'après Scholtus (2001).

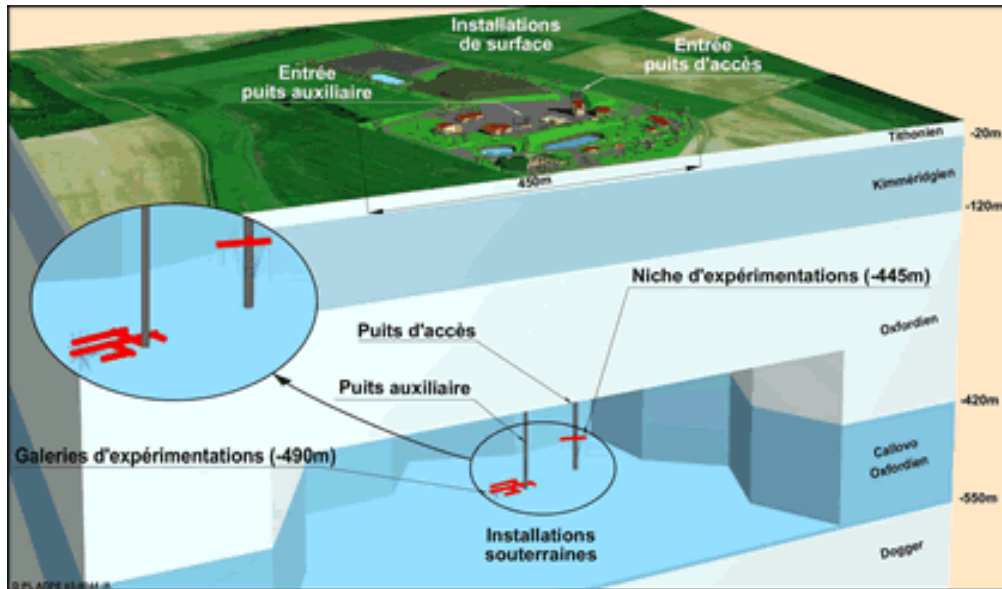


Figure 3.1 : Architecture générale du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne ([www.andra.fr](http://www.andra.fr)).

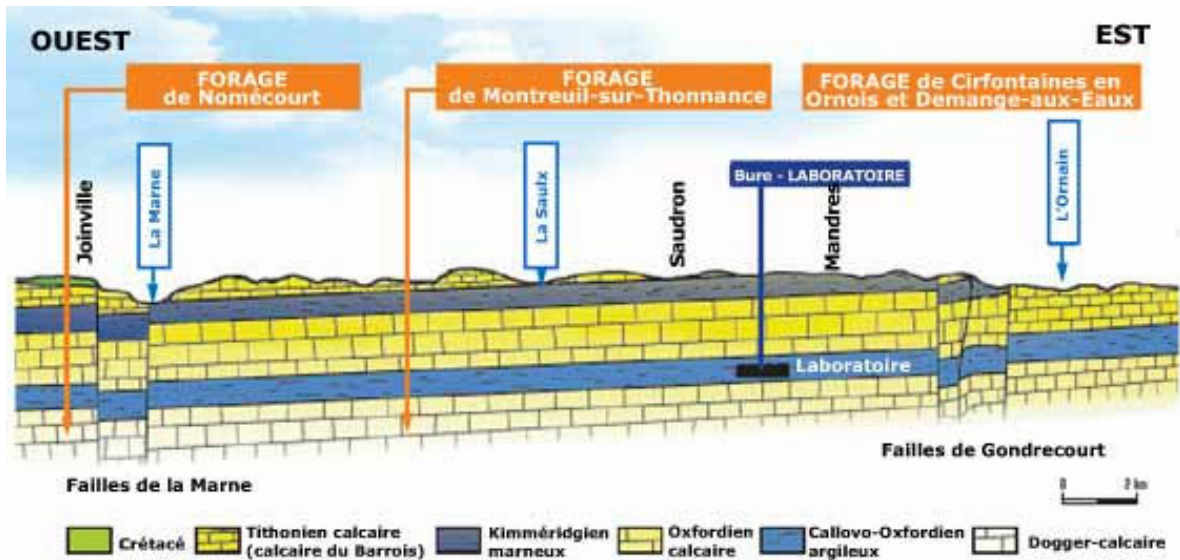


Figure 3.2 : Coupe géologique et emplacement du laboratoire souterrain du site de Bure ([www.andra.fr](http://www.andra.fr)).

La proportion en minéraux argileux étant inférieure à 50 %, le terme de marne argileuse pour cette roche serait plus approprié que celui d'argilite, réservée en général à des roches argileuses sans litage net contenant plus de 50 % d'éléments argileux. Cependant, nous garderons cette désignation utilisée par l'Andra.

L'argilite de l'Est est composée d'une matrice argilo-micritique relativement importante constituée de phyllosilicates (illites, interstratifiés illites/smectites, smectites...) par laquelle sont cimentés des cristaux de quartz anguleux à sub-anguleux, des carbonates sous forme de bioclastes, des feldspaths potassiques et des micas (Coquinot, 2000). Cette organisation se traduit par une faible teneur en eau (3 à 9 %) et une très faible perméabilité (entre  $10^{-14}$  et  $10^{-12}$  m/s) due à l'absence de connexion entre les pores de cette roche et à la faible dimension de ceux-ci ( $< 5 \mu\text{m}$  en moyenne). La porosité varie de 9 à 18 %.

Bauer-Plaindoux *et al.* (1998) ont montré que la cimentation calcique localisée uniquement entre les cristaux (200  $\mu\text{m}$ ) augmente le potentiel de fluage de cette roche.

Comme on peut le voir sur la Figure 3.3, les teneurs relatives en kaolinite, illite, chlorite et interstratifiés illite/smectite de la matrice argileuse varie avec la profondeur modifiant les propriétés physiques et chimiques de l'argilite de l'Est.

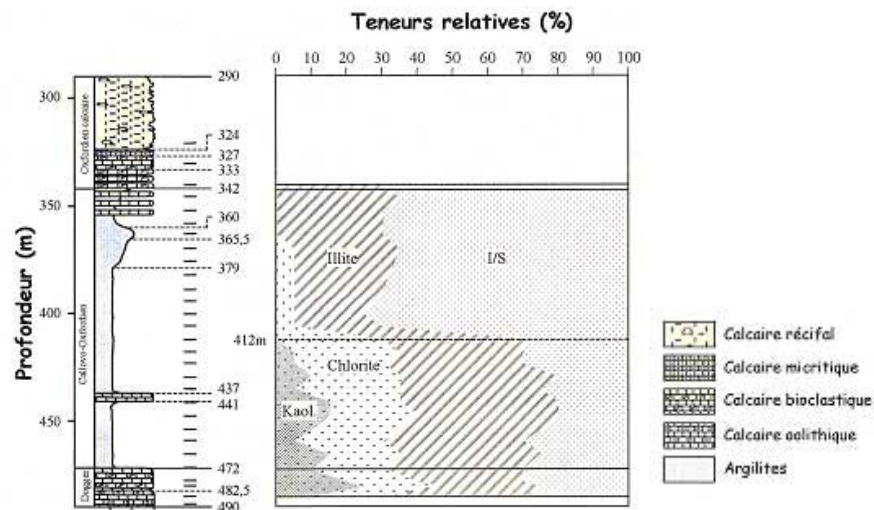


Figure 3.3: Log stratigraphique et composition minéralogique des argiles dans le forage HTM102, d'après Rousset (2001).

Résistance à la traction [MPa]	Résistance à la compression simple [MPa]	Module d'élasticité [GPa]	Coefficient de Poisson [-]
0,9 à 5,4	19 à 48,8	2,3 à 11	0,17 à 0,4

Tableau 3.2 : Caractéristiques mécaniques moyennes mesurées en laboratoire sur des éprouvettes d'argilite de l'Est, répertoriées par Gasc-Barbier (2002).

Le comportement mécanique de l'argilite de l'Est a été étudié par de nombreux auteurs (ANDRA, 1999 ; Ghoreychi, 1999, Escoffier, 2001 ; Boidy, 2002, etc.). Quelques résultats d'essais de traction, de compression uniaxiale et triaxiale, cités par Gasc-Barbier (2002) sont répertoriés dans le Tableau 3.2.

Lors des essais de fluage déjà réalisés en laboratoires, sur des durées variant de quelques heures à quelques mois, cette roche n'a pas présenté de phase de fluage secondaire nettement identifiable (Gasc-Barbier, 2002). La vitesse de déformation viscoplastique continue à diminuer (fluage primaire) tant que l'endommagement du matériau n'est pas atteint (fluage tertiaire). Ainsi, d'après la classification de Morlier (1966), présentée au chapitre 2 dans le paragraphe 2.4.1, l'argilite de l'Est peut être *a priori* classée parmi les roches viscoélastiques avec serrage. Les premières études réalisées sur l'argilite de l'Est ont montré que l'influence de la température sur les caractéristiques mécaniques de déformabilité, de résistance et d'endommagement n'est pas significative en dessous de 80°C. Mais cette influence est peut-être suffisamment faible pour être masquée par la dispersion des résultats.

Les essais de notre étude ont été réalisés sur des échantillons de cette argilite, provenant de deux carottes du sondage EST 205 (profondeur finale : 510 m), identifiées EST 05558 et EST 05633 et prélevées respectivement à 457 et 475 m de profondeur. Elles ont 10 cm de diamètre et environ 30 cm de longueur. Pour garder la roche intacte après le prélèvement *in situ*, les carottes ont été enveloppées dans une membrane étanche avant d'être confinées latéralement par un coulis expansif et axialement par un ressort, exerçant une contrainte de 100 à 200 kPa, puis placées dans une gaine PVC de 25 cm de diamètre.

### 3.2.2 Marne du Mont d'Or

Le tunnel du Mont d'Or, construit entre 1910 et 1915, est situé dans le Doubs, à proximité de la frontière suisse, sur la ligne SNCF Dijon-Vallorbe. D'une longueur totale de 6096 m dont 5110 m en France, ce tunnel traverse un massif essentiellement marneux de la chaîne du Jura. Ce site n'est pas pressenti ni étudié pour devenir un laboratoire souterrain ou un site de stockage profond. Néanmoins, la marne du Mont d'Or est une roche argileuse qui présente des caractéristiques identiques à celles des éventuelles couches hôtes pour ces projets (forte teneur en argiles, aptitude au fluage, faible perméabilité).

Plusieurs incidents se sont produits au cours de la vie de ce tunnel, notamment une rupture de radier, un écaillage en clé de voûte et une convergence des piédroits, dus en particulier à des problèmes de gonflement.

La marne du Mont d'Or est une marne de l'Argovien datant de l'Oxfordien moyen, formée il y a 150 millions d'années. Elle est dure à l'extraction et très microfissurée. D'après Robert et Fabre (1987), cette roche est composée d'une matrice argileuse qui cimente des cristaux de carbonates et, dans une moindre proportion, de quartz (Tableau 3.3.). La composition de sa matrice argileuse est détaillée dans le (Tableau 3.4).

Argiles	Quartz	Carbonates (CaCO <sub>3</sub> )
25 %	10 %	65 %

Tableau 3.3 : Composition minéralogique moyenne de la marne du Mont d'Or, d'après Robert et Fabre (1987).

Kaolinite	Illite	Chlorite	Montmorillonite
30 %	40 %	15 %	15 %

Tableau 3.4 : Composition de la matrice argileuse de la marne du Mont d'Or, d'après Robert et Fabre (1987).

N°	PM	Sondage	Position Azimuth par rapport au Nord – inclinaison	Profondeur [m]	Longueur [cm]
1	4950	F1 ascendant	N37 – 45°	14,65 – 15,0	35
4		F2G gauche descendant	N170 – 42°	14,4 – 14,7	30
9	5105	F1 ascendant	N52 – 45°	2,8 – 3,3	50
11	2700	F2G gauche descendant	N165 – 43°	11,9 – 12,25	35
13				6,5 – 6,8	30

Tableau 3.5 : Caractéristiques des carottes de marne du Mont d'Or utilisés pour la campagne d'essais.

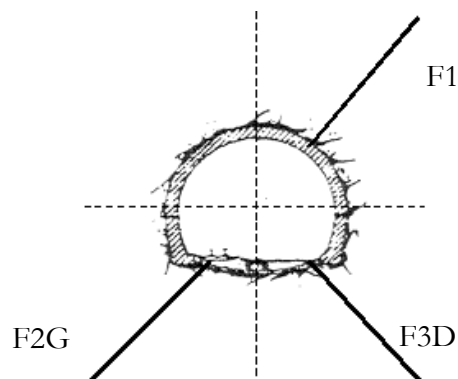


Figure 3.4 : Positionnement et orientation des sondages.

Les échantillons issus de cette roche proviennent des carottes de 3 sondages, prélevés dans les parties les moins fracturées (longueur de la carotte > 30 cm). L'inventaire de ces carottes de forages dans lesquelles nos échantillons ont été prélevés est présenté dans le Tableau 3.5.

*A priori*, du fait de sa formation, cette roche sédimentaire est anisotrope, ce que vont confirmer les mesures de vitesses soniques. Cependant, le litage n'est pas visible et l'orientation des carottes n'a pas été relevée. Si l'on suppose l'orientation des couches stratigraphiques subhorizontales, l'orientation du sondage renseigne sur celle des plans d'anisotropie. Cette information est à prendre en compte dans l'interprétation des résultats et de leur dispersion puisqu'il nous est impossible de tenir compte de cette anisotropie de structure.

### 3.2.3 Argilite de Tournemire

Pour étudier la solution du stockage souterrain en milieu géologique, un ancien tunnel ferroviaire sert de station expérimentale à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, IRSN. Il est situé sur les communes de Roquefort-sur-Soulzon, Saint-Rome-de-Cernon et Tournemire, dans l'Aveyron. D'une longueur de 1885 m, ce tunnel traverse une formation d'argilite du Toarcien-Jurassique inférieur (-175 à -184 millions d'années) compacte, de 200 mètres d'épaisseur, surmontée d'une couche de calcaires de 270 m (Figure 3.5).

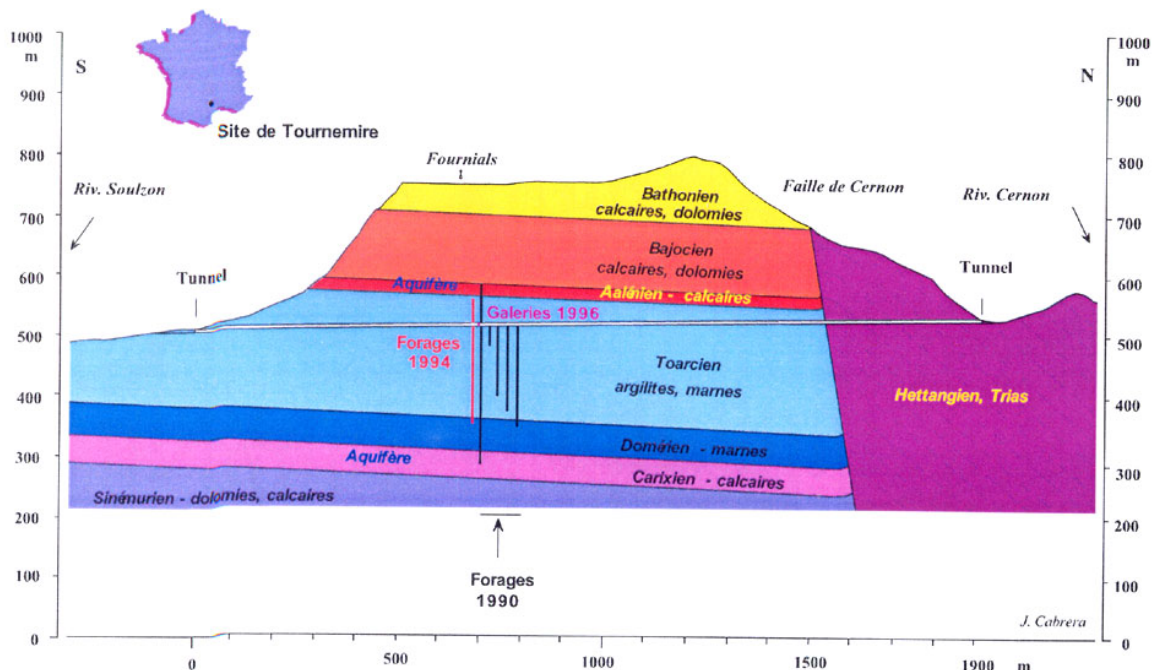


Figure 3.5 : Coupe géologique du site de Tournemire et positionnement des différents sondages, d'après Cabrera (1999).



Des analyses minéralogiques par diffraction X ont été réalisées par *Schmitt* (1994) permettant de connaître la composition moyenne de l'argilite de Tournemire. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.6.

<b>Argiles</b>	<b>Quartz</b>	<b>Carbonates</b>	<b>Autres minéraux (Feldspaths, micas, pyrite)</b>
55 %	19 %	15 %	11 %

Tableau 3.6 : Composition minéralogique des argilites de Tournemire, d'après *Schmitt* (1994).

La composition de la matrice argileuse de cette roche est donnée dans le Tableau 3.7. Les 55 % d'argile contenus dans cette roche se répartissent de la manière suivante :

<b>Kaolinite et smectite</b>	<b>Illite</b>	<b>Interstratifiés</b>
15-25 %	15-25 %	15-20 %

Tableau 3.7 : Composition de la matrice argileuse des argilites de Tournemire, d'après *Charpentier* (2001).

Le mode de formation de ces dépôts sédimentaires confère à l'argilite de Tournemire une anisotropie de type orthotrope de révolution dont le plan isotrope est le plan de stratification.

Le comportement mécanique de l'argilite de Tournemire a été étudié par de nombreux auteurs (*Niandou*, 1994, *Hajdu*, 1998 ; *Rejeb*, 1999 ; *Cabrera*, 2001). Quelques-unes des principales caractéristiques mécaniques de cette roche déterminées au cours d'essai de compressions simples sont résumées dans le Tableau 3.8.

<b>Résistance à la compression simple [MPa]</b>	<b>Module d'élasticité [GPa]</b>	<b>Coefficient de Poisson [-]</b>
18,26 à 46,17	10,1 à 30,4	0,12 à 0,25

Tableau 3.8 : Caractéristiques mécaniques moyennes mesurées en laboratoire sur des éprouvettes d'argilite de Tournemire d'après les essais réalisés par *Niandou* (1994).

Les échantillons utilisés pour ce programme d'essai sont issus de 2 sondages subhorizontaux réalisés sur le site de Tournemire, les sondages M4, M5 et TF4. Fin janvier 2003, 12 carottes d'une longueur de 20 cm environ ont été expédiées dans des enveloppes sous-vide par l'IRSN au laboratoire 3S. Certaines carottes étaient cassées, certaines enveloppes étaient percées mais les trous ont été rebouchés dès réception avec un scotch étanche afin de limiter les pertes hydriques.

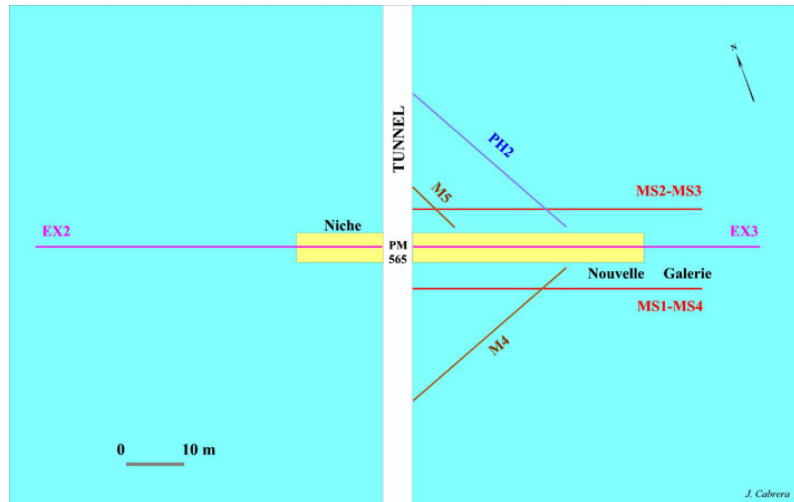


Figure 3.6 : Schéma de la galerie de la station expérimentale de Tournemire : positionnement des forages (données IRSN).

### 3.3 Description des dispositifs expérimentaux

L'étude expérimentale du comportement mécanique différé de l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or a été réalisée grâce à des essais de chargement quasi statique et des essais de fluage. Nous décrivons dans les paragraphes suivants les équipements expérimentaux que nous avons utilisés.

#### 3.3.1 Presse de chargement lent

Pour les essais de chargement quasi statique, nous avons utilisé le bâti de chargement lent présenté sur la Figure 3.7. D'une capacité de 500 kN, il est équipé d'un moteur pas à pas et permet de solliciter des échantillons en compression ou en traction sous de très faibles vitesses de déformation axiales, variant de  $0,03 \mu\text{m.mn}^{-1}$  à  $6 \mu\text{m.mn}^{-1}$ . Pour un échantillon de 80 mm de hauteur, ces vitesses de chargement correspondent à des vitesses de déformation axiale de  $6,25.10^{-9}$  à  $1,25.10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Cette presse est équipée d'un capteur de force *Deltech* de 200 kN ainsi que de 8 voies jauges. Ces 8 voies permettent la mesure simultanée des déformations données par 8 jauges collées à la surface de l'échantillon. Ce dispositif complet permet de déterminer entièrement le tenseur des déformations lors d'essais réalisés hors axes sur des échantillons de roches anisotropes (cf § 3.3.9). Les mesures locales de déformations par jauges d'extensométrie sont complétées par des mesures externes à l'aide de deux capteurs de déplacements (LVDT).

Le connecteur raccordé à la cellule d'essais a, de plus, été instrumenté de 4 prises BNC permettant le branchement de 4 capteurs piézo-électriques en PVDF (Poly-Vinylidène DiFluoré) pour les mesures de vitesses ultrasoniques (cf § 3.3.5).

Cette presse a l'inconvénient d'être constituée de quatre colonnes en acier de 1,25 m de hauteur qui sous l'action de la chaleur se dilate, le coefficient thermique de cette structure valant environ  $10 \mu\text{m.m}^{-1}.\text{°C}$ . Les variations de température journalières pouvant entraîner une augmentation de contrainte de 0,8 MPa par degré °C, la salle d'essais a été climatisée pour assurer le maintien de la température à une valeur constante. La température et l'hygrométrie ambiantes de la salle sont

mesurées en continu par un hygro-thermomètre enregistreur.

Les signaux des capteurs sont traités par des conditionneurs Sensorex puis une carte d'acquisition National Instrument (16 bits). Le logiciel d'exploitation, développé avec *LabWindows/CVI*, permet de définir les paramètres d'acquisition, notamment la cadence de scrutation, de visualiser en temps réel l'évolution des signaux et de les sauvegarder numériquement au format texte.

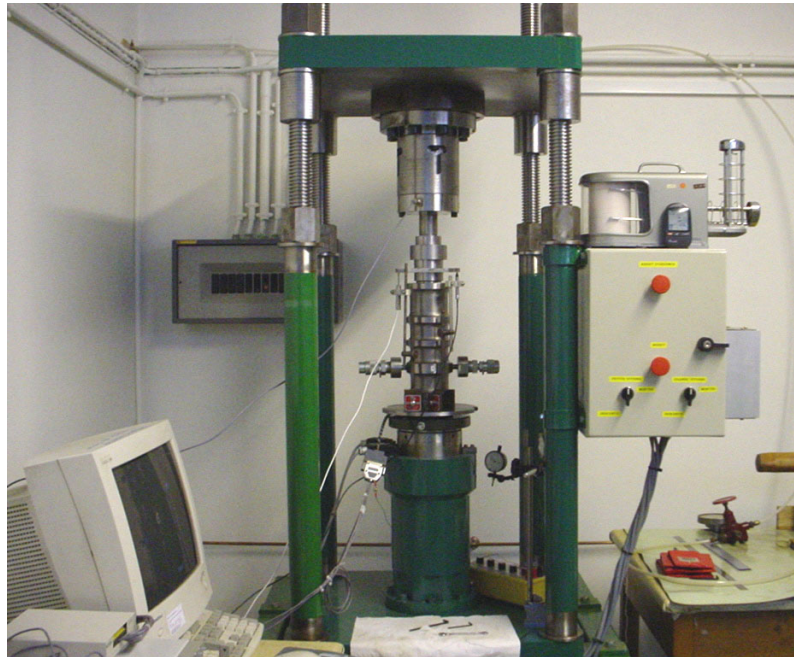


Figure 3.7 : Bâti de chargement lent du Laboratoire 3S et son système d'acquisition.

### 3.3.2 Bâtis de fluage

Pour cette étude du comportement mécanique des roches argileuses, la conception et la réalisation de plusieurs bâtis de fluage ont été nécessaires. Le principe de nos bâtis de fluage est relativement simple : la contrainte supportée par l'échantillon est appliquée par l'intermédiaire d'un plateau chargé de poids relié à un double bras de levier (Figures 3.8 (a)). Ce système de chargement est entièrement indépendant du réseau électrique si bien que les coupures de courant éventuelles n'interrompent que l'acquisition des données sans perturber l'essai.

Les trois bâtis de fluage mis en place sont équipés de huit voies jauges, d'un capteur LVDT et d'un capteur de force *Deltech* de 100 kN. L'acquisition des données est permise grâce à la mise en réseau de trois bancs de mesures *Fieldpoint* de *National Instrument*. Ces bancs sont composés de deux modules jauges FP-SG-140 (résolution 16 bits) pouvant mesurer chacun la tension aux bornes de huit jauges d'extensométrie et un module FP-AI-V10 récupérant la tension de sortie aux bornes du capteur LVDT. Les données sont transmises à l'ordinateur par l'intermédiaire d'un module FP-1600, via une liaison Ethernet.

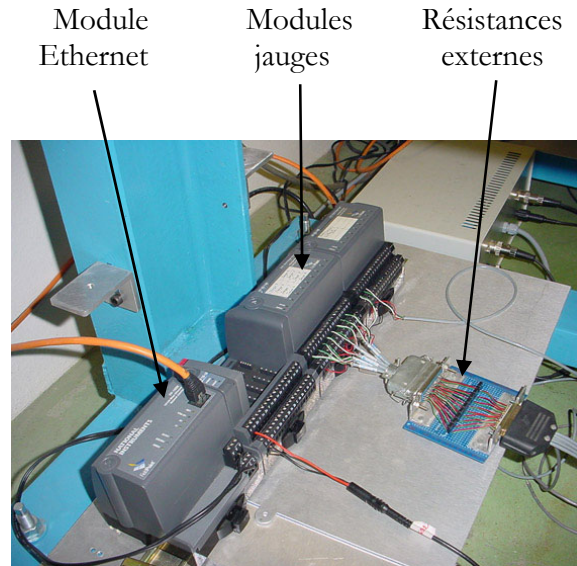
Le module FP-SG-140 est configuré pour travailler en demi-pont ou pont complet. Nous avons

donc dû compléter les ponts de Wheastone avec des résistances de précision externes afin de mesurer la déformation donnée par les jauges en montage  $\frac{1}{4}$  de pont. Ce dispositif est visible sur la Figures 3.8 (b).

Le réseau est géré par un ordinateur et chaque banc est programmable indépendamment des deux autres. Un logiciel d'acquisition des données a été développé avec l'environnement de programmation *Labview*. Il permet de définir la fréquence de scrutation des voies et de visualiser en temps réel les signaux des différents capteurs. Les données brutes sont enregistrées au format texte.



(a)



(b)

*Figures 3.8 : Bâti de fluage : (a) Vue générale ; (b) Détail du système d'acquisition Fieldpoint.*

### 3.3.3 Presse Schenck

Les essais de compression uniaxiale à des vitesses de déformation allant de  $10^{-3}$  à  $10^{-6}$  s<sup>-1</sup> ont été réalisés sur une presse servohydraulique universelle *Schenck hydropuls* de capacité 1000 kN (Figure 3.9). Cette presse est équipée d'un capteur de force intégré d'une précision de 0,02 %. Trois capteurs de déplacements (LVDT) positionnés en triangle autour de la cellule permettent une mesure externe des déplacements et des jauges d'extensométrie collées sur l'échantillon mesurent les déformations locales (*Gatelier, 2001 ; Millien, 1993*).

Les signaux des capteurs de force, des LVDT et des jauges d'extensométrie sont traités et enregistrés en continu sur une chaîne d'acquisition *Visbay Micromesures Système 4000*. La conversion analogique-numérique est réalisée par une carte d'acquisition 16 bits. Un logiciel de d'acquisition et de traitement des signaux a été développé par *Gatelier (2001)* à l'aide de l'environnement de programmation *LabWindows/CVI* en langage C. Les données peuvent être stockées au format texte sur disquette.



(a)



(b)

Figure 3.9 : Presse Schenck  
(a) Vue générale (b) Détail de la cellule et des capteurs LVDT mis en place entre les plateaux.

### 3.3.4 Cellules d'essais

Pour réaliser le programme expérimental uniquement composé d'essais de compression uniaxiale, nous avons utilisé les cellules triaxiales Boehler dont une vue d'ensemble et un schéma de principe sont présentés respectivement sur la Figure 3.10 et la Figure 3.11. Ces cellules présentent les avantages suivants :

- centrage automatique de l'éprouvette,
- montage et démontage rapides,
- câblage des jauges à travers la cellule.

Afin de limiter les effets de frettage, les bases des échantillons sont enduites d'une fine pellicule de graisse graphitée. Une membrane de néoprène d'épaisseur  $8/10^{\text{ème}}$  mm, de diamètre 35 mm est disposée autour de l'éprouvette afin d'assurer son étanchéité et de minimiser les pertes hydriques éventuelles lors des essais de fluage de longue durée. Une rotule sphérique est placée entre le piston supérieur de la cellule et le plateau de la presse.

Sur le modèle de la cellule Boehler, nous avons conçu une nouvelle cellule adaptée aux compressions monoaxiales, avec un corps transparent, permettant de visualiser l'échantillon au cours de l'essai (Figure 3.12).

Cette cellule a été utilisée pour les essais de chargement quasi statique avec mesures de vitesses soniques. Transparente, elle permet de suivre visuellement le développement de la déformation. Elle pourrait également être employée pour des essais de fluage de longue durée.

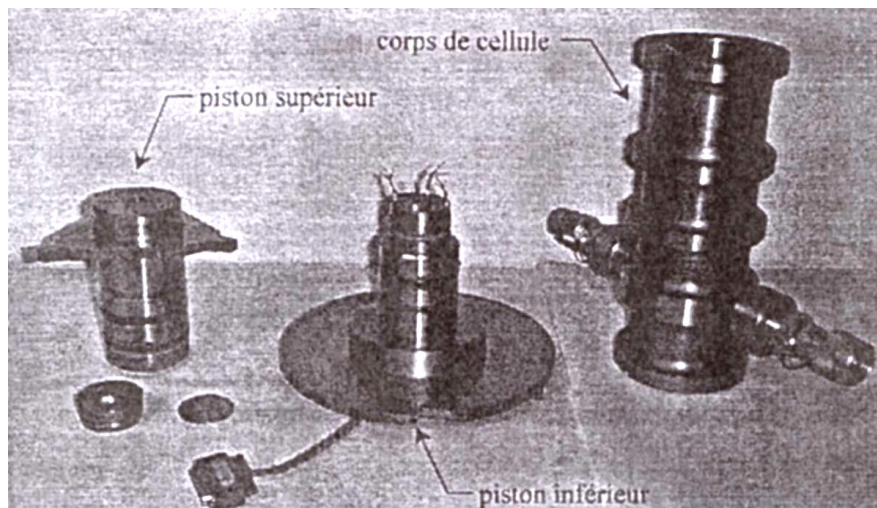


Figure 3.10 : Cellule Boehler, d'après Gatelier (2000).

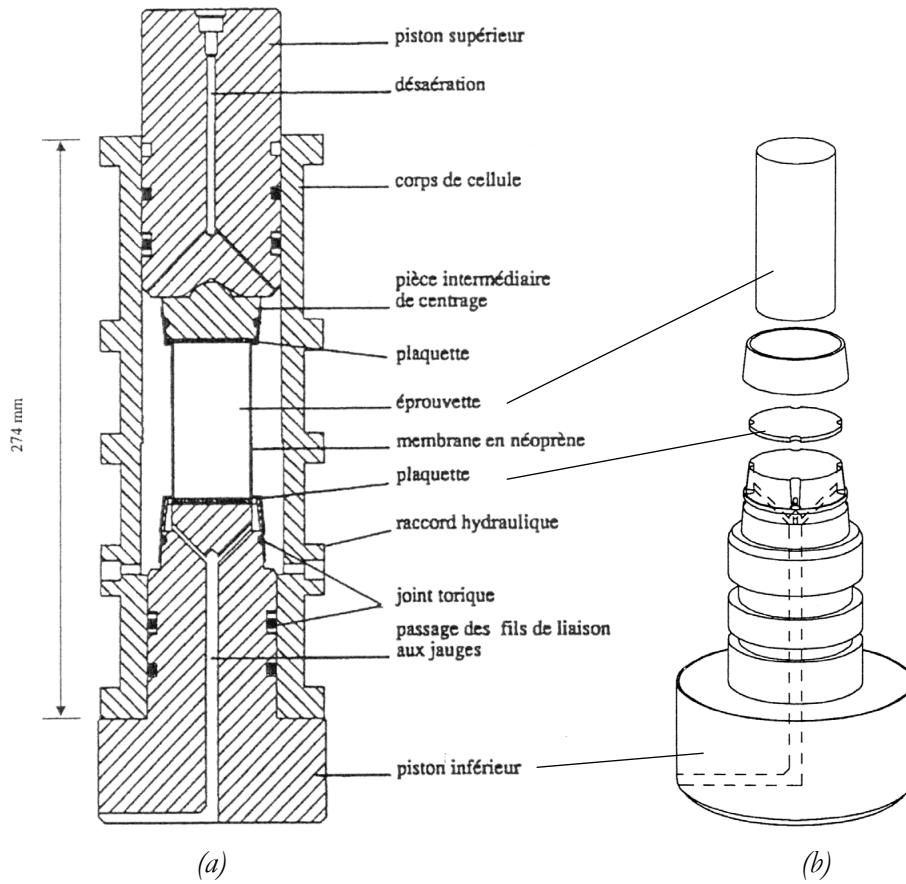


Figure 3.11 : Cellule Boehler, d'après Millien, 1993 :  
 (a) Schéma de principe; (b) vue détaillée du piston inférieur.



Figure 3.12 : Vue d'ensemble de la cellule de compression uniaxiale transparente.

### 3.3.5 Capteurs piézo-électriques

Pour les mesures de vitesses de propagation des ondes P au cours des essais de compression uniaxiale, nous avons utilisé les propriétés piézo-électriques du Poly-Vinylidène DiFluoré (PVDF).

Le PVDF est vendu sous forme d'une feuille d'épaisseur 100  $\mu\text{m}$  dont les deux faces conductrices polarisées, peuvent servir d'émetteur ou de récepteur et remplacer, grâce à leur propriété piézo-électrique, les céramiques couramment utilisées pour les mesures de vitesses de propagation d'ondes soniques. D'après *Noury et al.* (1998), le PVDF peut être soumis à de hautes pressions (80 MPa) sans être altéré ou que sa sensibilité ne soit affectée. Il était donc possible *a priori* de l'introduire dans nos cellules d'essais câblées, sans modification du câblage, pour faire des mesures de vitesses soniques (axiales ou latérales) durant les essais de fluage ou de chargement quasi statique.

La préparation de ces capteurs est un peu délicate. Dans le film PVDF, il faut d'abord découper, au cutter, en évitant le court-circuitage des deux faces, un petit rectangle de surface suffisante (quelques  $\text{cm}^2$ ). Plus la surface et/ou l'épaisseur du capteur est importante, meilleur est le signal reçu ou envoyé. Le câblage électrique est réalisé à l'aide de fils *Visbay* très fins, collés par une colle conductrice époxy à l'argent (*Elecolit 336*). Après le séchage de la colle, il suffit de souder le capteur sur une prise BNC pour permettre son branchement sur les appareils de mesure.

Pour réaliser les mesures de vitesses de propagation d'ondes soniques, les capteurs PVDF doivent être positionnés par couple émetteur-récepteur, sur l'échantillon, dans l'axe ou latéralement, dans le diamètre (Figure 3.13). Il est possible de les coller sur l'échantillon avec une résine époxy pour assurer le couplage du capteur et de la roche ; les capteurs ne seront alors plus réutilisables.

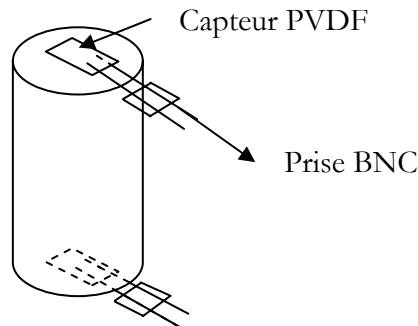


Figure 3.13 : Positionnement des capteurs PVDF pour la mesure des vitesses ultrasoniques dans l'axe de l'échantillon.

Le dispositif de mesure est constitué de deux couples de capteurs PVDF, d'un générateur d'impulsions, d'un oscilloscope enregistreur (*Pico ADC 212*), et d'un ordinateur permettant la visualisation des mesures et la commande des acquisitions par l'intermédiaire du logiciel *Picoscope* (Figure 3.14).

Le générateur d'impulsions excite le capteur émetteur toutes les millisecondes en générant des Dirac, de 300 V d'amplitude, et de largeur à mi-hauteur, 10 ns. Le système d'acquisition numérique permet l'enregistrement des signaux et la mesure des temps de propagation avec une résolution d'environ 10 ns.



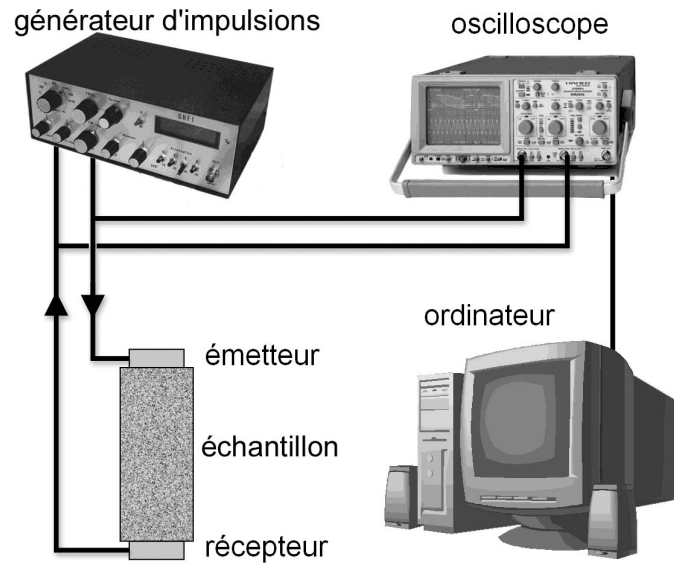


Figure 3.14 : Chaîne de mesure de vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

### 3.3.6 Préparation des échantillons

Toutes les carottes reçues avaient un diamètre supérieur à la taille des embases de nos cellules. Pour la réalisation de nos essais, il a donc fallu les recarotter en diamètre 36 ou 40 mm.

La forte teneur en particules argileuses et leur sensibilité à l'eau (montmorillonite, smectite) a rendu les opérations de préparation des échantillons (sciage, carottage et rectification des faces) très délicates car elles ont dû être réalisées à sec, en utilisant l'air comprimé comme fluide de refroidissement, et en limitant la mise à l'air de la roche pour éviter le délitage et les éventuelles pertes hydriques. Les éprouvettes ont donc été préparées au dernier moment, juste avant d'être soumises aux essais auxquels elles étaient destinées. La procédure suivie a été la suivante :

1. Sciage à sec des carottes en morceaux de longueur 80 mm,
2. Scellement, dans des moules PVC, avec de la paraffine, avec un centrage par vis pour éviter le glissement sur les bords intérieurs (Figure 3.15),
3. Carottage à sec à l'aide d'un carottier à couronne diamantée, monté sur une perceuse radiale GSP (Figure 3.16),
4. Rectification avec une rectifieuse plane pour parfaire le parallélisme des bases.

Les tolérances d'écart au parallélisme mesurées avec un comparateur à  $1 \mu\text{m}$ , préconisées par la Société Internationale de Mécanique des Roches (*ISRM*) ont été respectées, c'est-à-dire un écart maximal de  $\pm 10 \mu\text{m}$ .

Pour la réalisation de ces quatre phases de préparation des échantillons, nous avons dû concevoir de nouveaux équipements, notamment une série de moules en PVC, entièrement démontables, un dispositif de fixation de l'étau sur lequel sont maintenues les moules pour limiter les vibrations et un système de confinement des poussières siliceuses (Figure 3.15 et Figure 3.16 (a)).

Le socle en aluminium des moules sert de support. L'anneau en PVC garantit une épaisseur de paraffine sous le tronçon de carotte de roche à recarotter, tout en assurant son horizontalité.

Chaque moule est percé de dix trous taraudés, pour le passage des vis BTR qui arme la paraffine. Pour le démontage, après le dévissage de toutes les vis et l'escamotage du socle en aluminium, un cylindre PVC d'un diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule permet par simple pression l'extraction de la paraffine et du reste de roche.

Le fort dégagement de poussières, dû à l'utilisation d'air comprimé comme fluide de refroidissement, lors de la phase de recarottage, a nécessité la conception d'un système de confinement et d'aspiration. Sur la tête d'injection de l'air comprimé, au-dessus du carottier, avec une pince en aluminium sont fixés deux tubes de plexiglas transparents. Le tube inférieur a un diamètre correspondant à celui des moules de scellement. Le tube supérieur a un diamètre légèrement plus petit qui lui permet de coulisser à l'intérieur du tube inférieur au fur et à mesure de l'avance du carottier. Un orifice est prévu à la base du tube inférieur, ainsi, grâce à un selle de branchement (100/40), un aspirateur peut être directement raccordé. Ce système permet donc très simplement d'assurer le confinement des poussières et leur aspiration.



*Figure 3.15 : Vue d'ensemble des moules de scellement pour le recarottage des échantillons.*



(a)



(b)

Figure 3.16 : (a) : Carottuse GSP et fixation de l'étau ; (b) : Montage du système de confinement des poussières.



Figure 3.17 : Détail du système de confinement des poussières.

### 3.3.7 Identification physique

De façon systématique, avant essai, chaque échantillon a été soumis à une série de mesures visant à déterminer ses caractéristiques physiques (poids volumique, teneur en eau, degré de saturation, porosité...).

La teneur en eau, la porosité et le degré de saturation ont été calculés grâce à des mesures de poids humides et secs effectuées sur des chutes provenant des carottes après leur recarottage, et en utilisant les formules suivantes :

$$\text{- Teneur en eau : } W = \frac{W_w}{W_s} \quad [3.1]$$

$$\text{- Porosité : } n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad [3.2]$$

$$\text{- Degré de saturation : } S_r = \frac{w}{\gamma_w \left( \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} \right)} \quad [3.3]$$

avec :  $W_w$  : masse d'eau contenue dans l'échantillon,

$W_s$  : masse de l'échantillon sec,

$\gamma_w$  : poids volumique de l'eau ( $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$ ),

$\gamma_s$  : poids volumique des grains ( $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ ),

$\gamma_d$  : poids volumique de la roche sèche.

La porosité calculée par l'expression ci-dessus englobe la porosité connectée libre, la porosité connectée piégée et la porosité occluse. La valeur calculée est donc une valeur surestimée de la porosité mise en jeu dans les phénomènes de transport.

Nous avons pu recarotter 8 échantillons d'argilite de l'Est, 7 échantillons de marne du Mont d'or et 12 échantillons d'argilite de Tournemire. Les mesures d'identification physique effectuées ont permis d'apprécier l'homogénéité du lot d'éprouvettes testées et de faire apparaître d'éventuelles hétérogénéités susceptibles d'entacher les résultats d'essais et leurs interprétations. Les caractéristiques des échantillons sont répertoriées dans les tableaux 3.9 à 3.11.

De nos trois roches argileuses, l'argilite de l'Est est la plus poreuse :  $n = 15,6 \%$  en moyenne alors qu'on ne mesure sur l'argilite de Tournemire qu'une porosité moyenne de  $9,2 \%$  et de  $6,4 \%$  sur la marne du Mont d'or. L'argilite de l'Est est également la roche la plus humide :  $w = 5,9 \%$  en moyenne alors que la marne du mont d'or est pratiquement sèche ( $w_{\text{moy}} = 1,7 \%$ ). L'argilite de Tournemire présente une teneur en eau moyenne faible mais intermédiaire de  $3,6 \%$  qui sature quasiment ses pores puisque son  $S_{r_{\text{moy}}} = 92 \%$ . En revanche, la marne du mont d'or qui est pratiquement sèche, est partiellement désaturée :  $S_{r_{\text{moy}}} = 69 \%$ . Quant à l'argilite de l'Est, elle n'est pas complètement saturée :  $S_{r_{\text{moy}}} = 84 \%$ .

Les échantillons AT M5 3395.2 et AT M5 3395.3 présentent des caractéristiques physiques différentes des autres échantillons d'argilite de Tournemire, notamment une très faible teneur en eau ( $0,5 \%$ ) et un très faible degré de saturation ( $S_r = 19 \%$ ) qui sont peut-être dus à une dessiccation de la carotte (certaines enveloppes sous-vide étaient en effet percées à leur réception).

Carotte	Éch.	Orientation	Diamètre moyen [mm]	Hauteur moyenne [mm]	Rectification [ $\mu\text{m}$ ]	Poids [g]	Poids volumique [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	Teneur en eau [%]	Porosité [%]	Degré de saturation [%]
EST 05633	0°-1	0°	39,83	79,61	8	240,5	23,79 $\pm$ 0,05	5,95 $\pm$ 0,05	15,6 $\pm$ 0,3	84 $\pm$ 3
	0°-2	0°	39,83	79,68	7	240,2	23,74 $\pm$ 0,05			
	90°-1	90°	38,90	78,67	6	226,2	23,72 $\pm$ 0,05			
	90°-2	90°	38,90	78,15	10	224,7	23,74 $\pm$ 0,05			
	45°-1	45°	39,15	77,33	5	223,5	23,55 $\pm$ 0,05			
EST 05558	0°-1	0°	39,15	77,58	5	226,6	23,80 $\pm$ 0,05	5,80 $\pm$ 0,05	15,3 $\pm$ 0,3	84 $\pm$ 3
	0°-2	0°	39,18	78,57	5	228,7	23,69 $\pm$ 0,05			
	45°-1	45°	39,18	78,91	10	230,8	23,79 $\pm$ 0,05			

Tableau 3.9 : Caractéristiques géométriques et physiques des éprouvettes d'argilite de l'Est testées.

Carotte	Éch.	Orientation (sondage)	Profondeur prélèvement [m]	Diamètre moyen [mm]	Hauteur moyenne [mm]	Rectification [ $\mu\text{m}$ ]	Poids [g]	Poids volumique [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	Teneur en eau [%]	Porosité [%]	Degré de saturation [%]
1	1.1	45°	14,65 - 15,0	40,70	79,02	10	262,7	25,07 $\pm$ 0,08	2,20 $\pm$ 0,04	7,5 $\pm$ 0,2	74 $\pm$ 3
4	4.1	42°	14,4 - 14,7	39,66	76,01	20	247,5	25,47 $\pm$ 0,08	2,22 $\pm$ 0,04	6,0 $\pm$ 0,1	94 $\pm$ 4
9	9.1	45°	2,8 - 3,3	39,55	79,95	5	252,1	25,17 $\pm$ 0,08	0,98 $\pm$ 0,04	6,1 $\pm$ 0,1	41 $\pm$ 3
	9.2	45°		39,58	79,31	10	249,6	25,09 $\pm$ 0,08			
11	11.1	43°	11,9 - 12,25	35,96	77,17	10	202,5	25,34 $\pm$ 0,08	1,46 $\pm$ 0,04	6,7 $\pm$ 0,2	55 $\pm$ 3
	11.2	43°		40,60	76,90	10	254,5	25,08 $\pm$ 0,08			
13	13.1	43°	6,5 - 6,8	40,60	77,33	10	259,5	25,42 $\pm$ 0,08	1,78 $\pm$ 0,04	5,7 $\pm$ 0,11	79 $\pm$ 4

Tableau 3.10 : Caractéristiques géométriques et physiques des éprouvettes de marne du Mont d'Or testées.

Carotte	Éch.	Orientation	Diamètre moyen [mm]	Hauteur moyenne [mm]	Rectification [ $\mu\text{m}$ ]	Poids [g]	Poids volumique [ $\text{kN}/\text{m}^3$ ]	Teneur en eau [%]	Porosité [%]	Degré de saturation [%]
M4 630	630.1	90°	35,28	74,56	10	186,00	$25,04 \pm 0,09$	$3,73 \pm 0,05$	$8,9 \pm 0,2$	$99 \pm 4$
	630.2		35,24	74,43	10	185,20	$25,03 \pm 0,09$		$9,0 \pm 0,2$	$99 \pm 4$
M4 890	890.1		35,20	74,99	5	186,18	$25,03 \pm 0,09$	$3,81 \pm 0,05$	$9,0 \pm 0,2$	$98 \pm 4$
	890.2		35,34	74,63	10	186,28	$24,97 \pm 0,09$		$9,2 \pm 0,2$	$99 \pm 4$
M4 970	970.1		35,16	78,43	10	193,2	$24,88 \pm 0,09$	$3,55 \pm 0,05$	$9,3 \pm 0,2$	$93 \pm 4$
M5 400	400.1		35,14	78,68	10	193,7	$24,90 \pm 0,09$	$4,27 \pm 0,05$	$9,9 \pm 0,2$	$99 \pm 4$
M5 1500	1500.1		35,21	77,78	10	193,50	$25,06 \pm 0,09$	$3,95 \pm 0,05$	$9,0 \pm 0,2$	$99 \pm 4$
M5 2200	2200.1		35,44	73,80	5	184,31	$24,83 \pm 0,09$	$3,93 \pm 0,04$	$9,8 \pm 0,2$	$97 \pm 4$
M5 3140	3140.1		35,20	75,20	5	185,61	$24,88 \pm 0,09$	$4,29 \pm 0,06$	$10,0 \pm 0,2$	$98 \pm 4$
	3140.2		35,45	74,73	5	187,21	$24,89 \pm 0,09$		$9,9 \pm 0,2$	$98 \pm 4$
M5 3395	3395.2		35,44	73,74	5	184,88	$24,93 \pm 0,09$	$0,5 \pm 0,1$	$6,4 \pm 0,2$	$19 \pm 5$
	3395.3		35,34	72,92	5	180,75	$24,79 \pm 0,09$		$6,9 \pm 0,2$	$18 \pm 4$

Tableau 3.11 : Caractéristiques géométriques et physiques des éprouvettes d'argilite de Tournemire testées.

### 3.3.8 Mesures de vitesse sonique et évaluation du degré d'anisotropie

Afin d'évaluer le degré d'anisotropie, des mesures de vitesses de propagation d'ondes soniques ont été réalisées sur chaque éprouvette avant leur instrumentation, dans différentes directions : longitudinalement sur la hauteur de l'échantillon et diamétralement sur 2 diamètres à 0° et 90° ou 4 diamètres à 0°, 45°, 90° et 135°. Les mesures sont présentées en annexe A. Il nous a parfois été impossible de faire certaine mesure, le signal étant trop faible pour être détecté, en particulier perpendiculairement au litage de l'échantillon. Le contraste de vitesse a été calculé avec la formule suivante :

$$\text{Contraste} = \frac{V_{\text{rapide}} - V_{\text{lente}}}{V_{\text{lente}}} \times 100 \quad [3.4]$$

L'anisotropie de l'argilite de l'Est apparaît bien dans le résultat de ces mesures : la vitesse mesurée parallèlement aux strates (3280 m/s en moyenne) est supérieure de 10 % à la vitesse des ondes soniques mesurée perpendiculairement aux strates (2970 m/s en moyenne).

La roche la plus anisotrope du point de vue des célérités acoustiques est l'argilite de Tournemire. On mesure en effet des contrastes de vitesse allant jusqu'à 44 % et en moyenne de 30 %.

En ce qui concerne la marne du Mont d'Or, bien que l'orientation du litage ne soit pas repérée, un contraste de vitesse allant jusqu'à 16 % a été mesuré pour deux diamètres perpendiculaires. Les échantillons présentent donc une légère anisotropie et des plans d'isotropie, liés à la stratification, visiblement inclinés par rapport à l'axe des éprouvettes. Les mêmes contrastes sont mesurés sur tous échantillons quelle que soit leur profondeur de prélèvement. Cette anisotropie est donc bien liée à la structure de roche et non à un endommagement anisotrope dû au creusement du tunnel. L'anisotropie de la marne du Mont d'or est sensiblement comparable à celle de l'argilite de l'Est bien que l'on ne puisse pas la repérer visuellement et donc la définir convenablement avec les informations dont nous disposons sur les sondages.

### 3.3.9 Instrumentation des échantillons à l'aide de jauges de déformation

Afin de connaître l'évolution du tenseur des déformations  $\epsilon$  au cours des essais de compression uniaxiale, nous avons instrumenté chacune des éprouvettes testées avec des jauges d'extensométrie encapsulées CEA-06-125UN-350 *Visbay MicroMesures* dont l'élongation maximale théorique est de  $\pm 5$  %. Le nombre de jauges mises en place dépend de l'orientation de l'éprouvette. Celle-ci est définie par l'angle  $\theta$  entre l'axe  $\vec{v}_3$  de révolution de l'orthotropie et l'axe  $\vec{n}$  de révolution de l'éprouvette (Figure 3.18 (a)).

Le repérage des éprouvettes (orientation  $\theta$ ) est complété par une numérotation des quatre faces principales, fonction de la position des plans de stratification. Sur la Figure 3.18 (b), les faces d'un échantillon de diatomite, pour lequel le litage est bien visible, ont été numérotées de cette manière. Dans le cas  $\theta = 0^\circ$ , la numérotation est arbitraire. Pour  $\theta = 90^\circ$ , les deux plans perpendiculaires 1-3 et 2-4 doivent être repérés précisément.

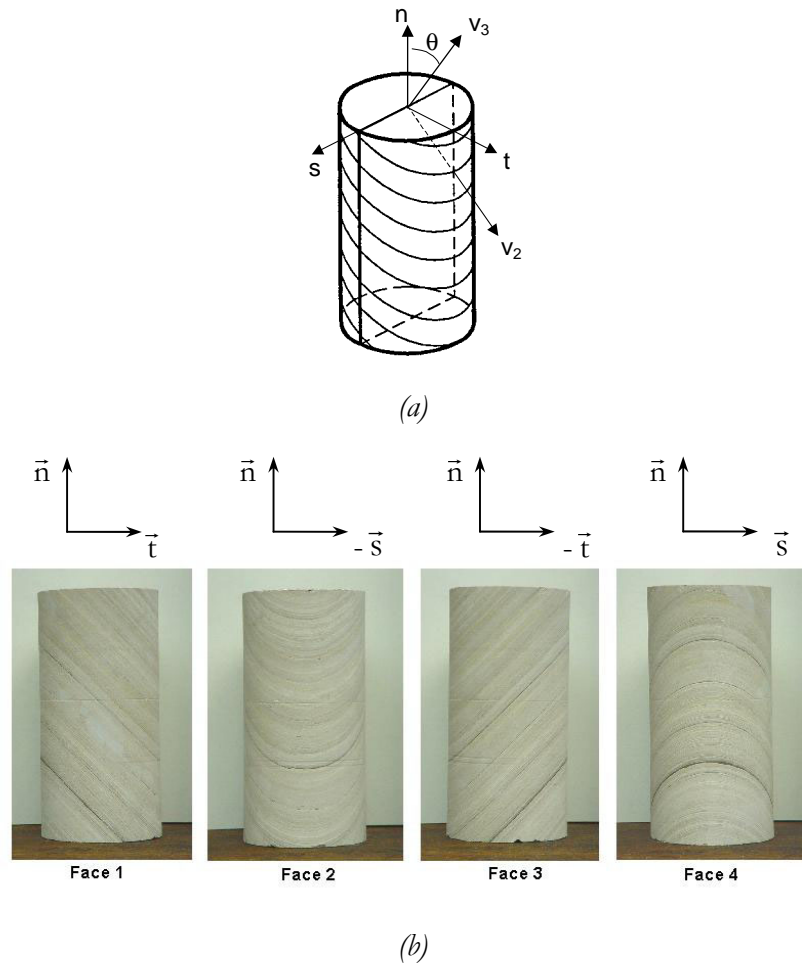


Figure 3.18 : (a) : Axes de symétrie matérielle des éprouvettes en fonction de leur orientation  $\theta$  ;  
 (b) : Repérages des faces d'un échantillon de diatomite d'orientation  $\theta = 45^\circ$ .

Lors d'un essai de compression sous pression de confinement sur un matériau orthotrope de révolution, les axes  $(\vec{n}, \vec{t}, \vec{s})$  sont les directions principales du tenseur des contraintes appliquées à  $\boldsymbol{\sigma}$  avec  $\vec{n}$  l'axe de l'éprouvette. Les axes  $(\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3)$  sont les axes privilégiés du matériau avec  $\vec{v}_3$  l'axe de révolution de l'orthotropie et  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$  les axes *a priori* arbitraires du plan isotrope du matériau. Nous avons choisi l'axe  $\vec{v}_1$  comme normale au plan  $(\vec{v}_3, \vec{n})$ . Les deux axes transversaux sont déterminés de la manière suivante : l'axe  $\vec{t}$  appartient au plan  $(\vec{v}_3, \vec{n})$  et l'axe  $\vec{s}$  est confondu avec l'axe  $\vec{v}_1$ . L'axe  $\vec{v}_1$  étant à la fois un axe de symétrie matérielle et une direction principale des contraintes, il est également une direction principale du tenseur des déformation  $\boldsymbol{\varepsilon}$ . La composante  $\varepsilon_{ss}$  est donc une déformation principale et la matrice symétrique de  $\boldsymbol{\varepsilon}$  s'écrit, dans le repère  $(\vec{s}, \vec{t}, \vec{n})$

$$[\boldsymbol{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{tt} & \varepsilon_{tn} \\ 0 & \varepsilon_{nt} & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix}_{(\vec{s}, \vec{t}, \vec{n})} \quad [3.5]$$

L'analyse théorique de cet essai a été réalisée par Boehler (1987). Il a montré que lorsque  $\theta = 0^\circ$  ou



$90^\circ$ , les directions principales  $(\vec{n}, \vec{t}, \vec{s})$  du tenseur de contrainte coïncident avec les axes de symétrie du matériau : l'essai est réalisé *dans les axes*. Les directions de déformations coïncident alors avec celles des contraintes et la distorsion  $\epsilon_{nt}$  est nulle. Pour connaître entièrement le tenseur de déformations, il suffit donc de coller :

- Pour  $\theta = 0^\circ$  : une jauge axiale et une jauge transversale dans le plan  $(\vec{n}, \vec{t})$ , sur chacune des faces 1 et 3 diamétralement opposées, pour mesurer respectivement les déformations  $\epsilon_{nn}$  et  $\epsilon_{tt} = \epsilon_{ss}$ .
- Pour  $\theta = 90^\circ$  : une jauge axiale, une jauge transversale dans le plan  $(\vec{n}, \vec{t})$ , sur chacune des faces 1 et 3 diamétralement opposées et une jauge transversale dans le plan  $(\vec{s}, \vec{n})$ , sur chacune des faces 2 et 4 pour mesurer les déformations  $\epsilon_{nn}$ ,  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{ss}$ .

Lorsque  $\theta \neq 0^\circ$  ou  $90^\circ$ , les directions principales du tenseur de déformations ne sont pas connues : l'essai est dit *hors axes*. Les directions de déformations coïncident avec celles des contraintes et la distorsion  $\epsilon_{nt}$  n'est pas nulle.

Pour connaître entièrement le tenseur de déformations, il est donc nécessaire de coller une jauge axiale, une jauge transversale et une jauge orientée à  $45^\circ$  par rapport à l'axe  $\vec{n}$  dans le plan  $(\vec{n}, \vec{t})$ , sur chacune des faces 1 et 3 diamétralement opposées pour mesurer les déformations  $\epsilon_{nn}$ ,  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{nt}$ , et une jauge transversale dans le plan  $(\vec{s}, \vec{n})$ , sur chacune des faces 2 et 4 afin de mesurer la composante  $\epsilon_{ss}$ .

Les jauges sont positionnées dans les plans tangents  $(\vec{n}, \vec{t})$  et  $(\vec{s}, \vec{n})$ , à mi-hauteur. La Figure 3.19 récapitulent leurs dispositions en fonction de l'orientation  $\theta$ .

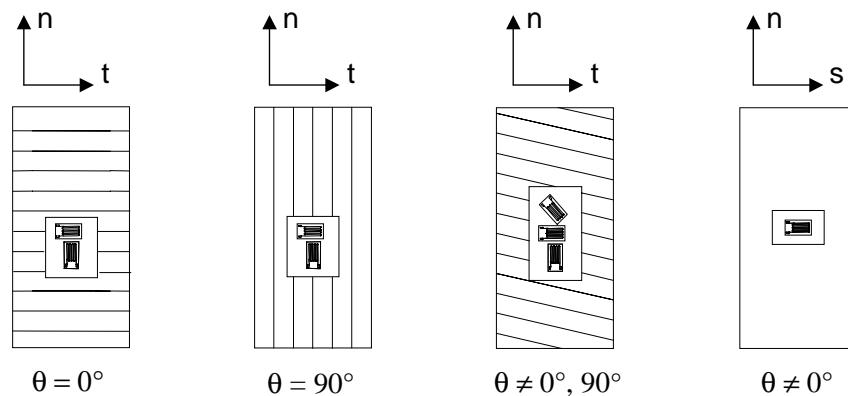


Figure 3.19 : Instrumentation des éprouvettes suivant leur orientation,  $\theta$ .

### 3.3.10 Acquisition des données

L'acquisition des données des essais réalisés sur la presse de chargement lent est assurée par une chaîne d'acquisition Sensorex. Les signaux des 8 voies jauges, du capteur de force et des deux capteurs LVDT sont enregistrées en continu et traités en temps réel par un logiciel d'acquisition développé avec *LabWindows/CVI* en langage C. La précision des mesures pour chaque capteur est de l'ordre de :

- $10^{-6}$  pour les jauges d'extensométrie avec une étendue de mesure de  $\pm 15\,000 \cdot 10^{-6}$ ,
- 5 N pour le capteur de force de capacité 200 kN,
- 0,1  $\mu\text{m}$  pour les LVDT.

Lors des essais de fluage, les signaux du capteur de force, du capteur LVDT et des jauges de déformation ont été enregistrés en continu grâce à une chaîne d'acquisition *FieldPoint* de *National Instrument*. Les résolutions correspondantes pour les capteurs utilisés sont :

- $10^{-6}$  pour les jauges d'extensométrie avec une étendue de mesure de  $\pm 15\,000 \cdot 10^{-6}$ ,
- 15 N pour le capteur de force de 100 kN,
- 1,5  $\mu\text{m}$  pour les LVDT ( $\pm 5$  mm).

Pour ces essais de longue durée, l'acquisition des mesures a été effectuée avec une période de scrutation de 1000 secondes pour toutes les voies. Pour les phases de chargement ou de déchargement, la cadence a été accélérée à 100, voire 10 secondes.

Pour les essais réalisés avec la presse Schenck, les signaux des capteurs de force, des LVDT, des jauges de déformations et du capteur de pression ont été enregistrés en continu par une chaîne d'acquisition *Vishay Micromesures Système 4000*. La précision des mesures pour chaque capteur est de l'ordre de :

- $10^{-6}$  pour les jauges avec une gamme de mesure de  $\pm 15\,000 \cdot 10^{-6}$ ,
- 6,1 N pour le capteur de force interne utilisé sur la gamme de mesure 100 kN,
- 0,3  $\mu\text{m}$  pour les LVDT,
- 0,07 MPa pour le capteur de pression.

Un logiciel d'acquisition et de traitement des signaux a été écrit à l'aide d'un environnement de programmation *LabWindows/CVI* en langage C.

## **3.4 Réalisation des essais**

### ***3.4.1 Programmes d'essais***

Les tableaux des pages suivantes résument les programmes expérimentaux réalisés sur les échantillons recarottés d'argilite de Tournemire, de marne du Mont d'Or et d'argilite de l'Est.

Les essais de fluage et de chargement quasi statique ont été menés, dans la mesure du possible, jusqu'à la rupture de l'échantillon. Des photographies des éprouvettes rompues sont visibles à la fin de chaque paragraphe.

Le Tableau 3.13 détaille les essais réalisés sur les 7 échantillons de marne du Mont d'or qui ont pu être recarottés. Afin de nous affranchir au maximum des effets de dispersion naturelle et de permettre une comparaison des différents essais, nous avons planifié autant que possible chaque série d'essais sur les échantillons issus d'une même carotte ou d'un même sondage.

Le programme des essais réalisés sur l'argilite de l'Est est résumé dans Tableau 3.12. Une série d'essais de chargement quasi statique à des différentes vitesses de chargement a été réalisée sur des éprouvettes d'orientations différentes pour évaluer l'influence de ces paramètres sur le

comportement mécanique de l'argilite de l'Est.

Dans l'objectif d'observer les trois phases de fluage, nous avons imposé à l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-2 EST 05558 une contrainte de fluage, très proche de la résistance à la rupture de cette roche (mesurée lors des essais de chargement quasi statique) : 26 MPa.

Huit essais de fluage uniaxial ont été réalisés sur l'argilite de Tournemire (Tableau 3.14). Ils ont été lancés sous un fort déviateur, proche de la résistance à la rupture, afin d'atteindre et d'observer dans un temps d'essai raisonnable, le fluage tertiaire. Lorsque la déformation axiale se stabilise (fluage primaire), le déviateur est légèrement augmenté ( $\Delta q \approx 2$  MPa). A ces niveaux de contrainte proches de  $\sigma_c$ , il est arrivé que l'échantillon se rompe subitement, lors d'une recharge, interrompant malheureusement l'essai sans permettre d'explorer la phase de fluage tertiaire.

Tous ces essais ont été réalisés en conditions drainées. En effet, la membrane étanche dans laquelle les échantillons ont été placés n'a pour fonction que de limiter les pertes hydriques : elle n'empêche pas la sortie éventuelle de l'eau interstitielle.

De plus, cette précaution ne permet pas de s'affranchir d'une potentielle redistribution des cations et de l'eau au sein de la microstructure des particules d'argiles, un couplage hydro-chimique peut donc malgré tout subsister.

### 3.4.2 Traitement des données

Pour les essais de compression simple, la contrainte axiale est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad [3.6]$$

où : F est la force axiale appliquée, lue sur le capteur de force.

$S_0$  est la section initiale de l'éprouvette mesurée avant essai.

Pour toutes les éprouvettes, que nous avons instrumentées de jauges, les mesures brutes obtenues ont été systématiquement corrigées des effets perturbateurs induits par :

- La non-linéarité du pont de Wheastone,
- Le défaut d'alignement des jauges,
- Les effets thermiques,
- L'effet transversal,
- La désensibilisation de la longueur de ligne.

En effet, les systèmes d'acquisition utilisés corrigent automatiquement la non-linéarité du pont.

Un montage en quart de pont trois fils a été choisi car il minimise les effets thermiques. Nous avons utilisé des jauges de résistance nominale 350  $\Omega$ , moins sensibles aux variations de température que les jauges 120  $\Omega$ .

L'utilisation d'une ligne de longueur inférieure à 2 m et de câbles de faible résistance linéaire ( $< 0,1 \Omega.m^{-1}$ ) permet de minimiser les erreurs induites par la désensibilisation de la longueur de la ligne.

Échantillon	Orientation	Type d'essai	Vitesse de déformation (s <sup>-1</sup> )	Presse utilisée
0°-1 EST 05558	0°	Compression uniaxiale	10 <sup>-8</sup>	Bâti de chargement lent
0°-1 EST 05633	0°		10 <sup>-6</sup>	Presse Schenck
0°-2 EST 05633	0°		10 <sup>-4</sup>	Presse Schenck
45°-1 EST 05558	45°	Compression uniaxiale	10 <sup>-6</sup>	Presse Schenck
45°-1 EST 05633	45°		10 <sup>-6</sup>	Presse Schenck
90°-1 EST 05633	90°		10 <sup>-6</sup>	Presse Schenck
90°-2 EST 05633	90°	Compression uniaxiale avec cycles de charge-décharge		Presse Schenck
0°-2 EST 05558	0°	Fluage sous 26 MPa	/	Bâti de fluage

Tableau 3.12 : Programme d'essais réalisés sur les échantillons d'argilite de l'Est.

Échantillon	Type d'essai	Vitesse de déformation (s <sup>-1</sup> )	Presse utilisée
MO – 9.1	Compression uniaxiale	8.10 <sup>-7</sup>	Presse de chargement lent
MO – 9.2		8.10 <sup>-7</sup>	Presse de chargement lent
MO – 4.1	Fluage avec cycles de charge - décharge	/	Bâti de fluage
MO – 11.1	Compression uniaxiale avec palier de relaxation	8.10 <sup>-9</sup>	Presse de chargement lent
MO – 11.2	Compression uniaxiale avec cycles de charge - décharge	5.10 <sup>-7</sup>	Presse de chargement lent
MO – 13.1	Fluage avec cycles de charge - décharge	/	Bâti de fluage
MO – 1 .1	Compression uniaxiale	6.10 <sup>-8</sup>	Presse de chargement lent

Tableau 3.13 : Programme d'essais réalisés sur les échantillons de marne du Mont d'Or.

Échantillon	Type d'essai	Vitesse de déformation (s <sup>-1</sup> )	Presse utilisée
AT M4 630.1	Fluage multipalier 4 paliers q = 29 à 36,8 MPa	/	Bâti de fluage
AT M4 630.2	Fluage multipalier 4 paliers q = 26,7 à 34,8 MPa	/	Bâti de fluage
AT M4 890.1	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	Presse de chargement lent
AT M4 890.2	Fluage monopalier q = 24,7 MPa	/	Bâti de fluage
AT M4 970.1	Fluage multipalier 2 paliers q = 30,0 et 32,6 MPa	/	Bâti de fluage
AT M5 400.1	Fluage multipalier 4 paliers q = 30,1 à 37,5 MPa	/	Bâti de fluage
AT M5 1500.1	Fluage multipalier 4 paliers q = 25,9 à 35,2 MPa	/	Bâti de fluage
AT M5 2200.1	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	Presse de chargement lent
AT M5 3140.1	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	Presse de chargement lent
AT M5 3140.2	Fluage multipalier 6 paliers q = 24,5 à 35,3 MPa	/	Bâti de fluage
AT M5 3395.2	Fluage multipalier 4 paliers q = 8,9 à 20,5 MPa	/	Bâti de fluage
AT M5 3395.3	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	Presse de chargement lent

Tableau 3.14 : Programme d'essais réalisés sur les échantillons d'argilite de Tournemire.

Lors de l'opération de collage, la direction des jauges à la surface de l'éprouvette s'écartent généralement de la direction théorique prévue d'un angle de  $\pm 2^\circ$ . A l'aide d'un cathétomètre, il est possible de repérer la position précise de chaque jauge et donc de calculer l'angle exact de déviation avec une précision de  $0,1^\circ$  pour ensuite corriger l'erreur due au mauvais alignement.

Soit  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  respectivement le vecteur unitaire dans la direction axiale et le vecteur unitaire dans la direction transversale de la jauge. L'allongement axial  $\delta l/l_0$  et l'allongement transversal  $\delta b/b_0$  des brins de la jauge sont respectivement donnés par :

$$\frac{\delta l}{l_0} = \vec{u} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \vec{u}, \quad \frac{\delta b}{b_0} = \vec{v} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \vec{v} \quad [3.7]$$

où  $\boldsymbol{\varepsilon}$  est le tenseur des déformations à mesurer.

La correction de l'effet transversal est réalisée par l'expression suivante (Koss *et al.*, 1990) :

$$m_c = \left( \frac{1}{1 - \nu_0 K_t} \right) \vec{u} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \vec{u} + \left( \frac{K_t}{1 - \nu_0 K_t} \right) \vec{v} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \vec{v} \quad [3.8]$$

où  $m_c$  est la mesure corrigée, de la déformation,  $K_t$  le coefficient de sensibilité transversale fourni par le fabricant et  $\nu_0$  le coefficient de Poisson du matériau servant à l'étalonnage des jauges ( $\nu_0 = 0,285$ ).

Soit  $\varphi$  l'angle entre l'axe de la jauge,  $\vec{u}$  et l'axe  $\vec{t}$ . Dans le plan  $(\vec{u}, \vec{v})$ , l'équation ci-dessus s'écrit de la manière suivante :

$$m_c = \frac{\cos^2 \varphi + K_t \sin^2 \varphi}{1 - \nu_0 K_t} \varepsilon_{tt} + \frac{\sin^2 \varphi + K_t \cos^2 \varphi}{1 - \nu_0 K_t} \varepsilon_{nn} + \frac{1 - K_t}{1 - \nu_0 K_t} (\sin 2\varphi) \varepsilon_{nt} \quad [3.9]$$

La mesure de trois déformations  $m_c$  dans le plan  $(\vec{n}, \vec{t})$  permet de déterminer les déformations axiale  $\varepsilon_{nn}$ , transversale  $\varepsilon_{tt}$  et de distorsion  $\varepsilon_{nt}$ .

Dans le plan  $(\vec{n}, \vec{s})$ , cette équation s'écrit :

$$m_c = \frac{\cos^2 \varphi + K_t \sin^2 \varphi}{1 - \nu_0 K_t} \varepsilon_{ss} + \frac{\sin^2 \varphi + K_t \cos^2 \varphi}{1 - \nu_0 K_t} \varepsilon_{nn} \quad [3.10]$$

où  $\varphi$  est l'angle entre l'axe de la jauge,  $\vec{u}$  et l'axe  $\vec{s}$ .

Une mesure  $m_c$  dans le plan  $(\vec{n}, \vec{s})$ , permet donc de déterminer la déformation transversale,  $\varepsilon_{ss}$ , la déformation axiale  $\varepsilon_{nn}$  étant déjà connue.

Les valeurs obtenues étant corrigées des effets perturbateurs, les déformations données par les jauges positionnées sur deux faces diamétralement opposées sont divisées par deux puis additionnées pour connaître la déformation moyenne de l'échantillon.

La déformation volumique est calculée grâce à l'expression :

$$\varepsilon_{vol} = \text{tr}[\boldsymbol{\varepsilon}] = \varepsilon_{nn} + \varepsilon_{tt} + \varepsilon_{ss} \quad [3.11]$$

### 3.5 Présentation et discussion des résultats expérimentaux

#### 3.5.1 Essais de chargement quasi statique

##### 3.5.1.1 Argilite de l'Est

Le programme d'essais réalisé sur l'argilite de l'Est visait à mettre en évidence l'influence sur le comportement mécanique, de l'anisotropie de structure de cette roche. Pour cela, des échantillons ont été carottés suivant trois orientations :  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport au litage horizontal de cette roche sédimentaire.

Ils ont été testés en compression uniaxiale et cyclique à différentes vitesses de déformation ( $10^{-4}$  à  $10^{-8} \text{s}^{-1}$ ). Les courbes représentant la contrainte axiale,  $\sigma_n$ , en fonction des déformations sont présentées sur les Figure 3.20, Figure 3.21 et Figure 3.22.

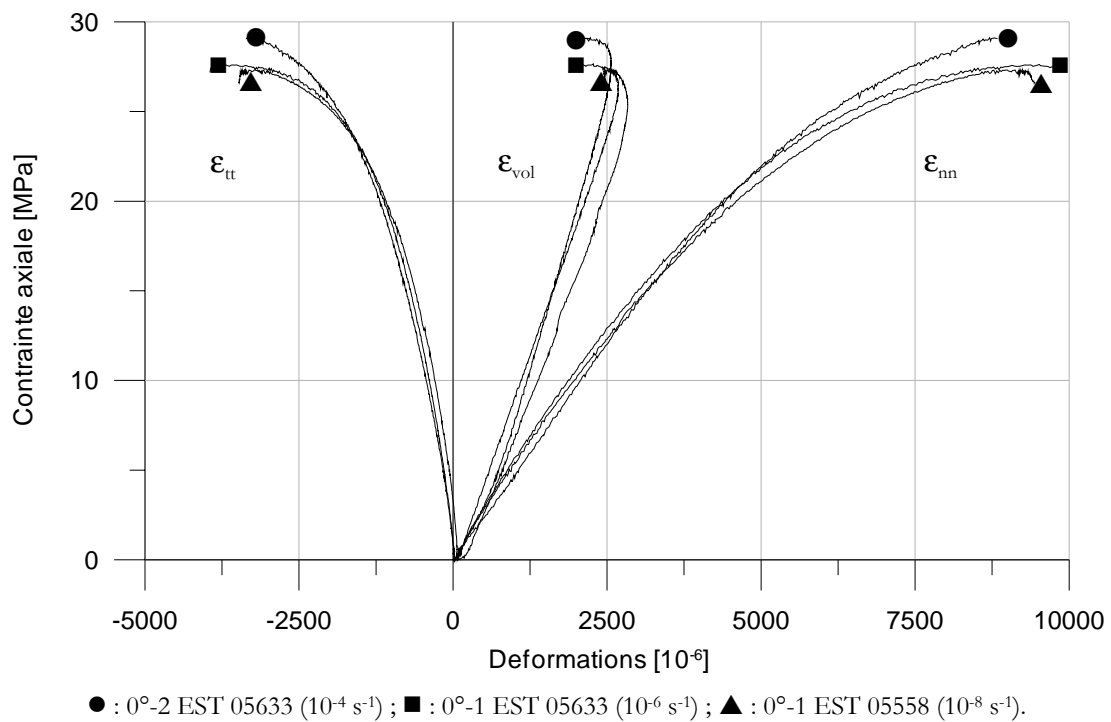


Figure 3.20 : Courbes contrainte-déformations des essais de chargement quasi statique réalisés sur trois échantillons d'argilite de l'Est orientés à  $\theta = 0^\circ$  : Influence de la vitesse de déformation.

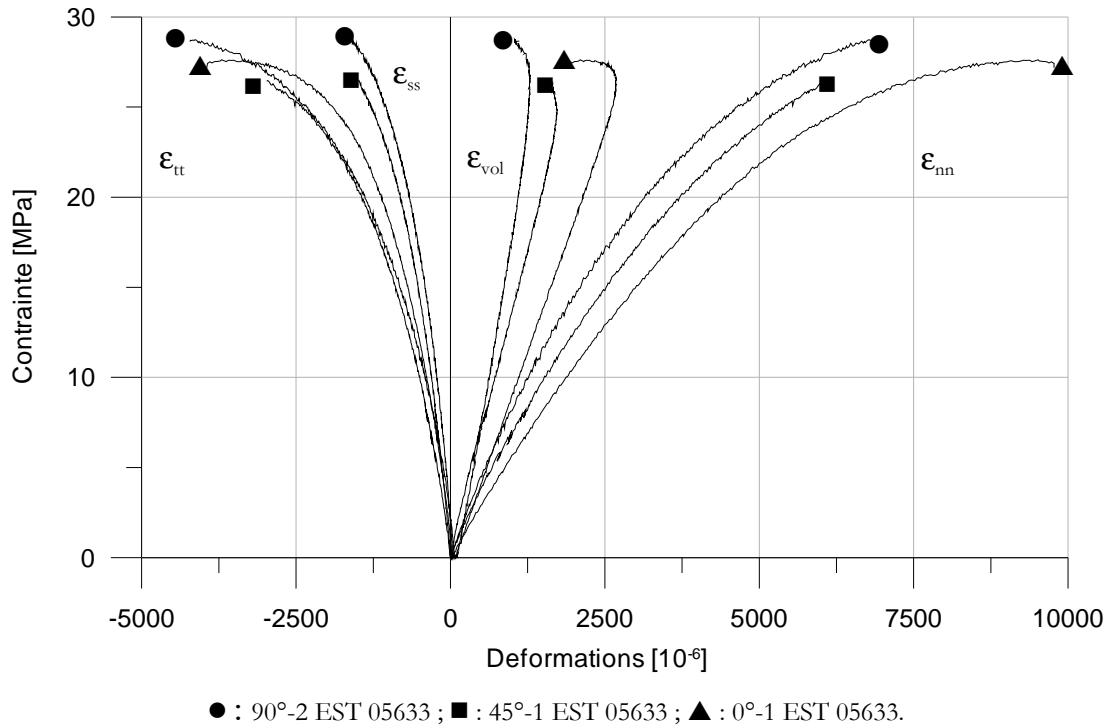


Figure 3.21 : Courbes contrainte-déformations des essais de chargement quasi statique réalisés sur des éprouvettes d'argilite à la vitesse de chargement de  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  : Influence de l'anisotropie de structure.

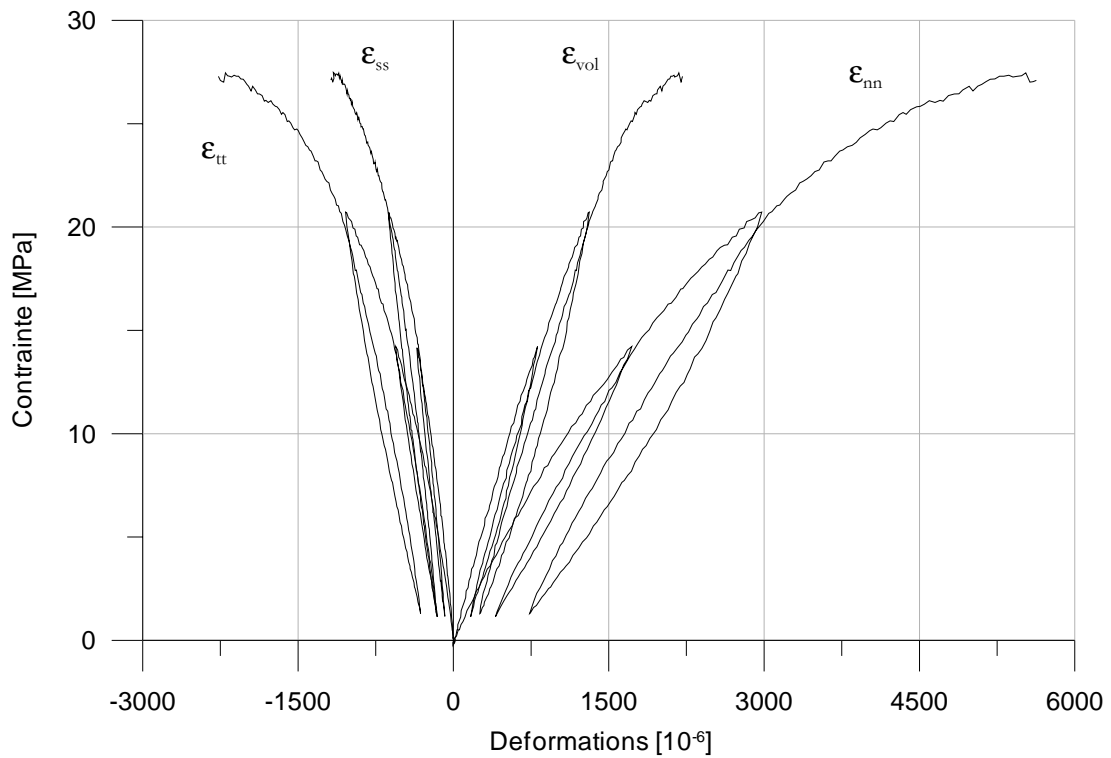


Figure 3.22 : Essai de chargement et de déchargement sur l'échantillon d'argilite de l'Est 90°-2 EST 05633.



### 3.5.1.1.1 Influence de la vitesse de chargement

L'analyse des courbes contraintes-déformations de ces essais nous a permis de déterminer les contraintes caractéristiques  $\sigma_{cd}$  et  $\sigma_f$  ainsi que les déformations correspondantes. Le Tableau 3.15 reprend l'ensemble de ces résultats, qui sont représentés graphiquement sur la Figure 3.23. Ils font apparaître que :

- La contrainte de rupture  $\sigma_f$  augmente légèrement avec la vitesse de déformation. Quantitativement, la résistance à la rupture augmente de 7% lorsque la vitesse de déformation est multipliée un facteur 10 000.
- La contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$ , subit une augmentation de 12% sur la plage de vitesse testée. La déformation  $(\epsilon_{nn})_{cd}$  augmente dans les mêmes proportions.
- La déformation axiale maximale atteinte à la rupture  $(\epsilon_{nn})_f$  est peu sensible à la vitesse de déformation sur la plage des vitesses testées.
- La déformation volumique maximale diminue de 10% lorsque la vitesse de déformation est multipliée 10 000.

Le faible écart entre les courbes des essais réalisés aux vitesses de déformations égales à  $10^{-6}$  et  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  laisse penser que la courbe limite de l'argilite de l'Est est obtenue pour une vitesse de chargement  $\dot{\epsilon}$  proche de  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

### 3.5.1.1.2 Influence de l'anisotropie de structure

L'anisotropie de l'argilite de l'Est apparaît clairement dans les résultats des essais de chargement quasi statique réalisés à  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  (Figure 3.21). En effet, on mesure bien  $\epsilon_{tt} \neq \epsilon_{ss}$  pour les éprouvettes orientées à  $45^\circ$  et à  $90^\circ$ .

Les contraintes et déformations caractéristiques issues de l'analyse de ces courbes sont données dans le Tableau 3.16 et représentées graphiquement en fonction de l'orientation des éprouvettes en Figure 3.24. Ils montrent que :

- La contrainte de rupture  $\sigma_f$  et la contrainte de contraction maximale dépendent de l'orientation de l'éprouvette testée. On observe un minimum pour ces deux contraintes caractéristiques à  $\theta = 45^\circ$ .
- Les déformations caractéristiques  $(\epsilon_{nn})_{cd}$  et  $(\epsilon_{nn})_f$  sont fortement influencées par l'orientation de l'éprouvette testée. On observe une fois encore un minimum pour ces deux déformations caractéristiques à  $\theta = 45^\circ$ , mais la déformation axiale finale mesurée augmentent de 50 % lorsque l'orientation varie de  $45^\circ$  à  $0^\circ$ .
- La déformation volumique maximale est une fonction décroissante de l'orientation des éprouvettes.

Ces résultats doivent être confirmés par d'autres essais réalisés sur des éprouvettes d'orientation intermédiaire, à  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $75^\circ$ . Ces essais devraient permettre de quantifier l'évolution de la contrainte de rupture en fonction de l'orientation,  $\theta$ , des éprouvettes et de vérifier si cette fonction présente un minimum à  $\theta = 45^\circ$ , comme nous avons pu l'observer.

Échantillon	0°-1 EST 05558	0°-1 EST 05633	0°-2 EST 05633
Orientation	0°	0°	0°
Vitesse de déformation	10 <sup>-8</sup> s <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>
$\sigma_{cd}$ (MPa)	25,5	26,2	28,0
$\sigma_f$ (MPa)	27,4	27,7	29,2
$(\epsilon_{nn})_{cd}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	7055	7194	7756
$(\epsilon_{nn})_f$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	9065	9249	8858
$\epsilon_{vol}$ maximale ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	2851	2689	2571

Tableau 3.15 : Influence de la vitesse de chargement : Contraintes et déformations caractéristiques.

Échantillon	0°-1 EST 05633	45°-1 EST 05558	90°-1 EST 05633
Orientation	0°	45°	90°
Vitesse de déformation	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>
$\sigma_{cd}$ (MPa)	26,2	24,7	26,7
$\sigma_f$ (MPa)	27,7	26,4	28,6
$(\epsilon_{nn})_{cd}$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	7194	5290	5376
$(\epsilon_{nn})_f$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	9249	6123	6899
$\epsilon_{vol}$ maximale ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	2689	1730	1291

Tableau 3.16 : Influence de l'anisotropie : Contraintes et déformations caractéristiques.

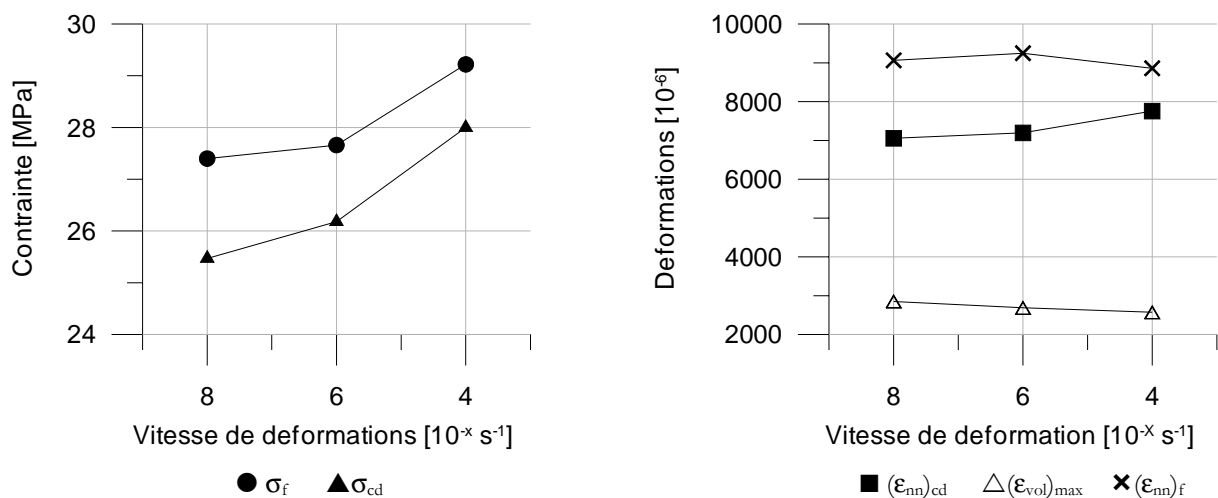


Figure 3.23 : Déformations et contraintes caractéristiques en fonction de la vitesse de déformation.

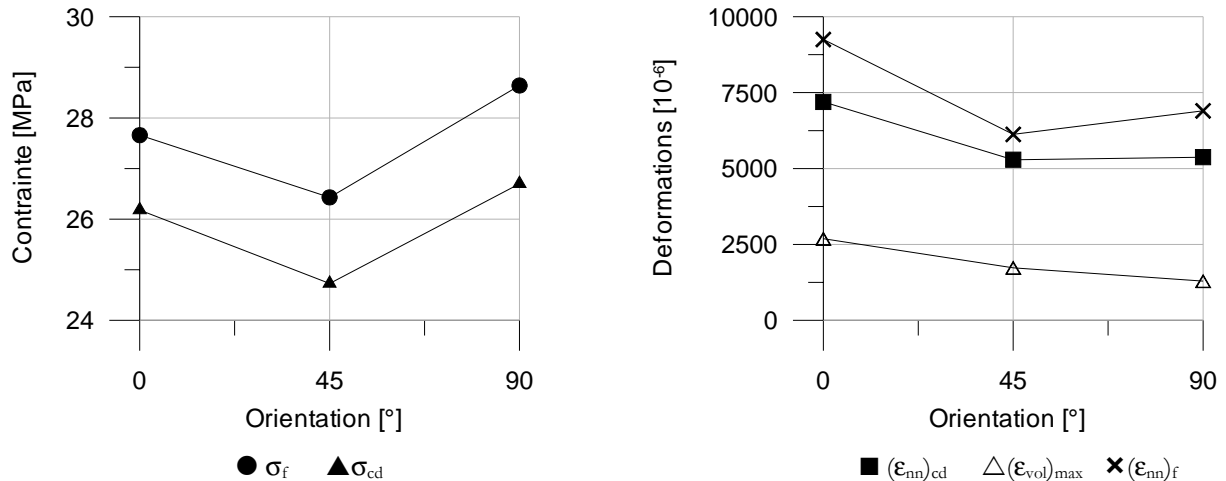


Figure 3.24 : Déformations et contraintes caractéristiques en fonction de l'orientation des éprouvettes.

### 3.5.1.1.3 Modules de déformation directionnels

Comme on peut s'en rendre compte sur la Figure 3.20 et la Figure 3.21, la plupart des courbes de déformations  $\epsilon_{nn}$ ,  $\epsilon_{tt}$ ,  $\epsilon_{ss}$  fonction du déviateur de contrainte ne présentent pas de partie linéaire. Cette observation laisse penser que la phase élastique linéaire de l'argilite de l'Est est très réduite, voire inexistante.

Cependant, d'après les résultats de l'essai avec charges et décharges (hystérésis), présentés sur la Figure 3.22, la part des déformations réversibles dans la déformation totale mesurée est relativement importante. L'élasticité de l'argilite de l'Est est donc essentiellement non linéaire. Dans ces conditions, il n'a pas été possible de calculer, à l'aide de l'analyse développée dans le paragraphe 2.5.1, les paramètres élastiques  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  et  $G$ .

En revanche, l'essai de chargement cyclique a permis de déterminer des modules de charge-décharge. De plus, à partir des essais de chargement quasi statique, nous avons tout de même calculé les modules axiaux et transversaux sécants à différents niveaux de contraintes (Tableau 3.18). La diminution progressive de ces modules avec la charge appliquée traduit l'endommagement du matériau (Figure 3.25).

On remarque sur le graphe de la Figure 3.25 que quelles que soient l'orientation et la vitesse de chargement, les courbes des modules directionnels axiaux et transversaux en fonction de la charge présentent une pente comparable et semblent donc parallèles entre elles, au-delà de  $\sigma = 10$  MPa.

Lorsque les courbes représentant la contrainte axiale en fonction de la déformation volumique présentent une partie linéaire, souvent jusqu'à la contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$ , comme nous l'avons observé sur ces essais, il est possible de calculer par régression linéaire un module équivalent en élasticité linéaire aux coefficients de compressibilité volumique d'un matériau isotrope. En effet, en élasticité linéaire, la contrainte moyenne et la déformation volumique sont liées par l'intermédiaire du module  $K$  suivant la relation :

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr}(\tilde{\sigma}_{ij}) = K \cdot \epsilon_{vol} = \frac{1}{3} \text{tr}(\tilde{\epsilon}_{ij}) \quad [3.12]$$

où  $\tilde{\sigma}_{ij}$  représente le tenseur de déformation et  $\tilde{\epsilon}_{ij}$ , le tenseur de déformation. Cette relation définit donc très simplement le module de compressibilité volumique, K.

Les modules K, équivalent au module de compressibilité volumique, calculés sur la partie linéaire de la courbe de la déformation volumique, sont répertoriés dans le Tableau 3.17. Ils semblent peu sensibles à la vitesse de déformation mais sont fortement dépendants de l'orientation des éprouvettes : le module de compressibilité volumique à 0° est deux fois moins élevé que le module à 90°.

Échantillon	0°-1 EST 05558	0°- 1 EST 05633	0°- 2 EST 05633	45°- 1 EST 05558	90°- 1 EST 05633
Orientation	0°	0°	0°	45°	90°
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
K (GPa)	3,1	3,3	4,0	4,6	7,2

Tableau 3.17 : Coefficients de compressibilité volumique de l'argilite de l'Est.

Échantillon	Vitesse $\dot{\epsilon}$	Module axial (GPa) sécant à :					Module transversal (GPa) sécant à :				
		5 MPa	10 MPa	15 MPa	20 MPa	25 MPa	5 MPa	10 MPa	15 MPa	20 MPa	25 MPa
0°-1 EST 05558	10 <sup>-8</sup> s <sup>-1</sup>	5,56	5,09	4,79	4,38	3,70	90,91	34,17	24,44	18,57	12,76
0°-1 EST 05633	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	5,62	5,31	4,97	4,56	3,89	33,948	25,85	21,68	17,84	13,13
0°-2 EST 05633	10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	4,74	4,83	4,76	4,53	4,09	31,46	23,04	19,64	16,79	13,59
90°-1 EST 05633	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	8,61	7,92	7,12	6,39	5,39	40,71	24,23	18,22	14,46	10,75
45°-1 EST 05558	10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	7,36	6,62	5,95	5,39	4,62	23,21	20,21	16,85	13,91	10,36

Tableau 3.18 : Modules axiaux et transversaux sécants de l'argilite de l'Est déterminés sur les essais de chargement quasi statique.

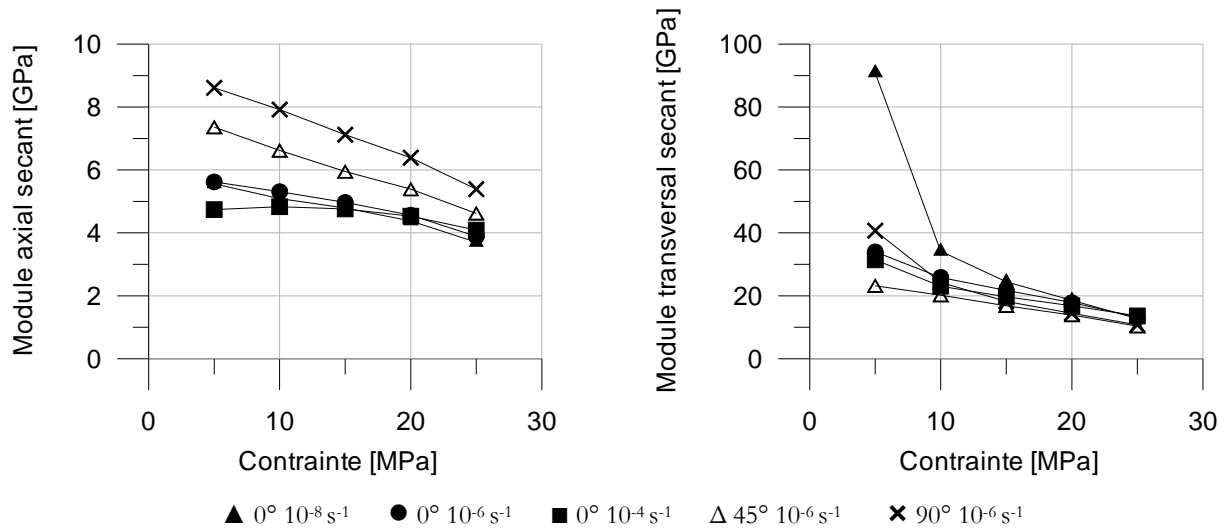


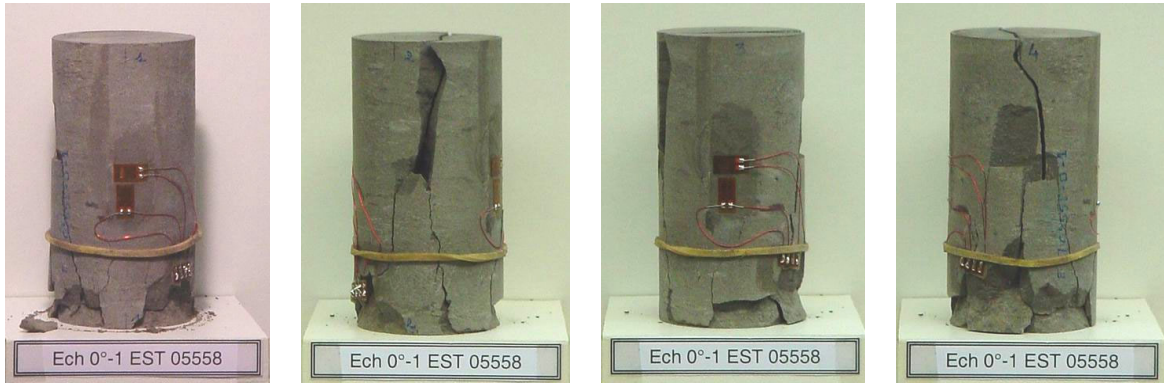
Figure 3.25 : Evolution des modules directionnels axiaux et transversaux en fonction de la charge lors des essais de chargement quasi statique sur l'argilite de l'Est.

#### 3.5.1.1.4 Mode de rupture

La contrainte caractéristique  $\sigma_{cd}$  marque le début de la propagation instable de la microfissuration qui traduit l'endommagement du matériau. On constate que la rupture macroscopique des échantillons d'argilite de l'Est survient rapidement une fois cette contrainte atteinte :  $\sigma_f$  est donc très proche de  $\sigma_{cd}$ . Cette observation que nous avons pu faire sur l'ensemble des essais quasi statiques réalisés, tend à prouver que dès que la propagation des fissures devient instable, les caractéristiques mécaniques de l'argilite de l'Est se dégrade rapidement menant l'échantillon à la rupture. Ces essais de chargement quasi statique permettent de définir une contrainte  $\sigma_{cd}$  moyenne pour les échantillons d'orientation  $0^\circ$  :  $\sigma_{cd}$  moyen = 26,6 MPa.

Les essais de fluage sur des échantillons d'argilite d'orientation  $0^\circ$  devraient donc être réalisé sous un déviateur proche de cette valeur si l'on souhaite étudier la phase de fluage tertiaire. Pour  $\theta = 45^\circ$  et  $\theta = 90^\circ$ , nous n'avons pu déterminer qu'une valeur de  $\sigma_{cd}$  respectivement égale à 24,7 MPa et 26,7 MPa.

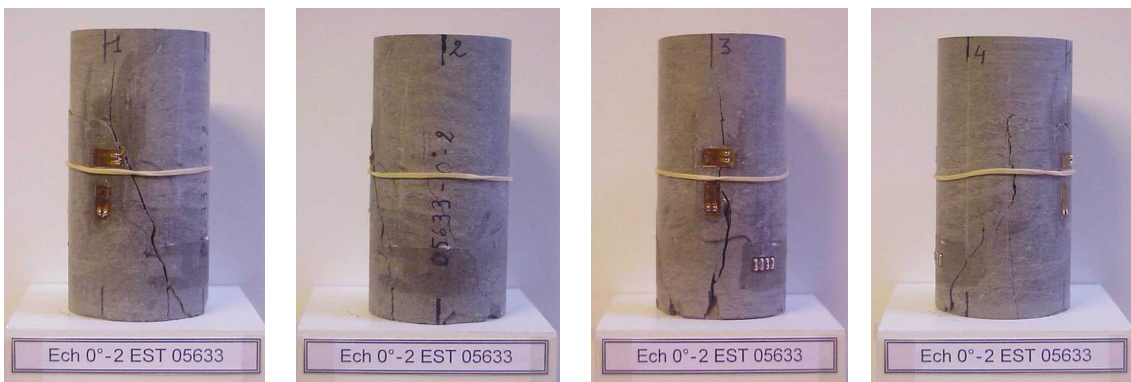
D'après les observations réalisées sur les échantillons rompus (Figure 3.26 et Figure 3.27), la rupture se produit bien en colonnettes, par extension astructural, sur les éprouvettes d'orientation  $\theta = 0^\circ$  et par extension structurale sur les éprouvettes d'orientation  $\theta = 90^\circ$ . Les plans de rupture verticaux recoupent les faces inférieures et supérieures des échantillons, sans formation de cône de frettage. Pour  $\theta = 45^\circ$ , la rupture se produit par cisaillement le long des plans de litage



a) Échantillon  $0^{\circ}$ -1 EST 05558 : vitesse de déformation =  $10^{-8} s^{-1}$ .

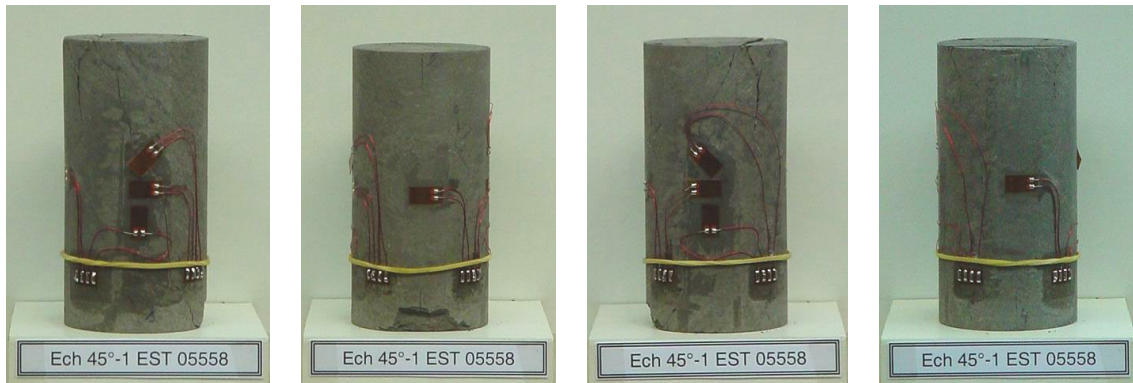


b) Échantillon  $0^{\circ}$ -1 EST 05633 : vitesse de déformation =  $10^{-6} s^{-1}$ .

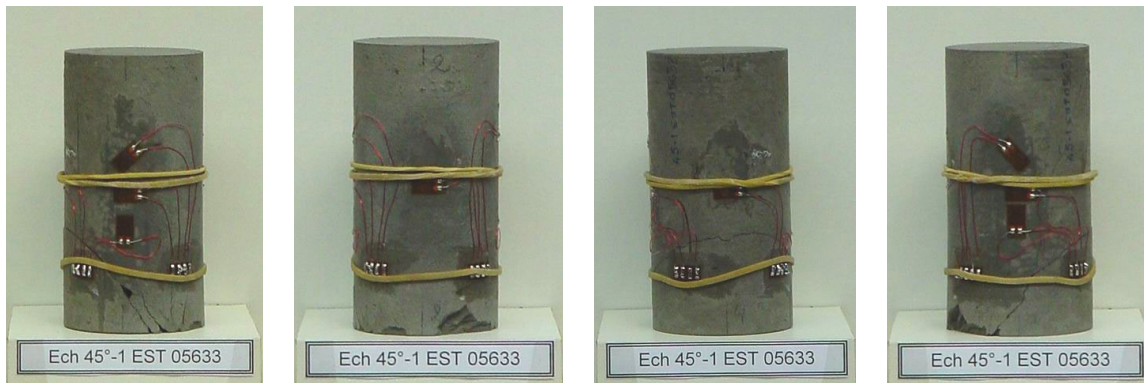


c) Échantillon  $0^{\circ}$ -2 EST 05633 : vitesse de déformation =  $10^{-4} s^{-1}$ .

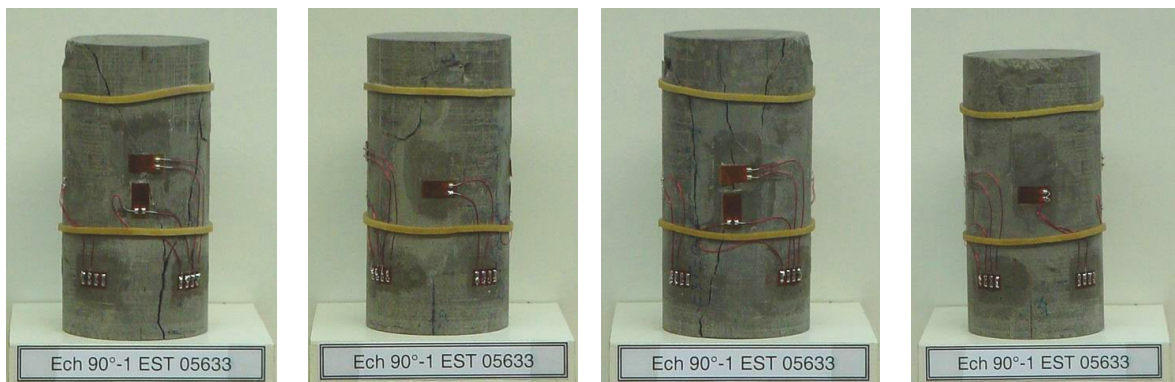
Figure 3.26 : Photographies des échantillons d'argilite de l'Est après rupture lors des essais de compression simple à différentes vitesses de déformation ( $\theta = 0^{\circ}$ ).



a) Échantillon 45°-1 EST 05558 : vitesse de déformation =  $10^6 s^{-1}$ .



b) Échantillon 45°-1 EST 05633 : vitesse de déformation =  $10^6 s^{-1}$ .



c) Échantillon 90°-1 EST 05633 : vitesse de déformation =  $10^6 s^{-1}$ .

Figure 3.27 : Photographies des échantillons d'argilite de l'Est, d'orientation variable, après rupture lors des essais de compression simple ( $\dot{\epsilon} = 10^6 s^{-1}$ ).

### 3.5.1.2 Marne du Mont d'Or

Contrairement à l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or n'est pas étudiée dans l'éventualité de devenir la couche hôte d'un futur stockage de déchets radioactifs.

Les échantillons proviennent d'un tunnel SNCF dans lequel des désordres, gonflement et un écaillage des parois, ont été observés à différentes périodes de son exploitation. Entre 1970 et 1975, une rupture du radier et un soulèvement des parties rompues avec un écaillage des moellons, un soulèvement de la clé de voûte et un rapprochement des piédroits ont notamment été relevés entre les PM 4770 et 5110.

Nous disposons de très peu d'informations sur le comportement mécanique de cette roche et en particulier, sur sa résistance à la compression simple. Une campagne de reconnaissance réalisée par Simecsol en 2000 à partir de sondages carottés donne des valeurs faibles du R.Q.D, révélant la fracturation importante de marne du Mont d'Or.

Il faut rappeler également que bien que cette roche sédimentaire soit *a priori* anisotrope, ce qu'ont confirmé les mesures de vitesses soniques, les plans de litage ne sont pas visibles à l'œil nu et n'ont pas été repérés lors du prélèvement des carottes, si bien que l'anisotropie de structure de cette roche n'a pu être prise en compte dans l'étude mécanique : les échantillons ont été instrumentés à l'aide de 4 jauges d'extensométrie comme des échantillons isotropes.

Dans un premier temps, nous avons réalisé deux essais de chargement quasistatique à la même vitesse ( $\dot{\epsilon} = 8.10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) sur les deux échantillons issus de la carotte n°9 (Figure 3.28). Ces essais devaient nous permettre de déterminer les caractéristiques mécaniques de cette roche afin de définir les valeurs de déviateurs à imposer lors des essais de fluage. La vitesse de chargement choisie pour ces deux essais préliminaires correspond à une des vitesses les plus rapides que l'on puisse atteindre avec la presse de chargement lent, à savoir :  $\dot{\epsilon} = 8.10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

Lors de l'essai MO 9.1, la rupture de l'échantillon s'est produite à 45 MPa et la contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$ , initiant la phase de propagation instable de la fissuration, valait 37,5 MPa. Lors de l'essai MO 9.2, réalisé à la même vitesse de déformation, la rupture s'est produite pour une contrainte plus faible, de l'ordre de 40 MPa et avant le développement de la dilatance.

Cette dispersion des résultats obtenus sur deux échantillons issus d'une même carotte ne peut vraisemblablement pas être imputée à l'anisotropie négligée dans les mesures de déformation. Elle semble plutôt due à l'existence d'un plan de faiblesse orienté à 45° qui correspond bien au litage de la roche, et le long duquel la rupture de l'échantillon MO 9.2 s'est amorcée par cisaillement, comme on peut le voir sur les photos de la Figure 3.33 (b).

D'après l'essai MO 9.1, la marne du Mont d'Or présente un comportement d'abord contractant (serrage et fermeture des fissures) caractérisé par une variation de volume quasiment linéaire puis une phase de dilatance (inversion du sens de la variation de volume). Cette dilatance intervient assez tardivement ce qui explique que la contrainte de contraction maximale  $\sigma_{cd} = 37,5 \text{ MPa}$ , soit proche de la contrainte de rupture.

En théorie, cela signifie que les essais de fluage doivent être réalisés avec un déviateur,  $q$ , supérieur à cette valeur pour que l'on puisse observer dans un temps raisonnable la phase de fluage tertiaire :  $q > 37,5 \text{ MPa}$ .

Contrairement à ce que l'on a pu observer avec l'échantillon MO 9.1, la courbe  $\epsilon_{nn}-\sigma_{nn}$  de l'essai MO 9.2 ne montre cette fois aucune phase de serrage, bien qu'*a priori*, l'orientation des plans de litage et de la fissuration initiale ne soit pas différente. De plus, il semble que la rupture de l'échantillon soit intervenue avant que la phase de dilatance soit amorcée. On a donc :  $\sigma_f = \sigma_{cd} = 40,7 \text{ MPa}$ , valeur supérieure à notre déviateur théorique. La phase de contractance est, elle aussi,



caractérisée par une variation de volume quasiment linéaire.

Le troisième essai, l'essai MO 11.1, a été réalisé à la vitesse de déformation la plus faible que l'on puisse atteindre avec le bâti de chargement lent, à savoir  $\dot{\epsilon} = 8.10^{-9} \text{ s}^{-1}$ .

La contrainte à la rupture est largement supérieure à celle qu'avaient permis de définir les deux essais précédemment, réalisés sur les échantillons MO 9.1 et MO 9.2 (Figure 3.29). On mesure ici une résistance à la compression  $\sigma_f = 81,8 \text{ MPa}$ , c'est-à-dire deux fois supérieure à celle que l'on pouvait escompter avec les résultats des premiers essais.

L'échantillon MO 11.1 présente un comportement fortement contractant caractérisée encore une fois par une variation de volume quasiment linéaire, sans phase de dilatance significative.

L'anisotropie négligée ne permet pas d'expliquer cette dispersion dans les résultats. Mais, les échantillons MO 9.1, MO 9.2 et MO 11.1 proviennent de deux sondages très différents, éloignés de près de 3 km et plus ou moins proches de la paroi. En effet, les échantillons MO 9.1 et MO 9.2 sont issus d'une carotte prélevée à 3 m de profondeur au PM 5105 alors que l'échantillon MO 11.1 a été recarotté dans une carotte situé à 12 m de la paroi du tunnel au PM 2700. On peut supposer que la roche a été à cette profondeur moins endommagée par le creusement, d'où cette résistance à la compression monoaxiale plus importante.

Un quatrième essai de chargement lent sur la marne du Mont d'Or a été réalisé à la vitesse moyenne de  $\dot{\epsilon} = 6.10^{-8} \text{ s}^{-1}$  sur l'échantillon MO 1.1, provenant d'une carotte du troisième sondage (PM 4950). Cet essai devait nous permettre d'évaluer la dispersion des résultats.

Les mesures de vitesse sonique n'ont pas permis de mettre en évidence l'anisotropie de l'échantillon MO 1.1 qui pourrait donc être considéré comme isotrope.

Comme l'échantillon MO 11.1, l'échantillon MO 1.1 présente un comportement fortement contractant caractérisé par une variation de volume linéaire avec une phase de dilatance quasi inexistante avant la rupture qui se produite à  $\sigma_f = 55,2 \text{ MPa}$  (Figure 3.29).

La déformation axiale mesurée lors de cet essai est très importante : elle atteint à la rupture 9027  $\mu\text{m}$  et est donc près de deux fois supérieure à la déformation axiale mesurée à la fin de l'essai MO 11.1 (4902  $\mu\text{m}$ ).

Etant donné la dispersion des résultats et le petit nombre d'essais que nous avons pu réaliser, il sera difficile de comparer quantitativement les résultats obtenus et de tirer des conclusions générales sur le comportement mécanique de la marne du Mont d'Or.

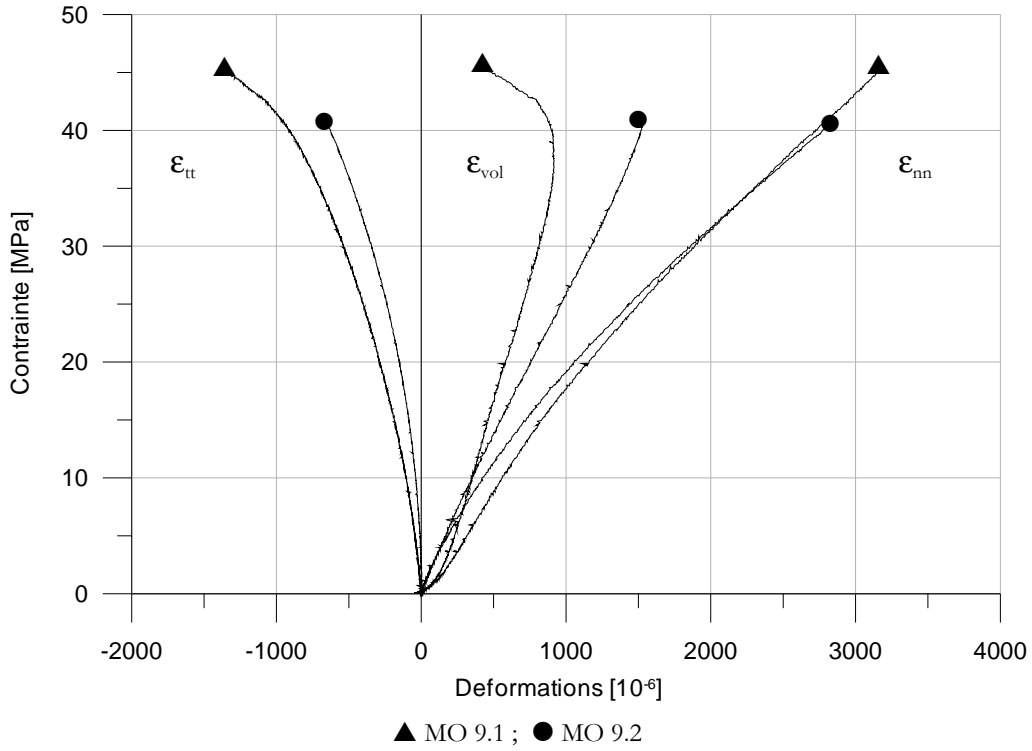


Figure 3.28 : Courbes contrainte - déformation des essais de chargement quasi statique ( $\dot{\epsilon} = 8.10^{-7} s^{-1}$ ) MO 9.1 et MO 9.2 réalisés sur des éprouvettes de marne du Mont d'Or.

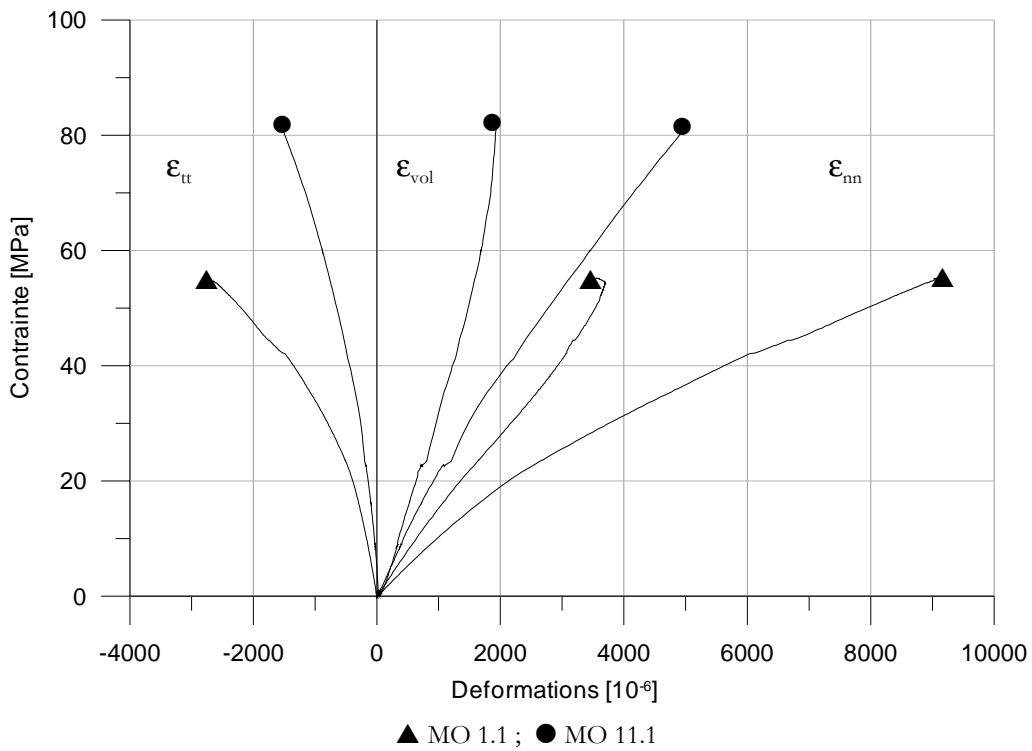


Figure 3.29 : Courbes contrainte - déformation de l'essai de chargement quasi statique MO 11.1 ( $\dot{\epsilon} = 8.10^{-9} s^{-1}$ ) et MO 1.1 ( $\dot{\epsilon} = 6.10^{-8} s^{-1}$ ) réalisés sur des éprouvettes de marne du Mont d'Or.

3.5.1.2.1 Influence de la vitesse de chargement

Le Tableau 3.19 récapitule les déformations et contraintes caractéristiques mesurées sur l'ensemble des essais de chargement quasi statique réalisés sur la marne du Mont d'or. Il met en évidence la plage de variation étendue de la contrainte de rupture, qui varie du simple au double entre 40 et 80 MPa et de la déformation axiale maximale qui varie dans un rapport de trois entre 3000 et 9000  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

D'après ces résultats, ils semblent que la contrainte de rupture augmente quand la vitesse de déformation diminue alors que le résultat inverse est généralement admis. En fait, cette conclusion doit être nuancée. En effet, l'état d'endommagement initial des échantillons varie en fonction de la profondeur de prélèvement et comme on peut le voir sur les graphes de la Figure 3.30, la résistance à la compression simple augmente avec la distance à la paroi.

Échantillon	MO – 9.1	MO – 9.2	MO – 11.1	MO – 1.1
$\dot{\epsilon}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	$8.10^{-7}$	$8.10^{-7}$	$8.10^{-9}$	$6.10^{-8}$
$\sigma_f$ (MPa)	45,5	40,7	81,8	55,2
$\sigma_{cd}$ (MPa)	37,5	40,7	81,4	54,4
$(\epsilon_{nn})_f$	3164	2856	4902	9027
$(\epsilon_{nn})_{cd}$	2452	2856	5036	9003
$(\epsilon_{vol})_{max}$	916	1535	1930	3628

Tableau 3.19 : Déformations et contraintes caractéristiques mesurées sur les essais de chargement quasi statique réalisés sur la marne du Mont d'or.

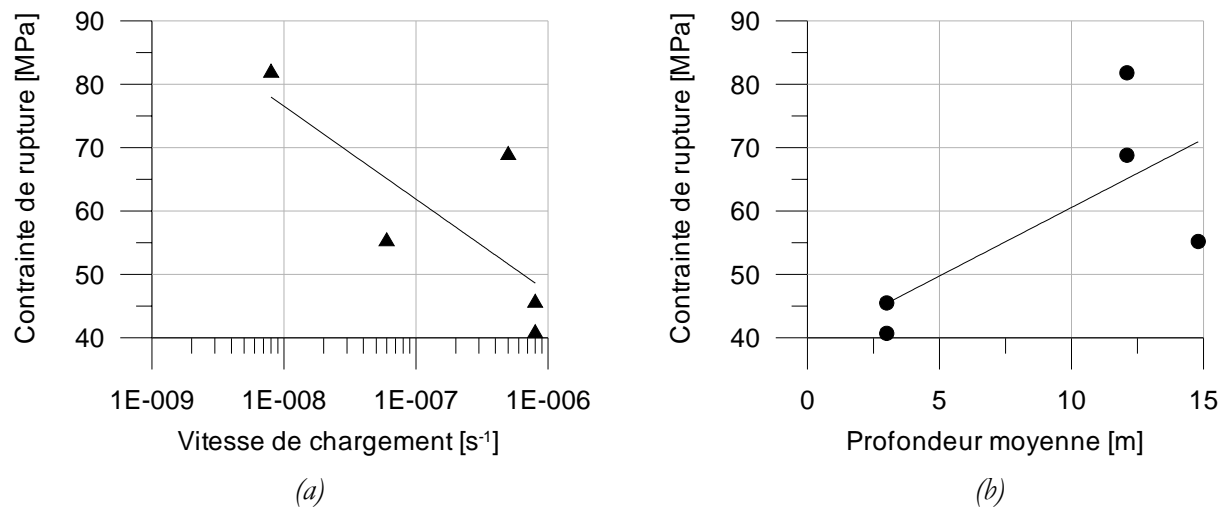


Figure 3.30 : Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de : (a) la vitesse de chargement et de : (b) la profondeur moyenne de prélèvement de l'échantillon.

3.5.1.2.2 Modules de déformation directionnels

D'après les résultats des essais de chargement quasi statique en compression uniaxiale, il semble que le comportement élastique en charge de la marne du Mont d'Or soit caractérisé par une phase linéaire très réduite. Le calcul des modules élastiques a été réalisé sur l'intervalle : 5 % de  $\sigma_f < \sigma < 20$  % de  $\sigma_f$ . Ces modules de déformation directionnels sont répertoriés dans le Tableau 3.20.

Ces résultats font apparaître une grande dispersion dont il faudra tenir compte dans les calages analytiques de la loi de comportement. De plus, la marne du Mont d'Or étant quasiment sèche, les modules de déformation directionnels calculés sont relativement élevés, en particulier le module transversal (61 à 286 GPa). Du fait de sa dessiccation progressive lors de sa conservation à l'air libre, cette roche est probablement beaucoup plus raide que dans son état naturel. Les déformations sont donc beaucoup moins importantes que l'on aurait pu le supposer.

Bien que tous ces échantillons aient un comportement contractant caractérisé par une déformation de volume variant linéairement avec la contrainte, les modules de compressibilité calculés sur cette phase de contractance sont très dispersés, entre 4,6 et 14,3 GPa. Même pour deux échantillons issus d'une même carotte les variations peuvent être importantes : le module de compressibilité de l'échantillon MO 9.1 est en effet deux fois supérieur à celui de l'échantillon MO 9.2. Le même rapport a été mesuré sur les modules directionnels  $E_{nn}$  des échantillons MO 9.1 et MO 1.1.

Échantillon	MO – 9.1	MO – 9.2	MO – 11.1	MO – 11.2	MO – 1.1
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	8.10 <sup>-7</sup>	8.10 <sup>-7</sup>	8.10 <sup>-9</sup>	5.10 <sup>-7</sup>	6.10 <sup>-8</sup>
K (GPa)	14,3	8,1	14,3	/	4,6
$E_{nn}$ (GPa)	20,4	24,6	23,5	18,7*	10,5
$E_{tt}$ (GPa)	89,2	286	146,8	118,6*	61,0

\*calculés sur le premier cycle de charge.

Tableau 3.20 : Paramètres élastiques de la marne du Mont d'Or.

3.5.1.2.3 Phases de relaxation

Lors d'un dernier essai de chargement simple sur la marne du Mont d'Or, nous avons soumis l'échantillon MO 11.2 à des cycles de charge-décharge suivis de phases de relaxation de courte durée (quelques heures). La vitesse de chargement choisie pour cet essai correspond à la vitesse la plus rapide que l'on puisse atteindre avec la presse de chargement lent ; elle correspond pour notre échantillon à une vitesse déformation de  $\dot{\epsilon} = 5.10^{-7}$  s<sup>-1</sup>.

La résistance à la rupture attendue pour cet échantillon est comparable à celle de l'échantillon MO 11.1 issu de la même carotte, c'est-à-dire de l'ordre de 80 MPa. Nous avons donc prévu de réaliser une décharge à 25, 35, 60 MPa et d'imposer un palier de relaxation de quelques heures à

25 et 60 MPa, avant de décharger l'échantillon. Les courbes contrainte-déformations obtenues sont présentées sur la Figure 3.29.

Bien qu'inférieure, la contrainte à la rupture mesurée lors de cet essai est du même ordre de grandeur que celle que l'on avait obtenue sur l'échantillon MO 11.1. Pourtant, la vitesse de sollicitation étant bien supérieure dans cet essai, nous attendions un  $\sigma_f$  supérieur à 82 MPa. On mesure ici,  $\sigma_f = 68,8$  MPa.

Lorsque les valeurs de 25 MPa puis 58 MPa ont été atteintes, les plateaux de la presse ont été bloqués pour mesurer la relaxation des contraintes. Cependant cette déformation axiale n'a pu être maintenue constante lors de ces deux phases de relaxation ; la chute de contrainte, faible, a été associée à une légère augmentation de la déformation (Figure 3.32).

Lors de la première phase de relaxation, on mesure une chute de 1,14 MPa en 20 heures, associée à une augmentation de la déformation axiale de 156  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Lors de la seconde phase de relaxation, on mesure une chute de 3,94 MPa en 15 heures, associée à une augmentation de la déformation axiale de 312  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Etant donnée l'augmentation de la déformation durant ces deux phases de relaxation la diminution de contrainte aurait été bien supérieure si la déformation axiale avait pu être correctement maintenue constante. Avec les modules élastiques calculés lors de la charge précédant ces deux phases de relaxation, respectivement 18,74 et 15,34 GPa, la chute de contrainte théorique qui aurait dû être mesurée était de :

$$\Delta\sigma_n = 1,14 + 18\,740 \times 156 \cdot 10^{-6} = 1,14 + 2,92 = \mathbf{4,06 \text{ MPa}} \quad [3.13]$$

$$\Delta\sigma_n = 3,94 + 15\,340 \times 312 \cdot 10^{-6} = 3,94 + 4,78 = \mathbf{8,72 \text{ MPa}} \quad [3.14]$$

soit par rapport au niveau de contrainte atteint, respectivement une chute de contrainte de 16,5% en 20 heures pour la première phase et de 15% en 15 heures pour la seconde.

Les modules élastiques ont été calculés à chaque cycle, lors la charge. A partir de ces mesures, on constate une légère augmentation du module après une phase de relaxation. On remarque également une diminution des modules de déformation si l'on compare les cycles 1-3 et 2-4, pouvant correspondre à un endommagement du matériau.

Les cycles 2 et 4 (non suivis d'une phase de relaxation) permettent d'étudier les boucles d'hystérésis observées. Dans la classification de *Nishimatsu et Heroesewojo* (1974), elles sont elliptiques et témoignent du comportement viscoélastique linéaire de la marne du Mont d'Or.

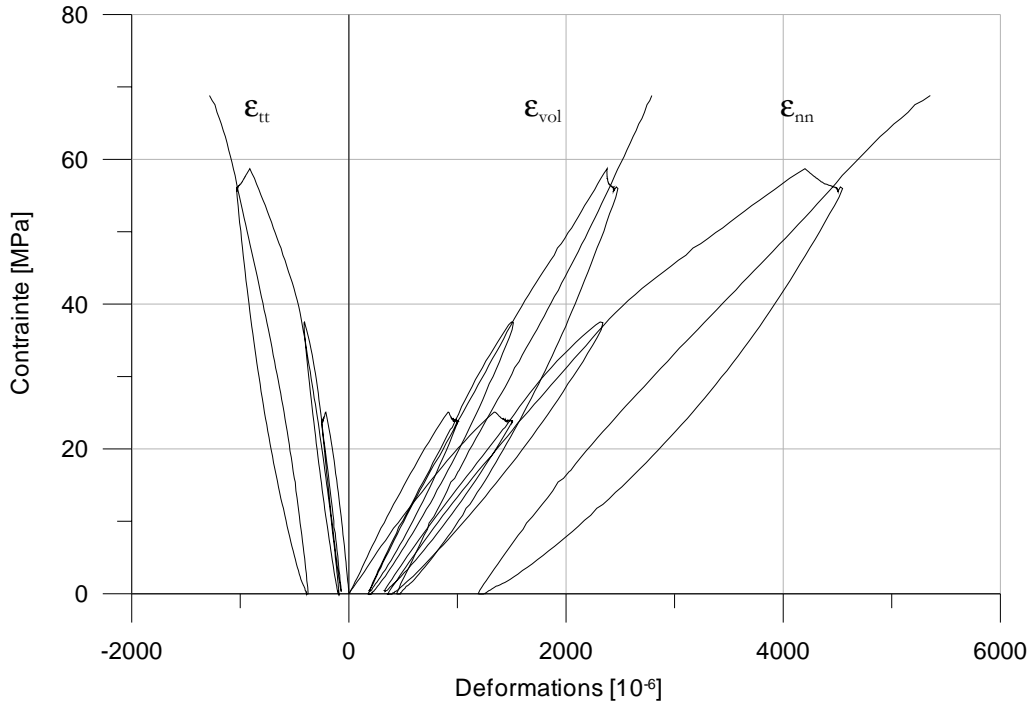


Figure 3.31 : Essai de chargement cyclique avec deux phases de relaxation sur la marne du Mont d'Or : évolution de la contrainte en fonction de la déformation.

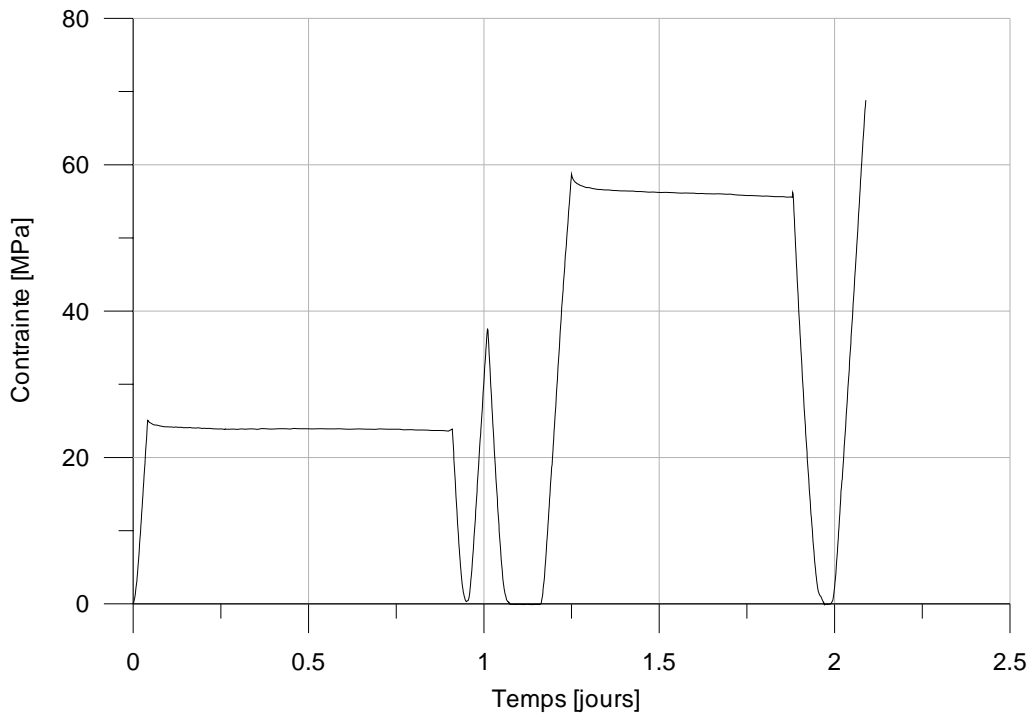


Figure 3.32 : Essai de relaxation : évolution de la contrainte axiale en fonction du temps.

Charge	Module axial (GPa)	Module transversal (GPa)
1	18,74	118,60
2	19,34	119,02
3	15,34	71,73
4	16,65	76,49

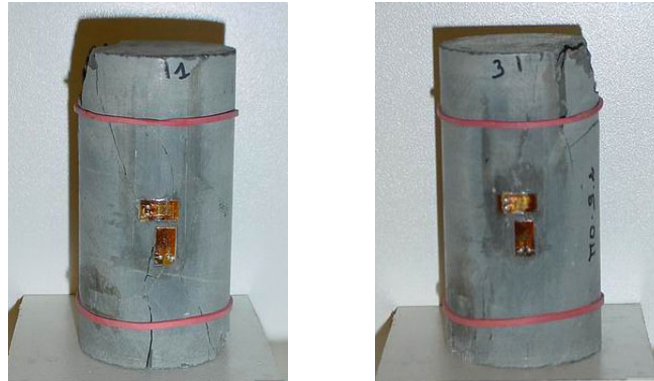
Tableau 3.21 : Modules élastiques calculés en charge lors de l'essai cyclique.

#### 3.5.1.2.4 Analyse du mode de rupture

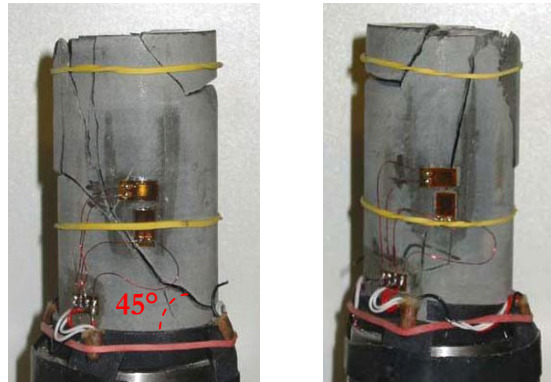
Sur les photographies des échantillons prises à la fin des essais, on observe principalement un mode de rupture en colonnettes, de type fragile caractérisé par des fissures d'extension verticales (mode I).

Cependant, l'échantillon MO 9.2 présente un plan de cisaillement orienté à 45° par rapport à l'horizontale qui correspond à l'orientation du litage de la roche. Il a sûrement constitué un plan de faiblesse sur lequel la rupture s'est développée.

Certains échantillons sont beaucoup plus microfissurés que d'autres. Lors du démontage des cellules, après essai, on retrouve parfois au niveau de l'embase et du piston une fine poudre argileuse provenant de l'écaillage et du broyage des bases de l'échantillon (échantillon MO 1.1).



a) Échantillon MO 9.1 : vitesse de déformation =  $8.10^{-7} s^{-1}$ .



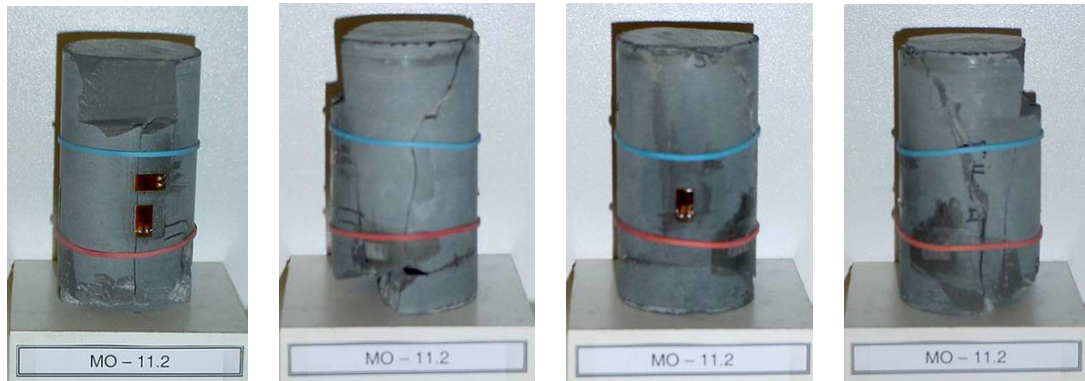
b) Échantillon MO 9.2 : vitesse de déformation =  $8.10^{-7} s^{-1}$ .



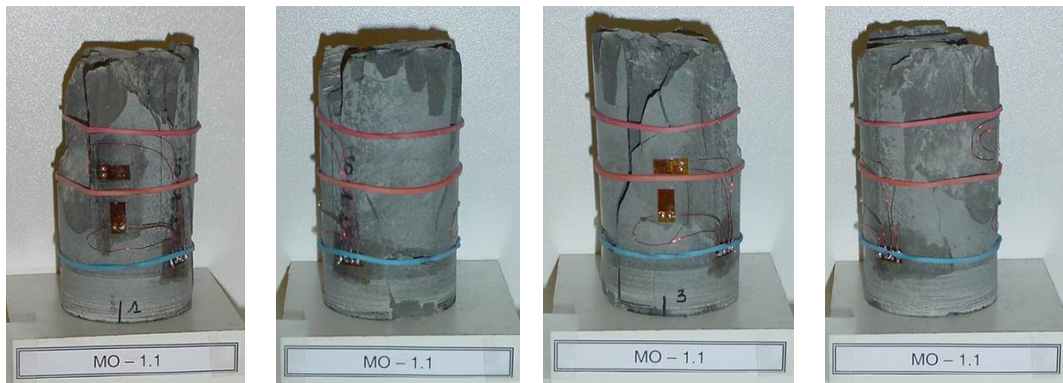
c) Échantillon MO 11.1 : vitesse de déformation =  $8.10^{-9} s^{-1}$ .

Figure 3.33 : Photographies des échantillons de marne du Mont d'Or MO 9.1, MO 9.2 et MO 11.1 après rupture sous chargement quasistatique à différentes vitesses de déformation.





a) Échantillon MO 11.2 : essai cyclique vitesse de déformation =  $5.10^{-7} s^{-1}$ .



b) Échantillon MO 1.1 : vitesse de déformation =  $6.10^{-8} s^{-1}$ .

Figure 3.34 : Photographies des échantillons de marne du Mont d'Or MO 11.2 et MO 1.1 après rupture sous chargement quasi statique à différentes vitesses de déformation.

### 3.5.1.3 Argilite de Tournemire

4 essais de chargement quasi statique ont été réalisés sur l'argilite de Tournemire dans le but d'étudier son comportement mécanique sous des vitesses de déformation très lentes. Ces essais devaient également nous permettre de définir la contrainte de contraction maximale correspondant à la résistance à long terme de la roche et donc au déviateur minimum à imposer lors de nos essais de fluage pour explorer la phase de fluage tertiaire.

4 capteurs piézoélectriques en PVDF ont été utilisés pour suivre l'évolution de la vitesse sonique dans l'axe des échantillons (parallèlement au litage) et dans un diamètre (perpendiculairement au litage) au cours de l'écrasement, lors d'un de ces essais.

Le Tableau 3.22 résume les caractéristiques et les observations principales faites sur l'ensemble des essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de Tournemire. Les résultats sont présentés graphiquement sur les Figure 3.36 à Figure 3.38.

Échantillon	Essai	Vitesse de chargement	Remarques
AT M4 890.1	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	Forte dilatance
AT M5 2200.1	Compression uniaxiale avec mesures de vitesses soniques et d'émissions acoustiques	$\dot{\epsilon} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	Rupture précoce
AT M5 3140.1	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	/
AT M5 3395.3	Compression uniaxiale	$\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$	/

Tableau 3.22 : Programme d'essais de compression uniaxiale réalisés sur les échantillons d'argilite de Tournemire.

### 3.5.1.3.1 Comportement à vitesse lente

Hormis l'essai AT M5 2200.1, les résultats obtenus lors des essais de chargement quasi statique permettent d'estimer la résistance à la compression simple de l'argilite de Tournemire mesurées perpendiculairement à la stratification ( $\theta = 90^\circ$ ) à 37 MPa, ce qui est conforme aux résultats des études antérieures (Niandou, 1994), bien que légèrement supérieur à la résistance habituellement relevée dans les rapports de l'IRSN ( $\sigma_c = 31 \text{ MPa}$  pour  $\theta = 90^\circ$ ).

Sur les 4 essais réalisés, on observe un développement de la déformation volumique qui varie linéairement avec la contrainte. Seul l'essai AT M4 890.1 fait apparaître une phase de dilatance après la contractance du matériau (Figure 3.36).

La courbe des déformations transversales  $\epsilon_t$  de l'échantillon AT M4 890.1 montre en effet un développement important de la fissuration instable. La courbe de la déformation axiale  $\epsilon_{nn}$  de cet essai révèle une rupture vers 27 MPa qui n'a en fait affecté qu'une seule des deux voies jauge. De même, le développement de déformation transversale a été beaucoup plus important sur une voie que sur l'autre. En réalité, la jauge transversale de la face 1 a mesuré l'ouverture d'une fissure verticale. La Figure 3.36 présente donc les déformations transversales mesurées par la jauge de la face 3, plus représentative des déformations subies par la matrice rocheuse.

Lors de l'essai AT M5 2200.1, on observe un développement des déformations à volume quasiment constant jusqu'à une charge de 14 MPa (Figure 3.37). Au-delà de cette contrainte, qui correspond à la perte de linéarité de la déformation  $\epsilon_{ss}$ , le matériau devient contractant, puis dilatant avant la rupture principale. La résistance à la compression simple obtenue ici ( $\sigma_c = 18,6 \text{ MPa}$ ) est relativement faible par rapport aux résultats des autres essais.

Lors des essais AT M5 3140.1 et AT M5 3395.3, nous avons pu mesurer une contractance quasi linéaire sans dilatance des échantillons avant la rupture survenue à respectivement 37,55 MPa et 37,90 MPa (Figure 3.38). L'échantillon AT M5 3395.3 présente une phase de serrage au début de l'essai probablement due à son faible degré de saturation initiale ( $S_r = 18 \%$ ).

Quand elle a pu être déterminée, la contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$  s'est révélée très proche de la contrainte de rupture,  $\sigma_f$ .  $\sigma_{cd}$  vaut entre 85 et 90% de  $\sigma_f$ .

Le litage des échantillons testés étant orienté à 90° par rapport à l'horizontale, les courbes obtenues ne présentent pas de phase de serrage.

La plage de vitesse testée est très peu étendue ( $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  à  $3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ), les résultats ne permettent pas de conclure sur l'influence de ce paramètre sur le comportement de l'argilite de Tournemire. Néanmoins, on mesure une légère augmentation de la résistance à la compression simple avec la vitesse de chargement et une diminution de la déformation axiale à la rupture (Figure 3.35).

Échantillon	AT M4 890.1	AT M5 2200.1	AT M5 3140.1	AT M5 3395.3
Vitesse ( $\text{s}^{-1}$ )	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$
$\sigma_f$ (MPa)	37,7	18,63	35,3	37,90
$\sigma_{cd}$ (MPa)	32,2	16,80	/	/
$(\epsilon_{nn})_f$	3076	1335	2048	2070
$(\epsilon_{nn})_{cd}$	2416	1118	/	/
$(\epsilon_{vol})_{max}$	867	72,94	898	862

Tableau 3.23 : Déformations et contraintes caractéristiques mesurées sur les essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de Tournemire.

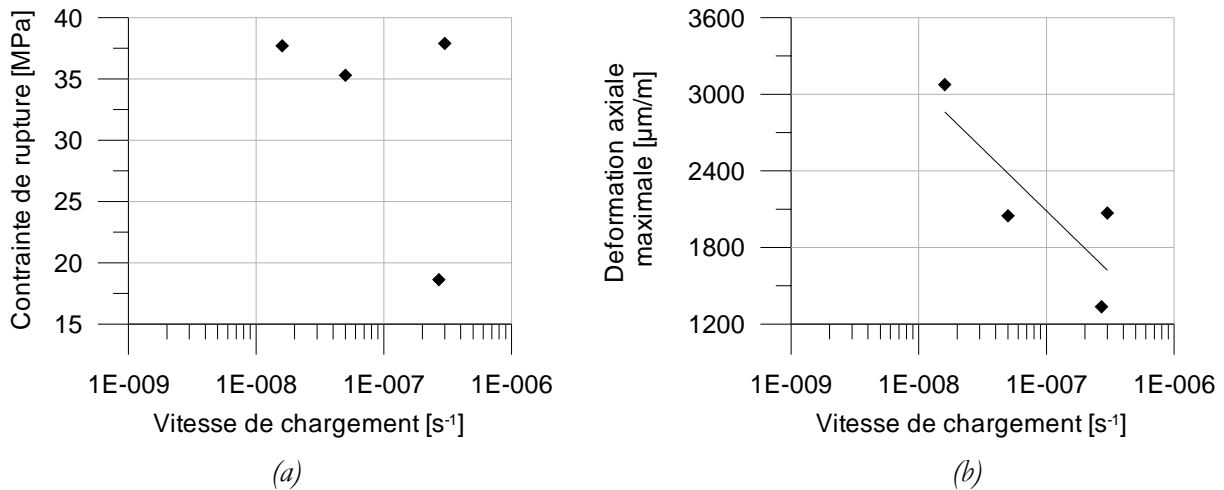


Figure 3.35 : Influence de la vitesse de chargement sur : (a) la contrainte de rupture et (b) la déformation axiale maximale de l'argilite de Tournemire.

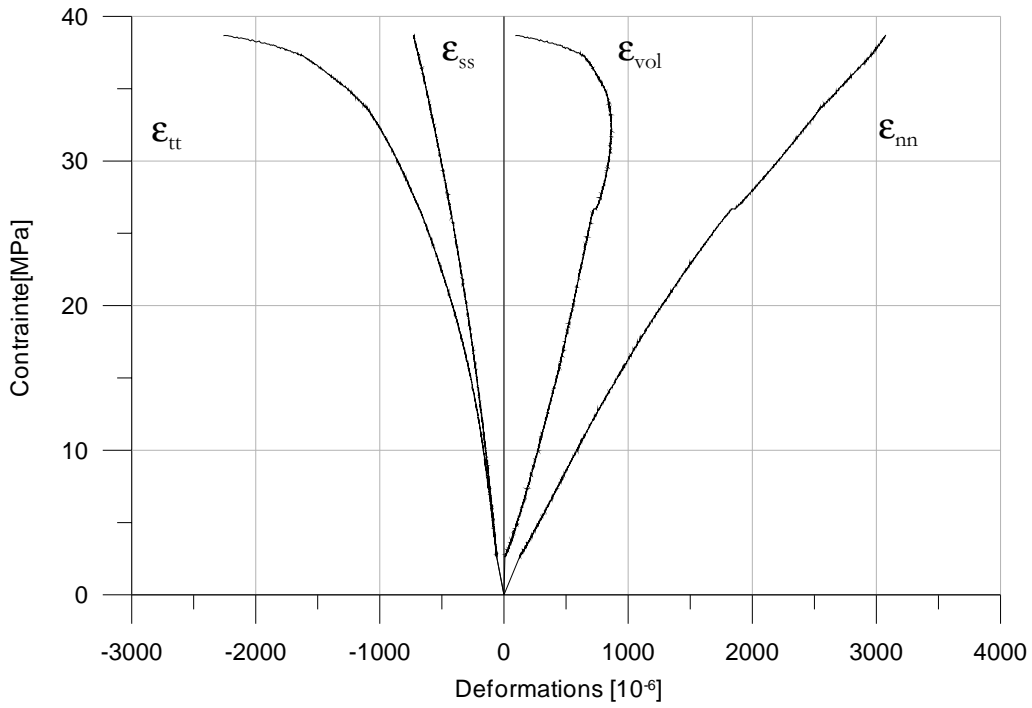


Figure 3.36 : Courbes contrainte-déformation de l'essai de chargement quasi statique AT M4 890.1 ( $\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) réalisé sur l'argilite de Tournemire.

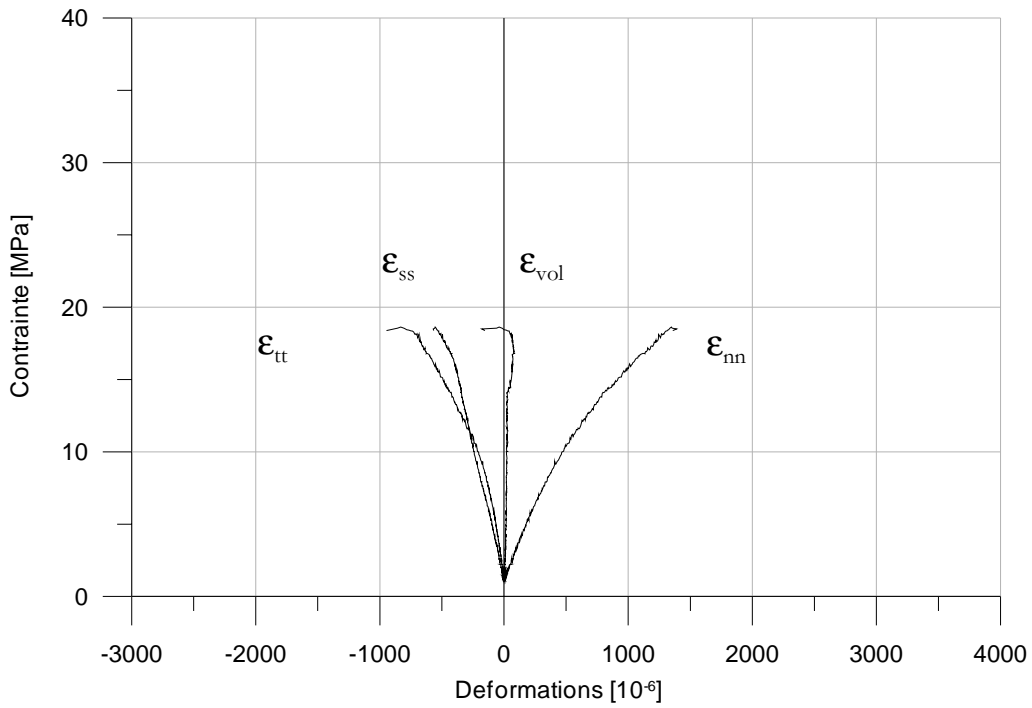


Figure 3.37 : Courbes contrainte-déformations de l'essai de chargement quasi statique AT M5 2200.1 ( $\dot{\epsilon} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) réalisé sur l'argilite de Tournemire.

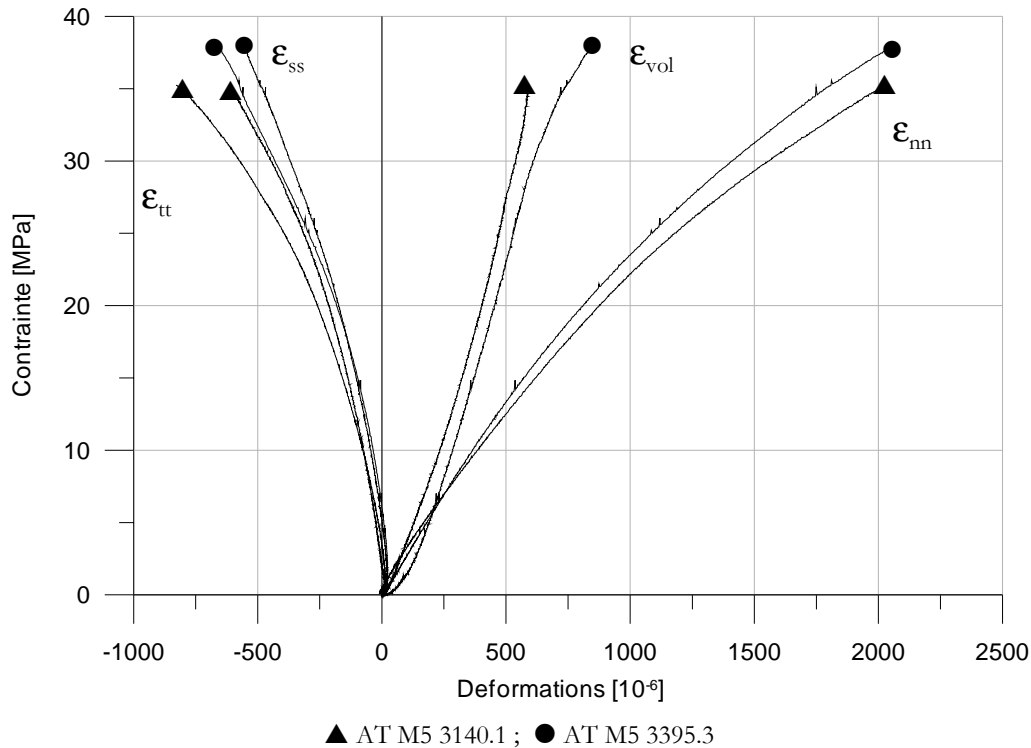


Figure 3.38 : Courbes contrainte-déformations des essais de chargement quasi statique AT M5 3140.1 ( $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) et AT M5 3395.3 ( $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) réalisé sur l'argilite de Tourneire.

### 3.5.1.3.2 Comportement élastique

Contrairement à l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or, l'argilite de Tourneire sollicitée en compression uniaxiale présente une phase linéaire en charge, supposée élastique.

Les modules directionnels ont été calculés sur la partie linéaire des courbes contrainte-déformation. Dès que la pente locale s'écarte de  $\pm 0,5 \%$  de la valeur globale de la pente, nous avons considéré que la linéarité était perdue, que nous étions sortis du domaine élastique. Les plages de variation pour ces modules élastiques sont très étendues.

Échantillon	AT M4 890.1	AT M5 2200.1	AT M5 3140.1	AT M5 3395.3
$\dot{\epsilon}$ (s <sup>-1</sup> )	1,610 <sup>-8</sup>	2,7.10 <sup>-7</sup>	5.10 <sup>-8</sup>	3.10 <sup>-7</sup>
K (GPa)	10,6	/	15,9	19,2
E <sub>nn</sub> (GPa)	15,8	21,5	23,8	27,1
E <sub>tt</sub> (GPa)	55,8	52,5	86,3	125,1
E <sub>ss</sub> (GPa)	72,0	37,2	86,3	116,0

Tableau 3.24 : Paramètres élastiques de l'argilite de Tourneire.

### 3.5.1.3.3 Mesures de vitesses soniques

Lors de l'essai AT M5 2200.1, nous avons mesuré en continu, la vitesse de propagation des ondes soniques P dans l'échantillon, dans l'axe et suivant un diamètre perpendiculaire aux plans de litage de la roche (plan  $(\vec{n}, \vec{\tau})$ ). L'émission acoustique a également été enregistrée lors de cet essai.

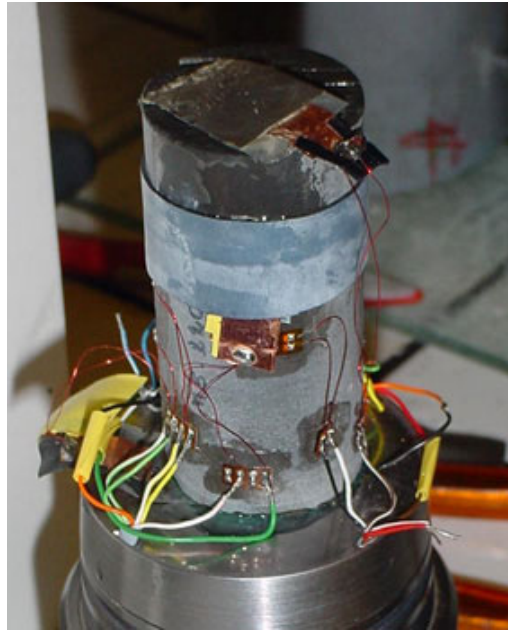


Figure 3.39 : Echantillon d'argilite de Tournemire AT M5 2200.1 instrumenté pour le suivi du développement des déformations, l'enregistrement de l'émission acoustique et l'évolution de la vitesse sonique des ondes P.

Les oscillogrammes ont montré que la mesure de la vitesse des ondes soniques dans une direction perpendiculaire aux plans de stratification, est en pratique assez difficile à réaliser à l'aide de ces capteurs PVDF, le signal reçu étant très faible et indiscernable du bruit électromagnétique.

En effet, l'argilite de Tournemire est très atténuante. L'amplitude du signal reçu est donc très inférieure à l'amplitude du signal émis, ce qui rend délicat le pointage de la première onde arrivée. De plus, la microfissuration parallèle à la stratification peut constituer un obstacle quasiment infranchissable pour l'onde qui devient alors indétectable par le capteur récepteur.

Le même problème de détection s'est posé pour les mesures dans l'axe de l'échantillon. Cependant, au cours de l'essai, le contact du capteur avec la roche était amélioré par l'augmentation de la charge et l'amplitude du signal reçu augmentant, la première arrivée devenait plus facilement identifiable.

Pour faciliter le pointage de la première arrivée définissant la vitesse de propagation, paramètre dont nous suivions l'évolution au cours de l'essai, douze signaux ont été successivement enregistrés toutes les dix minutes. Sommés, ils permettaient de visualiser plus précisément l'onde reçue.

Les signaux émis et reçus sont superposés sur l'oscilloscope de façon à mesurer précisément le

temps de parcours de la première onde arrivée (Figure 3.40).

Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 3.40 et la Figure 3.41. Ils ne font pas apparaître une tendance franche mais une augmentation de la vitesse due à la contractance du matériau se devine puis une diminution due à l'endommagement de la roche (ouverture de fissures).

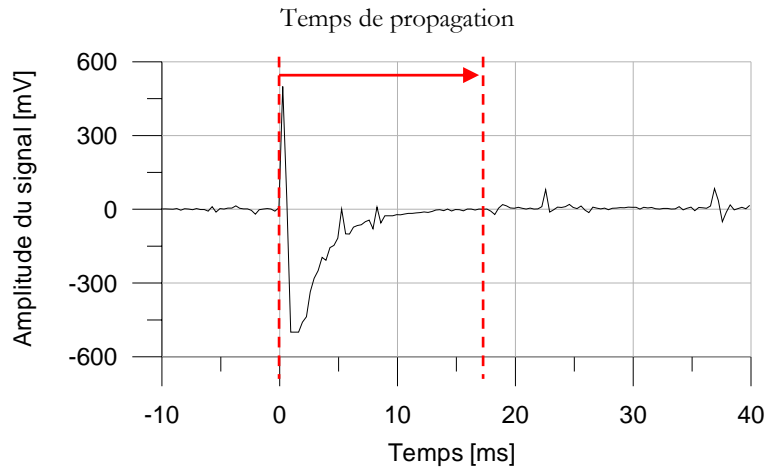


Figure 3.40 : Exemple d'enregistrement du signal de propagation d'ondes ultrasoniques dans l'argilite de Tournemire.

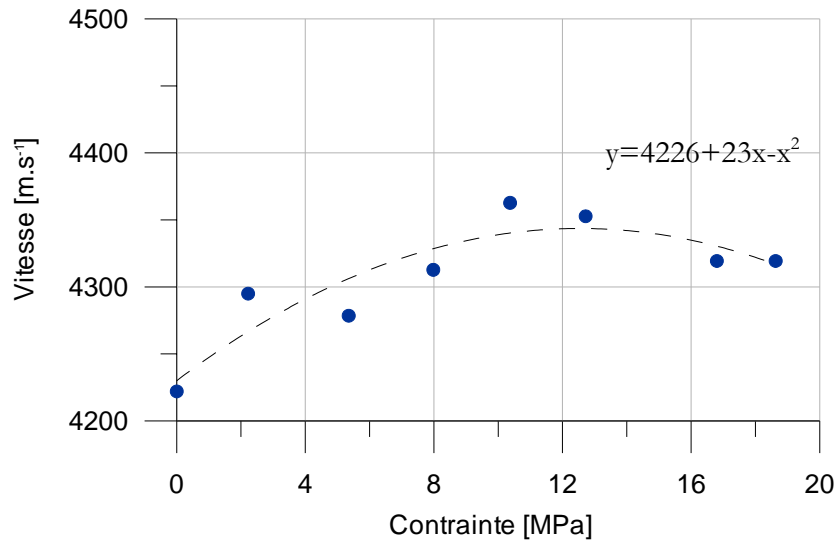


Figure 3.41 : Evolution de la vitesse des ondes ultrasonique en fonction de la contrainte appliquée à l'échantillon ATM5 2200.1.

Les mesures d'émission acoustique ont été réalisées à l'aide d'un capteur piézoélectrique placé

sur le piston supérieur de la cellule avec lequel nous voulions enregistrer le nombre d'événements (cracks) en fonction de l'augmentation de la charge.

Cette expérience n'a pas donné de résultat significatif. Très peu d'événements ont été enregistrés et aucune augmentation de l'émission n'a été mesurée avant la rupture de l'échantillon.

Les premières observations microscopiques faites sur les lames minces d'argilite de l'Est laissent penser que les ruptures et microfissures à l'intérieur des échantillons de ces roches se développent essentiellement dans la matrice argileuse, comme nous le verrons dans le chapitre 4. Sous le microscope optique ou électronique, peu de grains de quartz ou de carbonates fracturés sont visibles, ce qui expliquerait la faiblesse de l'émission acoustique enregistrée dans l'argilite de Tournemire.

#### *3.5.1.3.4 Analyse du mode de rupture*

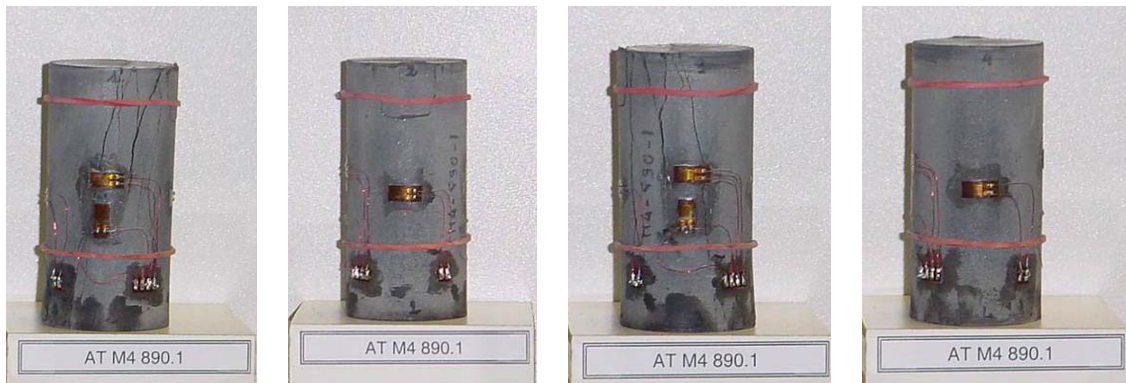
Les observations et les photographies réalisées sur les échantillons rompus montrent que la rupture se développe par extension dans les plans de litage pour ces éprouvettes orientées à  $\theta = 90^\circ$ . Les surfaces de rupture recoupent bien les bases, inférieure et supérieure, de l'échantillon sans formation de cône de fretage. Les traces de ces plans sont visibles sur les faces 1 et 3 des échantillons et quasiment invisibles sur les faces 2 et 4, comme on peut le voir sur les photographies de la Figure 3.42 et de la Figure 3.44.

Lors de la rupture de l'échantillon AT M4 890.1, les plans de rupture ont recoupé la surface des jauges transversales, sans pour autant les décoller ou les détruire, ce qui explique les fortes déformations transversales mesurées (jauge transversale de la face 1).

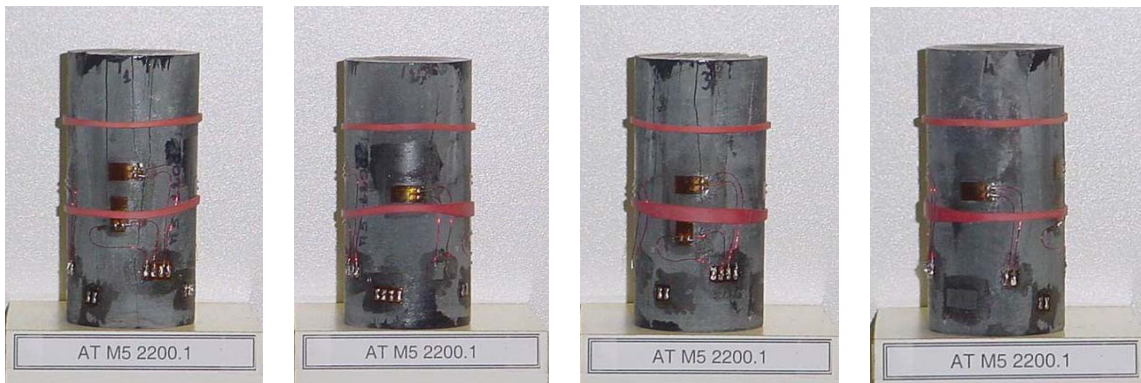
Nous avons fait varier la vitesse de déformation dans un intervalle relativement étroit :  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  à  $3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ . Aucune influence de ce paramètre sur le mode de rupture des échantillons n'est perceptible.

L'essai AT M5 3395.3 a été réalisé avec la cellule transparente que nous avons développée sur le modèle des cellules Bohler, pour suivre visuellement la déformation lors d'essai de compression simple. Des photographies de l'échantillon ont été prises tout au long de l'essai, toutes les 15 secondes ; certaines sont présentées sur la Figure 3.43. Cette expérience a montré que la fissuration macroscopique de l'échantillon AT M5 3395.3 a commencé à se développer assez tardivement, pour  $q = 34,9 \text{ MPa}$ . Les photographies successives ont permis de suivre l'ouverture progressive d'une macrofissure sur plusieurs minutes.

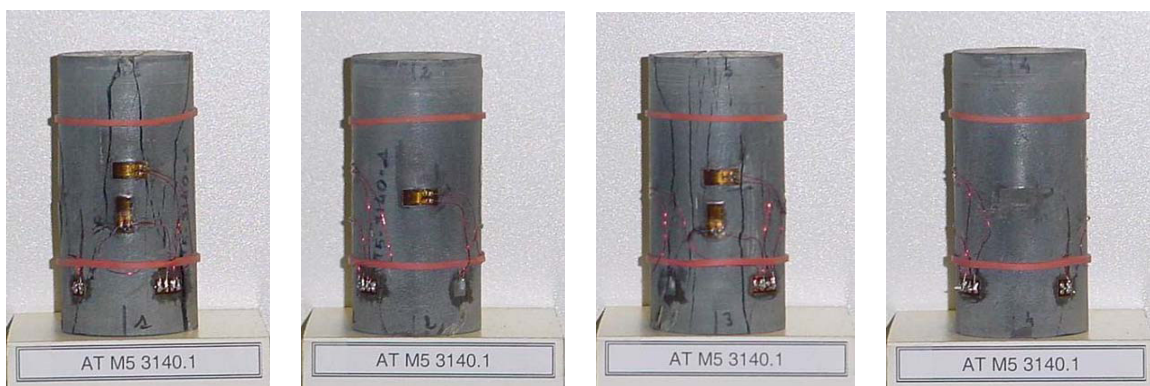




a) Echantillon AT M4 890.1 : vitesse de déformation =  $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

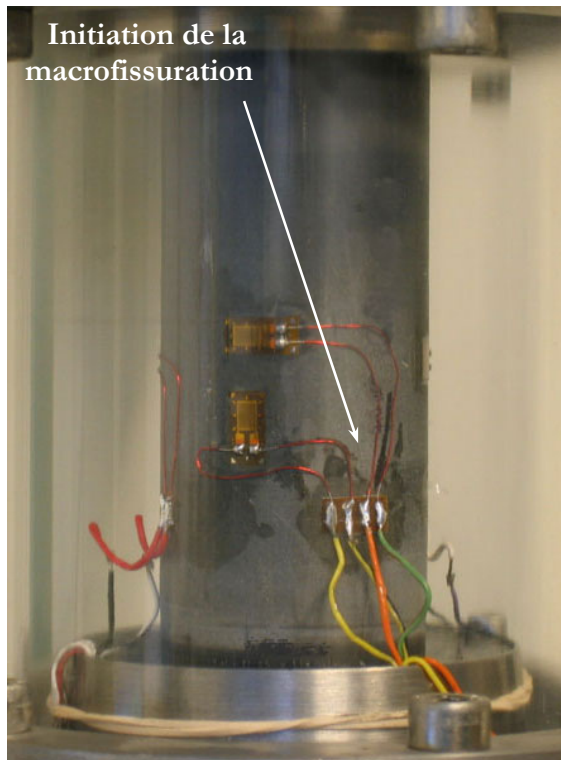


b) Echantillon AT M5 2200.1 : vitesse de déformation =  $2,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

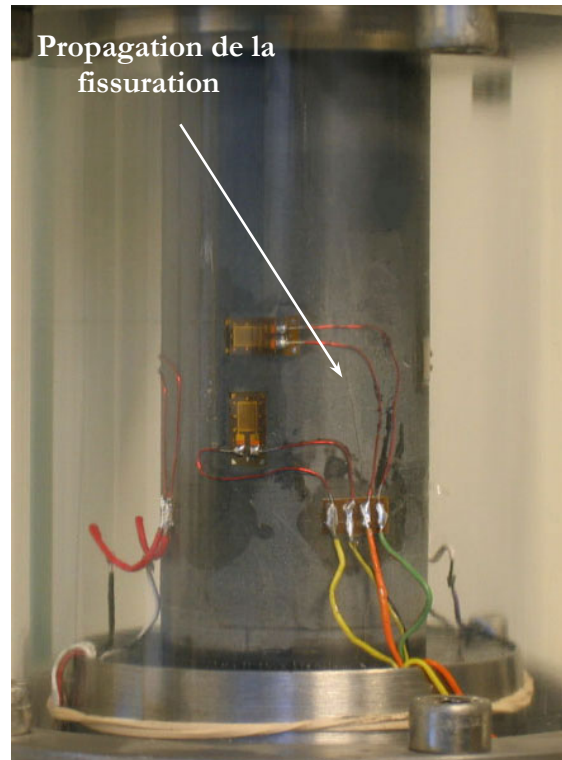


c) Echantillon AT M5 3140.1 : vitesse de déformation =  $5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

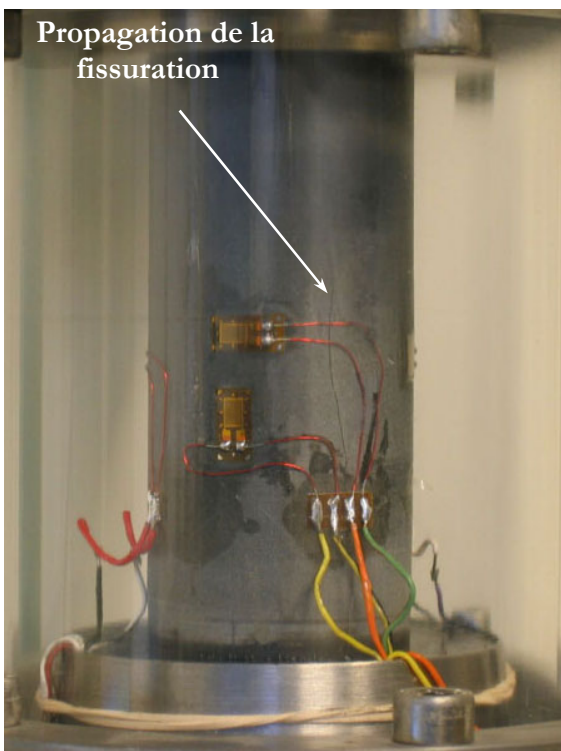
Figure 3.42 : Photographies des échantillons d'argilite de Tournemire ( $\theta = 90^\circ$ ) AT M4 890.1, AT M5 2200. et AT M5 3140.1 après rupture sous chargement quasistatique à différentes vitesses de déformation.



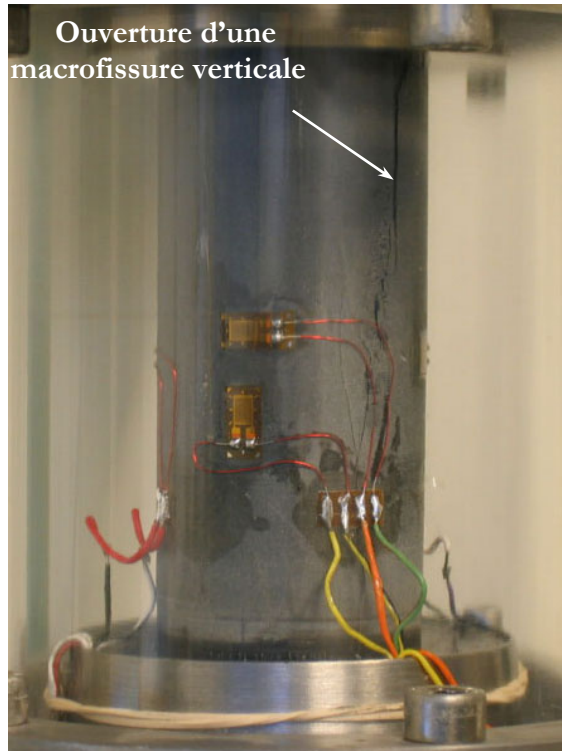
(a) :  $t$  et  $q = 34,9$  MPa



(b) :  $t + 15$  s



(c) :  $t + 60$  s



(d) :  $t + 120$  s

Figure 3.43 : Photographies de l'échantillon AT M5 3395.2 prises durant l'essai de chargement quasi statique : développement de la fissuration avant la rupture.

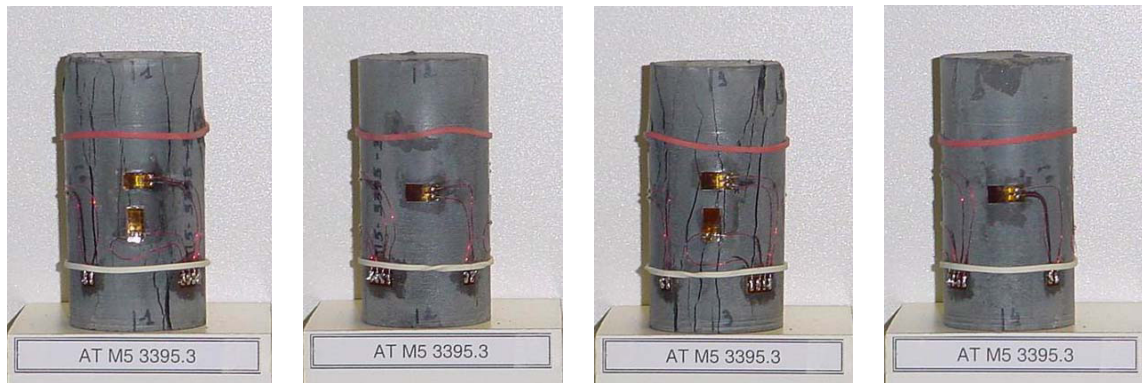


Figure 3.44 : Photographies de l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M5 3395.3 ( $\theta = 90^\circ$ ) après rupture sous chargement quasi statique à  $3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ .

### 3.5.1.4 Conclusions sur les essais de chargement quasi statique

D'après les essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de Tournemire, l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or, le comportement mécanique de ces trois roches argileuses sous compression uniaxiale est très similaire. Il est notamment caractérisé par un développement de la déformation volumique, linéaire avec la contrainte, jusqu'à l'initiation de la dilatance, quelle que soit la vitesse de chargement ou l'orientation de la stratification par rapport à la contrainte principale.

Quand elle apparaît, cette dilatance se produit assez tardivement, à partir d'une contrainte  $\sigma_{cd}$  proche de la contrainte de rupture,  $\sigma_r$ . En compression simple, dès que la propagation des fissures devient instable, les caractéristiques mécaniques de ces roches se dégradent donc rapidement, menant l'échantillon testé à la rupture, après une courte phase de dilatance.

Ces trois roches argileuses ne présentent aucune phase de serrage quelle que soit l'orientation des plans de stratigraphie par rapport à la contrainte appliquée. De plus, l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or ont un comportement élastique non linéaire alors que l'élasticité de l'argilite de Tournemire est linéaire.

Les observations et les photographies des échantillons rompus montrent que la rupture de l'argilite de l'Est en compression simple se produit en colonnettes, par extension astructurelle, sur les éprouvettes d'orientation  $\theta = 0^\circ$  et par extension structurelle sur les éprouvettes d'orientation  $\theta = 90^\circ$ . Pour  $\theta = 45^\circ$ , la rupture se produit par cisaillement le long des plans de litage

Ces échantillons d'argilite de Tournemire avaient une orientation  $\theta = 90^\circ$ , l'axe du forage étant horizontal. La rupture de type fragile s'est développée donc dans ces plans de litage.

Sur nos échantillons rompus de marne du Mont d'Or pour lesquels on peut supposer que  $\theta$  est de l'ordre de  $45^\circ$ , on observe une rupture astructurelle suivant des plans verticaux légèrement déviés, excepté pour un échantillon qui présente un plan de cisaillement orienté à  $45^\circ$ .

En ce qui concerne l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de ces roches, une augmentation de la résistance à la compression simple avec la vitesse de chargement a été observée sur l'argilite de l'Est. La plage de vitesse imposée aux échantillons d'argilite de Tournemire était trop étroite pour qu'une influence significative soit décelable. La dispersion des résultats obtenus avec les essais réalisés sur la marne du Mont d'Or ne permet pas non plus de conclure sur l'influence de ce paramètre.

### 3.5.2 Essais de fluage

Le but des essais de fluage réalisés sur l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire était essentiellement de détecter et d'observer la phase de fluage tertiaire afin de pouvoir caler un modèle rhéologique permettant la prise en compte de l'endommagement dans la modélisation des phénomènes différés.

L'existence d'une contrainte seuil théorique  $\sigma_{cd}$  en deçà de laquelle seul le fluage primaire se développe, nous a conduits à réaliser des essais de fluage multipalier. Il nous a donc fallu définir une vitesse de déformation limite à partir de laquelle les déformations étaient considérées comme stabilisées et le déviateur imposé,  $q$  inférieur à  $\sigma_{cd}$ , pouvait être augmenté.

Pour cela, sur chacun des trois bancs de fluage utilisés, la dérive électrique des jauges a été mesurée pendant 25 jours. Ces mesures ont montré que cette dérive électrique augmente artificiellement les déformations en moyenne de  $10 \mu\text{m}/\text{m}$  en 25 jours à la température ambiante de  $20^\circ\text{C}$ , ce qui correspond à une vitesse de déformation de :  $5 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . Les courbes de fluage ont été corrigées pour s'affranchir de cette dérive. La vitesse limite a été définie arbitrairement au-dessus de cette valeur à :  $\dot{\epsilon} = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ .

Pour vérifier la validité d'une des hypothèses de la loi de Lemaitre - *les déformations viscoplastiques se développent à volume constant* - nous avons suivi l'évolution de la déformation volumique totale en fonction du temps durant nos essais de fluage. Les déformations élastiques étant supposées instantanées, ces courbes donnent bien l'allure de la déformation viscoplastique en fonction temps.

#### 3.5.2.1 Fluage de l'argilite de l'Est

Les essais de compression uniaxiale réalisés sur l'argilite de l'Est ont permis de déterminer une contrainte de contraction maximale  $\sigma_{cd}$  moyenne de 26,6 MPa pour les échantillons d'orientation  $\theta = 0^\circ$ .

L'échantillon 0°-2 EST 05558 a été soumis à un déviateur de 26 MPa, donc légèrement inférieur au  $\sigma_{cd}$  théorique, mais tout de même égal à 93 % de  $\sigma_f$  et maintenu constant à plus ou moins 0,1 MPa près, pendant 321 jours. Malheureusement, malgré la durée de cet essai, la phase de fluage tertiaire et la rupture de l'échantillon n'ont pas été atteintes sous ce déviateur. L'essai a été interrompu au 321<sup>ème</sup> jour.

Les déformations axiales et transversales ont cependant été enregistrées en continu et la déformation volumique a été calculée avec la formule classique :

$$\epsilon_{\text{vol}} = \epsilon_{\text{nn}} + 2 \epsilon_{\text{tt}} \quad [3.15]$$

La courbe de fluage montrant l'évolution de la déformation axiale, volumique et du déviateur en fonction du temps est présentée à la Figure 3.45, elle se compose de :

- Une phase de fluage primaire qui a duré environ 25 jours.
- Une phase de fluage secondaire au cours de laquelle la vitesse de déformation semble constante : Le calcul de la vitesse de déformation en fonction du temps montre qu'elle se stabilise à  $2,2 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$  ( $19 \mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ ). Le seuil de fluage secondaire se situe environ à  $8020 \mu\text{m}/\text{m}$  sous ce déviateur.
- Une phase de stabilisation de la déformation qui s'amorce à partir du 283<sup>ème</sup> jour.

L'évolution de la déformation volumique totale en fonction du temps durant l'essai de fluage montre que les déformations viscoplastiques ne se développent pas rigoureusement à volume constant. On observe, en effet, après une importante contraction ( $\epsilon_{vol}$  croissante) durant le fluage primaire, une dilatance de l'échantillon - les déformations axiales positives se développant moins vite que les déformations transversales négatives - qui se poursuit durant la phase de fluage secondaire à la vitesse constante de  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ .

A la fin de cet essai, les déformations élastiques axiales instantanées ( $5200 \mu\text{m/m}$ ) ne représentent plus que 45 % de la déformation finale ( $11760 \mu\text{m/m}$ ). Plus de la moitié de la déformation de l'échantillon est donc d'origine différée.

La contrainte  $\sigma_{cd}$  caractérise la résistance à long terme de la roche et définit en théorie la contrainte minimale qui conduit à la rupture lors d'un essai de fluage. Le déviateur de contrainte choisi pour cet essai était très proche du  $\sigma_{cd}$  théorique déterminé sur les essais de chargement quasi statique réalisés sur des échantillons d'argilite de l'Est de même orientation, mais tout de même légèrement inférieur. L'essai a été interrompu au 321<sup>ème</sup> jour mais depuis le 283<sup>ème</sup> jour, les déformations axiales semblaient s'amortir. Il était donc probable que le fluage tertiaire ne soit jamais atteint sous ce déviateur ou bien, que la rupture de l'échantillon soit survenue malgré tout mais au bout d'un temps très long.

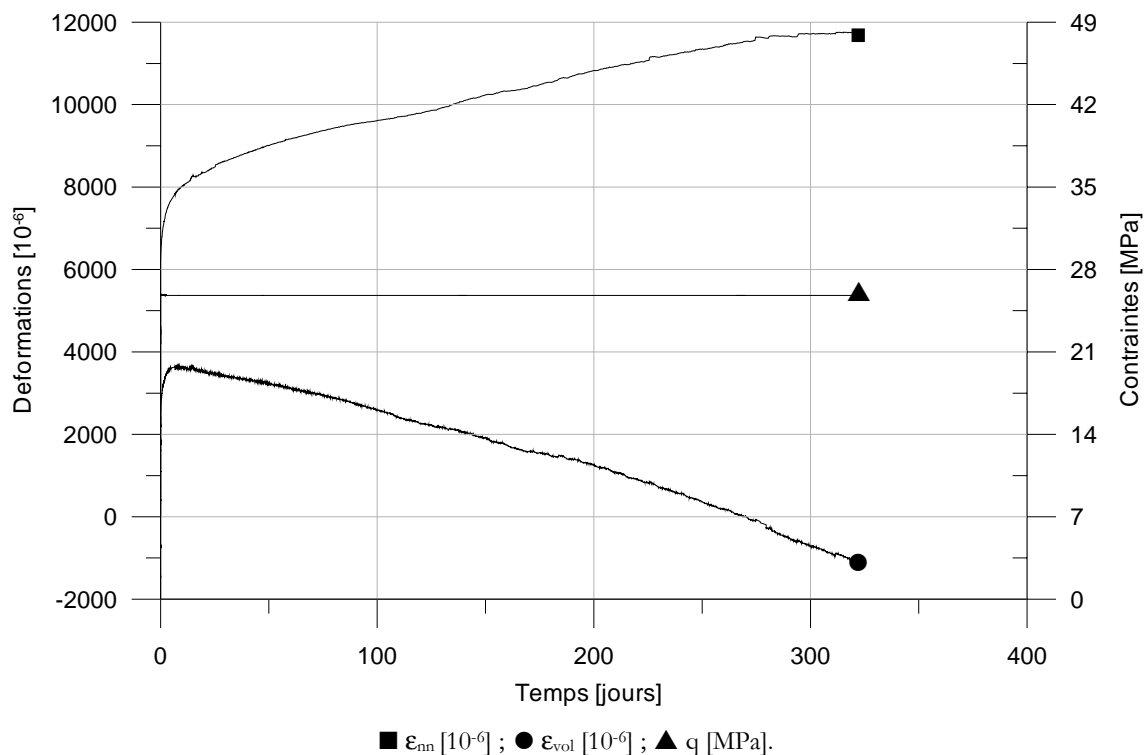


Figure 3.45 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage sous 26 MPa sur l'échantillon 0°-2 EST 05558 d'argilite de l'Est.

### 3.5.2.2 Fluage de la marne du Mont d'Or

Deux essais de fluage ont été réalisés sur deux échantillons de marne du Mont d'Or : MO 4.1 et MO 13.1.

Afin d'étudier le fluage tertiaire de cette roche, au cours de ces essais, nous avons chargé nos échantillons par paliers de déviateurs croissants et essayé d'accélérer les déformations en effectuant plusieurs cycles de charge-décharge (Figure 3.46 et Figure 3.47).

L'échantillon de marne du Mont d'Or, MO 4.1 a été soumis à six paliers de chargement croissants (de 30, 38, 44, 48,5, 51 et 60 MPa) maintenus constants à plus ou moins 0,2 MPa (Figure 3.46). Au cours de ces paliers, plusieurs phases de décharge jusqu'à 25 MPa ont été imposées à l'échantillon et maintenues au moins 24 heures. Le détail des phases de l'essai est résumé dans le Tableau 3.25.

La première phase de fluage sous 30 MPa a duré 21 jours. Sous ce déviateur, nous avons observé une phase de fluage primaire au cours de laquelle la vitesse de déformation a décru lentement jusqu'à  $10^{-11} \text{s}^{-1}$ . D'après l'allure de la courbe de fluage et l'évolution de la vitesse de déformation, il est probable que les déformations visqueuses auraient fini par s'amortir. La phase de fluage secondaire n'aurait dans ces conditions jamais pu être atteinte. Le déviateur a donc été augmenté à 38 MPa.

Lors du deuxième palier de chargement, sous un déviateur  $q = 38 \text{ MPa}$ , nous avons soumis l'échantillon à une série de cycles de charge-décharge dans le but d'observer une influence du chargement cyclique sur le comportement de la roche et mettre en évidence une éventuelle accélération des déformations. Pour vérifier la validité de cette hypothèse, la vitesse de fluage après une charge a été calculée sur une durée de 24 heures. Les résultats sont représentés graphiquement (Figure 3.49) et discutés dans le paragraphe 3.5.2.2.2.

Si on estime  $\sigma_{cd}$  proche de 40 MPa pour la marne du Mont d'Or, comme l'ont laissé supposer les essais de chargement quasi statique MO 9.1 et MO 9.2, le déviateur imposé dès le troisième palier (44MPa) est supérieur à cette valeur. En théorie, on peut donc s'attendre à voir un fluage secondaire se développer à partir de ce palier.

Pourtant au bout du 64<sup>ème</sup> jour, la courbe de fluage s'infléchit franchement laissant présager une longue phase de fluage primaire et un amortissement très lent des déformations. En espérant réactiver le fluage, nous avons imposé à l'échantillon un cycle de charge-décharge au même niveau de déviateur.

Effectivement, après avoir rechargé l'échantillon, nous avons constaté une augmentation de la vitesse de fluage avec une évolution quasi linéaire des déformations pendant une dizaine de jours. Cette observation est confirmée par le calcul de la vitesse de déformation qui laisse présager l'amorce de la phase de fluage secondaire : la vitesse est alors à peu près constante de l'ordre de  $4,2 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ . Mais à partir du 80<sup>ème</sup> jour de l'essai, la vitesse de déformation décroît à nouveau et tend vers  $10^{-11} \text{ s}^{-1}$  ce qui nous a conduit au 98<sup>ème</sup> jour, à appliquer un nouveau cycle de charge-décharge. Cette fois, le fluage n'a pas été réactivé puisqu'on observe un palier de déformation constant sur 3 jours, au cours duquel la valeur de déformation est étrangement inférieure à la valeur atteinte avant la décharge.

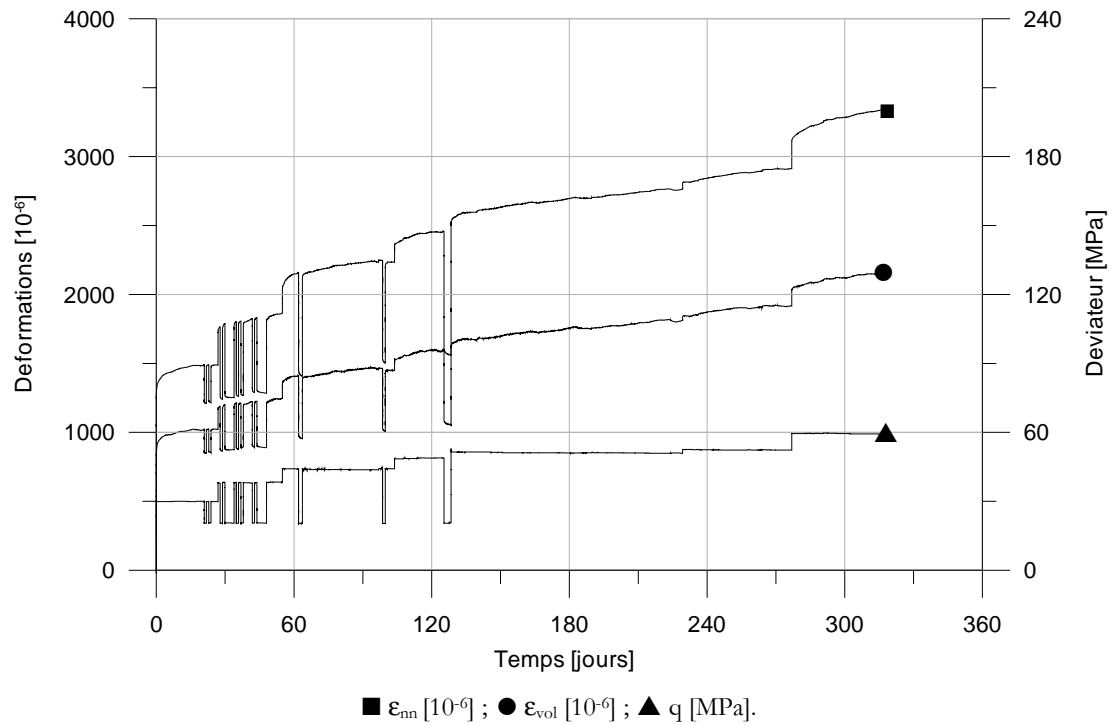


Figure 3.46 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage cyclique réalisé sur l'échantillon de marne du Mont d'Or, MO 4.1.

Palier	Phase	Niveau de $\sigma$ [MPa]	Durée [jours]	Palier	Phase	Niveau de $\sigma$ [MPa]	Durée [jours]
Palier 1	Fluage	30	21	Palier 2	Recouvrance	20,5	1
	Recouvrance	20,5	1		Fluage	38	1
	Fluage	30	1		Recouvrance	20,5	4
	Recouvrance	20,5	1		Fluage	38	7
	Fluage	30	3	Palier 3	Fluage	44	7
Fluage	38	1	Recouvrance		20,5	1,5	
Recouvrance	20,5	1	Fluage		44	35	
Fluage	38	1	Recouvrance		20,5	1,5	
Recouvrance	20,5	4	Fluage		44	4	
Palier 2	Fluage	38	1	Palier 4	Fluage	48,5	21,5
	Recouvrance	20,5	1		Recouvrance	20,5	3
	Fluage	38	2	Palier 5	Fluage	51	148,5
	Recouvrance	20,5	1	Palier 6	Fluage	60	42
Fluage	38	4					

Tableau 3.25 : Détails de l'essai de fluage cyclique multipalier réalisé sur l'échantillon MO 4.1 de marne du Mont d'Or.

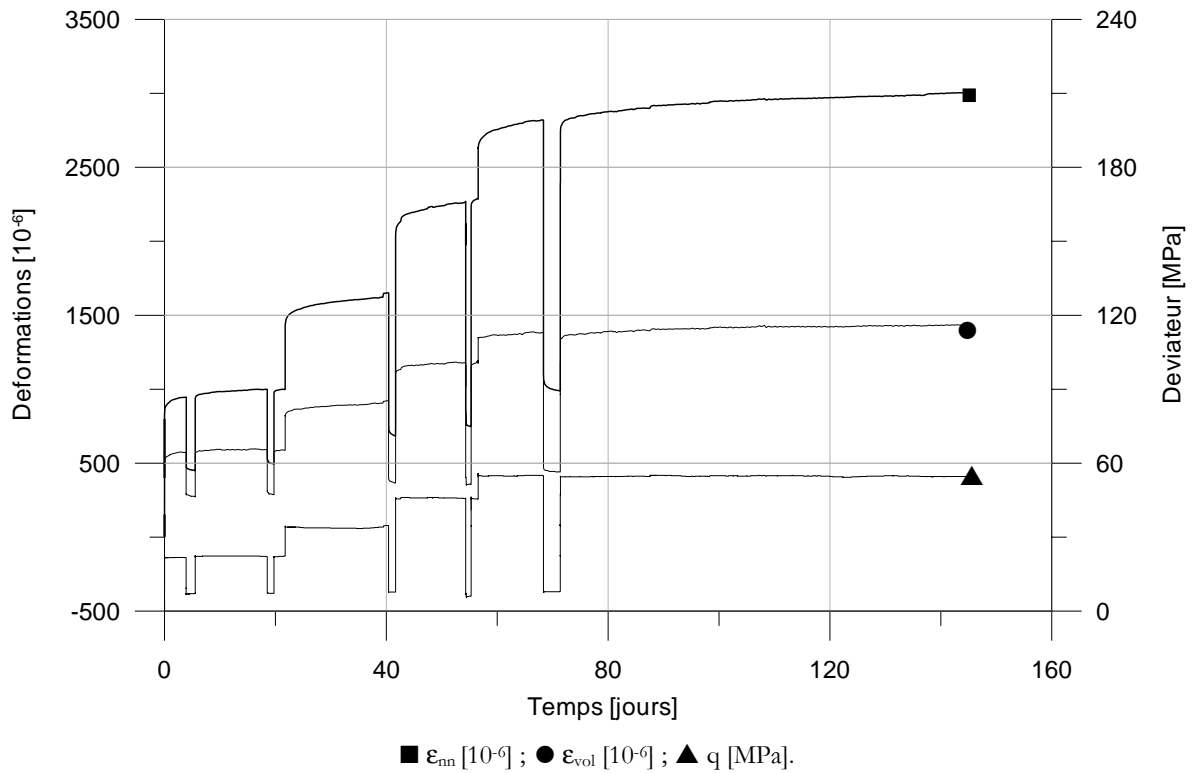


Figure 3.47 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon de marne du Mont d'Or MO 13.1.

Palier	Phase	Niveau de $\sigma$ [MPa]	Durée [jours]	Palier	Phase	Niveau de $\sigma$ [MPa]	Durée [jours]
Palier 1	Fluage	22	4	Palier 3	Fluage	46	12,5
	Recouvrance	7	1,5		Recouvrance	6	1
	Fluage	22	13		Fluage	46	1
	Recouvrance	7	1	Palier 4	Fluage	55	11,5
	Fluage	22	2		Recouvrance	7	3
Palier 2	Fluage	34	18,5		Fluage	55	74
	Recouvrance	7	1				

Tableau 3.26 : Détails de l'essai de fluage multipalier réalisé sur l'échantillon MO 13.1 de marne du Mont d'Or.



Cet amortissement de la déformation nous a contraint à augmenter à nouveau le déviateur jusqu'à 49 MPa. Mais le même phénomène s'est produit : après une augmentation linéaire de la déformation pendant 14 jours à la vitesse de  $5,7 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ , elle s'amortit pour devenir inférieure à  $10^{-11} \text{ s}^{-1}$  au 119<sup>ème</sup> jour. Au bout du 125<sup>ème</sup> jour, l'échantillon a de nouveau été déchargé puis rechargé à 51 MPa.

Sous ce déviateur, au 140<sup>ème</sup> jour de l'essai, le fluage secondaire semble s'amorcer. La vitesse de déformation axiale reste stable pendant 125 jours à  $2,3 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ . Le décrochement visible sur les courbes au 229<sup>ème</sup> jour n'est dû qu'à un réajustement de la contrainte axiale. Au 266<sup>ème</sup> jour, les déformations axiales s'amortissent à nouveau et la vitesse retombe à  $10^{-11} \text{ s}^{-1}$ .

Lors du 6<sup>ème</sup> palier, qui débute à  $t = 278$  jours, le déviateur atteint la valeur de 60 MPa. La déformation axiale varie linéairement à la vitesse de  $8 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$  à partir du 286<sup>ème</sup> jour.

Au bout de 318 jours, l'échantillon s'est rompu subitement, interrompant l'essai. Cette rupture n'a pas été précédée par l'accélération de la vitesse de déformation qui caractérise le fluage tertiaire. A la fin de l'essai, la déformation totale vaut  $\epsilon_{nn} = 3350 \text{ } \mu\text{m/m}$  ; la déformation axiale viscoplastique représente 35 % de la déformation totale ( $\epsilon_{nn}^{vp} = 1169 \text{ } \mu\text{m/m}$ ). L'échantillon s'est désagrégé au moment du démontage de la cellule d'essai et aucune photographie n'a pu être prise.

L'échantillon MO 13.1 a été soumis à 4 paliers de chargement maintenus constants à plus ou moins 0,5 MPa près pendant plusieurs semaines (Figure 3.47). Lors du dernier palier, imposé à 55 MPa (70 % de  $\sigma_c$ ), la phase de fluage secondaire n'est toujours pas amorcée ; la vitesse de déformation décroît et les déformations s'amortissent.

La première phase de fluage sous 22 MPa a duré 4 jours au bout desquels l'échantillon a été déchargé jusqu'à 7 MPa puis après une phase de recouvrance de 24 heures, rechargé au même déviateur. La courbe enveloppe ne présente pas de discontinuité et le fluage se poursuit avec la même allure (amortissement).

Lors de la seconde phase de fluage, un déviateur de 34 MPa a été imposé durant 18,5 jours. On n'observe le développement d'un fluage primaire : la déformation s'amortit lentement. Dès que la vitesse de fluage est devenue inférieure à  $\dot{\epsilon} = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ , l'échantillon a été déchargé jusqu'à 7 MPa puis rechargé jusqu'à 44 MPa. Sous ce déviateur, on observe le développement d'un fluage secondaire ce que l'étude de l'évolution des déformations viscoplastiques en fonction du temps va confirmer (Figure 3.51).

La phase de fluage sous 55 MPa a duré 75,5 jours, entrecoupé au 11<sup>ème</sup> jour par une décharge jusqu'à 7 MPa et une phase de recouvrance de 3 jours avant la recharge. Au cours de cette dernière phase de fluage, la vitesse de déformation axiale s'est amortie puis stabilisée à la valeur à peu près constante mais très faible de  $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$  (fluage secondaire).

L'essai a dû être interrompu avant l'apparition du fluage tertiaire et n'a donc pas été mené jusqu'à la rupture de l'échantillon. A la fin de l'essai, la déformation totale vaut  $\epsilon_{nn} = 3003 \text{ } \mu\text{m/m/jour}$  ; la déformation axiale viscoplastique représente 34 % de la déformation totale ( $\epsilon_{nn}^{vp} = 1021 \text{ } \mu\text{m/m}$ ).

### 3.5.2.2.1 Modules de déformation

Dans le but de quantifier l'endommagement de l'échantillon au cours de l'essai, les modules de déformations directionnels en charge et en décharge ont été calculés à chaque palier à partir des mesures de la déformation axiale.

L'essai de fluage cyclique MO 4.1 comportait 16 phases de charge et 11 décharges. On observe sur le graphe de la Figure 3.48, même si le coefficient de corrélation n'est pas très élevé, une diminution du module élastique en charge et en décharge qui traduit une détérioration des caractéristiques mécaniques de la marne du Mont d'Or.

La même analyse a été réalisée sur l'essai de fluage MO 13.1 qui comportait 8 phases de charge et 5 phases de décharge.

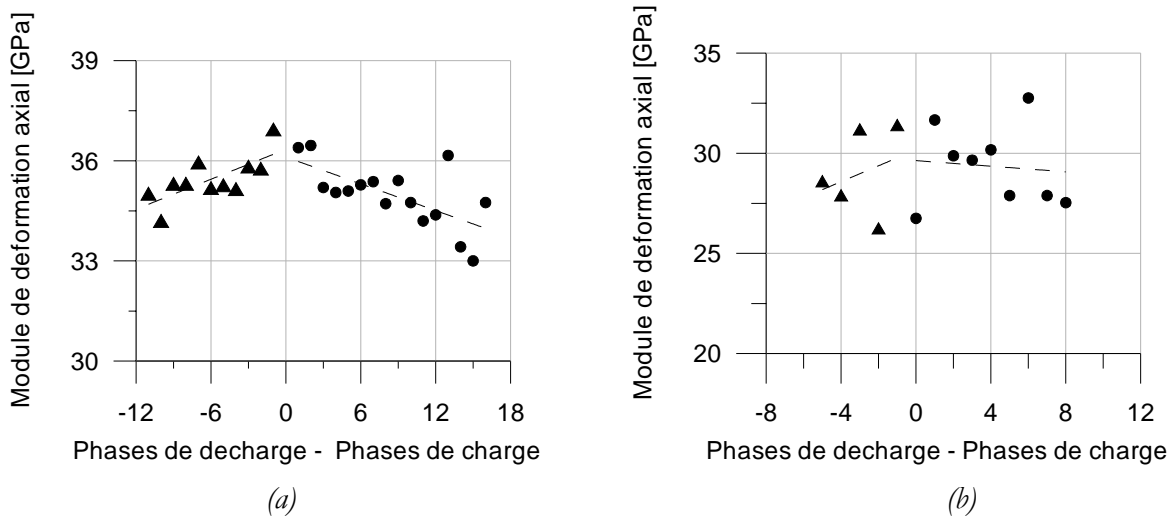


Figure 3.48 : Evolution des modules élastiques en charge et en décharge au cours des essais de fluage cyclique (a) MO 4.1 et (b) MO 13.1.

### 3.5.2.2.2 Influence des cycles

Pour évaluer la validité de l'hypothèse d'une activation du fluage par la mise en œuvre de cycles de décharge-recharge lors de l'essai MO 4.1, la vitesse de fluage moyenne sur 24 heures a été calculée après chaque cycle. Les résultats sont représentés sur le graphe de la Figure 3.49, chaque symbole correspondant à l'un des six paliers de chargement successif.

Pendant le second palier, imposé à 38 MPa, la vitesse de fluage moyenne sur 24 heures augmente après un cycle. En revanche, lors du palier suivant imposé à 44 MPa, la tendance est inversée : les cycles semblent ralentir le fluage.

Lors du dernier palier, imposé à 51 MPa (65 % de  $\sigma_c$ ), à partir du 143<sup>ème</sup> jour de l'essai, il semble que la phase de fluage secondaire soit amorcée : la vitesse de déformation se stabilise à la valeur très faible de  $3.10^{-6}$  jour<sup>-1</sup>.

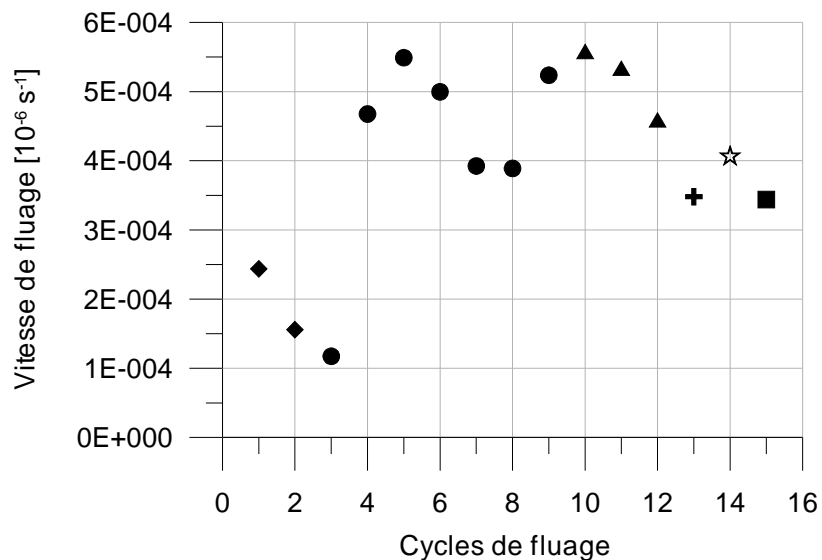
Bien que les régressions linéaires, donnent des coefficients de corrélation très mauvais, les vitesses calculées étant faibles, on devine une augmentation de la vitesse de fluage après un cycle

de charge-décharge. Ce résultat reste à confirmer.

Lors de l'essai MO 13.1, nous avons essayé de mesurer l'influence d'un cycle de charge-décharge à différents niveaux de contrainte. La première phase de fluage sous 22 MPa a duré 4 jours au bout desquels l'échantillon a été déchargé jusqu'à 7 MPa puis après une phase de recouvrance de 24 heures, rechargé au même déviateur. Ce cycle ne semble pas avoir influencé le développement des déformations axiales ou transversales. En effet, avant la décharge, elles avaient atteint respectivement,  $\epsilon_{nn} = 947 \mu\text{m}/\text{m}$  et  $\epsilon_{tt} = -187 \mu\text{m}/\text{m}$ ; après recharge à 22 MPa, on mesure  $\epsilon_{nn} = 925 \mu\text{m}/\text{m}$  et  $\epsilon_{tt} = -184 \mu\text{m}/\text{m}$ . La courbe enveloppe ne présente pas de discontinuité et le fluage se poursuit à la même vitesse.

Au 18<sup>ème</sup> jour, un nouveau cycle de décharge-recharge a été mis en œuvre. Il n'a pas eu plus d'influence que le premier. Avant la décharge, on mesure  $\epsilon_{nn} = 999 \mu\text{m}/\text{m}$  et  $\epsilon_{tt} = -204 \mu\text{m}/\text{m}$ ; après la recharge,  $\epsilon_{nn} = 970 \mu\text{m}/\text{m}$  et  $\epsilon_{tt} = -200 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Les différences observées correspondent à la déformation mesurée pendant la phase de recouvrance comme on peut le voir dans le Tableau 3.28 à la précision des mesures de déformation près.



◆ q = 30 MPa ; ● q = 38 MPa ; ▲ q = 44 MPa ; + q = 48,5 MPa ; ☆ q = 51 MPa ; ■ q = 60 MPa.

Figure 3.49 : Vitesses de fluage calculées sur 24 heures après un cycle de décharge-recharge lors de l'essai de fluage multipalier MO 4.1.

### 3.5.2.2.3 Phases de recouvrance

Lors de l'essai MO 4.1, chaque décharge a été effectuée jusqu'à un même déviateur minimal :  $q = 20,5 \text{ MPa}$ . Ces paliers ont été maintenus au minimum 24 heures. Les variations de déformation axiale et transversale ont été mesurées durant ces phases de recouvrance et sont répertoriées dans le Tableau 3.27. Pour que la comparaison soit possible, nous avons gardé la même durée de référence c'est-à-dire, 24 h, même lorsque le palier était plus long. Nous avons ajouté entre parenthèses la déformation de fluage qui a suivi le palier de recouvrance sur la même durée.

Sous un déviateur de 20,5 MPa, une partie de ces déformations est toujours d'origine élastique, on ne peut donc parler de déformations irréversibles que sur l'augmentation relative de la déformation d'un cycle à l'autre. Les valeurs mesurées sur la déformation transversale sont peu significatives car très faibles et à la limite de la précision des capteurs. Cependant, on observe une légère augmentation de l'amplitude des déformations axiales *différées* en fonction du déviateur. Pour un même niveau de déviateur, l'augmentation de la déformation d'un cycle à l'autre est en partie causée par la diminution du module de déformation due à l'endommagement du matériau.

La même analyse a été réalisée sur les résultats de l'essai de fluage multipalier MO 13.1. Le Tableau 3.28 répertorie les variations de déformation, transversale et axiale, mesurées à la décharge après une recouvrance de 24 heures. Entre parenthèse, pour comparaison, sont indiquées les variations lors de la phase de fluage suivante, au même déviateur et sur la même durée. Les conclusions sont identiques : l'amplitude des phases de recouvrance et de fluage augmente avec le déviateur.

A partir de ces mesures, on constate que sur 24 heures, les phases de fluage et de recouvrance ont très souvent la même amplitude. Une partie de la déformation réversible semble donc être différée, on parle alors de *viscoélasticité*.

#### 3.5.2.2.4 Déformations axiales viscoplastiques

Sur la Figure 3.50 et la Figure 3.51, nous présentons une superposition des courbes donnant la déformation axiale viscoplastique en fonction du temps obtenue pour chaque palier de fluage lors de l'essai MO 4.1 et de l'essai MO 13.1. Cette représentation facilite la comparaison des courbures des graphes à chaque niveau de déviateur et permet ainsi l'identification d'une éventuelle phase de fluage secondaire.

La courbure de la première partie de ces graphes semble bien caractéristique du fluage primaire de la roche : quel que soit le déviateur, les courbes se superposent parfaitement.

Cette représentation des courbes de fluage permet de situer l'apparition du fluage secondaire dès le troisième palier ( $q = 38$  MPa) pour l'essai MO 4.1, et lors du dernier palier de fluage ( $q = 55$  MPa) pour l'essai MO 13.1.

Cependant, lors du premier palier de fluage, au cours de l'essai MO 13.1, sous  $q = 22$  MPa, nous avons remarqué, après la recharge (palier 2<sup>bis</sup> sur la Figure 3.51), un développement linéaire des déformations axiales viscoplastique. La pente de cette courbe est sensiblement parallèle à la pente du fluage secondaire mesurée au dernier palier. Il n'y a pas eu lors de cette recharge de phase de fluage primaire. La phase de décharge-recharge n'a eu aucune influence sur la courbe de fluage comme on a pu le voir dans le paragraphe 2.5.2.2.3.

Cet effet ne semble exister que sur une durée très courte. Lors de l'essai MO 13.1, nous avons pu observer qu'un cycle de décharge-recharge n'influence pas le comportement de la roche lorsque la recharge de l'échantillon survient après une période de recouvrance inférieure ou égale 24h. Les niveaux de déformations axiales et transversales atteints avant la décharge et après la recharge sont quasiment identiques et le fluage reprend à la même vitesse (paliers 2 et 2<sup>bis</sup> sur la Figure 3.51). En revanche, après une période de recouvrance plus longue (3 jours) comme celle imposée lors du dernier palier de déviateur, sous  $q = 55$  MPa, à l'échantillon MO 13.1, on retrouve la courbure du fluage primaire après la recharge (paliers 4 et 4<sup>bis</sup> sur la Figure 3.51).

Cycle	Palier [MPa]	Déformation axiale [ $\mu\text{m}$ ]	Déformation transversale [ $\mu\text{m}$ ]
1	30	20 (21)	-4 (-2)
2		12 (13)	-3 (-1)
3	38	40 (39)	-7 (-10)
4		31 (40)	-7 (-7)
5		34 (48)	-5 (-9)
6		35 (43)	-6 (-6)
7		47 (33)	-6 (-6)
8	44	36 (33)	-6 (-17)
9		32 (47)	-14 (-9)
10		59 (40)	-10 (-7)
11	48,5	78 (34)	-15 (-12)

Tableau 3.27 : Mesures des déformations axiales et transversales durant les phases de recouvrance lors de l'essai de fluage multipalier MO 4.1.  
(Entre parenthèses, la déformation de fluage mesurée sur 24h après le palier de recouvrance)

Cycle	Palier [MPa]	Déformation axiale [ $\mu\text{m}$ ]	Déformation transversale [ $\mu\text{m}$ ]
1	22	27 (40)	- 5 (- 7)
2		46 (25)	- 5 (- 5)
3	34	92 (79)	- 21 (18)
4	46	92 (89)	- 28 (- 23)
5	55	158 (164)	- 52 (- 53)

Tableau 3.28 : Mesures des déformations axiales et transversales durant les phases de recouvrance lors de l'essai de fluage multipalier MO 13.1.  
(Entre parenthèses, la déformation de fluage mesurée sur 24h après le palier de recouvrance)

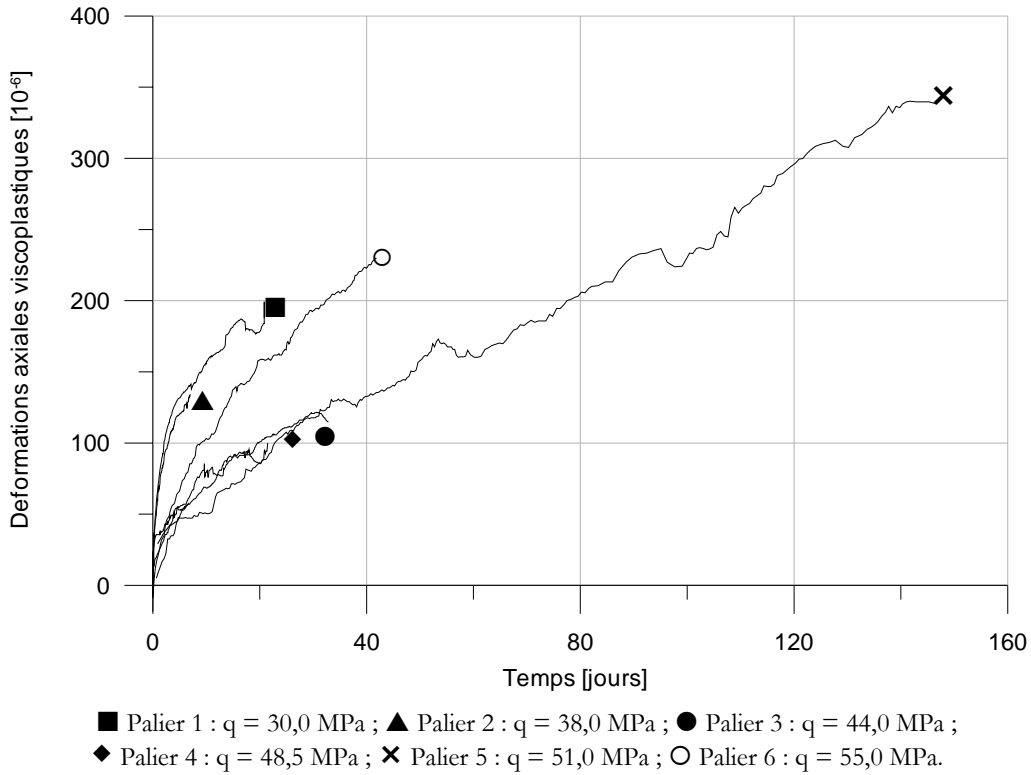


Figure 3.50 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : Déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon MO 4.1 en fonction du temps.

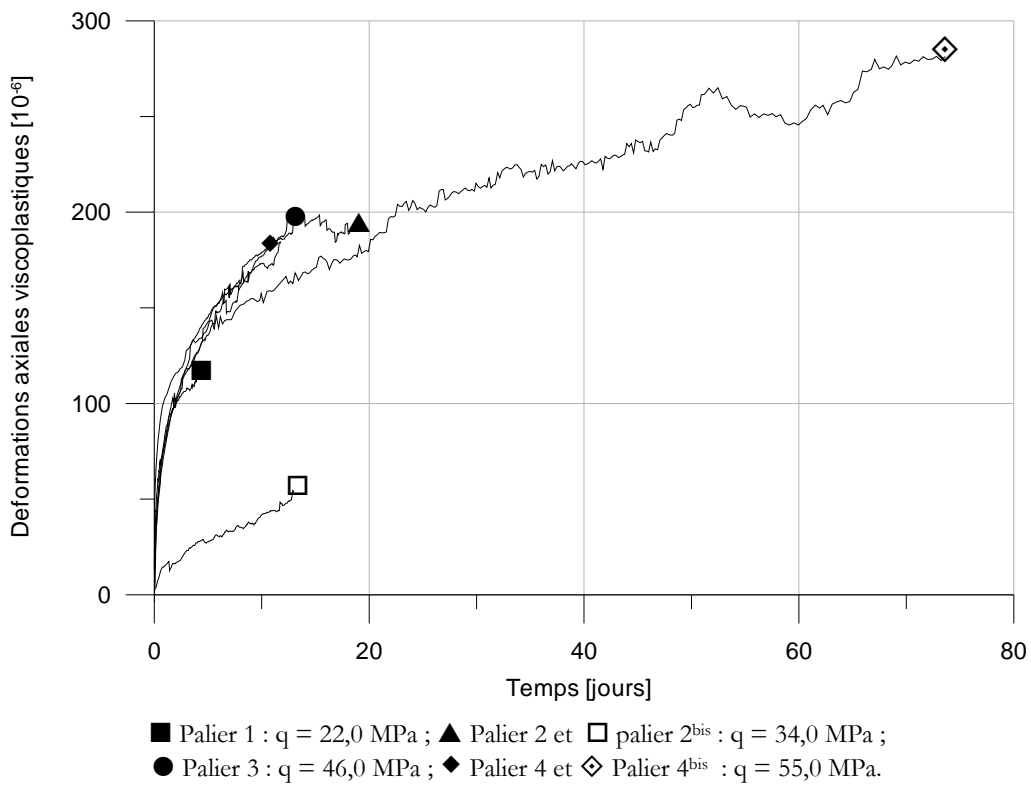


Figure 3.51 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : Déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon MO 13.1 en fonction du temps.

### 3.5.2.3 Fluage de l'argilite de Tournemire

Huit d'essais de fluage uniaxial ont été réalisés sur des échantillons d'argilite de Tournemire. Ils ont généralement été lancés sous un fort déviateur (proche de la résistance à la rupture), afin d'atteindre et d'observer le fluage tertiaire dans un temps d'essai raisonnable. Lorsque nous observions une stabilisation de la déformation axiale (fluage primaire), le déviateur,  $q$ , était légèrement augmenté ( $\Delta q \approx 2$  MPa). La vitesse limite de fluage, en dessous de laquelle nous considérons les déformations axiales stabilisées, a été définie arbitrairement à :  $\dot{\epsilon} = 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ , en fonction de la dérive électrique du système de mesures (cf. § 3.5.2).

A ces niveaux de contrainte, proches de la résistance à la rupture de la roche, il est arrivé que l'échantillon se rompe subitement, lors d'une recharge, interrompant l'essai sans permettre d'explorer en détail la phase de fluage tertiaire.

Rappelons que les essais de chargement quasi statique non pas permis de déterminer très précisément la valeur de la contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cb}$ , valeur minimale du déviateur permettant d'atteindre, en théorie, le fluage tertiaire. D'après ces essais, cette contrainte se situe dans l'intervalle [16 MPa ; 32 MPa].

Le Tableau 3.29 détaille les caractéristiques des huit essais de fluage réalisés sur l'argilite de Tournemire ainsi que les principales observations faites.

Échantillon	Caractéristiques du chargement	Type de fluage observé	Remarques
AT M4 630.1	37 jours 4 paliers : $q = 28,6$ à $36,8$ MPa	Fluages primaire et secondaire	Rupture à la recharge
AT M4 630.2	137 jours 5 paliers : $q = 26,7$ à $35,9$ MPa	Fluage primaire et secondaire	Déformations à volume constant
AT M4 890.2	7 jours $q = 24,7$ MPa	Fluage primaire	
AT M4 970.1	35 jours 2 paliers : $q = 30,0$ et $32,6$ MPa	Fluage primaire et secondaire	Rupture à la recharge
AT M5 1500.1	36 jours 4 paliers : $q = 25,6$ à $35,2$ MPa	Fluages primaire et secondaire	Rupture brutale sans fluage tertiaire
AT M5 3140.2	132 jours 6 paliers : $q = 24,5$ à $35,3$ MPa	Fluages primaire, secondaire et tertiaire	Forte dilatance
AT M5 3395.2	95 jours 4 paliers : $q = 8,9$ à $20,5$ MPa	Fluages primaire et secondaire	Panne du système d'acquisition
AT M5 400.1	206 jours 4 paliers : $q = 30,1$ à $37,5$ MPa	Fluage primaire, secondaire et tertiaire	Rupture progressive en fluage tertiaire

Tableau 3.29 : Programme d'essais réalisés sur les échantillons d'argilite de Tournemire.

L'essai AT M4 630.1 a duré 36 jours (Figure 3.52). La rupture de l'échantillon s'est produite à la recharge, au 5<sup>ème</sup> palier (36,8 à 39,6 MPa). Dans cet essai, on observe une très faible contractance du matériau et l'apparition d'un fluage secondaire dès le 3<sup>ème</sup> palier, sous un déviateur  $q = 33,5$  MPa.

Lors de l'essai M4 630.2 (Figure 3.53), les déformations viscoplastiques se sont développées à volume constant, quasiment nul. Après une faible contractance au cours du premier palier de chargement ( $q = 26,7$  MPa), l'échantillon a commencé à se dilater légèrement. On observe une nouvelle contractance au cours du quatrième palier sous  $q = 34,8$  MPa. La courbe des déformations volumiques en fonction du temps a une allure atypique. La rupture est survenue brutalement lors d'une recharge au dernier palier.

L'essai de fluage AT M4 890.2 (Figure 3.54) ne comporte qu'un seul palier de chargement ( $q = 24,7$  MPa), la rupture de l'échantillon s'étant produite brutalement lorsque le déviateur a été augmenté à 27,5 MPa. Dans cet essai, on observe une faible contractance du matériau.

Le même phénomène s'est produit lors de l'essai AT M4 970.1 (Figure 3.55). Lors du 2<sup>ème</sup> palier, une augmentation de la charge de 32,6 à 35,3 MPa a provoqué la rupture de l'échantillon. Cependant, on remarque cette fois, le comportement dilatant de l'échantillon, dès le premier palier de chargement ( $q = 30$  MPa).

Lors de l'essai AT M5 1500.1 (Figure 3.56), les déformations viscoplastiques se développent à volume quasi constant. L'échantillon a un comportement très légèrement contractant. La phase de fluage secondaire semble s'initier au cours du 3<sup>ème</sup> palier, sous un déviateur de 31,6 MPa. Elle est clairement identifiable sous le dernier palier de chargement,  $q = 35,2$  MPa, au-delà d'une déformation axiale de 2800  $\mu\text{m}/\text{m}$ . La rupture est survenue de manière brutale sans fluage tertiaire. Les points n'apparaissent pas sur la courbe.

Lors de l'essai AT M5 3140.2 (Figure 3.57), qui comporte 6 paliers, l'échantillon d'argilite de Tournemire a eu un comportement très contractant jusqu'au dernier palier de chargement sous  $q = 35,3$  MPa et lors duquel on atteint le fluage tertiaire. Sous ce déviateur, on observe une accélération des déformations axiales, discontinue, certainement due à plusieurs petites ruptures. A la fin de l'essai, l'échantillon entre en dilatance avant de se rompre.

Le fluage secondaire semble s'initier lors du deuxième palier, sous  $q = 26,4$  MPa. Les déformations axiales viscoplastiques se développent ensuite à vitesse constante malgré les augmentations successives du déviateur jusqu'au dernier palier.

L'essai AT M5 3395.2 comporte 4 paliers (Figure 3.58). Lors des deux premiers, nous n'avons pas laissé les déformations s'amortir mais à ces faibles niveaux de contrainte, il est très vraisemblable que le fluage tertiaire n'aurait jamais été atteint. Le fluage secondaire débute lors du 3<sup>ème</sup> palier, sous un déviateur  $q = 17,5$  MPa. L'échantillon a gardé un comportement contractant tout au long de l'essai.

Malheureusement, pour des problèmes techniques concernant la chaîne d'acquisition, cet essai relativement long a dû être interrompu au 95<sup>ème</sup> jour et l'échantillon n'a pas été mené jusqu'à la rupture.

L'essai AT M5 400.1 comporte 4 paliers (Figure 3.59). Le fluage primaire a été observé lors du premier palier sous  $q = 30,1$  MPa. Lors du deuxième puis du troisième palier, sous  $q = 35,9$  MPa, le fluage secondaire s'est initié. Les déformations viscoplastiques se sont alors développées à la vitesse constante de respectivement  $33.10^{-6}$  puis  $35.10^{-6}$  jour<sup>-1</sup>, pendant plusieurs mois. Au bout du 170<sup>ème</sup> jour, pour diminuer la durée de l'essai, le déviateur a été augmenté à 37,5 MPa, ce qui a accéléré la vitesse de déformation et initié la phase de fluage tertiaire qui a duré 36 jours. Dès le début de l'essai, l'échantillon est entré en dilatance.



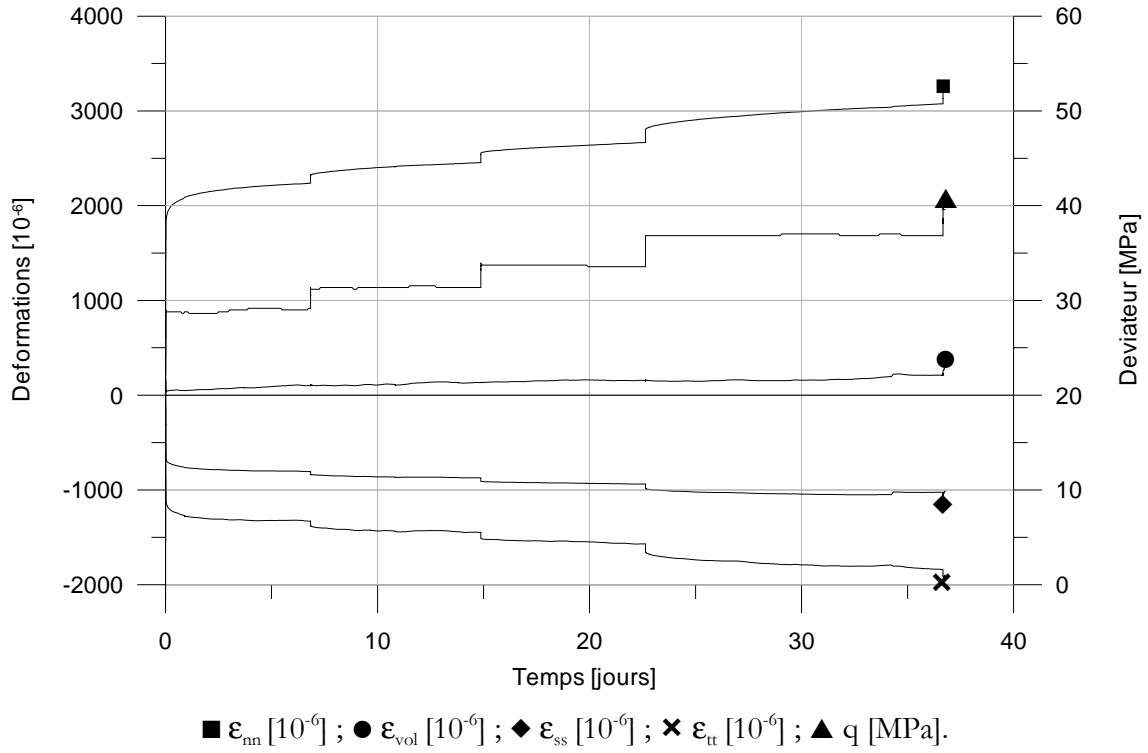


Figure 3.52 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M4 630.1.

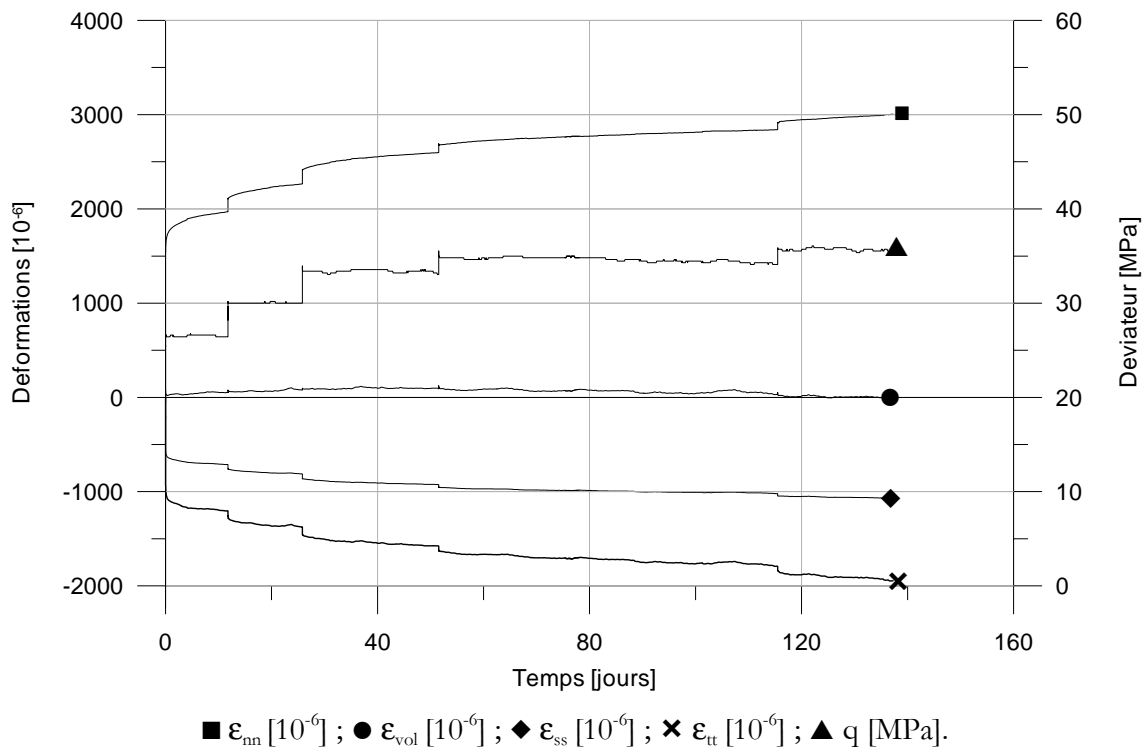


Figure 3.53 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M4 630.2.

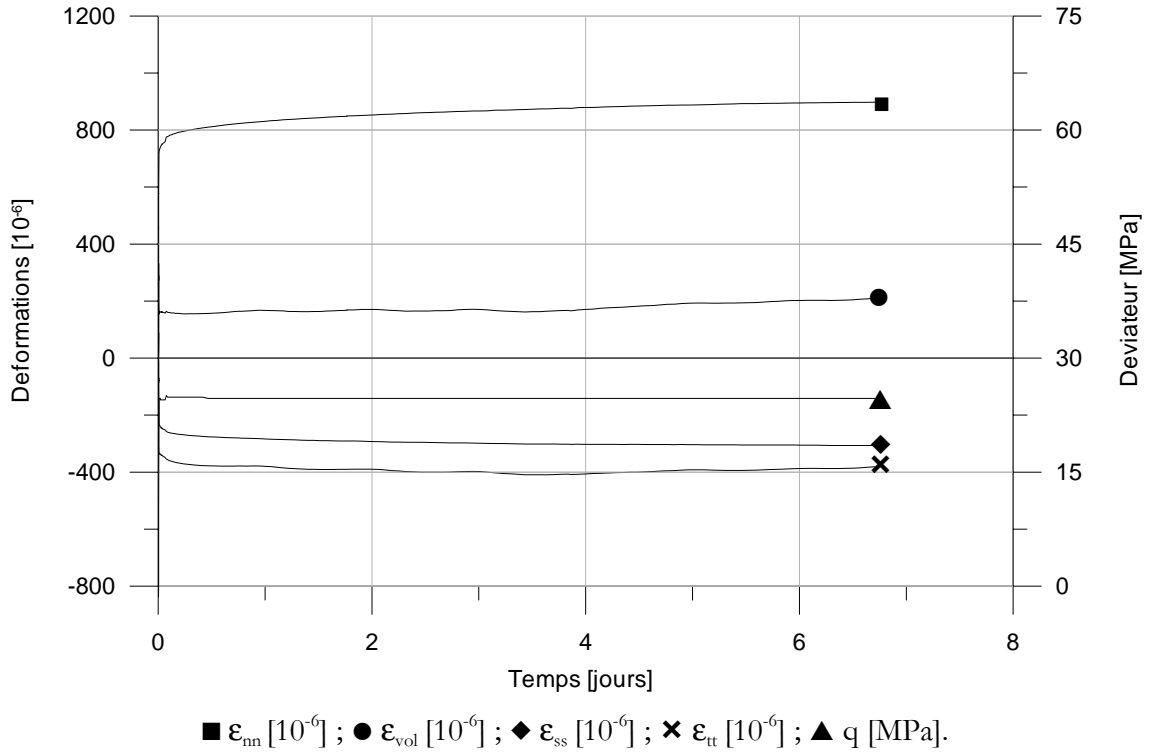


Figure 3.54 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M4 890.2.

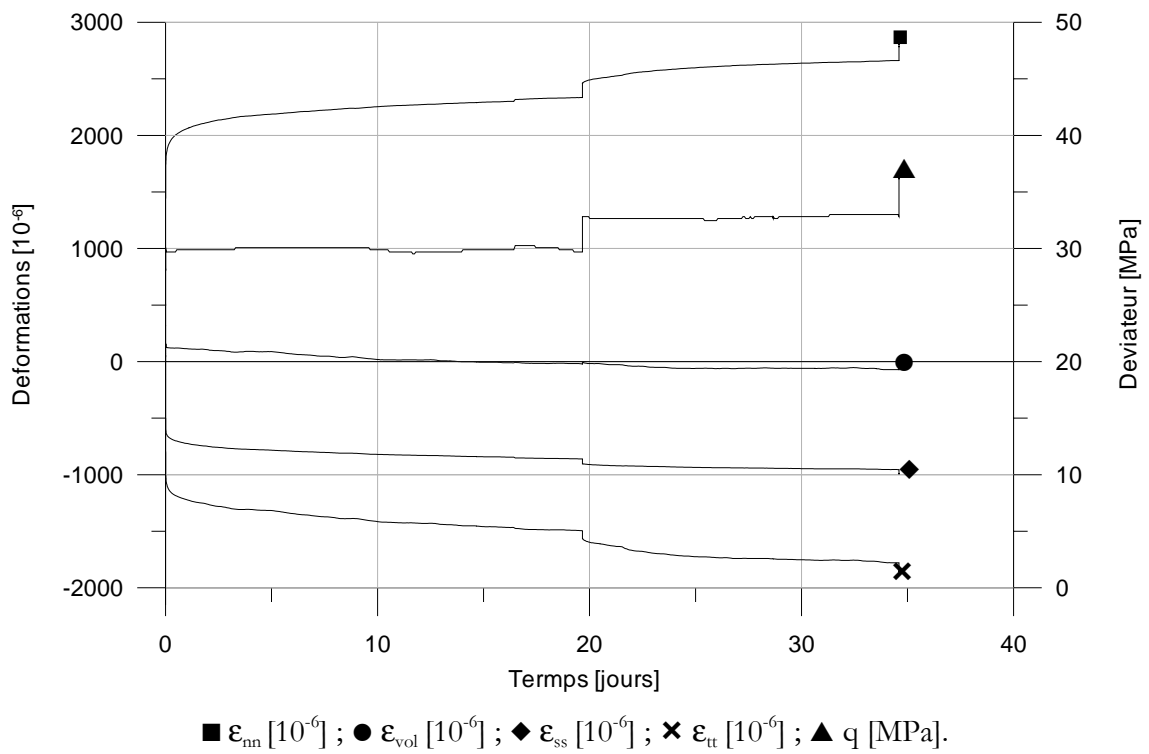


Figure 3.55 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M4 970.1.

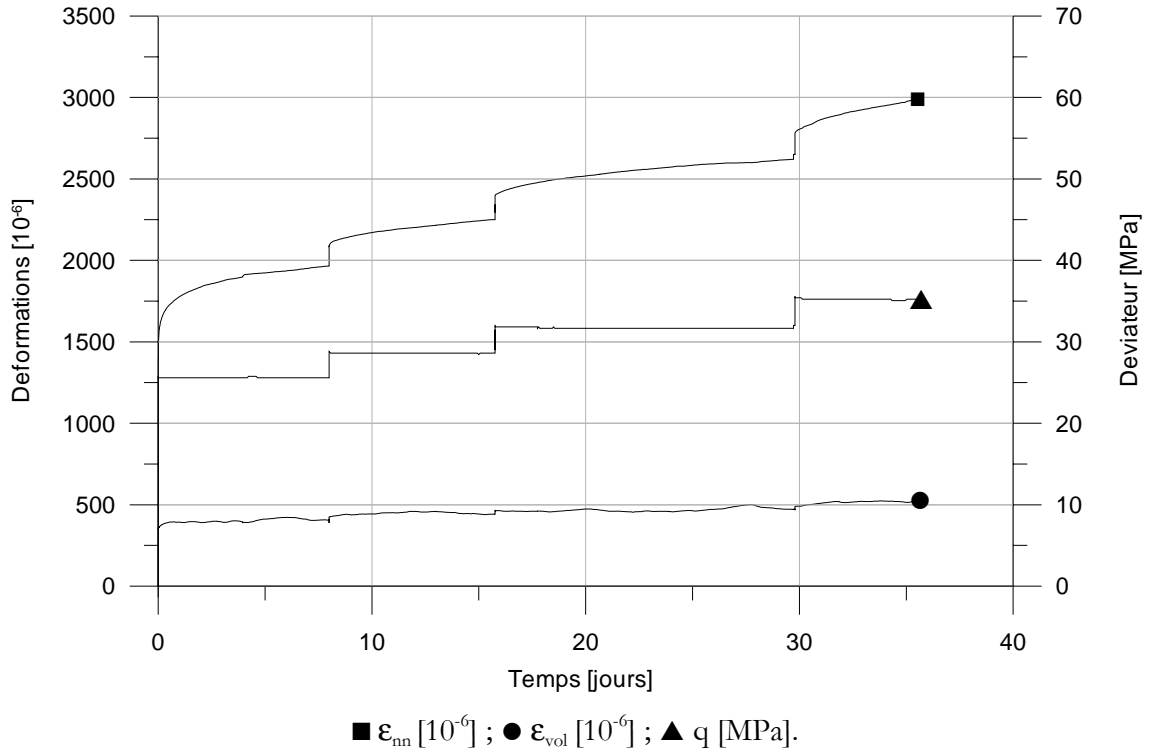


Figure 3.56 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M5 1500.1.

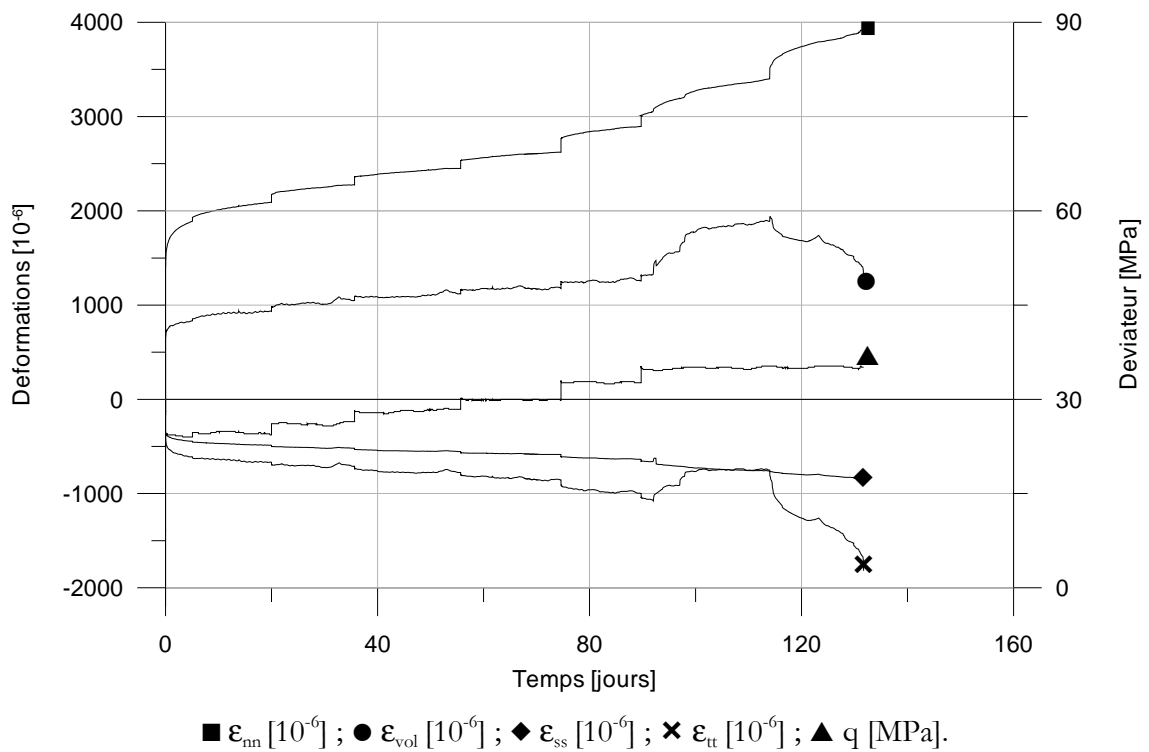


Figure 3.57 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M5 3140.2.

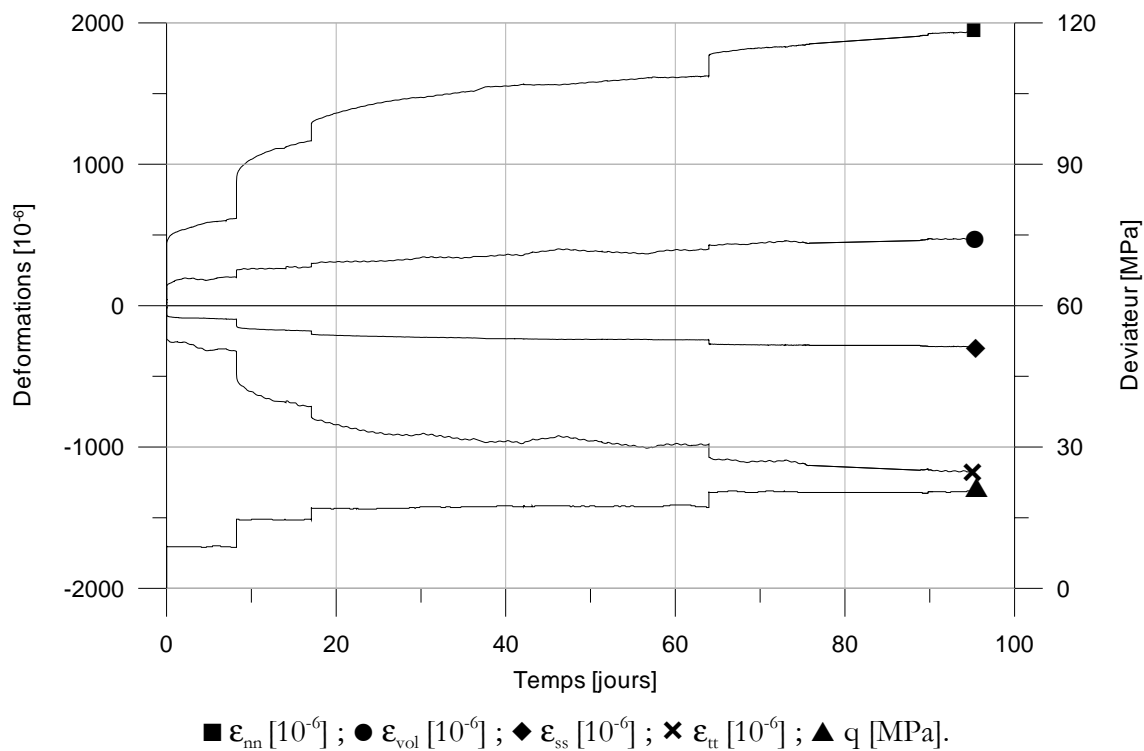


Figure 3.58 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M5 3395.2.

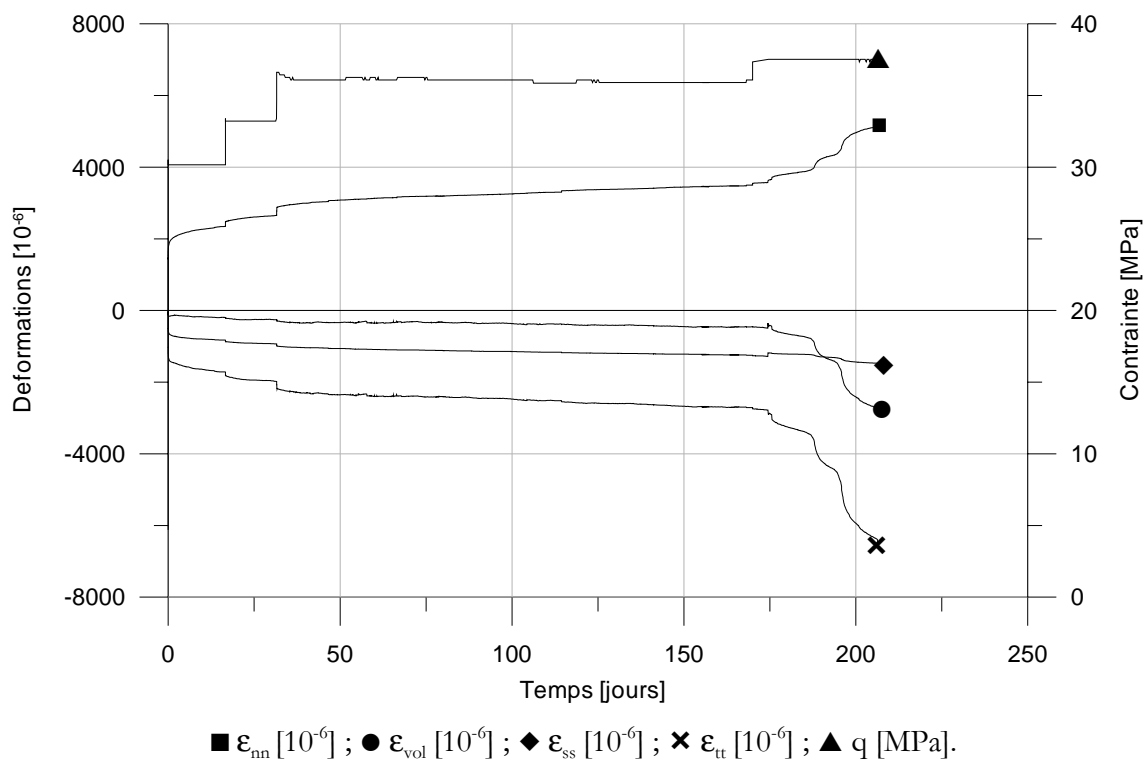


Figure 3.59 : Déformations en fonction du temps :  
Essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de Tournemire AT M5 400.1.

### 3.5.2.3.2 Déformations viscoplastiques

Sur les figures des pages suivantes (Figure 3.60 à Figure 3.66), nous présentons une superposition des courbes donnant les déformations axiales viscoplastiques en fonction du temps, obtenues pour chaque palier de fluage, lors des essais réalisés sur l'argilite de Tournemire. Pour tracer ces courbes, nous avons enlevé, à chaque palier, la déformation axiale instantanée due à l'augmentation du déviateur ainsi que la déformation totale atteinte au cours des paliers précédents. L'origine temporelle a également été décalée.

L'essai de fluage AT M4 630.1 a duré 36 jours et comporte 4 paliers de chargement (Figure 3.60). A la fin de cet essai, la déformation axiale totale a atteint la valeur de  $\epsilon_{nn} = 3103 \mu\text{m}/\text{m}$  et la déformation viscoplastique totale vaut  $\epsilon_{nn}^{vp} = 619 \mu\text{m}/\text{m}$ , ce qui représente à peine 20 % de la déformation totale.

Contrairement à ce que nous avons observé sur la marne du Mont d'Or, les courbes ne se superposent pas (Figure 3.60). Le fluage secondaire apparaît dès le deuxième palier sous un déviateur  $q = 31,4 \text{ MPa}$ . Les déformations axiales viscoplastiques se développent alors à la vitesse de  $9.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ . Cette vitesse augmente légèrement après augmentation du déviateur  $q = 33,5 \text{ MPa}$  ( $\dot{\epsilon} = 11.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ ) puis sous  $36,8 \text{ MPa}$  ( $\dot{\epsilon} = 19.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ ). Dès que le fluage secondaire est initié, au-dessus de  $q = 31,4 \text{ MPa}$ , une augmentation du déviateur semble donc augmenter la vitesse de déformation.

A la fin de l'essai AT M4 630.2 qui a duré 137 jours, le déviateur vaut  $q = 35,9 \text{ MPa}$  et la déformation axiale  $\epsilon_{nn} = 3005 \mu\text{m}/\text{m}$ . La déformation axiale viscoplastique qui atteint la valeur de  $\epsilon_{nn}^{vp} = 914 \mu\text{m}/\text{m}$  ne représente que 30 % de la déformation axiale totale.

Dans cet essai, le fluage secondaire semble s'initier au troisième palier sous  $q = 33,4 \text{ MPa}$  puis se développe clairement sous  $q = 34,8 \text{ MPa}$ , au palier suivant, à la vitesse de  $4.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ .

Sur le graphe de la Figure 3.61, on observe une diminution progressive des courbures puis des pentes avec l'augmentation du déviateur. Les paliers 2 et 3 marquent la transition entre le fluage primaire et le fluage secondaire. Dès que le développement des déformations axiales devient linéaire, la phase de fluage primaire disparaît même lorsque le déviateur est augmenté.

L'essai AT M4 970.1 (Figure 3.62) ne comporte que deux paliers de chargement. Sous  $q = 30 \text{ MPa}$ , une courte phase de fluage primaire qui n'a duré que 4 jours est observable. Au-delà de  $\epsilon_{nn}^{vp} = 350 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\epsilon_{nn} = 2190 \mu\text{m}/\text{m}$ ), la déformation axiale viscoplastique devient linéaire et se développe à la vitesse de  $\dot{\epsilon} = 10.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ . Puis, lorsque le déviateur de contrainte est augmenté à  $q = 32,6 \text{ MPa}$ , la courbure de la phase de fluage primaire s'aplatit et la vitesse de fluage secondaire diminue :  $\dot{\epsilon} = 6.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$ .

A la fin de l'essai, la déformation viscoplastique,  $\epsilon_{nn}^{vp} = 786 \mu\text{m}/\text{m}$ , représentent 30 % de la déformation axiale totale,  $\epsilon_{nn} = 2697 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Lors de l'essai AT M5 1500.1 (Figure 3.63), on observe le phénomène inverse : la vitesse de fluage secondaire augmente avec le déviateur. En effet, dès que le fluage secondaire débute, sous  $q = 25,6 \text{ MPa}$  lors du 1<sup>er</sup> palier, après 5 jours de fluage primaire et au delà de  $\epsilon_{nn}^{vp} = 492 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\epsilon_{nn} = 1911 \mu\text{m}/\text{m}$ ), la pente des courbes augmente avec la charge appliquée, de  $12$  à  $14.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$  entre les paliers 2 et 3, puis à  $25.10^{-6} \text{ jour}^{-1}$  sous  $q = 35,2 \text{ MPa}$ .

Le fluage tertiaire a pu être observé dans l'essai AT M5 3140.2, sous  $q = 34,9 \text{ MPa}$  (Figure 3.64). La rupture s'est cependant développée de manière atypique avec une succession d'accélération de la déformation sans augmentation du déviateur, correspondant probablement à des petites ruptures au sein de l'échantillon.

Lors du premier palier, sous  $q = 24,5$  MPa, seul le fluage primaire se développe. Mais dès l'augmentation du déviateur à  $q = 26,1$  MPa, la courbe d'évolution des déformations axiales viscoplastiques en fonction du temps devient linéaire. Lors des paliers suivants, la pente reste sensiblement la même, la vitesse de déformation se stabilise autour de  $\dot{\epsilon} = 10 \cdot 10^{-6}$  jour<sup>-1</sup>, sans influence nette du niveau de déviateur de contrainte imposé.

A la fin de l'essai, les déformations axiales viscoplastiques,  $\epsilon_{nn}^{vp} = 1902$   $\mu\text{m}/\text{m}$ , représentent 49 % de la déformation axiale totale,  $\epsilon_{nn} = 3917$   $\mu\text{m}/\text{m}$ .

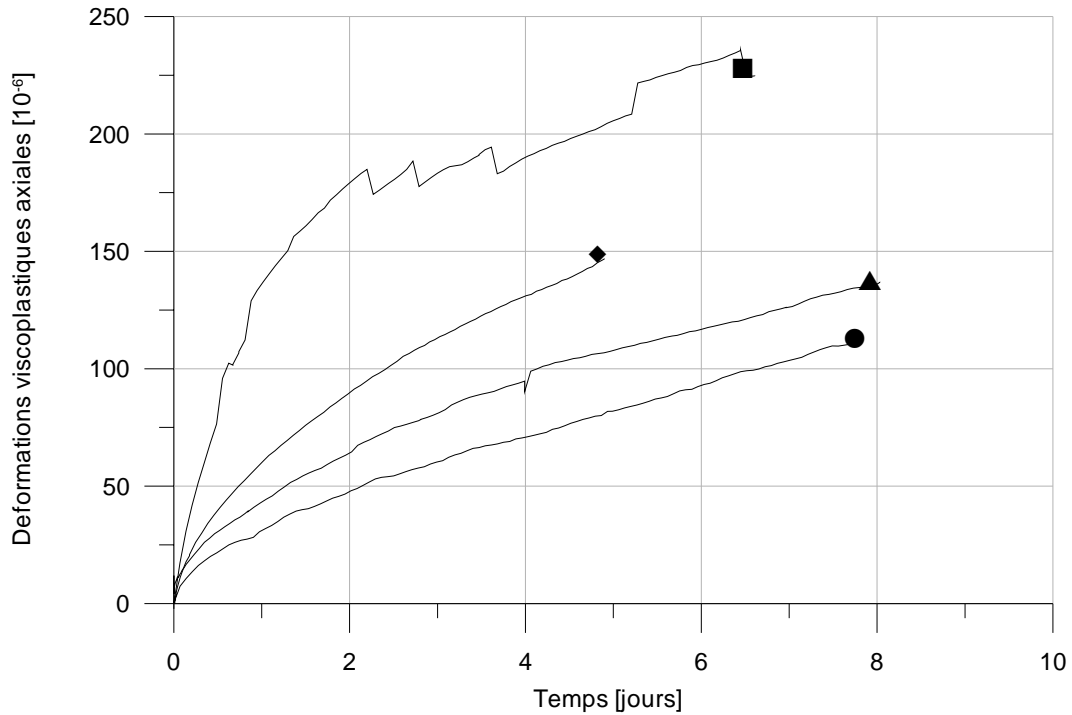
L'essai AT M5 3395.2 a débuté sous faible déviateur :  $q = 8,9$  MPa puis  $q = 14,5$  MPa et seul le fluage primaire a pu être observé à ces niveaux de contrainte (Figure 3.65).

Le fluage secondaire semble débiter sous  $q = 17,5$  MPa, au 3<sup>ème</sup> palier de chargement et au-delà de  $\epsilon_{nn} = 1516$   $\mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$ . La vitesse de fluage secondaire est faible,  $\dot{\epsilon} = 4$   $\mu\text{m}/\text{m}/\text{jour}$  et m'augmente que très légèrement lors de la recharge de l'échantillon à  $q = 20,5$  MPa. A la fin de l'essai, les déformations axiales viscoplastiques,  $\epsilon_{nn}^{vp} = 945$   $\mu\text{m}/\text{m}$ , représentent 49 % de la déformation axiale totale,  $\epsilon_{nn} = 1937$   $\mu\text{m}/\text{m}$ .

L'essai AT M5 400.1 comporte 4 paliers de fluage (Figure 3.66). La phase de fluage tertiaire a pu être observée lors de cet essai sous un déviateur  $q = 37,5$  MPa.

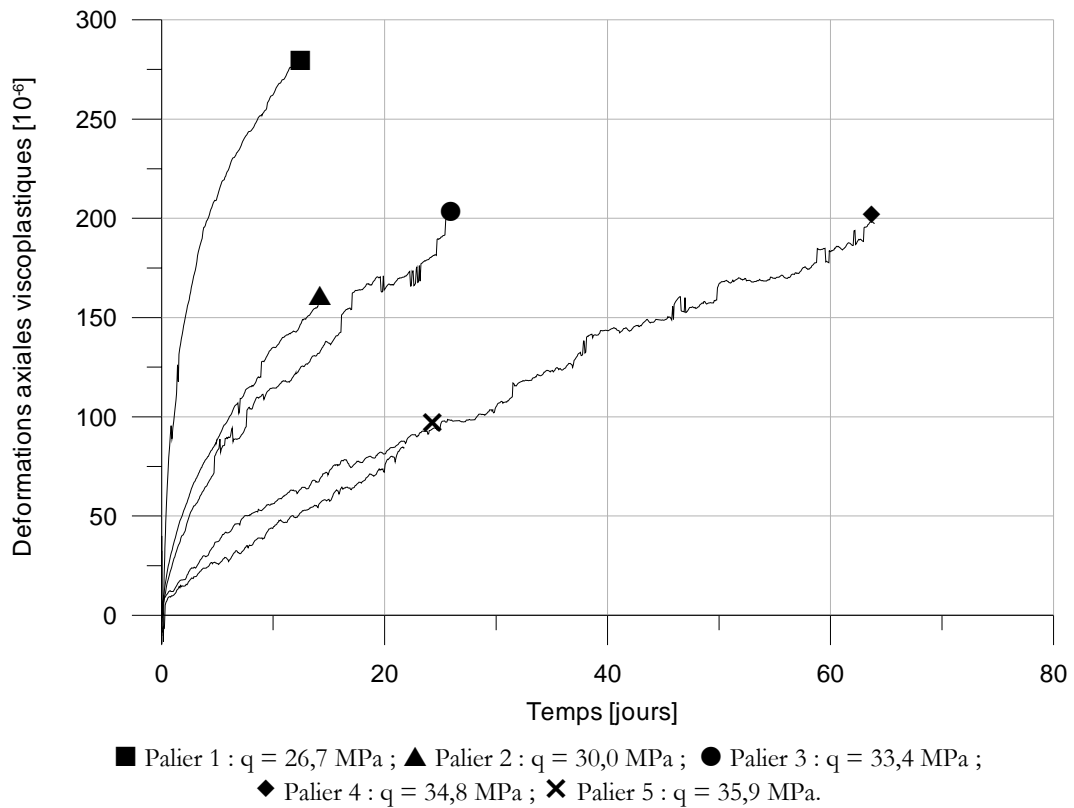
Le fluage secondaire se développe dès le deuxième palier sous  $q = 33,2$  MPa. Après l'augmentation du déviateur à  $q = 35,9$  MPa, les courbes de la déformation axiales viscoplastiques en fonction du temps correspondant à ce deuxième palier et au troisième palier se superposent parfaitement et les vitesses de fluage secondaires sont comparables (33 et 35 jour<sup>-1</sup> respectivement).

L'augmentation du déviateur de contrainte à 37,5 MPa accélère le développement des déformations axiales viscoplastiques et le fluage tertiaire est rapidement atteint. La rupture de l'échantillon survient 38 jours après la recharge. A la fin de l'essai, les déformations axiales viscoplastiques,  $\epsilon_{nn}^{vp} = 3001$   $\mu\text{m}/\text{m}$  représentent 58 % de la déformation axiale totale,  $\epsilon_{nn} = 5166$   $\mu\text{m}/\text{m}$ .



■ Palier 1 :  $q = 28,6$  MPa ; ▲ Palier 2 :  $q = 31,4$  MPa ; ● Palier 3 :  $q = 33,5$  MPa ; ◆ Palier 4 :  $q = 36,8$  MPa.

Figure 3.60 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M4 630.1



■ Palier 1 :  $q = 26,7$  MPa ; ▲ Palier 2 :  $q = 30,0$  MPa ; ● Palier 3 :  $q = 33,4$  MPa ;  
◆ Palier 4 :  $q = 34,8$  MPa ; ✕ Palier 5 :  $q = 35,9$  MPa.

Figure 3.61 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M4 630.2.

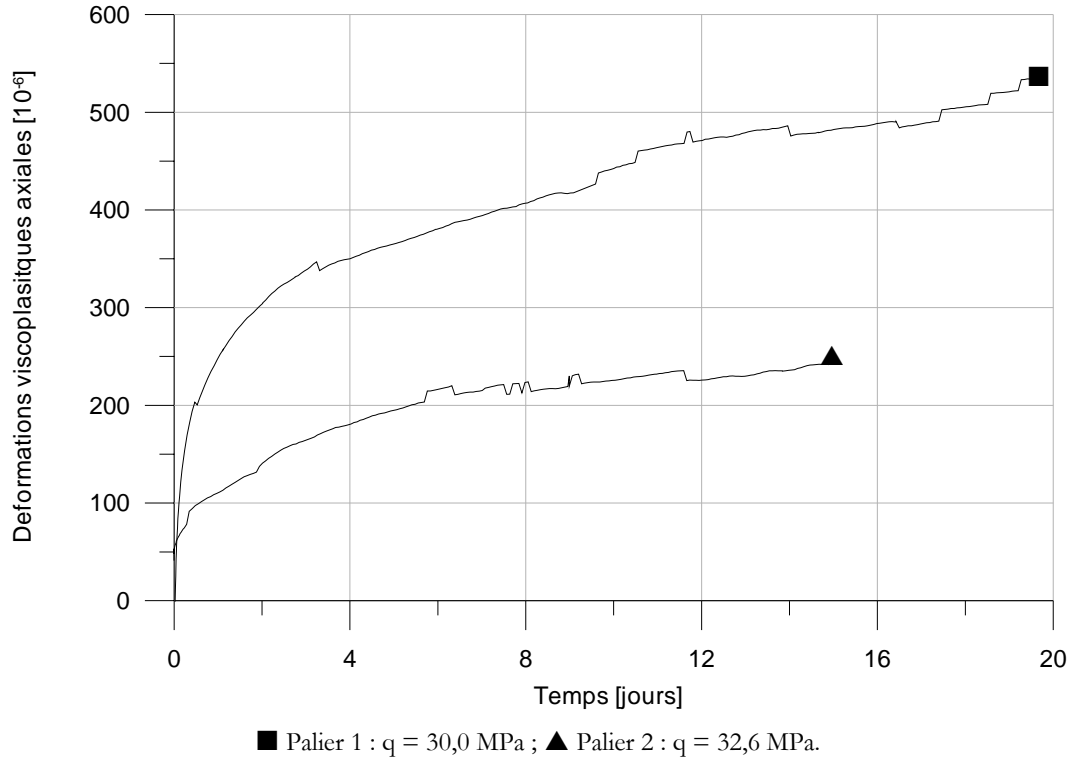


Figure 3.62 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M4 970.1.

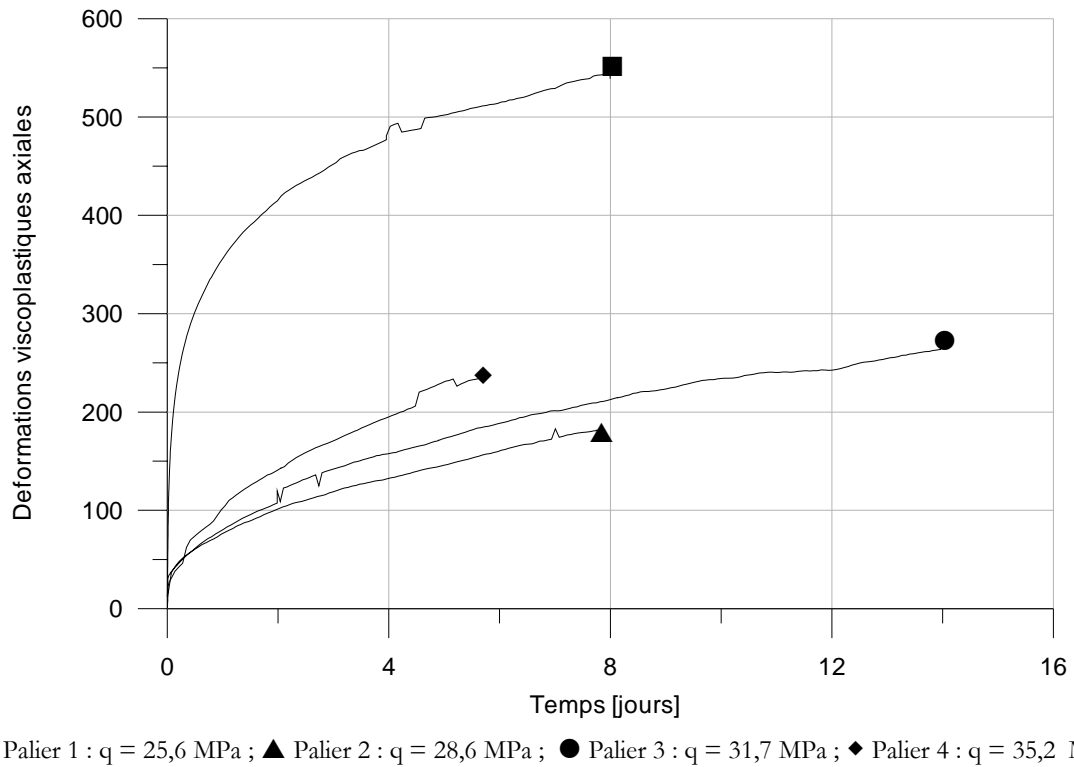


Figure 3.63 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M5 1500.1.



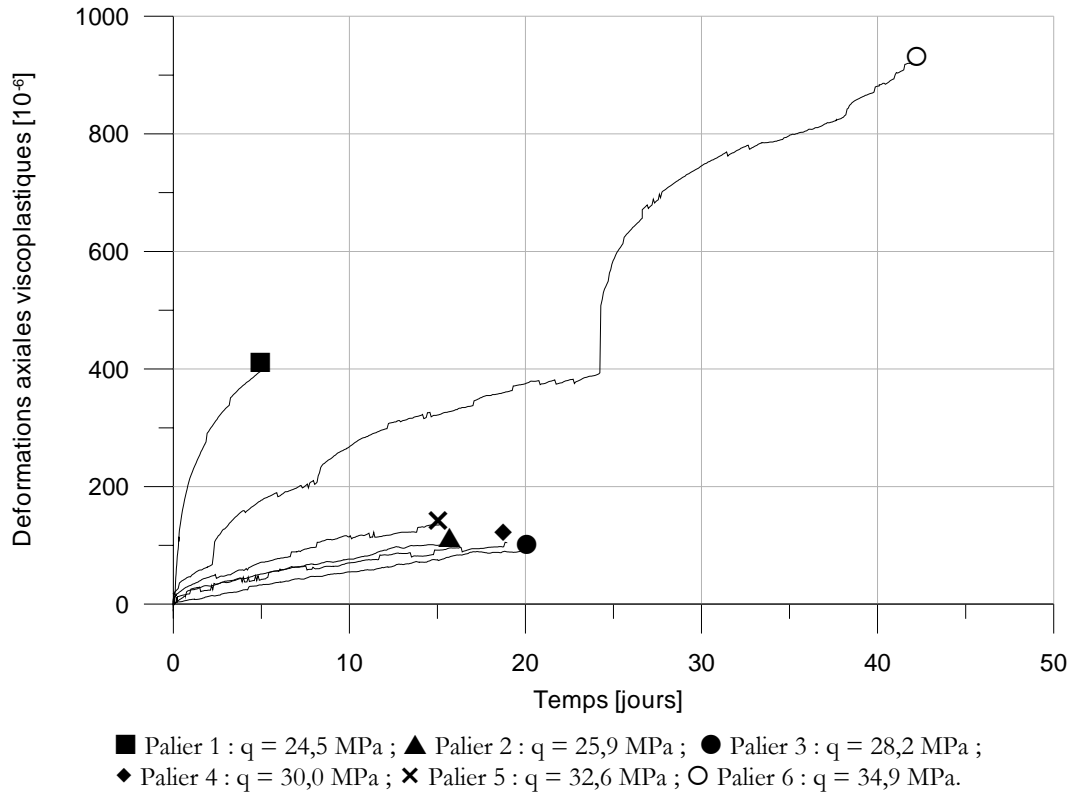


Figure 3.64 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M5 3140.2.

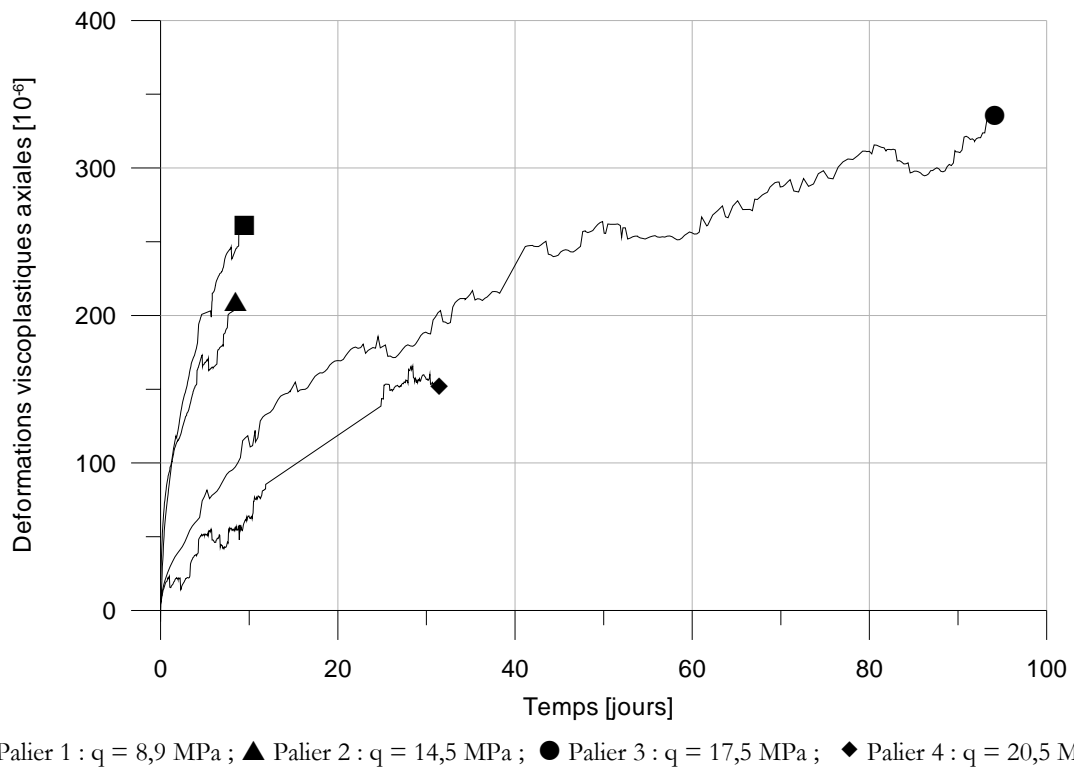
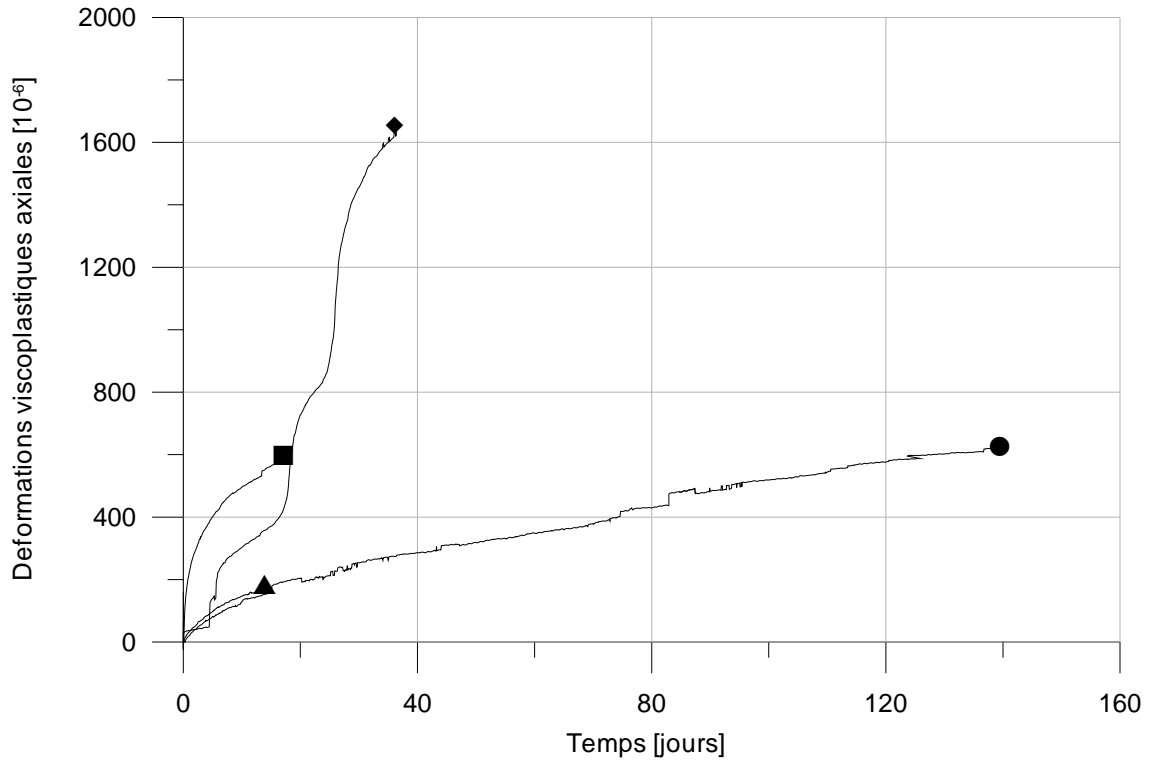


Figure 3.65 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M5 3395.2.



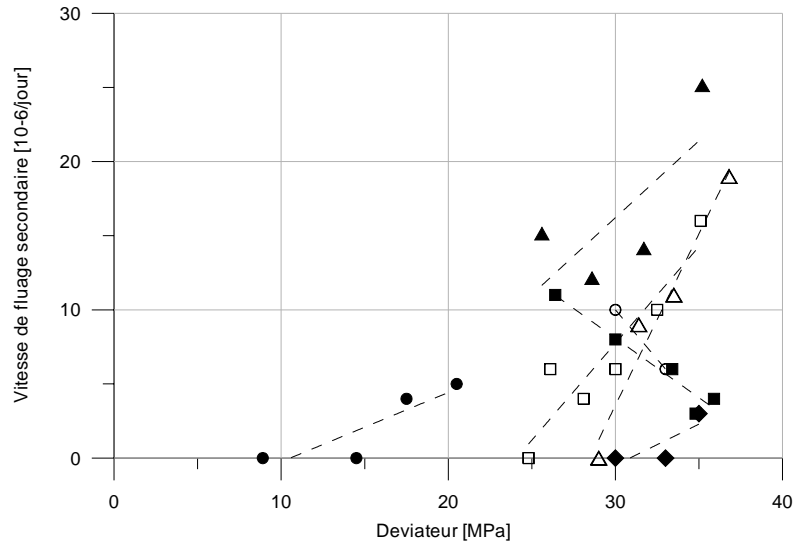
■ Palier 1 :  $q = 30,1$  MPa ; ▲ Palier 2 :  $q = 33,2$  MPa ; ● Palier 3 :  $q = 35,9$  MPa ; ◆ Palier 4 :  $q = 37,5$  MPa..

Figure 3.66 : Superposition des courbes de fluage aux différents paliers de contrainte : déformations axiales viscoplastiques de l'échantillon AT M5 400.1

### 3.5.2.3.3 Vitesses de fluage

La phase de fluage secondaire a pu être observé au cours de sept de ces essais de fluage, réalisés à différents niveaux de contrainte. La vitesse de déformation, qui est par définition constante lors de cette phase, a été calculée et est représentée sur le graphe ci-dessous en fonction du déviateur appliqué (Figure 3.67). Les vitesses de fluage secondaire mesurées sont très faibles ; elles ont été exprimées en  $10^{-6}$  jour<sup>-1</sup>. La synthèse de ces résultats montre une augmentation de la vitesse de fluage secondaire avec le déviateur de contrainte imposé.

De plus, le fluage secondaire semble apparaître pour des déviateurs relativement faibles et probablement inférieurs à la contrainte de contraction maximale. En effet, des vitesses de fluage secondaire sont mesurées dès  $q = 17,5$  MPa alors que les essais de chargement quasi statique ont permis d'approcher  $\sigma_{cd}$  à l'intervalle [16 MPa ; 32 MPa], la valeur 16 MPa correspondant à un essai aux résultats atypiques par rapport aux autres (résistance à la compression simple beaucoup plus faible).



△ AT M4 630.1 ; ■ AT M4 630.2 ; ● AT M5 3395.2 ; ▲ AT M5 1500.1 ;  
 ○ AT M4 970.1 ; □ AT M5 3140.2 ; ◆ AT M5 400.1

Figure 3.67 : Corrélation entre la vitesse de fluage secondaire et le déviateur de contrainte imposée.

#### 3.5.2.3.4 Mesures de vitesses soniques

Lors de l'essai de fluage AT M5 400.1, à l'aide d'un couple de capteurs PVDF, nous avons réalisé une série de mesures de la vitesse de propagation des ondes soniques P dans l'axe de l'échantillon.

Les premières mesures de ce type, lors de l'essai de chargement quasi statique AT M5 2200.1, (§ 3.5.1.3.3), ont montré que l'amélioration du contact entre le capteur PVDF et la roche due à l'augmentation de la charge au cours de l'essai facilite le pointage de la première arrivée et précise la mesure de la vitesse de propagation des ondes P dans cette roche argileuse très atténuante. L'essai de fluage AT M5 400.1 a débuté sous un fort déviateur ( $q = 30,1$  MPa), ce qui nous a permis de nous affranchir de ce problème. L'amplitude du signal reçu est légèrement supérieure à celles des signaux mesurés lors de l'essai de chargement quasi statique AT M5 2200.1, comme on peut le voir sur la Figure 3.68.

Le graphe de la Figure 3.69 représente la vitesse des ondes P mesurée au cours de l'essai AT M5 400.1 en fonction du temps. Les quatre paliers de contrainte successifs sont figurés par des symboles différents et l'évolution du déviateur de contrainte en fonction du temps est rappelée. Les mesures de vitesses ont été réalisées tous les 5 à 7 jours suivant la variation observée ; lors de la phase de fluage tertiaire, l'intervalle de temps entre deux mesures a été écourté.

Ces mesures montrent une légère augmentation de la vitesse des ondes P à chaque augmentation du déviateur de contrainte. Elle peut être rapprochée du phénomène de serrage et correspondre à une fermeture de fissures qui diminue la porosité de la roche.

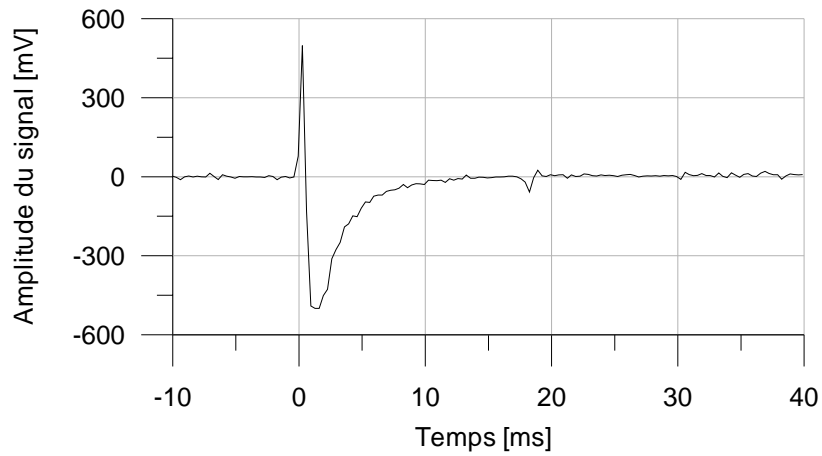


Figure 3.68 : Exemple d'enregistrement du signal de propagation d'ondes ultrasoniques dans l'argilite de Tournemire lors de l'essai de fluage AT M5 400.1.

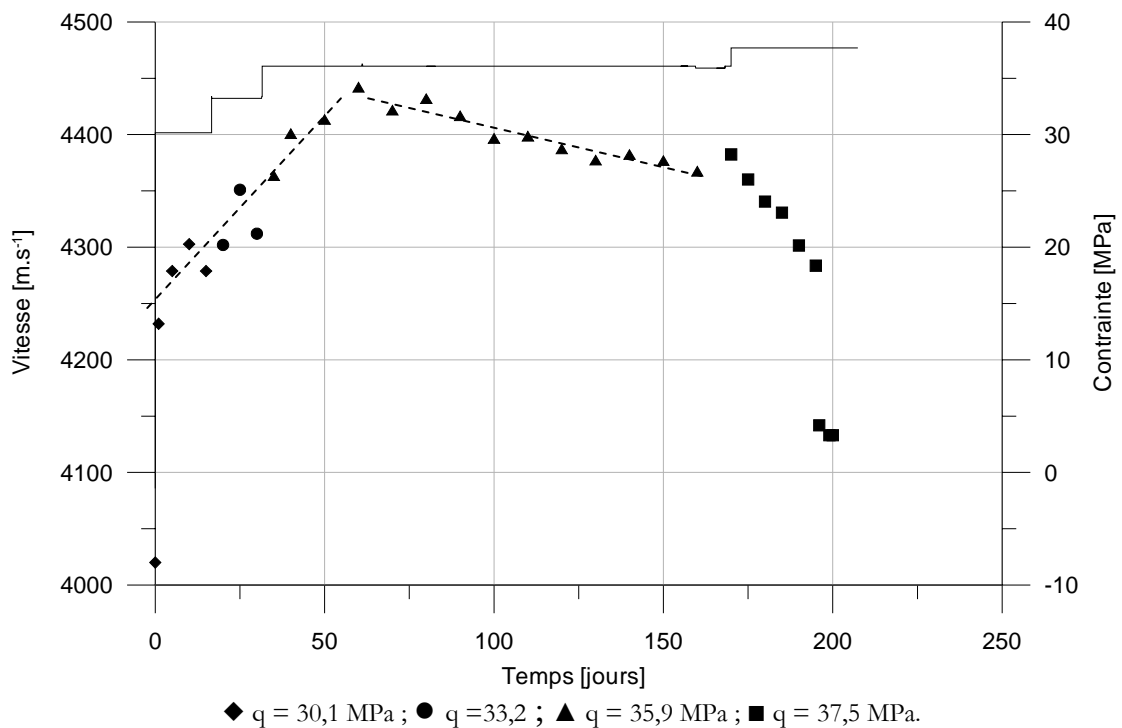


Figure 3.69 : Evolution de la vitesse des ondes ultrasonique en fonction du temps lors de l'essai de fluage AT M5 400.1.

La courbe de la vitesse des ondes P en fonction du temps (Figure 3.69) présente trois phases :

- Lors des deux premiers paliers, et jusqu'à  $t = 60$  jours, la vitesse de déformation croît linéairement avec le temps et la déformation viscoplastique, malgré quelques sauts lors des paliers de contrainte.
- Lors du troisième palier de contrainte ( $q = 35,9$  MPa) qui a duré 139 jours, la vitesse des ondes P atteint son maximum,  $4442 \text{ m.s}^{-1}$  à  $t = 60$  jours. Elle diminue ensuite linéairement avec le temps alors que les déformations axiales se développent à vitesse constante (fluage secondaire). La pente de cette évolution qui caractérise l'endommagement progressif de l'argilite de Tournemire est plus faible.
- Lors du dernier palier de contrainte sous  $q = 37,5$  MPa, la déformation viscoplastique s'accélère et on entre dans la phase de fluage tertiaire. L'ouverture de fissures diminue sensiblement la vitesse de propagation des ondes P. Les mesures ne sont plus possibles au-delà du 200<sup>ème</sup> jour d'essai, le signal reçu n'étant plus décelable.

Ces mesures de vitesses des ondes P dans l'argilite de Tournemire permettent donc au cours d'un essai de fluage de détecter le seuil d'endommagement à partir duquel la vitesse de propagation commence à diminuer. Ce seuil se situe pour l'essai AT M5 400.1 aux environs de  $t = 60$  jours, soit 30 jours après l'application du déviateur du troisième palier ( $q = 35,9$  MPa) et pour  $\epsilon_{nn} = 3130 \text{ } \mu\text{m/m}$ . La déformation viscoplastique  $\epsilon_{nn}^{vp}$  représente alors 30 % de la déformation totale.

Ces premiers résultats de mesures de vitesses d'ondes soniques sur un essai de fluage de longue durée sont conformes aux conclusions de *Nur et al.* (1969) qui avaient observé qu'à la localisation, l'atténuation du signal croît brutalement et la vitesse de propagation chute.

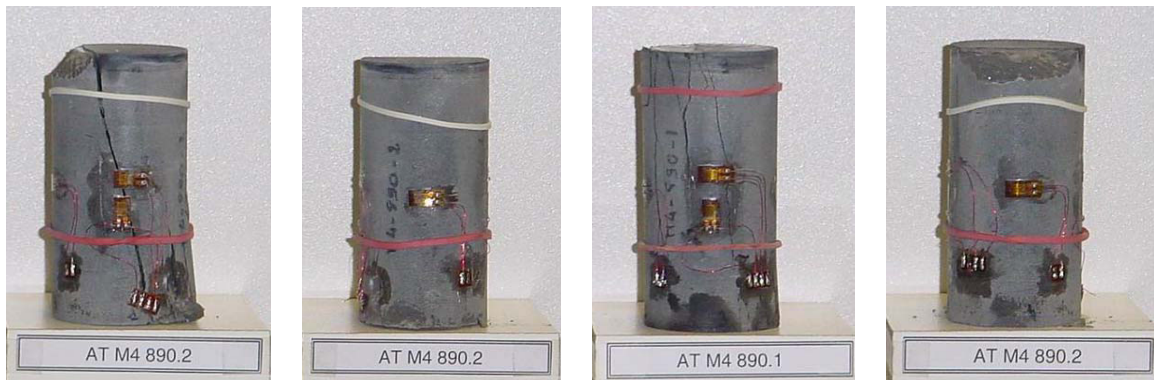
#### 3.5.2.3.5 Mode de rupture

Les observations et les photographies réalisées sur les échantillons rompus lors des essais de fluage montrent que la rupture se développe par extension dans les plans de litage pour ces éprouvettes orientées à  $\theta = 90^\circ$ .

Les surfaces de rupture recoupent bien les bases, inférieure et supérieure des échantillons sans formation de cône de freinage. Les traces de ces plans de rupture sont bien visibles sur les faces 1 et 3, comme on peut le voir sur les photographies de la Figure 3.70.



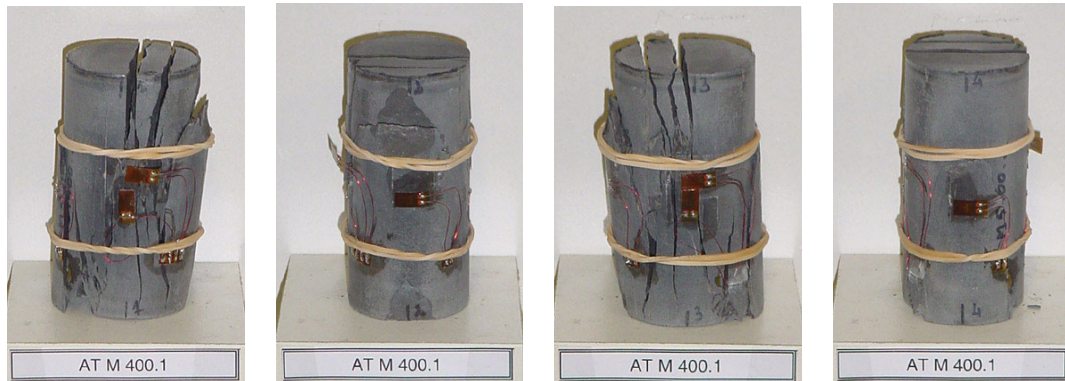
a) Échantillon AT M4 630.1 : essai de fluage : rupture lors de l'augmentation du déviateur de 36,8 à 39,6 MPa.



b) Échantillon AT M4 890.2 : essai de fluage : rupture lors de l'augmentation du déviateur de 24,7 à 27,5 MPa.



c) Échantillon AT M5 3140.2 : essai de fluage : rupture lors du fluage tertiaire sous 34,9 MPa.



d) Échantillon AT M5 400.1 : essai de fluage : rupture lors du fluage tertiaire sous 37,5 MPa.

Figure 3.70 : Photographies des échantillons d'argilite de Tournemire ( $\theta = 90^\circ$ ) AT M4 630.1, AT M4 890.2, AT M5 3140.2, AT M5 400.1 après rupture en fluage sous différents niveaux de déviateur.

### 3.5.2.4 Conclusions sur les essais de fluage

Les essais de fluage réalisés sur l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire ont montré que les déformations axiales viscoplastiques peuvent représenter une part importante de la déformation totale. En effet, pour l'argilite de l'Est, en 321 jours, sous un déviateur de 26 MPa, plus de la moitié de la déformation de l'échantillon est d'origine différée. Elles représentent également entre 30 et 50 % de la déformation des échantillons de la marne du Mont d'Or et de l'argilite de Tournemire après quelques semaines voire quelques mois sous fort déviateur.

Lors de nos essais de fluage, la mesure des déformations axiales et transversales a permis de suivre l'évolution de la déformation volumique et de vérifier la validité d'une des hypothèses de la loi de Lemaitre qui stipule que *Les déformations viscoplastiques se développent à volume constant*. Nous avons pu constater que cette hypothèse n'est pas vérifiée pour l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or. Les déformations viscoplastiques de ces deux roches se développent en effet à volume non constant. L'argilite de l'Est présente un comportement contractant durant la phase de fluage primaire, puis fortement dilatant à l'amorce et pendant le fluage secondaire, sans que le fluage tertiaire ne soit atteint au terme des 321 jours de l'essai. Cependant, le nombre limité d'essais réalisés nous impose de rester prudents face à ses conclusions. L'argilite de Tournemire a montré un comportement volumique très différent d'un échantillon à l'autre. En effet, nous avons pu observer que certains échantillons se déformaient à volume constant, vérifiant l'hypothèse de la loi de Lemaitre, alors que d'autres présentaient un comportement contractant en fluage primaire et secondaire puis dilatant en fluage tertiaire.

Sur les 11 essais réalisés, le fluage tertiaire n'a malheureusement été atteint et observé que deux fois. Cependant, les phases de fluage secondaire ont été bien explorées, notamment lors des essais sur l'argilite de Tournemire et de la marne du Mont d'Or. En superposant les courbes de la déformation axiale viscoplastique en fonction du temps obtenues lors des essais multiphasés, la comparaison des courbes des graphes et l'identification délicate du fluage secondaire se trouvent facilitées.

De cette étude, il ressort que la courbure de la phase de fluage primaire est caractéristique de la roche. Les courbes en fluage primaire se superposent en effet parfaitement en ce qui concerne la marne du Mont d'Or.

Dès que le fluage secondaire est initié, la phase de fluage primaire disparaît lors des essais sur l'argilite de Tournemire certainement à cause de la faible augmentation du déviateur à chaque palier. L'effet est inverse sur la marne du Mont d'Or, même si l'on remarque que le comportement en fluage n'est pas influencé par une décharge de 24h. En revanche, une augmentation de la vitesse de fluage secondaire avec le déviateur a pu être mise en évidence avec les essais réalisés sur l'argilite de Tournemire.

D'après les essais de fluage cyclique réalisés sur la marne du Mont d'Or, il semble difficile de conclure quant à l'influence de cycles de charge-décharge sur l'activation des déformations du fluage.

### **3.6 Conclusions de l'étude expérimentale**

Cette étude expérimentale composée d'essais de fluage et de chargement quasi statique a montré que l'argilite de Tournemire, l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or, ont un comportement mécanique très similaire sous compression uniaxiale.

En chargement quasi statique, il est notamment caractérisé par un développement de la déformation volumique, linéaire avec la contrainte, jusqu'à l'initiation de la dilatance, quelle que soit la vitesse de chargement ou l'orientation de la stratification.

La dilatance n'apparaît pas systématiquement lors de ces essais. Mais elle est en général assez tardive donnant une contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$  proche de la contrainte de rupture  $\sigma_f$ . En compression simple, dès que la propagation des fissures devient instable, les caractéristiques mécaniques de ces roches argileuses se dégradent rapidement, menant l'échantillon à la rupture. La détermination de  $\sigma_{cd}$  est donc difficile et le petit nombre de valeurs obtenu la rend relativement imprécise bien que  $\sigma_{cd}$  soit un paramètre important pour les essais de fluage : cette contrainte représente, en théorie, le déviateur minimal à imposer pour atteindre le fluage tertiaire.

En ce qui concerne l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de ces trois roches, on observe, de manière classique, une augmentation de la résistance à la compression simple avec la vitesse de chargement sur l'argilite de l'Est. Aucun effet n'est décelable sur l'argilite de Tournemire (plage de vitesse explorée trop étroite) ou la marne du Mont d'Or (dispersion des résultats).

Ces premières conclusions mériteraient d'être affinées au moyen d'autres essais sur une plage de vitesse plus large et d'être complétées par des essais sur des éprouvettes d'orientation intermédiaire, 30°, 60° et 75°. Ces essais devraient permettre de quantifier plus précisément l'évolution des contraintes  $\sigma_f$  et  $\sigma_{cd}$  en fonction de l'orientation,  $\theta$ , des éprouvettes et de la vitesse de sollicitation, pour ainsi déterminer des contraintes caractéristiques plus représentatives.

Les essais de fluage ont montré qu'une part importante des déformations de l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire sont d'origine viscoplastique. Les déformations différées sous charge constante de ces trois roches argileuses peuvent représenter 30 à 55 % de la déformation totale après quelques semaines ou quelques mois d'essai.



Lors des essais de fluage, le calcul de la déformation volumique fait apparaître que les déformations viscoplastiques ne se développent pas à volume constant (hypothèse de la loi de Lemaitre). Lors de l'essai réalisé sur l'argilite de l'Est, après une importante contraction de l'échantillon durant le fluage primaire, nous avons mesuré une forte dilatance accompagnant la phase de fluage secondaire et se développant à la vitesse constante de  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ . La marne du Mont d'Or a eu un comportement strictement contractant même durant la phase de fluage secondaire que nous avons atteinte sous de forts déviateurs lors des deux essais réalisés sur cette roche. En revanche, l'argilite de Tournemire a montré un comportement contractant en fluage primaire et secondaire puis dilatant en fluage tertiaire. Cependant, certains échantillons, comme le AT M5 400.1, sont entrés en dilatance dès le premier palier de chargement.

Nous avons pu mettre en évidence, en compression uniaxiale, avec des déviateurs proches de la résistance à la rupture ( $q > 90 \%$  de  $\sigma_f$ ), l'existence d'une phase de fluage secondaire dans l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire.

Cette observation est plus classique dans le sel gemme ou la glace. L'existence d'une phase de fluage secondaire dans les roches dites "dures" ou "fragiles" est souvent remise en question ; cette phase ne serait pour certains auteurs qu'apparente et confondue avec le passage du fluage primaire ou fluage tertiaire (*Dusseault et Fordham, 1993*).

De plus, lors d'essais antérieurs réalisés en laboratoire, sur des durées variant de quelques heures à quelques mois, l'argilite de l'Est n'avait jusque là pas présenté de phase de fluage secondaire nettement identifiable : sa vitesse de déformation viscoplastique continuait à diminuer (fluage primaire) tant que l'endommagement du matériau n'est pas atteint (fluage tertiaire). Notre essai a été réalisé en compression uniaxiale sous un fort déviateur ( $q > 90 \%$  de  $\sigma_f$ ) mais sa reproductibilité n'ayant pu être testée faute d'échantillon, nous resterons prudents sur sa conclusion. En revanche sous fort déviateur, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or présentent nettement des phases de fluage secondaire où la vitesse de déformation viscoplastique est constante.

De plus, d'après les résultats obtenus sur l'argilite de Tournemire, il semble que cette vitesse de fluage secondaire soit une fonction croissante du déviateur de contrainte appliqué. Les vitesses de déformations mesurées sont très faibles, de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$  par jour, mais une augmentation du déviateur accélère le développement des déformations viscoplastiques.

Les résultats d'études expérimentales antérieures sur l'argilite de Tournemire ont mis en évidence que les vitesses de fluage à long terme étaient similaires sur des échantillons carottés perpendiculairement et parallèlement au litage. (cité par *Gasc-Barbier, 2002*). Bien que l'anisotropie de structure de cette roche induise une anisotropie des caractéristiques mécaniques à court terme, se répercutant entre autres sur les paramètres élastiques de la roche (*Niandou, 1994*), elle n'influence pas la vitesse de déformation de la roche à long terme. Sur la base de cette conclusion, l'orientation des échantillons ( $\theta = 90^\circ$ ) utilisés pour cette étude expérimentale du comportement à long terme de l'argilite de Tournemire n'a donc pas d'influence sur les vitesses de déformation calculée.

Au cours des essais de fluage sur la marne du Mont d'Or, nous avons mis en œuvre une série de cycle de charge-décharge pour vérifier la validité de l'hypothèse d'une activation du fluage par ce procédé (*Goodall et al., 1980 ; Graiss, 2000*). Même si, avec des régressions linéaires aux coefficients de corrélation très mauvais, les vitesses calculées étant faibles, une augmentation de la vitesse de fluage après un cycle de charge-décharge est perceptible, les effets des cycles varient d'un palier à l'autre et ce résultat reste à confirmer. Il est donc difficile de conclure quant à l'influence de cycles de charge-décharge sur l'accélération des déformations viscoplastiques.

La fréquence des cycles était très faible ( $1 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$ ), et bien inférieure à celles mis en œuvre

habituellement dans les essais de fluage cyclique (de 0,25 à 20 Hz pour les essais de fatigue de *Mora*, 1982). Cependant, ces cycles entrecoupés de période de recouvrance ont montré qu'à cette fréquence, avec une période de recouvrance de 24h, un cycle de décharge-recharge n'influence pas le comportement de la roche. Les niveaux de déformations axiales et transversales atteints avant la décharge et après la recharge sont identiques et le fluage reprend à la même vitesse. En revanche, après une période de recouvrance plus longue, on retrouve la courbure du fluage primaire après la recharge de l'échantillon.

Nous avons présenté une superposition des courbes donnant la déformation axiale viscoplastique en fonction du temps obtenue pour chacun palier lors de tous les essais de fluage réalisés. Cette représentation facilite la comparaison des courbures des phases de fluage primaire et l'identification de l'apparition du fluage secondaire, difficilement repérable sur la courbe complète. Ces représentations nous ont permis de vérifier que la forme de la courbe de la phase primaire est caractéristique de la roche. Lors des essais multipaliers, nous avons également constaté qu'au-delà d'un certain seuil de contrainte et/ou de déformation, le comportement en fluage de la roche n'est pas affecté par une augmentation faible du déviateur : lorsque le fluage secondaire est atteint au palier précédent, il se poursuit après l'augmentation de la charge, à une vitesse légèrement supérieure.

La durée des essais de fluage et leur difficulté de réalisation n'ont pas permis leur multiplication qui aurait pourtant amélioré la représentativité des résultats. Les conclusions présentées ici n'ont donc pas encore un caractère général pour le comportement des roches étudiées.

Des mesures de vitesses soniques ont été réalisées pour évaluer l'endommagement des échantillons lors d'un essai de chargement quasi statique et d'un essai de fluage sur l'argilite de Tournemire. Le dispositif mis au point dans cet objectif est très facilement utilisable et ses capteurs piézo-électriques en PVDF peuvent être incorporés sans difficulté d'instrumentation à aux cellules d'essais.

Les résultats de ces mesures restent conformes aux prédictions théoriques (*Sammonds et al.*, 1989). Lors du chargement quasi statique, on observe une augmentation de la vitesse due à la contractance du matériau puis une diminution due à l'endommagement de la roche (ouverture de fissures). Lors de l'essai de fluage, on mesure une augmentation de la vitesse des ondes P linéaire avec le temps, puis une diminution de la vitesse due à l'endommagement progressif du fluage secondaire et enfin, une chute lors de la phase de fluage tertiaire. Ces premières mesures de vitesses d'ondes soniques sur un essai de fluage de longue durée sont conformes aux conclusions de *Nur et al.* (1969).

La rupture des échantillons testés en fluage ou chargement quasi statique s'est produite de manière classique. Elle est de type fragile et se développe de manière structurale, dans les plans de litage pour les échantillons orientés à  $\theta = 90^\circ$  et astructurale, dans des plans de verticaux lorsque  $\theta = 0^\circ$  et  $\theta = 45^\circ$  où ils sont alors légèrement déviés par la stratification.

Tous les essais de compression ont été réalisés en conditions drainées, la membrane étanche limitant les pertes hydriques lors des essais de longue durée n'empêchant pas le drainage du matériau. Cependant, les déformations volumiques mesurées sont suffisamment faibles pour éviter une resaturation au cours de la compression : aucune surpression interstitielle ne s'est donc développée dans nos échantillons.

La cellule de compression uniaxiale transparente développée au cours de cette thèse permet un suivi visuel de la déformation qui améliorera l'analyse des essais chargement quasi statique. Elle peut également être utilisée en fluage bien que nous n'ayons pu le faire.

A partir des échantillons rompus d'argilite de l'Est et de marne du Mont d'Or, plusieurs lames minces ont été réalisées. Elles vont être observées au microscope optique et électronique afin d'identifier à l'échelle microscopique les mécanismes de déformations viscoplastiques dans ces roches argileuses. Cette étude microstructurale est l'objet du chapitre 4.

De plus, l'étude expérimentale sera complétée par le calage analytique d'un modèle rhéologique utilisant la loi de Lemaitre, modifiée pour tenir compte des comportements volumiques observés. Cette modélisation analytique du comportement différé de l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire sera traitée dans le chapitre 5 qui exploitera tous les résultats expérimentaux présentés dans ce chapitre 3.

## Analyse microstructurale de la déformation différée des roches argileuses

**Objet :** Dans ce chapitre, nous cherchons à mettre en évidence au sein de la microstructure de l'argilite de l'Est et de la marne du mont d'Or les modifications induites par les essais mécaniques qui traduisent leur comportement différé.

*Après avoir rappelé certaines caractéristiques minéralogiques des argiles et des cristaux contenus dans ces deux roches, nous exposons brièvement les techniques particulières utilisées pour réaliser des lames minces dans ces matériaux très sensibles à l'eau. Cinq lames minces d'argilite de l'Est et cinq lames épaisses de marne du Mont d'Or imprégnées d'une résine fluorescente ont été observées au microscope optique puis au microscope électronique à balayage (MEB). L'influence de la pyrite sur le mode de fissuration a pu être mis en évidence ainsi que le rôle de l'anisotropie de ces roches sédimentaires. En revanche, sur la plage de vitesse de déformation explorée lors des essais mécaniques, le rôle de ce paramètre sur la microfissuration n'a pu être clairement établi.*

## 4.1 Introduction

Les matériaux rocheux sont des milieux polycristallins, poreux, hétérogènes, très souvent anisotropes. Afin de mieux comprendre leur comportement macroscopique, et en particulier leur comportement différé, il est important d'étudier les phénomènes qui se produisent à l'échelle microscopique. En effet, la composition minéralogique et la microstructure d'une roche déterminent ses propriétés physiques, et notamment sa viscosité et son potentiel de fluage.

Grâce au microscope optique et au microscope électronique à balayage (MEB), nous allons observer nos échantillons sur une plage de longueur comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^{-8}$  m. En deçà de cet intervalle, nous serions à l'échelle atomique ; au delà, nous serions dans le domaine macroscopique (Figure 4.1).

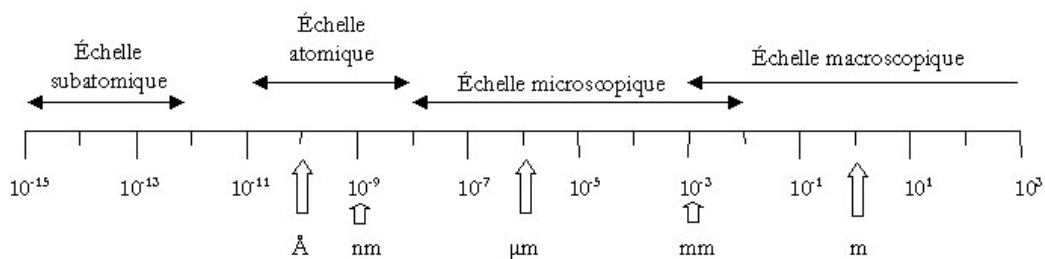


Figure 4.1 Définition des différentes échelles d'observation, d'après Dowling (1998).

## 4.2 Éléments d'analyse du comportement mécanique des roches argileuses

### 4.2.1 Minéralogie, structure et propriétés des argiles

Les minéraux argileux proviennent de l'altération et de la dégradation des roches, altération physique sous l'effet des variations de température mais aussi chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules de moins de  $2 \mu\text{m}$  de diamètre. Les conditions d'altération notamment la température et le pH de l'eau, ainsi que son degré d'avancement expliquent la variété des argiles.

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés se présentant sous forme de petites plaquettes de quelques  $\mu\text{m}$ . Leur structure est caractérisée par un empilement de feuillets de silice et d'hydroxyde d'aluminium, composés de couches T de tétraèdres de  $[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]^{6-}$  et O d'octaèdres de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ou de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Figure 4.2).

Ces associations de tétraèdres ou d'octaèdres délimitent des cavités tétraédriques ou octaédriques de volume défini que peuvent occuper des cations ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ...). La composition et la superposition de ces couches, T-O ou T-O-T, ainsi que l'épaisseur du feuillet, donnent aux minéraux leur spécificité et leurs propriétés (Caillere et Henin, 1963).

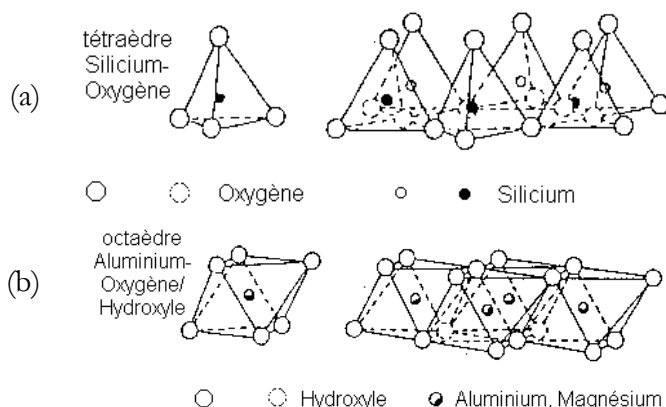


Figure 4.2 : Structure des minéraux argileux :  
Tétraèdres de silice, octaèdres d'aluminium, de magnésium et leur agencement.  
(a) : Couche tétraédrique ; (b) : Couche octaédrique

Suivant l'échelle considérée, on peut distinguer trois niveaux d'organisation de la phase argileuse :

- le *feuillet* dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques Å. ( $10^{-10}$  m).
- La *particule* qui est un assemblage de feuillets.
- L'*agrégat* qui est une association de particules élémentaires dont la longueur peut atteindre 2  $\mu\text{m}$  suivant la nature minéralogique de l'argile considérée.

Les minéraux argileux sont très nombreux. Les principales familles sont décrites dans le Tableau 4.1.

A partir de la structure de base des feuillets, des substitutions entre cations sont possibles. On parle de substitutions *isomorphes* lorsque celles-ci ne modifient pas l'épaisseur du feuillet.

Cette propriété confère aux particules argileuses une surface chargée. En effet, la substitution des ions  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Al}^{3+}$  dans la couche tétraédrique et celle de  $\text{Al}^{3+}$  par  $\text{Mg}^{2+}$ , dans la couche octaédrique, entraîne un déficit de charges. La surface du feuillet est donc chargée négativement et attire des ions positifs présents dans l'eau afin d'assurer une électroneutralité globale. Ces ions s'insèrent alors dans l'espace interfoliaire.

L'adsorption de cations compensateurs dans l'espace interfoliaire pour assurer l'électroneutralité des particules d'argile peut modifier leurs propriétés. Ces cations parmi lesquels on peut citer :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ , sont hydratés, c'est-à-dire associés à des molécules d'eau qui concourent à l'écartement des feuillets et donc au gonflement macroscopique. La charge du feuillet conditionne donc à l'échelle microscopique le gonflement observé. La Capacité d'Echange Cationique, CEC, exprimée en milléquivalents pour 100 g d'argile sèche (meq) quantifie la quantité d'ions échangeables : une valeur élevée est associée à un fort potentiel d'adsorption de cations.

Cette électroneutralité qui est une caractéristique fondamentale varie selon les familles de minéraux argileux et le pH de l'eau. Les propriétés des argiles, notamment leurs formes et l'épaisseur des agrégats, dépendront donc du pH et des ions présents dans l'eau.

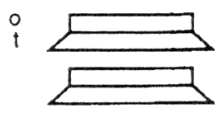
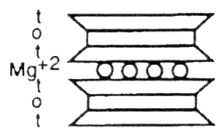
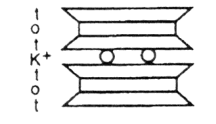
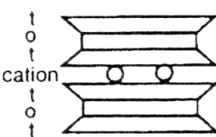
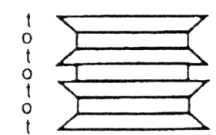
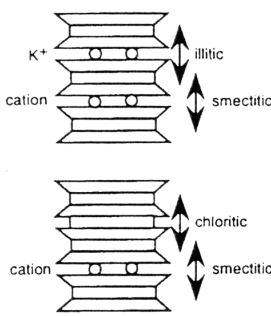
Principales familles de particules argileuses	Structure du feuillet élémentaire	Caractéristiques du feuillet	Propriétés du feuillet
<b>Kaolinite</b>	2 couches 	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ Type T-O épaisseur : 7 Å cristaux étendu (jusqu'à 15 µm) Forte porosité	Feuillet neutre (pas de substitution) Argile raide Surf. spécifique : 10-20 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>
<b>Vermiculite</b>		Petites particules généralement associées à d'autres types d'argiles Epaisseur : 12 Å Type T-O-T	Augmentation du volume par chauffage (20 fois) Exfoliation en vermicules Surf. spécifique : 40-80 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>
<b>Illite</b>		$K_x Al_2[Si_{4-x}Al_xO_{10}](OH)_2$ Feuillet irrégulier Epaisseur : 10 Å Type T-O-T	Surf. spécifique : 65-100 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>
<b>Smectite</b>	3 couches 	Epaisseur : 14 Å variable selon la teneur en eau Type T-O-T	Argiles gonflantes : substitution importante (montmorillonite) Faible porosité Surf. spécifique : 50-120 m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup>
<b>Chlorite</b>	3 couches 	$(Mg, Fe, Al)_3 Mg_3[(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2](OH)_6$ épaisseur : 14 Å cristaux aplatis à clivage parfait	
<b>Interstratifiés</b>		Alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes	Propriétés dépendantes des argiles constituantes

Tableau 4.1 : Caractéristiques des principales familles de minéraux argileux, d'après Nuclear Energy Agency (1996).

La cohésion au sein des particules argileuses est assurée par deux types de liaisons entre les éléments :

- les liaisons *iono-covalentes* (mise en commun de deux électrons et attraction électrostatique entre ions de charge contraire) existantes entre les atomes de Si et O ou Al et O qui sont des liaisons très fortes,
- les liaisons *interfoliaires* ou *interparticulaires*.

Les liaisons interfoliaires ou interparticulaires peuvent être de différentes natures :

- les *forces de Van der Waals*: liaison faible entre les électrons et les noyaux d'atomes constituant les particules d'argiles,
- les liaisons *hydrogène* entre les ions  $H^+$ ,
- les liaisons *coulombiennes* dues à la présence de cations compensateurs entre les feuillets comme les ions  $K^+$  dans l'illite.

Les forces qui associent les éléments du feuillet élémentaire sont de nature iono-covalente et donc particulièrement stables. En revanche, les liaisons qui associent les feuillets successifs sont toujours beaucoup moins intenses, ce qui permet parfois de les séparer (exfoliation). Les liaisons entre couches ainsi que les liaisons entre les feuillets et les cations hydratés adsorbés sont des liaisons de type Van der Waals, coulombiennes ou hydrogène beaucoup plus faibles.

De plus, les ions  $K^+$ , qui ont parfois pris place entre deux feuillets d'argile, participent à la résistance au cisaillement. Ils contribuent à la liaison des feuillets, jusqu'au dépassement d'un certain taux de déformation (Figure 4.3).

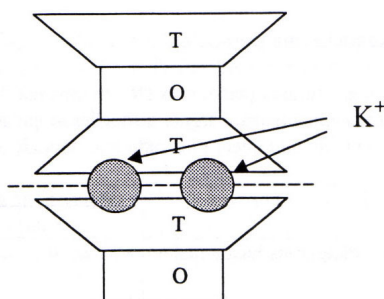


Figure 4.3 : Pénétration des ions  $K^+$  entre feuillets d'illite.

L'argilite de l'Est a été étudiée par différents auteurs (ANDRA 1999, Coquinot 2000, Chiarelli 2000, Scholtus 2001, Wright 2001, entre autres). Des analyses par diffraction X ont montré que la fraction argileuse représentait jusqu'à 45 % de la composition de cette roche et qu'elle était essentiellement composée d'interstratifiés illites/smectites désordonnés avec un fort pourcentage de smectites (50 à 70%).

La composition minéralogique de l'argilite de Tournemire a été déterminée et étudiée par de nombreux auteurs (Schmitt 1994, Niandou et al. 1997, Rejeb 1999, Cabrera 2001). Des analyses minéralogiques ont montré que cette roche contenait en moyenne 55 % d'argile dont 28 % de kaolinite, 16 % d'illite, 3 % de chlorite et 8 % d'interstratifiés illites/smectites.

A notre connaissance, la marne du Mont d'Or n'a fait l'objet d'aucune étude approfondie de sa microstructure à l'aide de lame mince. Cette roche contient une faible proportion d'argile (25 %).



Cette matrice argileuse est composée essentiellement d'illite (40 %) et de kaolinite (30 %) et d'un faible pourcentage de montmorillonite (15 %) qui confère à la marne du Mont d'Or ses propriétés de gonflement.

#### **4.2.2 Autres cristaux présents dans les roches argileuses étudiées**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les trois roches argileuses étudiées expérimentalement sont constituées d'une forte proportion de particules argileuses de différentes natures mais également de grains quartz, de carbonate de calcium, de pyrite et de micas.

Le quartz (Figure 4.4 (a)) est la forme cristalline de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et l'un des minéraux les plus répandus dans la lithosphère. On le retrouve dans les roches magmatiques plutoniques et volcaniques (granite), dans les roches métamorphiques (gneiss) mais aussi du fait de sa dureté et de sa faible solubilité dans les roches sédimentaires détritiques (grès, marnes...). Il cristallise dans le système hexagonal et ne présente pas de clivage.

La calcite (Figure 4.4 (b)) est la forme stable du carbonate de calcium anhydre,  $\text{CaCO}_3$ . Elle cristallise dans le système hexagonal en cristaux de formes variées : tabulaire, prismatique, scalénoèdres, rhomboèdres... Ses cristaux souvent concrétionnés sont incolores ou blanchâtres s'ils sont purs, mais peuvent se présenter sous différentes couleurs (jaune, rose, vert, bleu). On retrouve la calcite principalement dans les roches sédimentaires calcaires et métamorphiques qui en dérivent (marbres, cipolin). Elle a un clivage parfait selon les faces du rhomboèdre. Par compression, la calcite peut donner des mâcles polysynthétiques lamellaires.

La pyrite,  $\text{FeS}_2$ , (Figure 4.4 (c)) est un sulfure de fer, très répandu et présent dans tous les types de roches. Ce minéral de couleur jaune laiton aux éclats métalliques, cristallise dans le système cubique. La pyrite est présente en faible quantité dans les roches argileuses que nous avons étudiées expérimentalement mais ses caractéristiques physiques et chimiques peuvent lui donner une influence importante sur le comportement mécanique de la roche. Dans nos échantillons, elle se présente essentiellement sous forme de globules framboïdaux de quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  de côté. Cet habitus particulier, ressemblant à une framboise et dont l'origine n'est pas encore bien connue, est courant dans les boues et les vases riches en matière organique. La pyrite framboïdale est particulièrement sensible à l'altération du fait des grandes surfaces de contact qu'elle présente.

Les micas regroupent différents minéraux aux caractéristiques communes : la muscovite (Figure 4.4 (d)), la biotite, la glauconite... La muscovite ( $\text{KAl}[(\text{OH},\text{F})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ ) se présente généralement sous forme d'agrégats écailleux au clivage facile.

Les mécanismes régissant les comportements différés dépendent en particulier de la température, comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 2. Les phénomènes de mouvements de dislocation mis en œuvre dans un cristal sont identifiés par rapport à la température de fusion du cristal considéré. A température modérée, à peu près  $1/3$  de la température de fusion, la diffusion des atomes s'effectue le long des joints de grains (fluage de Coble) tandis qu'à une température proche de la température de fusion (au-delà de  $2/3 T_f$ ), elle devient de nature intragranulaire (fluage de Nabarro-Herring).

Dans le Tableau 4.2, sont répertoriées les températures de fusion moyennes des principaux cristaux contenus dans les roches argileuses que nous avons étudiées. Les essais mécaniques ont été réalisés dans un local climatisé où la température a été maintenue à  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , c'est-à-dire bien en deçà de la température de fusion des cristaux contenus dans nos roches. Dans ces conditions, sous les contraintes appliquées, les cristaux se sont donc très probablement déformés par broyage des grains, c'est-à-dire de façon cataclastique et seule la phase argileuse est

susceptible d'avoir un comportement ductile.

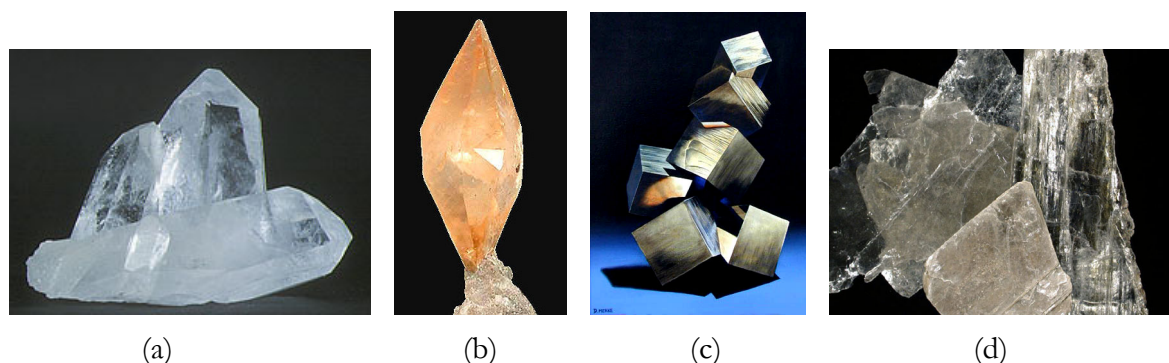


Figure 4.4 : Cristaux de : (a) quartz, (b) : calcite, (c) : pyrite et (d) : muscovite  
(source Internet : <http://www.pitt.edu/~cejones/GeoImages/>).

Quartz	Calcite	Muscovite	Pyrite
1715 °C	1339 °C	1375°C	>600 °C

Tableau 4.2 : Température de fusion des principaux minéraux contenus dans les roches argileuses étudiées (argilite de l'Est, argilite de Tournemire et Marne du Mont d'Or).

### 4.2.3 Observations microscopiques antérieures

Le rapport est étroit entre la microstructure des roches et leurs propriétés mécaniques. En effet, comme pour les métaux, la composition minéralogique, les dislocations, la microporosité, la microfissuration et leurs orientations préférentielles déterminent la résistance à la rupture des roches.

Quand un échantillon est sollicité jusqu'à la rupture, les déformations sont essentiellement dues à la coalescence des microfissures, induites par l'endommagement, et qui finissent par former des zones de glissement (localisation de la déformation). Ces mécanismes sont généralement identifiables par tomodynamométrie ou mesures d'émissions acoustiques (Amitrano, 1999).

Dans le cas des comportements mécaniques différés, les mécanismes de déformation sont moins bien identifiés. Cruden (1971) ainsi que Hofer et Knoll (1971) ont étudié les mécanismes de fluage primaire et sont arrivés à la conclusion que lors de ce fluage transitoire, durant lequel la vitesse de déformation diminue, les mouvements de dislocations et la microfissuration pourraient être en compétition. Le fluage secondaire, quant à lui, pourrait s'expliquer par des mouvements de dislocations et/ou des phénomènes diffusifs (fluage de Coble ou de Nabarro-Herring) suivant la nature de la roche, sa microstructure et les conditions thermodynamiques. Le fluage tertiaire est lui vraisemblablement dû à l'accélération de la microfissuration qui devient instable au sein de la matrice.

Dans leur étude du comportement différé du gypse de la carrière de Grozon, Hoxha et al. (2003) ont recherché les mécanismes microscopiques à l'origine du fluage dans la structure de la roche et

ses modifications en présence d'eau. Pour eux, la dilatance observée lors de leurs essais de fluage est liée au développement d'une fissuration par clivage des cristaux selon le plan  $\langle 010 \rangle$ .

Cependant, dans le cas du gypse, le couplage hydromécanique semble primordial pour expliquer les mécanismes de déformation puisque *Hoxha et al.* ont mis en évidence le contrôle de la cinétique du glissement des dislocations et de la propagation subcritique des fissures par l'hygrométrie. En effet, les observations MEB des fragments d'échantillons après fluage montrent une diminution importante de la taille des cristaux de gypse et les observations au MET montrent une augmentation du nombre de dislocations qui semble être la cause de l'écroutissage de la roche. Cette augmentation conduit à une augmentation de leur probabilité d'intersection et donc de leur interaction. Elles ont ainsi plus de chance de rencontrer des obstacles à l'intérieur de la microstructure (contact entre grains, vallée de Pierls...). Dans un essai de fluage à contrainte constante, le durcissement du gypse se manifeste par une diminution de la vitesse de déformation avec l'accumulation des déformations, jusqu'à l'établissement du fluage secondaire.

Les observations au microscope sur des lames minces de marne de Beaucaire réalisées par *Tillard* (1992) ont permis d'identifier les origines de la résistance au cisaillement de cette roche argileuse.

Pour mieux comprendre les phénomènes de rupture observés macroscopiquement dans la marne de Beaucaire, *Tillard* s'est intéressé aux caractéristiques cohésives et frottantes de chaque phase minérale mise en évidence lors de l'analyse pétrographique : cette roche contient en moyenne 36 % de quartz, 32 % d'argile et 31 % de carbonate de calcium.

Etant donné leur incapacité à retenir l'eau, les grains de quartz contribuent peu à la cohésion de la marne, par contre avec un coefficient de frottement résiduel de l'ordre de  $35^\circ$ , ils expliquent en partie, ses propriétés frottantes.

Les grains de carbonate jouent un double rôle dans la marne de Beaucaire. Avec un coefficient de frottement du même ordre que celui du quartz, ils participent à sa résistance au cisaillement. De par leur forte contribution à la fraction de particules fines, ils se comportent au même titre que les matières organiques ou les oxydes de fer comme des agents cimentant favorables à la cohésion de la roche.

Les particules d'argiles influent uniquement sur la cohésion de la marne : leur forme plane leur permet de s'entourer d'eau adsorbée qui conditionne les forces cohésives et limite fortement les contacts frottants entre particules.

La résistance au cisaillement d'un matériau argileux cohérent comme la marne de Beaucaire provient donc d'une part de la cohésion de ses particules et d'autre part du frottement à leurs contacts. Dans la marne de Beaucaire, il semble que la cohésion liée à la cimentation des particules soit mobilisée pour de faibles déformations et qu'elle disparaisse ensuite.

*Gasc-Barbier* (2002) a utilisé la microscopie confocale laser (résolution de l'ordre du micromètre), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique à transmission (MET) pour observer la structure de l'argilite de l'Est. Des observations sur des échantillons séchés ou hydratés lui ont permis d'étudier l'assemblage du système argiles-carbonates-eau.

Dans le cadre d'une collaboration avec Tessier de l'unité des sciences du sol de l'INRA, *Gasc-Barbier* a étudié l'organisation des composants des argilites de l'Est. Au MEB, Tessier a observé la présence de particules argileuses de grande extension dans le plan des feuillets, englobant des grains de quartz et de calcite bien individualisés et de taille parfois supérieure à  $200 \mu\text{m}$ . la phase carbonatée ne constitue pas un ciment mais s'organise sous forme de grains noyés dans une

matrice argileuse dans laquelle on remarque également la présence de pyrite.

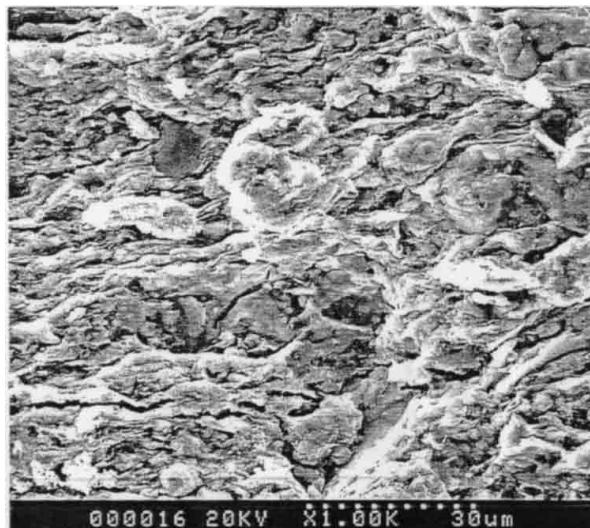
L'argilite de l'Est est en fait constituée d'un assemblage de grains d'environ 100 à 200  $\mu\text{m}$  de diamètre de quartz ou de calcite, noyés dans une matrice argileuse. Un espace d'1  $\mu\text{m}$  environ entoure ces gros grains et un réseau de fissures semblent les relier. Les observations au MEB et au MET ont mis en évidence l'importante extension plane des particules d'argiles. La distance interparticulaire est estimée à 2  $\mu\text{m}$  ce qui pourrait expliquer les propriétés de gonflement de cette roche. Les pores seraient de dimension nanométrique.

Ces observations ont permis de formuler les premières hypothèses sur le comportement de l'argilite de l'Est : la fraction argileuse est constituée pour partie d'interstratifiés illite-smectite dont les ions potassium, présents entre les feuillets, assurent la cohésion. L'espace intercrystallite n'étant pas ou peu rempli par de la calcite, les particules d'argiles devraient pouvoir se réorganiser et changer la taille des pores de la matrice.

Grâce à des mesures de porosité, *Gasc-Barbier* a montré que les déformations observées macroscopiquement lors des essais de fluage étaient dues essentiellement au développement de la microfissuration.

Lors de ses observations au MEB, *Chiarelli* (2000) a également constaté que les grains de quartz et de calcite sont liés dans une matrice fine d'argile. Les minéraux argileux apparaissent sous forme d'amas de quelques microns qui localement ne sont pas toujours parallèles à la stratification.

Les observations au MEB de *Escoffier* (2001) sont en accord avec celles de *Chiarelli* (2000) et *Gasc* (2002). Sur la photo de la Figure 4.5, l'organisation de la matrice argileuse est bien visible : on distingue nettement les clastes incrustés essentiellement de quartz et de calcite. La porosité de ces argilites serait donc une porosité interagrégat ou interparticulaire.



*Figure 4.5 : Organisation structurale de l'argilite de l'Est : matrice englobant des clastes de quartz et de calcite, d'après Escoffier (2001).*

En étudiant au microscope électronique à balayage (MEB) une lame mince d'argilite de l'Est issue d'un échantillon testé en compression sous différentes vitesses de chargement puis en relaxation, *Boidy* (2002) a pu identifier les mécanismes de déformation successifs.

Lors de la compression du matériau, des micro-plans de cisaillement orientés à 30 ou 40° par rapport à l'horizontale, se développent au sein de la matrice argileuse. Ces microplans ne sont pas rectilignes mais leur tortuosité et leur orientation semblent en partie contrôlées par la stratification et la granulométrie de la roche (Figure 4.6).

Le long de ces microplans de cisaillement qui mesurent moins de 5 µm de large, une réorientation des particules d'argiles face contre face est nettement visible. Elle affecte une zone de 10 à 20 µm d'épaisseur autour de la fissure et marque un endommagement diffus de l'échantillon lors de la compression puisque les cristaux de calcite pris dans ces plans sont fracturés (Figure 4.7). Au cours de la phase de relaxation, des microfissures horizontales, d'épaisseur variable (de quelques µm à 0,3 mm) tendent à s'ouvrir, constituant un réseau sub-parallèle à la stratigraphie.

Trois types d'endommagement sont donc visibles sur cette lame :

- des microplans de cisaillement (< 5 µm de large), associés à la phase de compression, inclinés à 30-40° par rapport à l'horizontale dont la tortuosité est contrôlée par la granulométrie de la roche.
- Des bandes de cisaillement de 50 à 100 µm de large dans lesquelles les particules argileuses se réorientent face contre face et la calcite est fracturée.
- Des microfissures horizontales ouvertes dues à la relaxation.

Pour observer les déformations de l'argilite de l'Est sous sollicitation mécanique, *Wright* (2001) a utilisé des lames épaisses (5 mm) qu'il a soumises à un chargement de compression dans une microcellule CGI développée au Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris. Cette cellule permet, dans une certaine mesure, de contrôler la température et l'humidité relative de l'échantillon, mais surtout de suivre la déformation de l'échantillon visuellement sans interrompre l'essai.

Avec ce dispositif (Figure 4.8), lors d'essais de fluage, Wright ne parvient pas à observer la phase de fluage secondaire et l'explique de deux manières :

- le niveau de déviateur est inférieur au seuil de viscoplasticité ;
- la vitesse de fluage stationnaire des argilites est trop faible par rapport à la précision de la mesure.

En revanche, il visualise très bien la phase de fluage tertiaire qui correspond à l'augmentation de la vitesse de déformation jusqu'à la rupture. De plus, il réussit à démontrer le rôle important joué par la pyrite qui constitue visiblement une zone de fragilité et un lieu d'initiation privilégié des fissures. Sous des sollicitations thermomécaniques, en atmosphère ouverte pendant une dizaine de jours, les glomérules pyritisés conditionnent le comportement de ses échantillons d'argilites de l'Est de dimensions centimétriques : ils diminuent la résistance à la rupture des échantillon d'une valeur probablement supérieure à 10%.

Finalement, *Wright* arrive à la conclusion que les déformations dans l'argilite de l'Est sous les sollicitations étudiées seraient plutôt de type cataclastique. La rupture se produit par le développement de fissures. Leur initiation semblerait liée aux hétérogénéités de la texture dues principalement aux agrégats de carbonate, de quartz et de pyrite qui ont des propriétés différentes de la matrice argileuse et sont moins déformables.

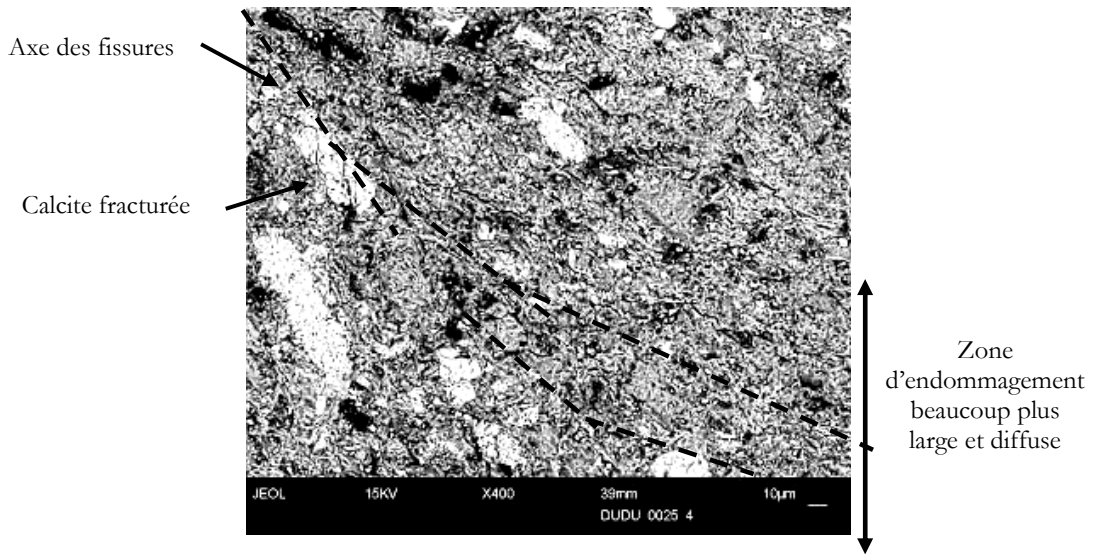


Figure 4.6 : Zone d'endommagement avec fissuration de la matrice argileuse et fracturation de cristaux de calcite, d'après Boidy (2002).

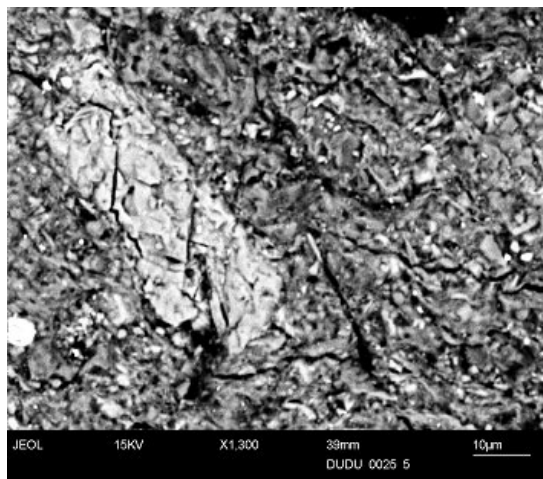


Figure 4.7 : Fracturation d'un cristal de calcite, d'après Boidy (2002).

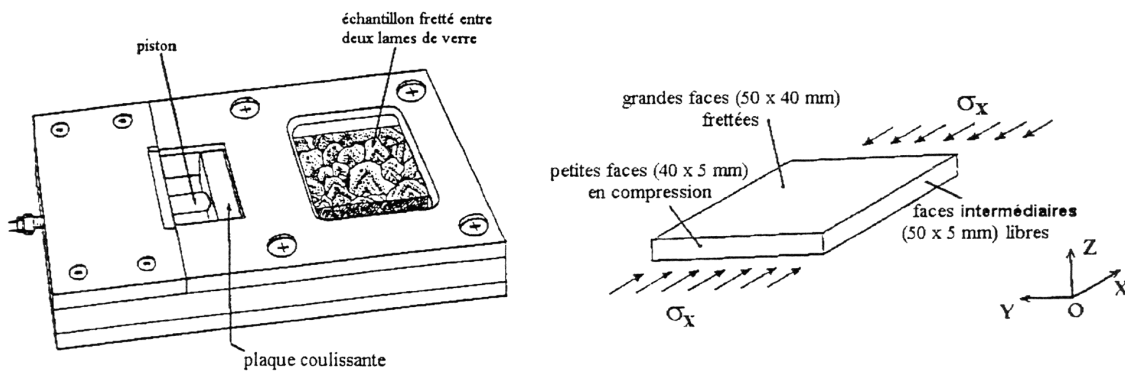


Figure 4.8 : Microcellule CGI et son principe, d'après Wright (2001).

### 4.3 Techniques d'imprégnation des échantillons et réalisation des lames minces

Le procédé de réalisation de lames minces a été compliqué par la sensibilité à l'eau des particules argileuses contenues dans nos trois roches, problème auquel nous avons déjà été confronté lors de la préparation des échantillons (sciage, carottage, rectification à sec).

Généralement, lors de la réalisation de lames minces, les échantillons sont sciés à l'eau avant d'être collés sur une plaquette de verre puis polis jusqu'à ce que la lame atteigne l'épaisseur souhaitée. Mais cette méthode ne peut être mise en œuvre sur des roches argileuses sans risquer de remanier la matrice. Il a donc fallu trouver un atelier de litholamellage capable de réaliser des lames minces dans des matériaux argileux tout en préservant la structure de l'échantillon.

#### 4.3.1 Argilite de l'Est

Les lames minces d'argilite de l'Est ont été réalisées à l'Université des Sciences et Technologies de Lille 1, par Monsieur Pierre Dorn.

Pour pouvoir réaliser des lames minces ou des surfaces polies sur des roches à forte teneur argileuse, une imprégnation à la résine polyester s'avère indispensable. Cette opération s'effectue sous vide avec une résine très diluée. La durée de ce traitement est fonction du temps de polymérisation de la résine et demande souvent plusieurs semaines. Ensuite toutes les opérations de sciage, rectification sont réalisées avec le matériel habituel mais à sec. Le polissage peut se faire à l'aide de pétrole.

Les lames minces ont toutes été prélevées sur la section entière de l'échantillon dans le plan  $(\vec{n}, \vec{v}_3)$ . Des études antérieures sur plusieurs types de roches orthotropes de révolution ont montré que, lorsque  $\theta = 0^\circ$ , ce plan contient la ligne de plus grande pente du plan de rupture (*Saint-Leu et al.*, 1978 ; *Millien*, 1993). Dans ce plan, le pendage de la stratification et l'orientation de la fissuration sont donc directement mesurables.

#### 4.3.2 Marne du Mont d'Or

Nos échantillons de marne du Mont d'Or ont été imprégnés, dans l'Unité de Science du Sol de Bioclimatologie du Centre INRA de Rennes, par Monsieur Yannick Benard, technicien litholamelleur.

Spécialisé en micromorphologie des sols, l'atelier rennais a adapté les techniques classiques de réalisation de lames minces aux coupes planes de sol qui exigent la conservation de la structure originelle quelles que soient la nature du matériau et sa teneur en eau initiale.

Dans leur laboratoire, la fabrication des lames minces s'effectue en quatre étapes : la déshydratation des échantillons, leur imprégnation à l'aide d'une résine, la découpe de la lame à partir de l'échantillon induré et enfin le polissage.

La déshydratation des échantillons est réalisée suivant deux techniques : la déshydratation par séchage à l'air ou par échange eau/acétone. Pour les échantillons dont la structure est susceptible de varier avec l'humidité (argiles sensibles), comme la marne du Mont d'Or, l'échange eau/acétone est préféré car contrairement à la déshydratation à l'air qui risquerait de provoquer un retrait, il permet de remplacer l'eau par de l'acétone sans modifier la structure de l'échantillon.

L'échange eau/acétone est effectué après la saturation des échantillons par capillarité et, par gain

de temps, en phase vapeur. Sous hotte, dans un circuit fermé constitué de bacs remplis d'acétone dans lesquels sont plongées les boîtes contenant les échantillons, de 3 colonnes de zéolites et d'une pompe péristaltique de  $30 \text{ cm}^3/\text{mn}$ , une circulation continue d'acétone permet le remplacement progressif de l'eau de la roche sans modification de la structure. L'eau est ensuite retenue par les zéolites qui constituent un tamis moléculaire de maille  $4 \text{ \AA}$ .

L'imprégnation des échantillons se fait sous aspiration haute et basse. La résine d'inclusion est une résine liquide de polyester insaturé (Crystic SR 17449) contenant environ 30 % de styrène. L'acétone constitue le solvant du mélange. Un pigment fluorescent (Ciba-Geigy Uvitex OB) excitable en éclairage ultraviolet a été ajouté au mélange. Lors de l'observation des lames sous lampes UV, la porosité et la microfissuration apparaissent ainsi plus nettement. Le mélange d'imprégnation est directement versé sur les échantillons sans que le vide soit nécessaire. L'induration résulte de la polymérisation de la résine qui nécessite 4 à 8 semaines. Une fois imprégnés, les échantillons peuvent être découpés et polis de manière tout à fait classique en utilisant de l'eau.

### **4.3.3 Préparation pour les observations au MEB**

La technique d'observation au MEB nécessite une préparation préalable de l'échantillon qui consiste à recouvrir la surface des lames à observer d'une substance conductrice (or, carbone). Nos lames d'argilite de l'Est ont donc été carbonées après avoir été observées au microscope optique.

La colonne du microscope électronique doit être maintenue sous vide pour deux raisons : d'une part pour éviter l'oxydation de la source, d'autre part pour éviter le freinage et la déviation des électrons par collision avec les molécules d'air. Dans les instruments courants, on utilise une pompe à diffusion d'huile couplée à une pompe primaire à palettes permettant d'atteindre  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  torrs. L'introduction de l'échantillon se fait à travers un sas pour éviter de casser le vide dans la colonne. Mais dans notre cas, la taille des échantillons nous a contraints à l'ouvrir à chaque fois et donc à refaire le vide dans la colonne avant chaque observation.

## **4.4 Observations au microscope optique de l'argilite de l'Est**

Avant d'être carbonées pour être observées au MEB, les lames d'argilite de l'Est ont été étudiées au microscope optique.

Les essais mécaniques réalisés sur les échantillons d'argilite de l'Est dont sont issues nos lames sont rappelés dans le Tableau 4.3. Les lames minces réalisées dans ces échantillons doivent nous permettre d'étudier au niveau microscopique l'influence de la vitesse de chargement et de l'anisotropie sur les modes de déformation et de rupture, ainsi que l'accommodation des déformations dans le temps.



Echantillon	Essai	Vitesse
0°-2 EST 05558	fluage de 321 jours sans rupture	/
0°-1 EST 05558	compression uniaxiale quasistatique	$\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{s}^{-1}$
0°-2 EST 05633		$\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}$
45°-1 EST 05558		$\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{s}^{-1}$
45°-1 EST 05633		$\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{s}^{-1}$

Tableau 4.3 : Rappel des essais mécaniques réalisés sur les échantillons d'argilite de l'Est dont sont issues les lames observées au microscope optique.

#### 4.4.1 Essai de fluage

L'échantillon 0°-2 EST 05558 a subi un fluage de 321 jours sous un déviateur de 26 MPa. Sur la lame correspondant à cet essai (Figure 4.9), aucune fissure n'est visible à l'œil nu. L'essai n'ayant pu être poursuivi jusqu'à la rupture de l'échantillon, l'endommagement n'apparaît pas de manière flagrante. Néanmoins, les mesures de déformation faites par jauges lors de ce fluage de longue durée ont révélé une forte dilatance de l'échantillon.

Sous le microscope optique, à faible grossissement ( $G = 10$ ), l'argilite de l'Est présente une texture granulaire riche en cristaux de calcite et de quartz. Le litage horizontal de cet échantillon est perceptible grâce à une alternance de zones claires (calcite, quartz) et sombres (niveaux plus argileux). Les grains de quartz et de carbonates sont de forme arrondie avec un diamètre de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ .

À faible grossissement, on distingue sur le bord de l'échantillon deux fissures horizontales, suivant le litage de la roche, dont l'une, ramifiée est relativement longues (jusqu'à 8,7 mm) (Figure 4.10).

Les microfissures sont généralement très longues. Elles peuvent être suivies jusqu'à ce que la diminution progressive de leur ouverture les rendent inobservables même au plus fort grossissement ( $G = 45$ ).

Ces microfissures perpendiculaires au chargement appliqué ne témoignent pas de l'endommagement de la roche lors de l'essai mécanique réalisé mais sont plus vraisemblablement dues à la décompression à la décharge de l'échantillon.

De nombreuses taches noires sont présentes au milieu de la lame. Il s'agit des agrégats de pyrite qui mesurent jusqu'à 1 mm de longueur (Figure 4.11 (a))

Les cristaux de pyrite jouent un rôle important dans le développement et la propagation des microfissures. Certaines d'entre elles semblent s'amortir en effet à leur approche. On observe également qu'elles contournent de manière très nette les grains de quartz et de carbonate de calcium (Figure 4.11 (b)).

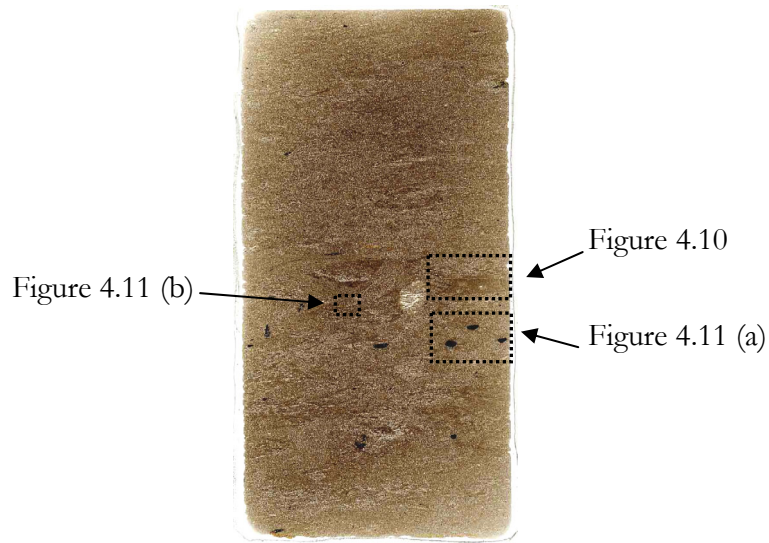


Figure 4.9 : Localisation des photos prises au microscope optique sur l'échantillon d'argilite de l'Est ayant subi un essai de fluage de 321 jours sous 26 MPa (lame 0°-2 EST 05558).

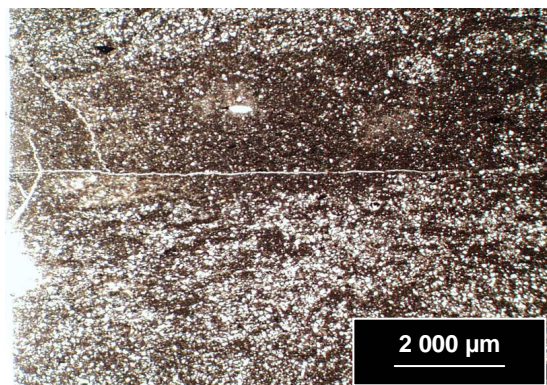
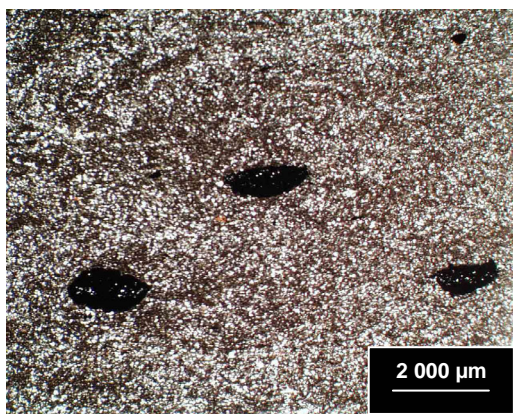
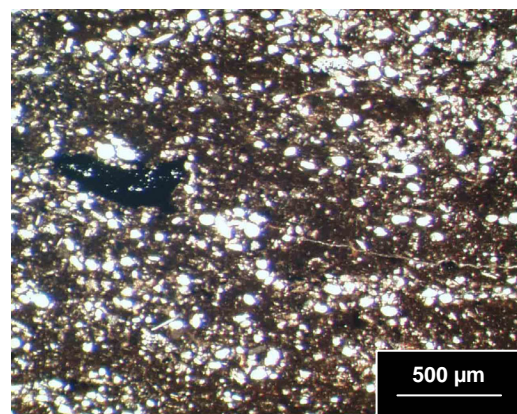


Figure 4.10 : Microfissure horizontale de relaxation : ramification au bord de l'échantillon.



(a)



(b)

Figure 4.11 : Influence de la pyrite sur la propagation de l'endommagement :  
(a) : Agrégats de Pyrite ; (b) : Rétrécissement d'une microfissure horizontale à l'approche d'un agrégat de pyrite.

#### 4.4.2 Essais de compression uniaxiale

Toutes les photos prises lors des observations microscopiques sont localisées sur les vues d'ensemble des lames (Figure 4.12, Figure 4.14 et Figure 4.18).

Sur ces échantillons, l'argilite présente une texture granulaire riche en cristaux de calcite et de quartz d'un diamètre moyen de 100  $\mu\text{m}$ , cimentés par une matrice argileuse.

##### 4.4.2.1 Influence de la vitesse de sollicitation

L'échantillon 0°-1 EST 05558 a subi une compression uniaxiale à la vitesse de  $\dot{\epsilon} = 10^{-8}\text{s}^{-1}$ . L'éprouvette rompue présente une fissure verticale, caractéristique de la rupture fragile, qui recoupe la face supérieure de l'échantillon en son milieu. A la base de l'éprouvette, on observe la formation d'un cône de freinage (orienté à environ 60° par rapport à l'horizontale), bien visible sur les photos prises au microscope optique (Figure 4.13 (a)).

L'ouverture de la fissure verticale diminue progressivement et l'écartement des épontes a été mesuré en plusieurs points. Au niveau du sommet du cône de freinage, il mesure 350  $\mu\text{m}$  ; en haut de l'éprouvette, les épontes ne sont plus écartées que de 70  $\mu\text{m}$  (Figure 4.13 (b)).

Les photos de l'éprouvette rompue ont montré également un écaillage superficiel que l'on retrouve sur les photos prises lors des observations microscopiques (Figure 4.13 (c)). Des marqueurs granulaires (décrochement) permettent de mesurer le déplacement vertical et de suivre le mouvement qui reste très faible (Figure 4.13 (d)).

L'échantillon 0°-2 EST 05633 a subi une compression uniaxiale à la vitesse de  $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ . Cette fois encore, l'éprouvette rompue présente une fissure verticale, qui recoupe la face supérieure de l'échantillon en son milieu, ainsi qu'un cône de freinage dans sa partie basse, orienté à environ 60° par rapport à l'horizontale (Figure 4.15). Cependant, les fissures principales sont moins nettes et l'échantillon semble beaucoup plus microfissuré.

A faible grossissement, le réseau de fissures et de microfissures semble dense et leur répartition aléatoire. Deux largeurs de fissures sont principalement représentées : 500  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$ .

On trouve dans cet échantillon de nombreuses taches noires de pyrite, parfois entourées d'un halo orangé. Ces agrégats sont souvent fracturés et la pyrite se retrouve sur les deux épontes de la fissure (Figure 4.16).

Dans le halo orangé, en lumière réfléchie, on distingue des reflets métalliques : il s'agit donc très probablement de limonite, minéral d'altération de la pyrite (Figure 4.17 (b)). Cette coloration ocre autour des glomérules pyritisés montre qu'ils sont un peu altérés.

En bas à gauche de l'échantillon, on remarque un point dur autour duquel les fissures sont déviées et se ramifient. En lumière polarisée, il semble qu'il s'agisse d'un gros cristal de quartz dont le diamètre est de l'ordre de 1,5 mm (Figure 4.17 (c)).

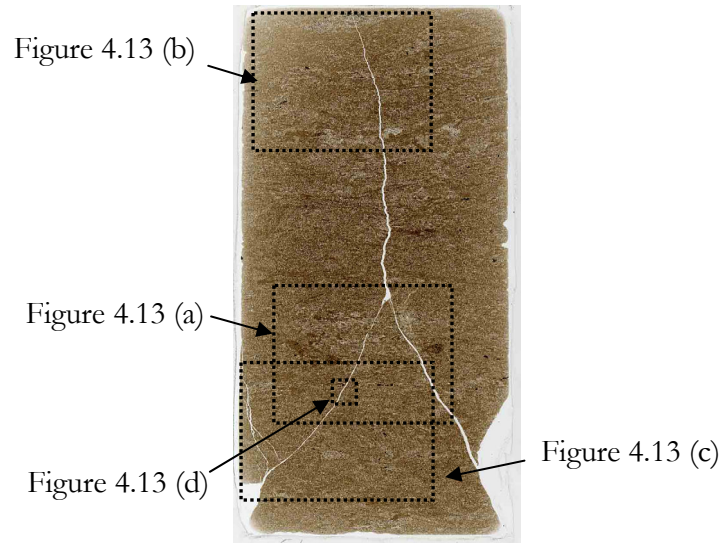


Figure 4.12 : Localisation des photographies prises au microscope optique sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-1 EST 05558 ayant subi une compression uniaxiale à  $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

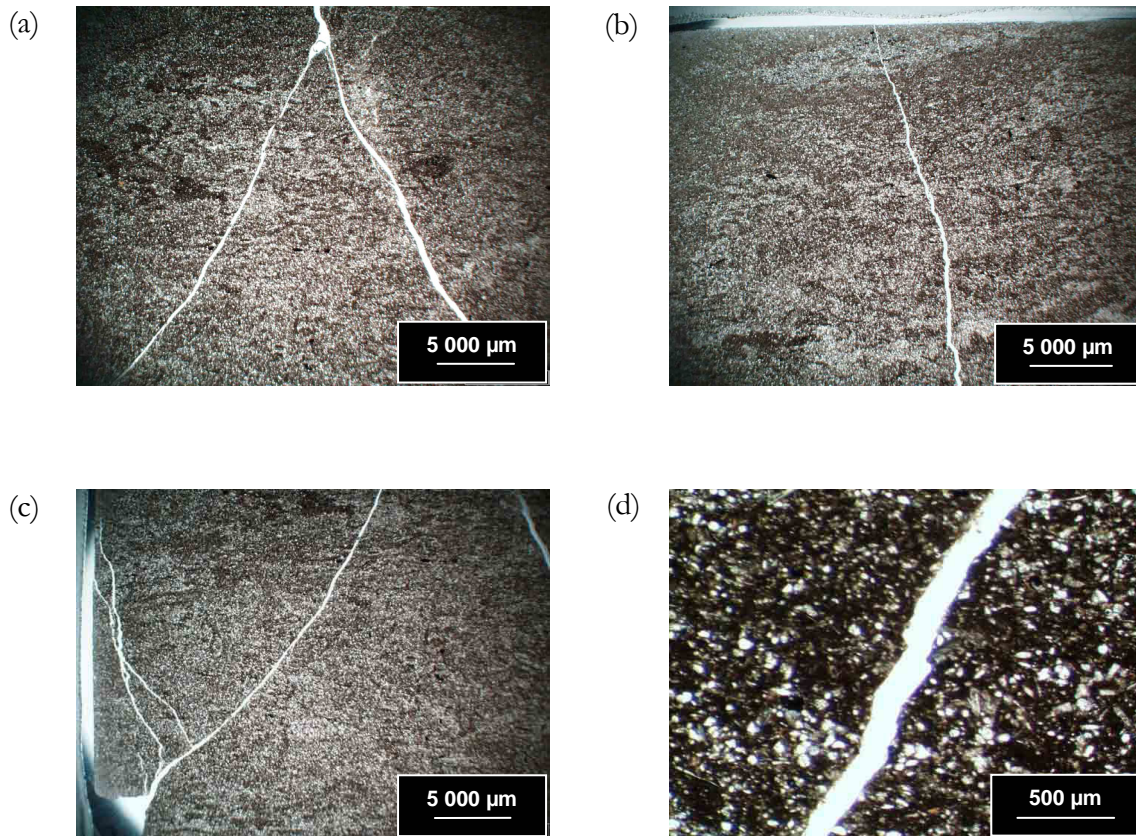


Figure 4.13 : Fissuration de l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-1 EST 05558 :  
 (a) : Cône de frettage ; (b) : Diminution progressive de l'ouverture de la fissure principale ;  
 (c) : Ecaillage superficiel de l'éprouvette au bord du cône de frettage ;  
 (d) : Décrochement sur la fissure principale : indicateur du mouvement

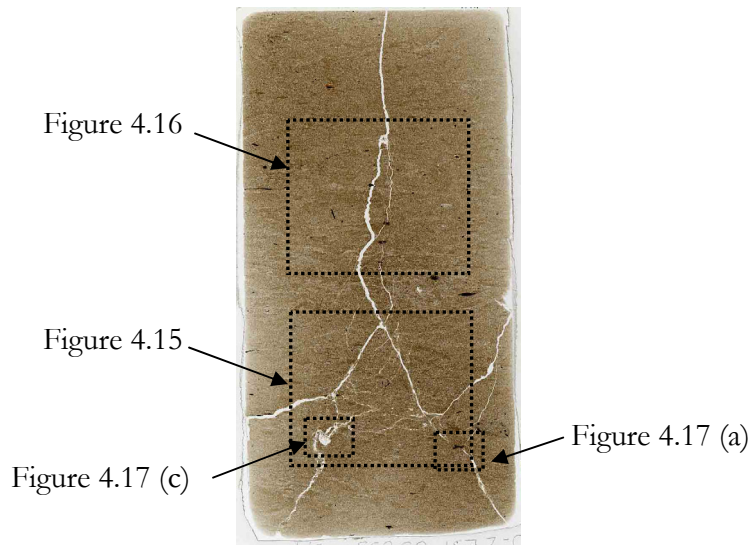


Figure 4.14 : Localisation des photographies prises au microscope optique sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-2 EST 05633 (ayant subi une compression uniaxiale à  $\dot{\epsilon} = 10^4 s^{-1}$ ).

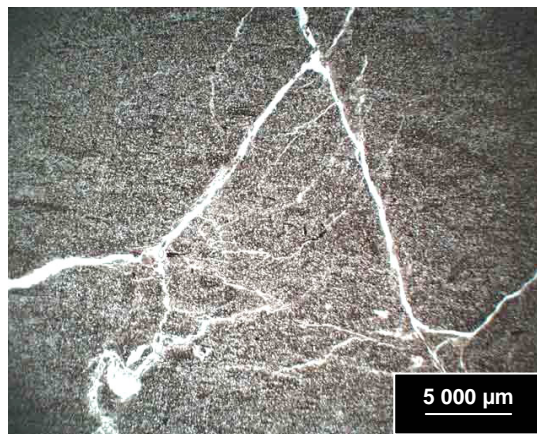


Figure 4.15 : Cône de frettage dans la lame 0°-2 EST 05633.



Figure 4.16 : Rôle des agrégats de pyrite dans le développement de la fissuration de l'échantillon 0°-2 EST 05633.

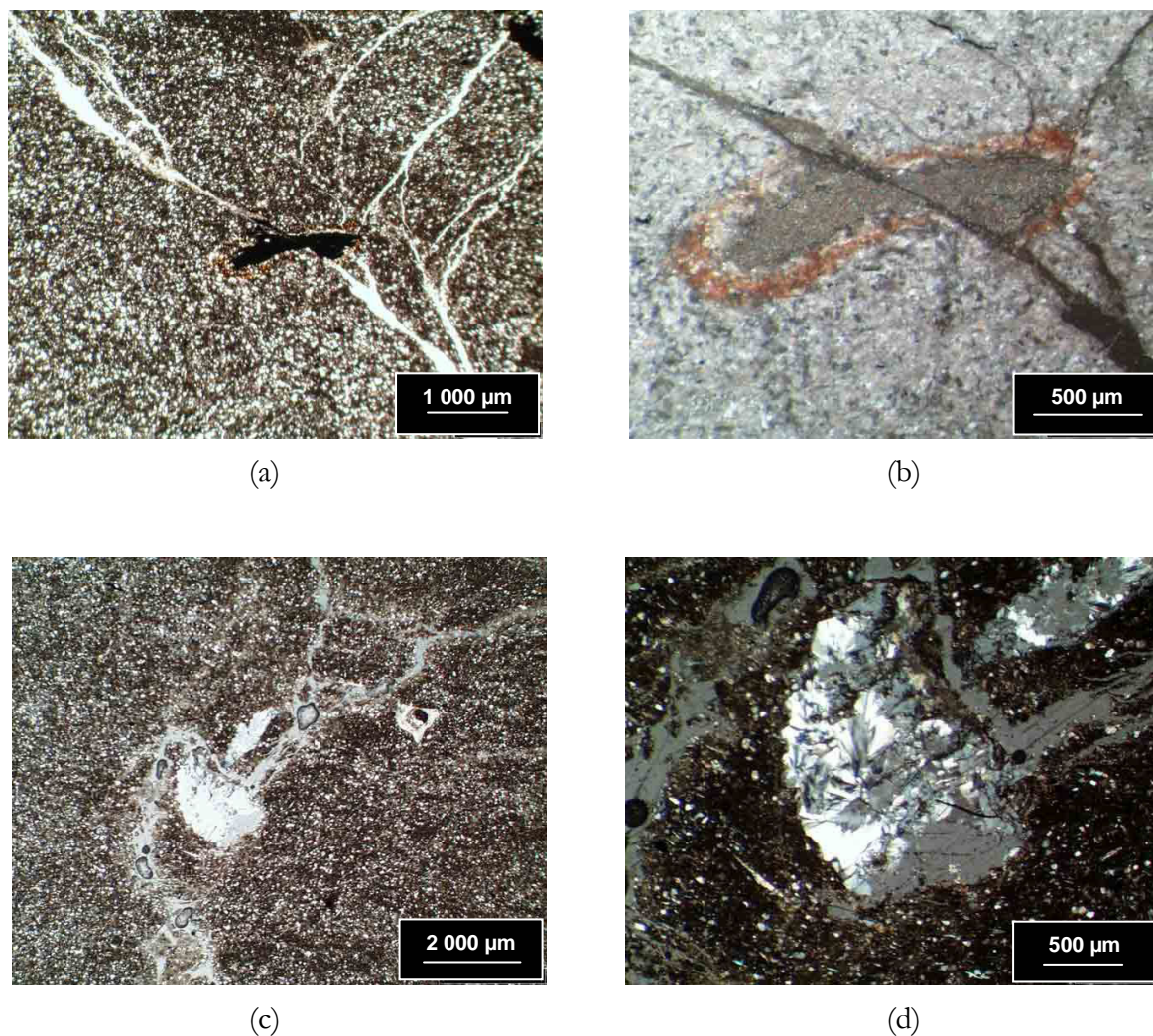


Figure 4.17 : Influence de la pyrite et du quartz sur la microfissuration dans la lame 0°-2 EST 05633 :

(a) : Cisaillement de l'agrégat de pyrite altéré en limonite ; (b) : Zoom sur l'agrégat en lumière réfléchie.  
(c) : Microfissuration autour du point dur ; (d) : Vue en lumière polarisée : gros cristal de quartz.

#### 4.4.2.2 Influence de l'orientation des éprouvettes

Les échantillons 45°-1 EST 05558 et 45°-1 EST 05633 ont subi le même type d'essai : une compression uniaxiale à la vitesse  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{s}^{-1}$ . Les photographies prises au microscope optique et commentées dans ce paragraphe sont localisées sur chacune des lames des Figure 4.18 et Figure 4.21.

Comme pour les autres échantillons, le litage, orienté ici à 45°, est perceptible à l'œil nu grâce à une alternance de zones claires (calcite, quartz) et de zones plus sombres (niveaux plus argileux).

On distingue grossièrement deux réseaux principaux de fissures : les unes, subverticales, les autres, orientées suivant la stratigraphie (Figure 4.19). L'orientation du litage et l'anisotropie induite de l'argilite de l'Est influencent clairement le mode de rupture des échantillons : les

fissures sont en plusieurs endroits déviées et s'orientent dans le sens de la stratigraphie. Ce changement d'orientation de la fissuration est probablement dû à l'influence conjuguée du frettage et du litage. En effet, bien que nous ayons essayé dans le protocole expérimental de le limiter, le frettage peut avoir induit une rotation des plans de rupture qui se sont ensuite orientés dans le litage.

Les microfissures *perpendiculaires* à la stratigraphie sont sinueuses et très ramifiées (Figure 4.22 (c)).

Dans la lame 45°1 EST 05558, les agrégats de pyrite apparaissent sous forme de glomérules framboïdaux (Figure 4.20).

Dans le coin inférieur droit de la lame 45°1 EST 05633, on observe de multiples fissures verticales recoupées par une microfissure horizontale, qui peut être antérieure à l'essai et cisaille un agrégat framboïdal de pyrite (Figure 4.22 (a)).

On distingue également une série de petites fissures parallèles entre elles bien que non orientées dans le litage (Figure 4.22 (b) et (c)).

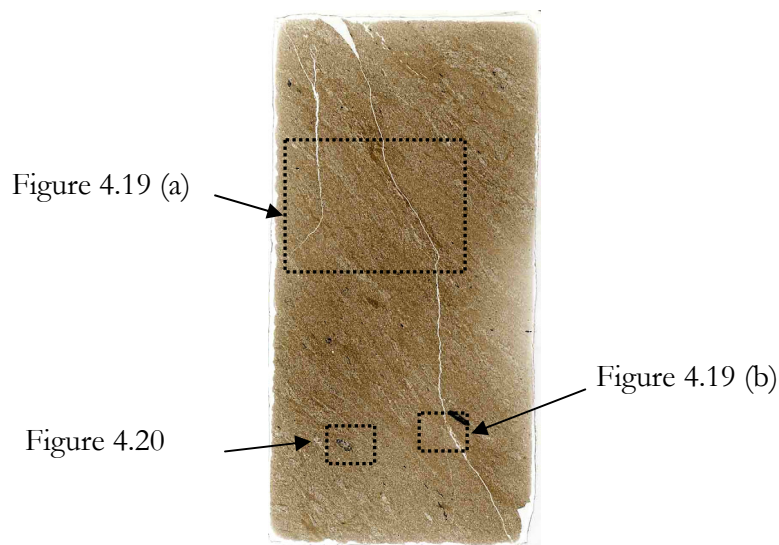
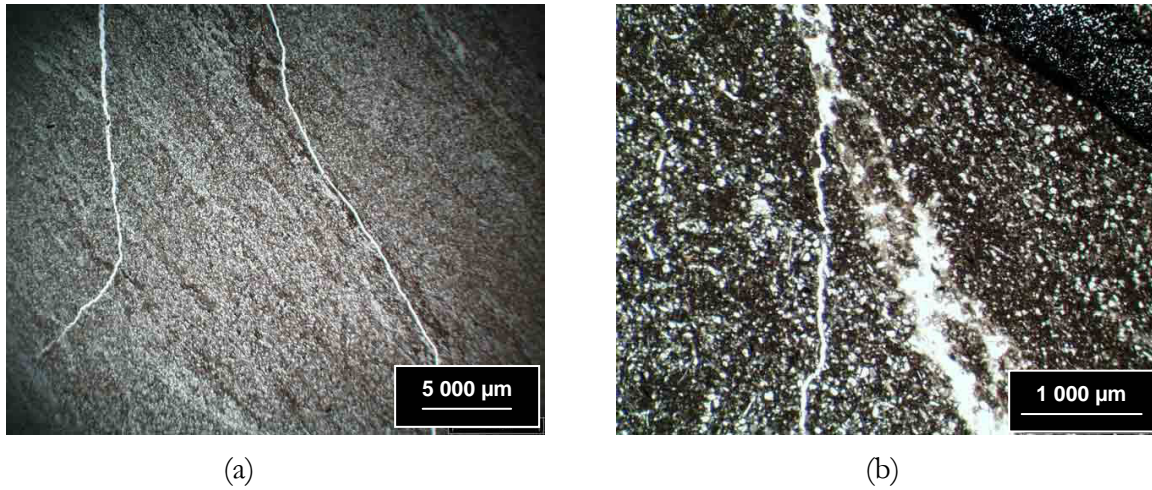
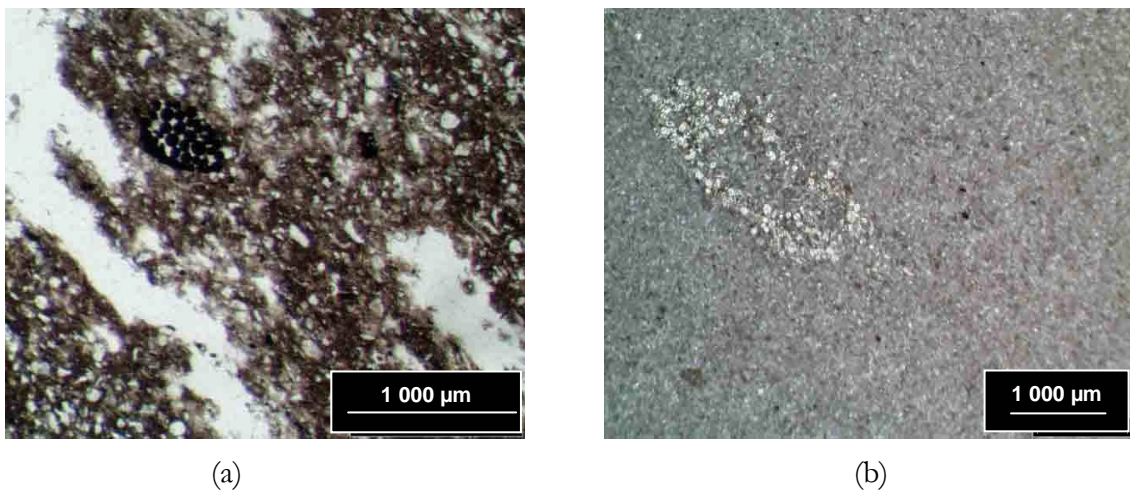


Figure 4.18 : Localisation des photos prises au microscope optique sur l'échantillon d'argilite de l'Est 45°1 EST 05558 ayant subi une compression uniaxiale à  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} s^{-1}$ .



*Figure 4.19 : Fissuration de l'échantillon 45°1 EST 05558 :  
(a) : Orientation des fissures dans le sens de la stratigraphie ; (b) : Relais de fissures ;*



*Figure 4.20 : agrégats framboïdaux de pyrite :  
(a) en lumière naturelle ; (b) : en lumière réfléchie.*



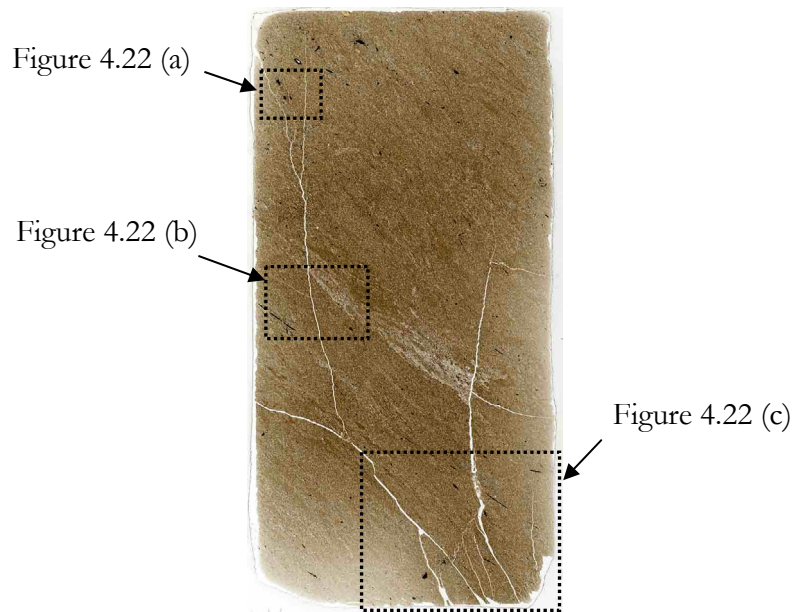


Figure 4.21 : Localisation des photos prises au microscope optique sur l'échantillon d'argilite de l'Est 45°1 EST 05633 ayant subi une compression uniaxiale à  $\dot{\epsilon} = 10^{-6} s^{-1}$ .

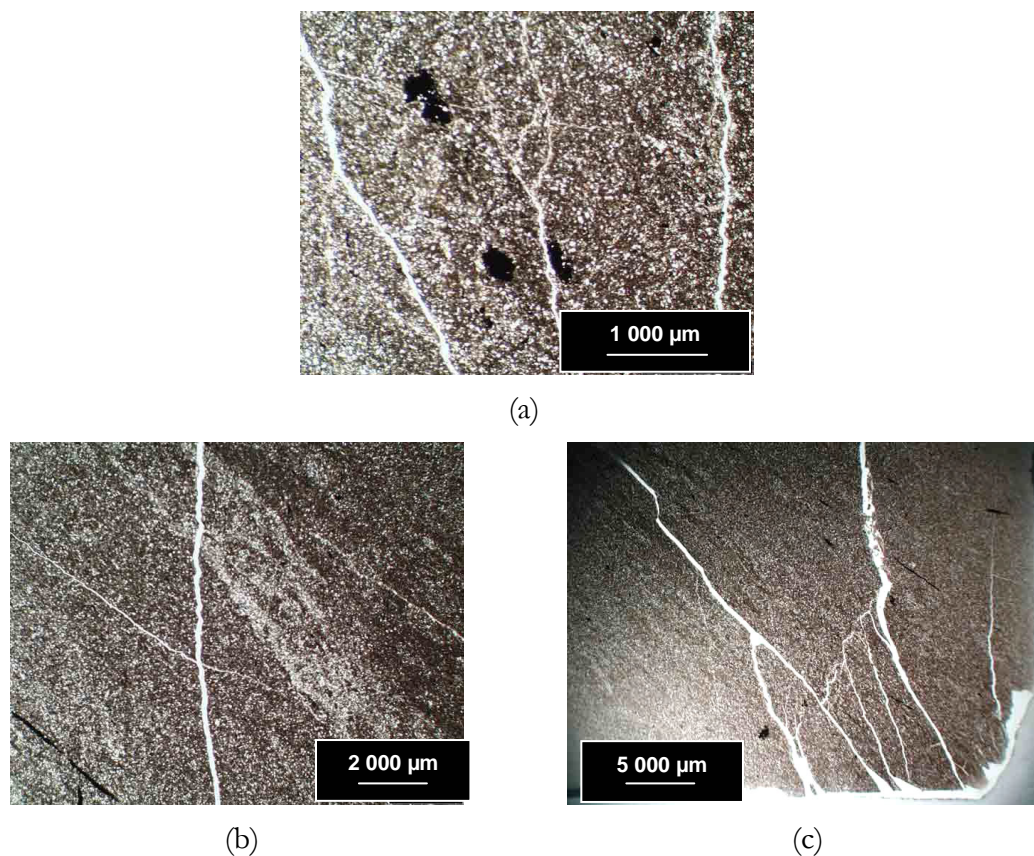


Figure 4.22 : Microfissuration de l'échantillon d'argilite de l'Est 45°1 EST 05633  
(a) : Fissures subverticales recoupées par une microfissure horizontale. ; (b) Fissures non parallèles au litage mais parallèles entre elles et recoupant une fissure verticale ; (c) : Fissures perpendiculaires au litage reliant les fissures principales verticales déviées par la stratigraphie.

### 4.4.3 Premières conclusions

De ces observations au microscope optique des lames minces issues d'échantillons d'argilite de l'Est testé en compression uniaxiale (fluage et chargement à vitesse contrôlée), il ressort plusieurs conclusions.

L'anisotropie structurale, liée au litage de l'argilite de l'Est, joue un rôle important sur le mode de rupture de la roche. Les fissures verticales consécutives à la rupture fragile s'orientent nettement dans le litage dans nos échantillons 45°-1 EST 05558 et 45°-1 EST 05633.

La pyrite présente sous forme d'agrégats framboïdaux semble contrôler le développement de la microfissuration. Ces agrégats constituent des zones de faiblesse que les fissures n'ont pas de mal à traverser. Ainsi ils sont très souvent cisailés.

Bien que l'échantillon 0°-1 EST 05558 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8}\text{s}^{-1}$ ) soit moins fissuré que l'échantillon 0°-2 EST 05633 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ), il est difficile de conclure sur l'influence de la vitesse de déformation sur le mode de rupture de l'argilite de l'Est.

A cette échelle, rien ne permet d'expliquer la forte dilatation mesurée lors de l'essai de fluage.

## 4.5 Observations de la marne du Mont d'Or sous Ultraviolets

### 4.5.1 Introduction

Nos échantillons de marne du Mont d'or ont été imprégnés avec une résine contenant un pigment fluorescent excitable par un éclairage ultraviolet. Afin d'étudier la porosité et la microfissuration de cette roche, des tranches d'épaisseur 5 mm ont été découpées dans ces échantillons, perpendiculairement aux plans des fissures principales. Elles ont été ensuite observées au microscope optique sous lampes UV.

Nous présentons ici le résultat de cette étude. Les essais mécaniques réalisés sur les échantillons de marne du Mont d'Or dont sont issues les cinq lames étudiées, sont rappelés dans le Tableau 4.4. Ces lames vont nous permettre d'étudier l'influence de la vitesse de chargement sur le mode de rupture de la marne du Mont d'Or.

Echantillon	Essai	Vitesse
MO – 1.1	Compression uniaxiale	$6.10^{-8}$
MO – 9.1		$8.10^{-7}$
MO – 9.2		$8.10^{-7}$
MO – 11.1	Compression uniaxiale avec palier de relaxation	$8.10^{-9}$
MO – 11.2	Compression uniaxiale avec cycles de charge - décharge	$5.10^{-7}$

Tableau 4.4: Description des lames de marne du Mont d'Or observées au microscope optique sous lampes UV.

Avec une dizaine de photos couvrant la surface des lames et un montage, nous avons pu reconstituer des vues complètes des éprouvettes étudiées. Ces vues en noir et blanc des cinq échantillons sont présentées sur la Figure 4.23.

Bien que le litage ne soit pas visible à l'œil nu, les mesures de vitesses soniques ont révélé que la marne du Mont d'Or est légèrement anisotrope. L'orientation des carottes n'ayant pas été notée au moment de leur prélèvement, cette caractéristique de la roche n'a pu être prise en compte dans l'étude mécanique mais elle a pu influencer le mode de rupture à l'échelle microscopique.

Mis à part l'échantillon MO 11.1 dont le mode de rupture est plus singulier, ces échantillons de marne du Mont d'Or testés en compression uniaxiale avec des vitesses de déformation comprises entre  $5.10^{-7}$  et  $8.10^{-9}$ , présentent la fissuration classique d'une rupture fragile. On retrouve en effet un réseau de fissures subverticales qui recoupent sans frottement les faces supérieures et inférieures des échantillons. Les épentes franches sont caractéristiques de ce mode de rupture par extension.

Nos échantillons présentent deux réseaux principaux de fissures : les unes subverticales avec une épaisseur de l'ordre de 1 mm, les autres subhorizontales (ou orientées dans le litage de la roche) d'une épaisseur moyenne de 300  $\mu\text{m}$ .

La rupture de l'échantillon MO 9.2 s'est produite suivant un plan de faiblesse orienté à  $45^\circ$  d'après les photographies de l'éprouvette. Il correspond très probablement à l'orientation de la stratigraphie. Le pendage apparent de ce plan sur la tranche de l'échantillon étudiée ici est orienté à  $20^\circ$ . De nombreuses fissures principales se développent parallèlement à cette direction.

On peut faire les mêmes observations sur l'échantillon MO 11.2. Les deux réseaux de fissures subhorizontales et subverticales sont complétés par un réseau connexe de microfissures qui relie entre eux les deux autres (Figure 4.24). Ce mécanisme de rupture se retrouve également dans les échantillons MO 9.1 et MO 1.1.

En ce qui concerne l'échantillon MO 11.1, il présente une rupture fragile caractérisée par une importante fissure d'extension verticale mais aussi une zone centrale très perturbée avec un réseau dense de microfissures (Figure 4.25). On distingue également un second réseau de fissures avec un pendage apparent de  $15^\circ$ , correspondant probablement au litage de l'échantillon.

#### **4.5.2 Observations au microscope optique**

Le mélange d'imprégnation utilisé pour consolider nos échantillons de marne du Mont d'Or a permis le découpage de tranches de 5 mm d'épaisseur et leur polissage à l'eau sans altération de la matrice argileuse. Grâce à cette imprégnation de la matrice et au pigment fluorescent ajouté au mélange, nous avons observé la porosité de la roche.

Sur les photos prises sous le microscope optique à fort grossissement, on distingue quelques taches dans la matrice. Si on les assimile à la porosité de la marne du Mont d'Or, on peut en déduire que celle-ci est principalement liée à la microfissuration de la roche. Elle se localise aux frontières des grains (Figure 4.27). La porosité de cette marne serait donc une porosité interagrégat ou interparticulaire.

Les marques de stratification ne sont pas visibles. On devine cependant que la microfissuration

s'oriente de manière préférentielle dans le litage de la roche. On observe en effet des réseaux secondaires de microfissures parallèles entre elles avec un pendage apparent compris entre 20° et 45°. Ces microfissures sont tortueuses, leur géométrie semblant déterminée par la granulométrie de la roche : elles contournent les grains et se localisent dans la matrice argileuse.

D'autre part, il apparaît que le développement de l'endommagement fait intervenir deux mécanismes distincts : la propagation et la coalescence des fissures, comme on peut le voir sur les photos des Figure 4.28 et Figure 4.29.

On relève également les traces d'une activité biologique dans cette roche. Comme souvent dans ces roches sédimentaires, on observe la présence d'un terrier. La forme de cet ichnofossile est nettement visible sur la Figure 4.26.

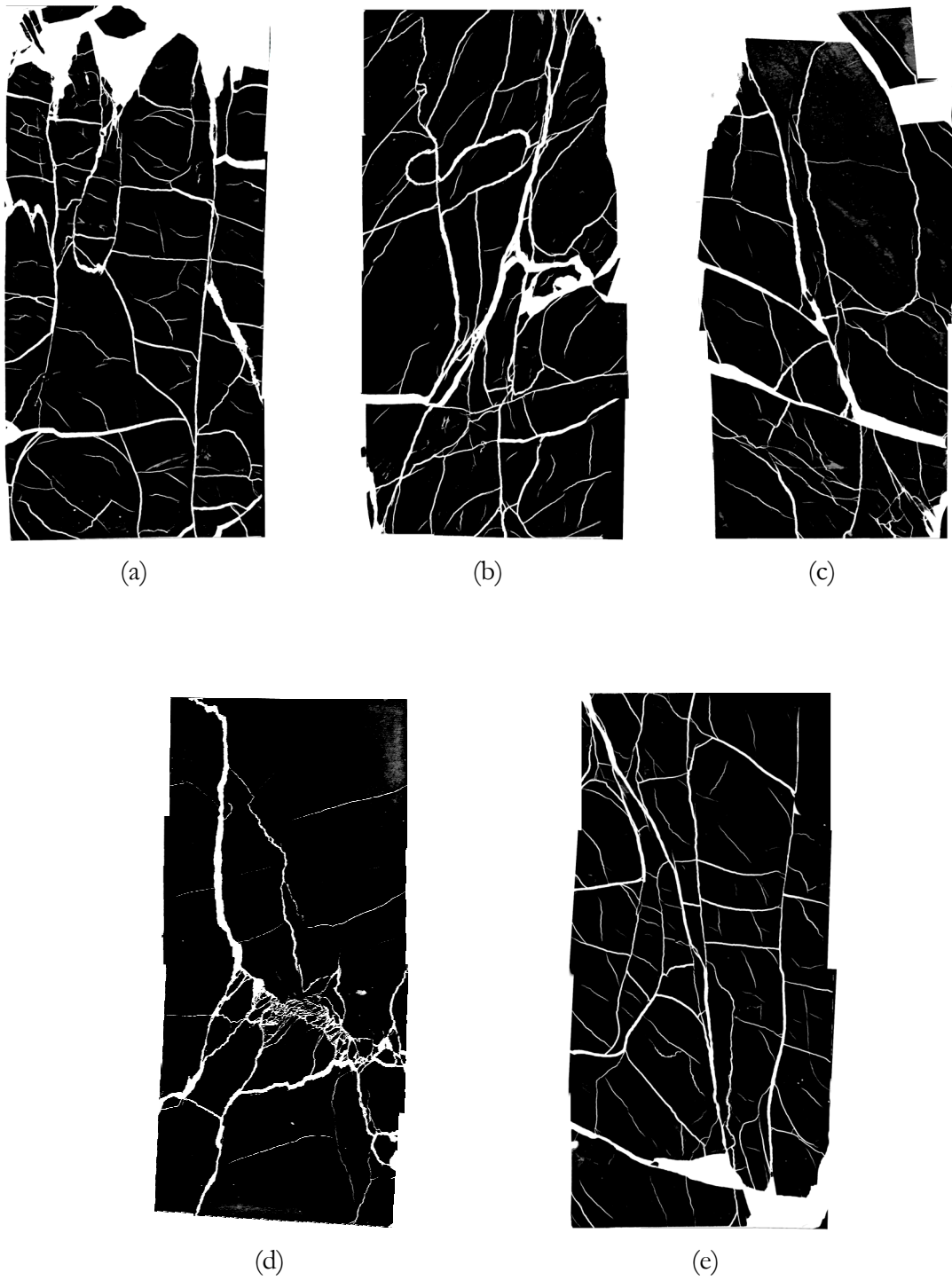
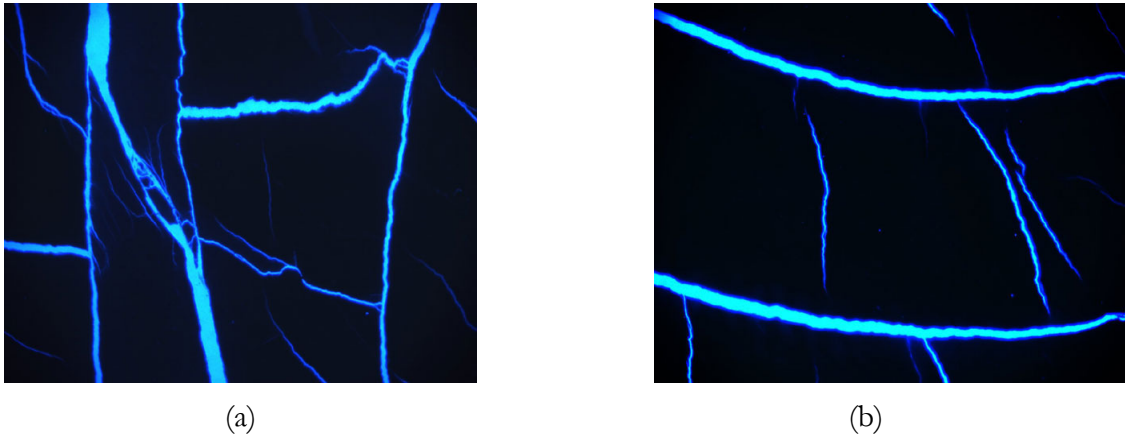
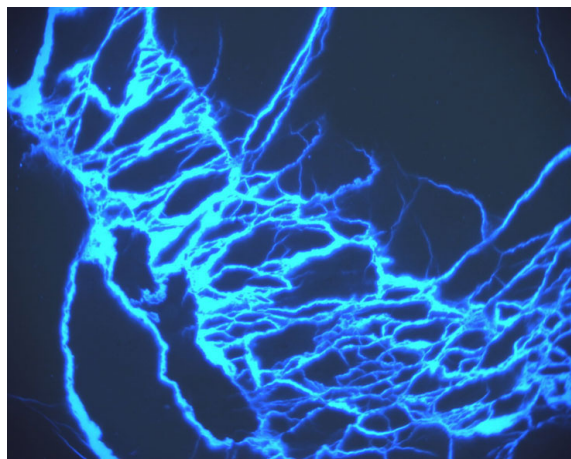


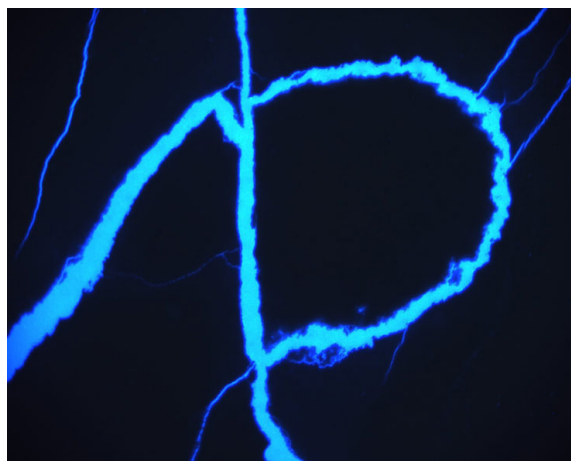
Figure 4.23 : Vues reconstituées des cinq éprouvettes rompues de marne du Mont d'Or :  
(a) Echantillon MO 1.1 (b) : Echantillon MO 9.1 ; (c) : Echantillon MO 9.2 ;  
(d) Echantillon MO 11.1 ; (e) : Echantillon MO 11.2



*Figure 4.24 : Microfissuration principale et connexe dans l'échantillon MO 11.2. (Grossissement : 1,5)*



*Figure 4.25 : Zone centrale perturbée dans l'échantillon MO 11.1 (Grossissement : 1,5).*



*Figure 4.26 : Activité biologique fossile dans l'échantillon MO 9.1 (Grossissement : 1,5).*

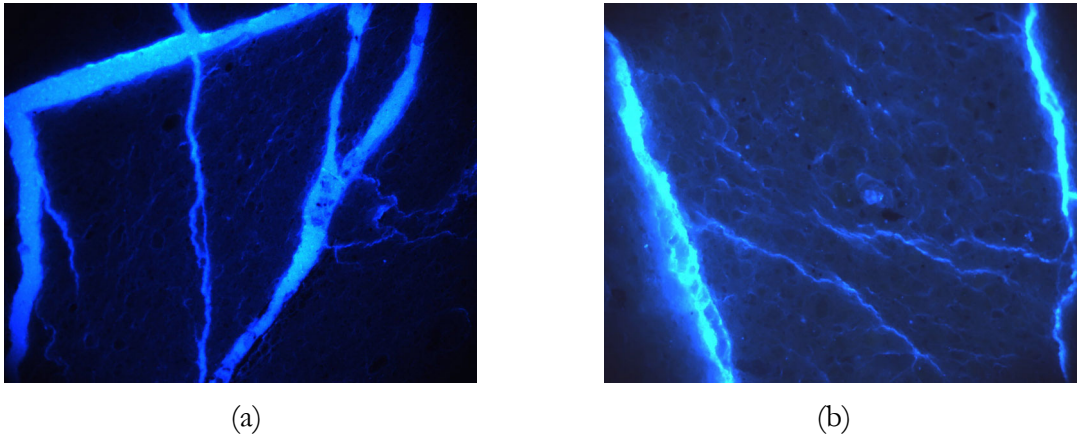


Figure 4.27 : Endommagement de la matrice argileuse dans l'échantillon MO 9.1 et MO 9.2 :  
(a) : dans l'échantillon MO 9.1 ; (b) dans l'échantillon MO 9.2 (Grossissement : 20).

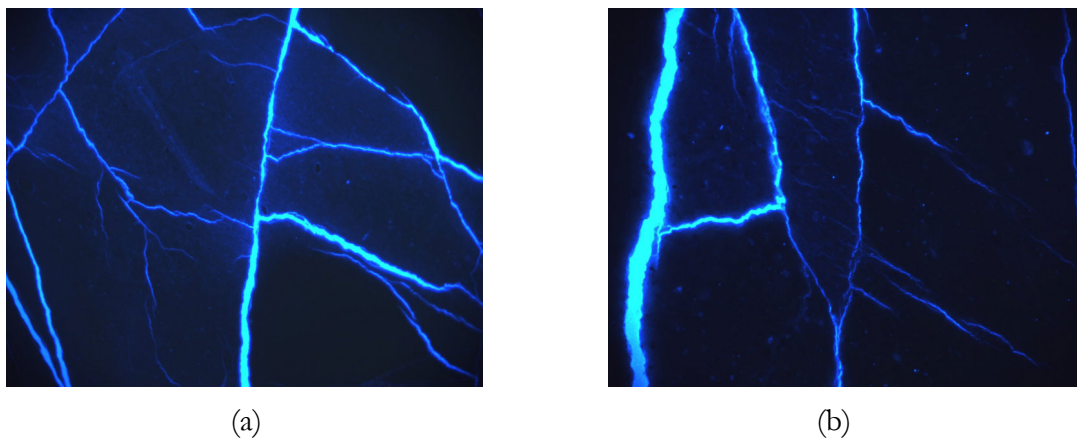


Figure 4.28 : Coalescence de microfissures dans l'échantillon MO 9.2 :  
(a) : Grossissement : 1,5 ; (b) : Grossissement : 5.

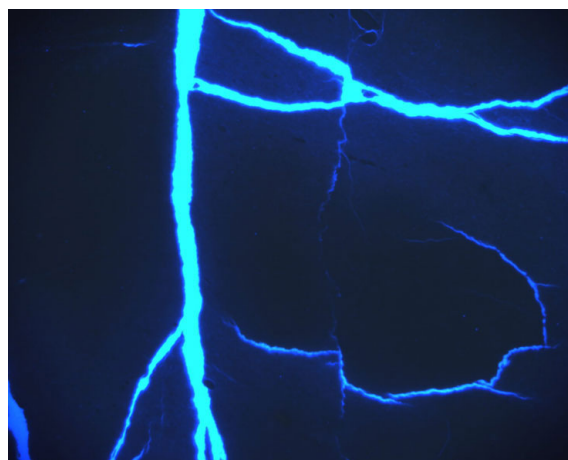


Figure 4.29 : Coalescence de microfissures dans l'échantillon MO 1.1 (Grossissement : 1,5).

## **4.6 Observations au Microscope Electronique à Balayage de l'argilite de l'Est**

Nous présentons dans ce paragraphe les observations effectuées sur des images de lames minces d'argilite de l'Est obtenues au microscope électronique à balayage en mode électrons rétrodiffusés, pour la plupart. Dans ces conditions d'analyse, les niveaux de gris affectés aux minéraux sont fonction de la masse atomique du minéral. Aux éléments les plus lourds correspondent les niveaux de gris les plus clairs.

Les photos MEB ont toutes été prises sans rotation de la lame. L'axe vertical des photos correspond à l'axe vertical des lames et coïncide donc avec l'axe du chargement.

Les observations MEB sur l'argilite de l'Est ont été effectuées sur les lames correspondant aux échantillons :

- 0°-1 EST 05558 : essai quasi statique :  $\dot{\epsilon} = 10^{-8}\text{s}^{-1}$ ,
- 0°-2 EST 05558 : fluage,
- 0°-2 EST 05633 :  $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ,
- 45°-1 EST 05558 : essai de compression uniaxiale,  $\dot{\epsilon} = 10^{-6}\text{s}^{-1}$ ,
- 45°-1 EST 05633 : essai de compression uniaxiale,  $\dot{\epsilon} = 10^{-6}\text{s}^{-1}$ .

Nous avons également pu approfondir les premières observations MEB réalisées par Boidy (2002) sur une lame d'argilite de l'Est, issue d'un échantillon testé en compression uniaxiale à différentes vitesses de chargement, puis en relaxation.

### **4.6.1 Essai de fluage**

L'échantillon 0°-2 EST 05558 a été soumis à un déviateur de 26 MPa qui a été maintenu constant pendant 321 jours. Malgré la longueur de cet essai, la phase de fluage tertiaire et la rupture de l'échantillon n'ont pas été atteintes sous ce déviateur. L'essai a été interrompu au bout de 321 jours.

Les points d'analyse minéralogique réalisés sur différents grains ont permis d'identifier leur nature d'après leur composition chimique : calcite, quartz, pyrite et mica (Figure 4.30 à Figure 4.33).

Les grains de carbonates, de formes arrondies, ont un diamètre relativement grand, souvent supérieur 100  $\mu\text{m}$ . Les cristaux de quartz sont plus petits avec un diamètre de l'ordre de 80  $\mu\text{m}$ .

Sur cette lame, on observe un endommagement diffus dans tout l'échantillon avec un réseau de fissures horizontales plus ou moins tortueuses, qui se sont vraisemblablement ouvertes à la décharge de l'échantillon (Figure 4.34).

Quelques fissures verticales de quelques microns d'ouverture (6-10 $\mu\text{m}$ ) sont visibles (Figure 4.35). Bien que peu nombreuses et dispersées dans la lame, elles peuvent permettre d'expliquer en partie la forte dilatance mesurée lors de cet essai.

Les fissures se localisent essentiellement dans la matrice argileuse, elles contournent les grains dont la résistance est plus élevée. Peu de cristaux sont fissurés mais ce sont essentiellement les grains de carbonates qui présentent des microfissures intragranulaires. Elles apparaissent nettement en mode électrons rétrodiffusés (Figure 4.30).

La pyrite très dense apparaît sous forme de tâches blanches. Les agrégats framboïdaux peuvent parfois être très étendus mais les fissures cisailent les agrégats sans en fracturer les cristaux (Figure 4.36).



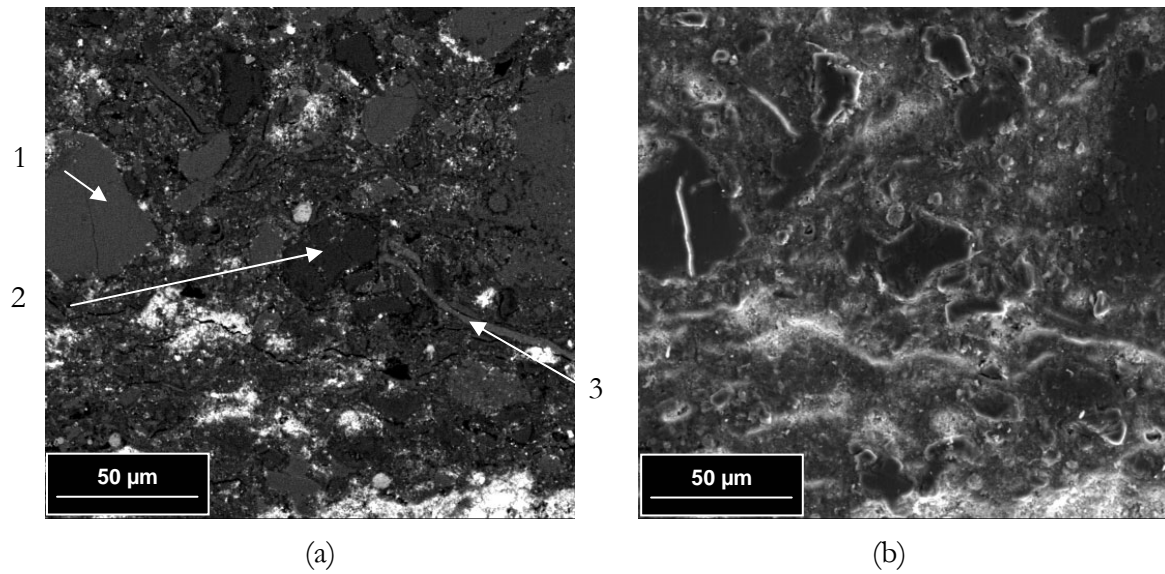


Figure 4.30 : Vue de la matrice argileuse : (a) en mode électrons retrodiffusés ; (b) en mode électrons secondaires.  
 1 : Grain de carbonate fracturé, 2 : Grain de quartz, 3 : Mica.

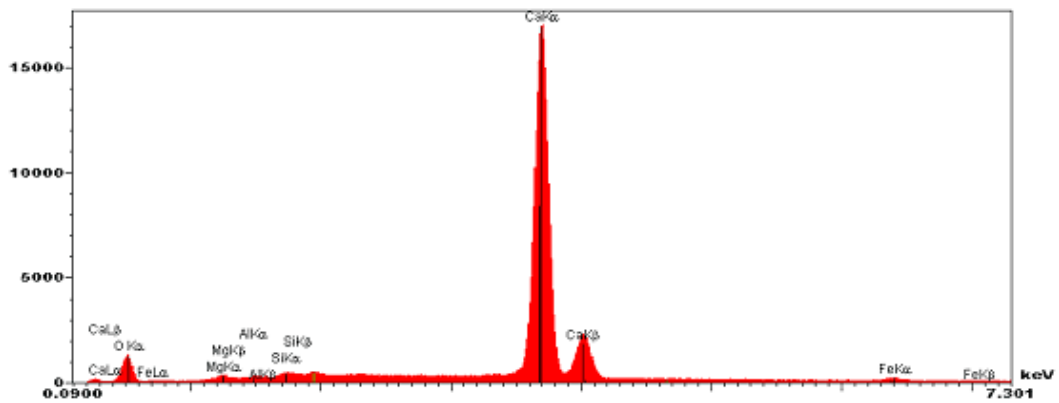


Figure 4.31 : Spectre d'émission du grain 1 : Carbonate de calcium.

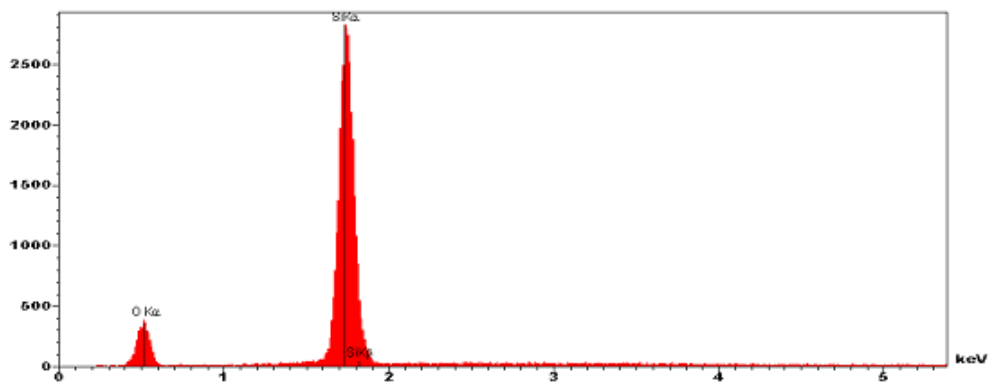


Figure 4.32 : Spectre d'émission du grain 2 : quartz

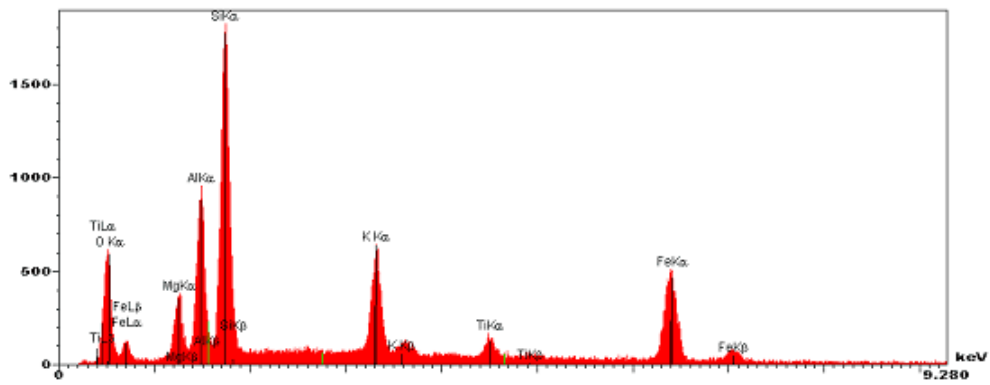


Figure 4.33 : Spectre d'émission du grain 3 : Mica.

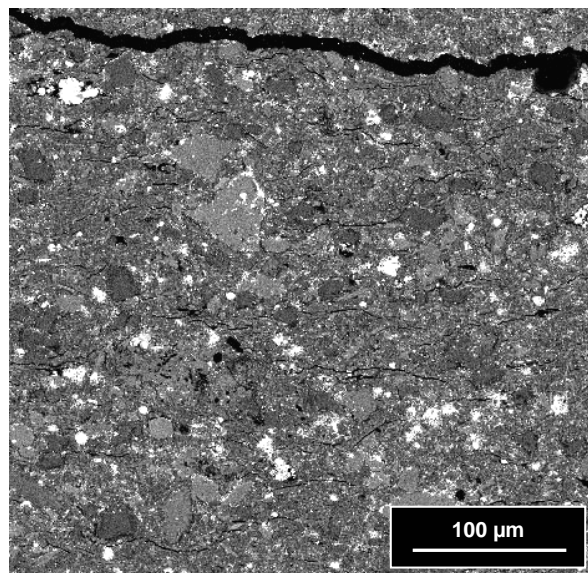


Figure 4.34 : Endommagement diffus de la matrice argileuse : fissure principale et microfissures horizontales de relaxation.

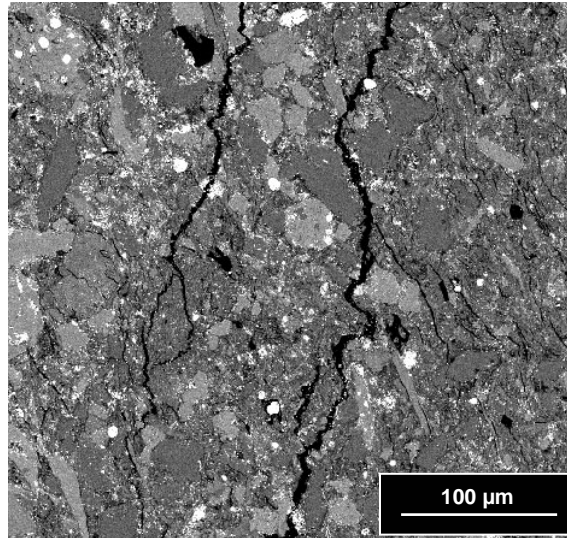


Figure 4.35 : Fissures verticales contournant les grains de quartz et calcite, cisillant les agrégats framboïdaux de pyrites.

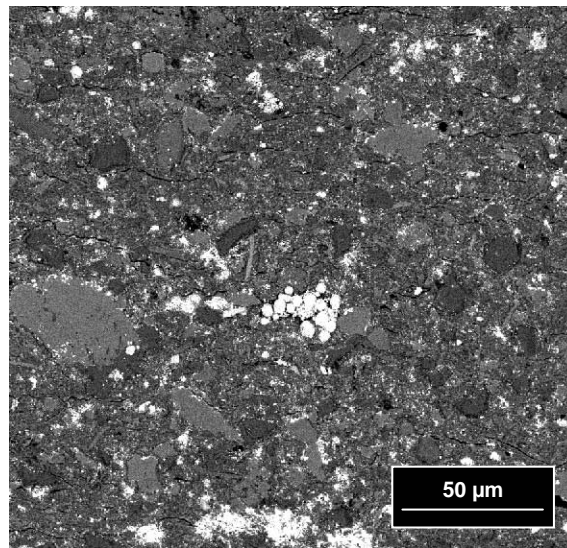


Figure 4.36 : Agrégats framboïdaux de pyrite.

## 4.6.2 Essais de compression uniaxiale

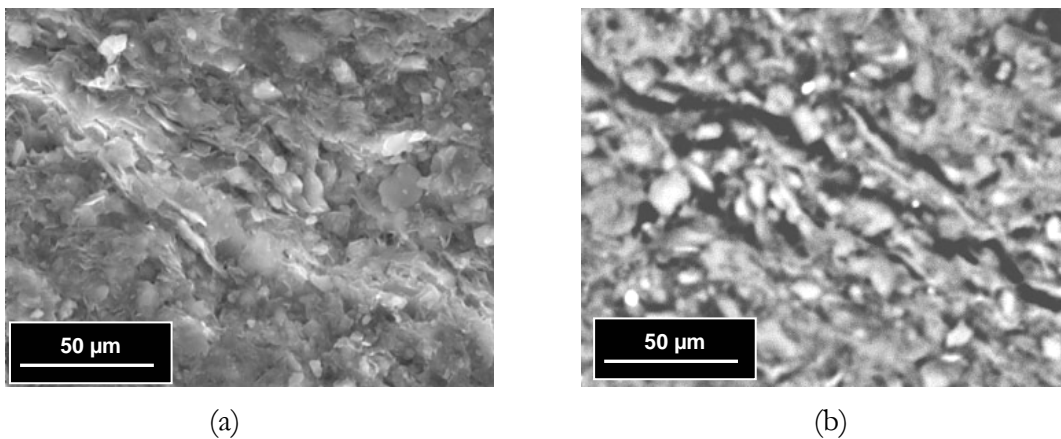
### 4.6.2.1 Essai de compression/relaxation

Nous avons pu réaliser une étude approfondie de la lame issue d'un échantillon d'argilite de l'Est testé par *Boidy* (2002) en compression sous différentes vitesses de chargement, puis en relaxation. L'échantillon présentait un litage horizontal.

Les photos MEB présentées dans ce paragraphe ont été réalisées à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers par P. Dudoignon.

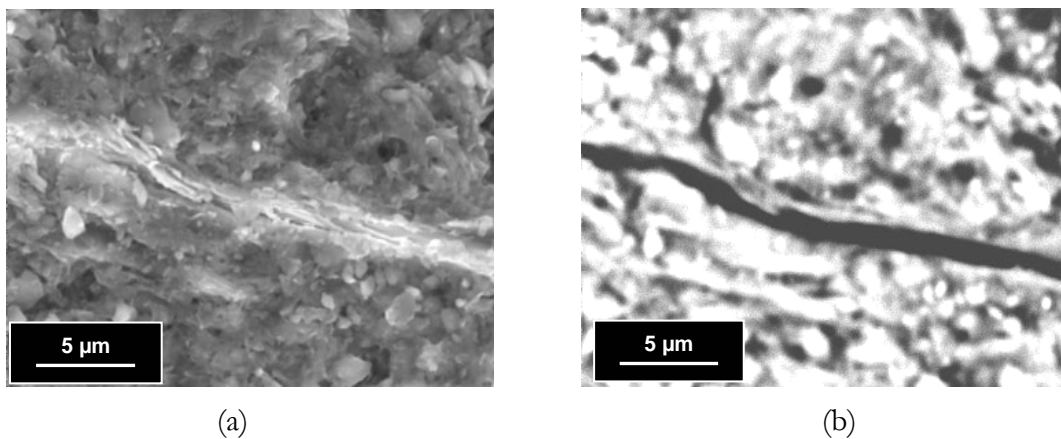
On observe ici la présence d'une microfissuration de la matrice argileuse associée à des plans de cisaillement. Le long de ces plans, les particules argileuses semblent se réorienter face contre face (Figure 4.37 et Figure 4.38). Sur les Figure 4.37 (b) et Figure 4.38 (b), l'axe de la microfissure apparaît en noir. L'arrangement des particules affecte une zone de 10 à 20  $\mu\text{m}$  d'épaisseur autour de l'axe de la fissure.

Sur la Figure 4.39, la microfissure qui traverse la matrice argileuse recoupe et fracture également un grain de calcite présent dans le plan de cisaillement. Ces microfissures peuvent également être la cause d'une exfoliation des micas comme on peut le voir sur la Figure 4.40.



*Figure 4.37 : Endommagement diffus de la matrice argileuse avec réorientation des plaquettes d'argile le long des microplans de cisaillement.*

*(a) : En mode électrons absorbés ; (b) : En mode électrons rétro-diffusés.*



*Figure 4.38 : Microfissuration de la matrice argileuse avec réorientation des plaquettes d'argile le long des microplans de cisaillement.*

*(a) : En mode électrons absorbés ; (b) : En mode électrons rétro-diffusés.*

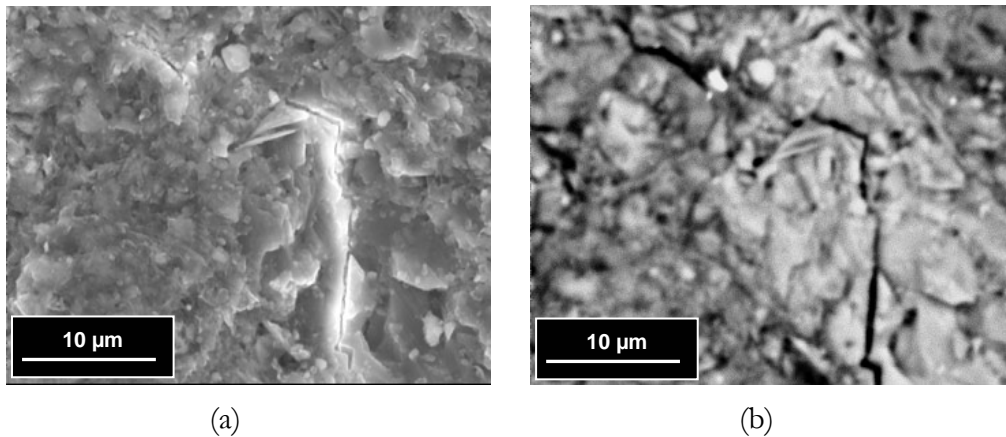


Figure 4.39 : Détail de la microfissuration de la matrice argileuse et d'un grain de calcite.  
(a) : En mode électrons absorbés ; (b) : En mode électrons rétro-diffusés.

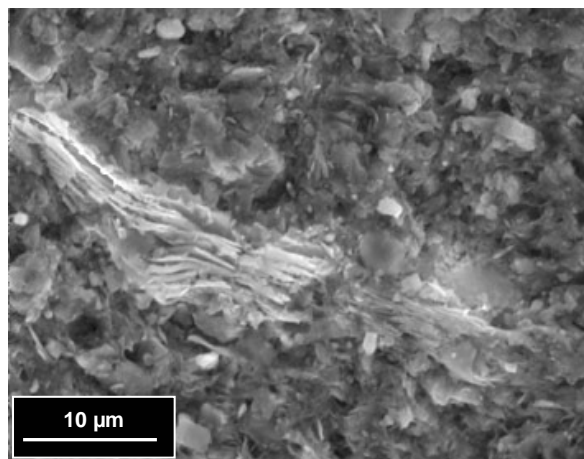


Figure 4.40 : Exfoliation d'un mica le long d'une microfissure.

#### 4.6.2.2 Influence de la vitesse de sollicitation

En comparant, à l'échelle microscopique, les modes de déformation et de rupture observés sur les échantillons 0°-1 EST 05558 et 0°-2 EST 05633 sollicités en compression uniaxiale respectivement à  $\dot{\epsilon} = 10^{-8}\text{s}^{-1}$  et  $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ , nous voulions mettre en évidence l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement mécanique de la roche.

En observant ces deux lames, nous avons retrouvé les mêmes mécanismes de déformation quelle que soit la vitesse de chargement imposée à l'échantillon, à savoir un endommagement diffus avec des microfissures se développant dans la matrice argileuse et une décohésion des grains, sans fracturation ni broyage des épontes (Figure 4.41).

Même en ce qui concerne les agrégats de pyrite qui a plus faible grossissement semblaient cisailés, à fort grossissement, on constate que la fissure traverse l'agrégat sans fracturer les glomérules framboïdaux (Figure 4.42). En revanche, dans certaines zones de cisaillement, certains grains et notamment la calcite, sont broyés (Figure 4.43).

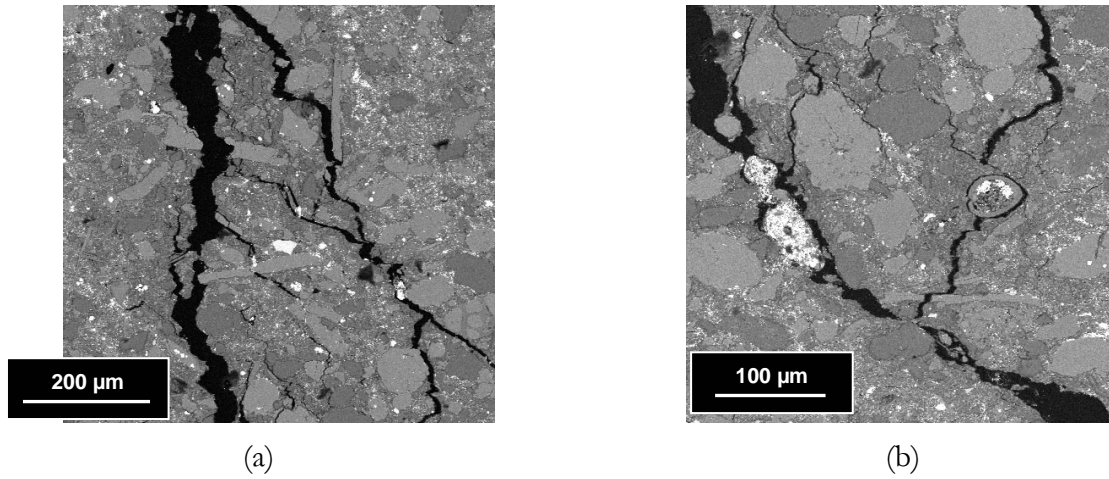


Figure 4.41 : Fracturation de la matrice argileuse et décobésion des cristaux de quartz et de calcite dans la lame 0°-1 EST 05558.

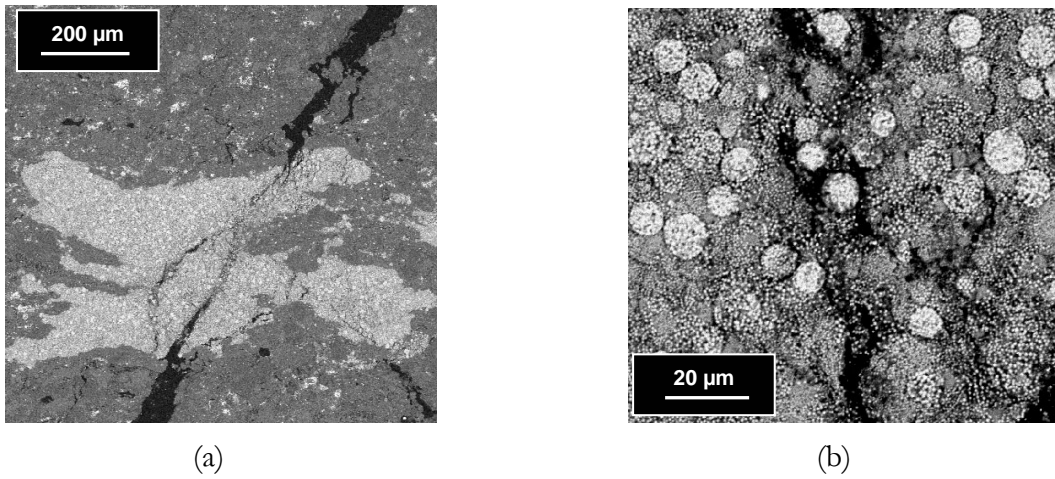


Figure 4.42 : Cisaillement d'un agrégat de pyrite framboïdale dans l'échantillon 0°-2 EST 05633 : (a) : Vue globale de l'agrégat ; (b) : Zoom sur la zone de cisaillement sans fracturation de grains.

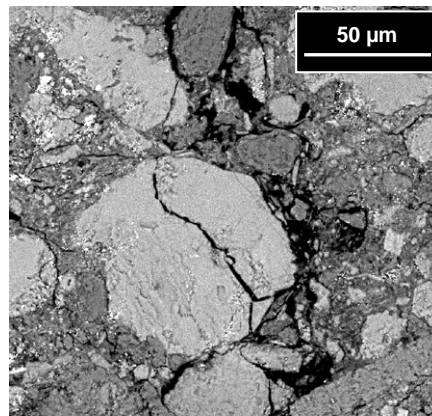


Figure 4.43 : Fracturation d'un grain de calcite dans l'échantillon 0°-2 EST 05633.

### 4.6.2.3 Influence de l'anisotropie

En comparant les observations réalisées sur les lames 45°-1 EST 05558 et 45°-1 EST 05633 qui ont subi des compressions uniaxiales à la même vitesse de chargement, on retrouve les mêmes mécanismes de déformation.

En ce qui concerne sur l'influence de l'anisotropie sur le mode de déformation de l'argilite de l'Est, les observations MEB de ces lames n'ont pas apporté plus d'informations, que les observations faites au microscope optique. Les fissures, même principales, s'orientent dans le sens du litage de la roche. Elles sont déviées par les plans d'anisotropie.

A cette échelle d'observation, l'anisotropie de la roche est marquée essentiellement par des microfissures de relaxation orientées à 45° par rapport à l'horizontale et qui semblent antérieures à l'essai puisque recoupées en certains endroits par des fissures verticales dues à la rupture fragile de l'échantillon (Figure 4.44).

De plus, on observe une décohésion des grains due à la fissuration (fissures de traction) de la matrice argileuse et qui en général, ne s'accompagne d'aucune fracturation (Figure 4.45). On note pourtant la présence de rares zones de cisaillement où les grains de quartz et de calcite sont broyés (Figure 4.46).

Enfin, la pyrite joue un rôle important dans la propagation des fissures. Ces agrégats framboïdaux sont souvent cisailés (Figure 4.47).

### 4.6.3 Discussion

A priori, nous pensions que la vitesse de sollicitation influençait le mode d'endommagement de l'argilite de l'Est et nous nous attendions à trouver moins de grains fracturés dans l'échantillon sollicité à  $10^{-8}$  qu'à  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Cela n'a pas été le cas. Les observations au MEB réalisées sur les lames 0°-1 EST 05558 et 0°-2 EST 05633 ont montré que très peu de grains de quartz ou de carbonates étaient fracturés, quelle que soit la vitesse de déformation appliquée. La microfissuration se développe essentiellement dans la matrice argileuse même si dans les plans de cisaillement, on trouve quelques grains de calcite fracturés.

Les observations réalisées ont mis en évidence le rôle important joué par la pyrite dans le développement de la fissuration de l'argilite de l'Est. En effet, la pyrite qui se présente dans cette roche sous forme d'agrégats framboïdaux, est cisailée par les microfissures consécutives aux essais de compression, sans être fracturée. La cohésion de ses agrégats doit donc être comparable à la résistance des liaisons de la matrice argileuse et bien inférieure à la résistance des grains de quartz et de calcite.

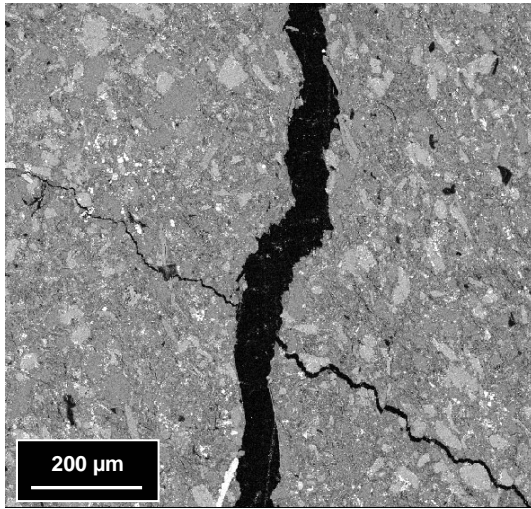


Figure 4.44 : Fissure principale verticale recoupant une microfissure orientée dans le litage dans la lame 45°-1 EST 05633.

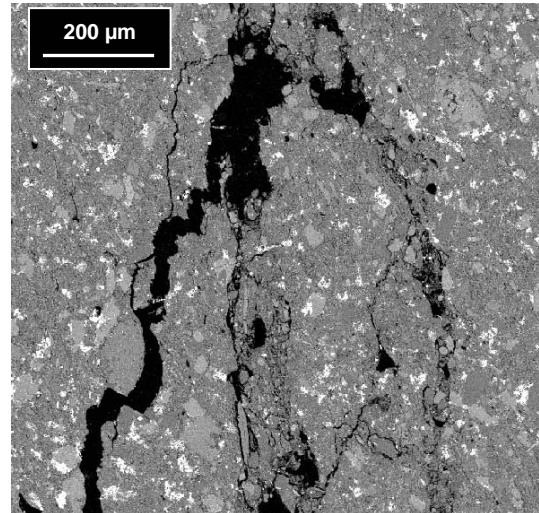


Figure 4.45 : Déchocision des grains due à la fissuration de la matrice argileuse dans la lame 45°-1 EST 05558.

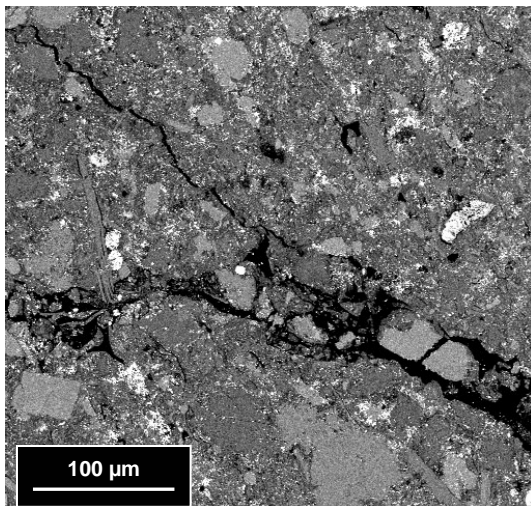


Figure 4.46 : Zone de fissuration où les grains de quartz et de calcite sont broyés dans la lame 45°-1 EST 05633.

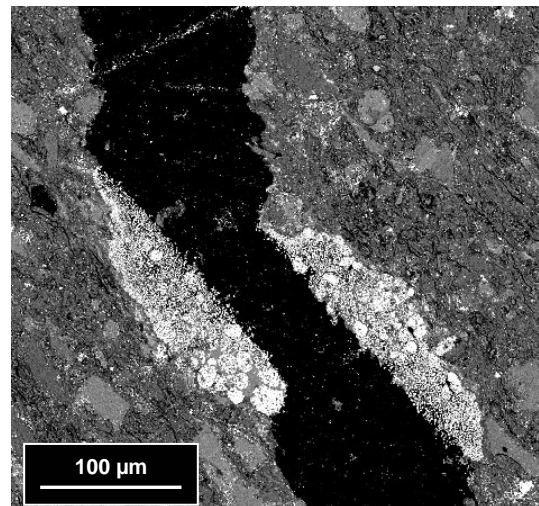


Figure 4.47 : Cisaillement d'un agrégat de pyrite framboïdale dans la lame 45°-1 EST 05633.



## 4.7 Conclusions

La réponse des roches argileuses à une sollicitation externe, mécanique ou thermique, dépend fortement de la nature des particules argileuses qu'elles contiennent et de leur comportement mécanique propre. Celui-ci est étroitement lié à différents mécanismes physico-chimiques dus à l'interaction entre les particules argileuses et l'eau interstitielle (capillarité, adsorption...). Dans les conditions de nos essais (température ambiante, absence de confinement), seule la matrice argileuse était susceptible d'avoir un comportement ductile.

Le litage de l'argilite de l'Est et de la marne du Mont d'Or est perceptible grâce à une alternance de zones claires (calcite, quartz) et sombres (niveaux plus argileux). Il est matérialisé par l'orientation des particules argileuses, parfois des tests fossiles sous forme de plaquettes d'assez grande taille et par un arrangement des minéraux non argileux entre les lits.

De notre étude au microscope optique et électronique à balayage, il ressort que les déformations observées macroscopiquement lors des essais mécaniques réalisés sur l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or, sont essentiellement dues à la microfissuration de la matrice argileuse.

Sous le microscope optique, bien que l'échantillon 0°-1 EST 05558 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8}\text{s}^{-1}$ ) paraisse moins fissuré que l'échantillon 0°-2 EST 05633 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-4}\text{s}^{-1}$ ), il est difficile de conclure quant à l'influence de la vitesse de déformation sur le mode de rupture de l'argilite de l'Est. En effet, au MEB, nous avons pu constater que la microfissuration se développe essentiellement dans la matrice argileuse. Peu de grains de calcite ou de quartz sont donc fracturés même sous une vitesse de chargement élevée. L'imprégnation de résine fluorescente des échantillons de marne du Mont d'Or donne également cette impression.

Cependant, nous avons constaté que l'anisotropie induite par le litage de l'argilite de l'Est joue un rôle important sur le mode de rupture de la roche. Les fissures verticales consécutives à la rupture fragile sont nettement déviées par le litage dans nos échantillons 45°-1 EST 05558 et 45°-1 EST 05633. Nous avons pu aboutir aux mêmes conclusions en ce qui concerne la marne du Mont d'Or.

De plus, le long des plans de microfissures, les particules argileuses semblent se réorienter face contre face. L'arrangement des particules affecte une zone de 10 à 20  $\mu\text{m}$  d'épaisseur autour de l'axe de la fissure.

Les observations réalisées ont mis en évidence l'influence de la pyrite qui semble contrôler le développement de la fissuration de l'argilite de l'Est. Présente sous forme d'agrégats framboïdaux constituant des zones de faiblesse, elle est très souvent cisailée par les microfissures induites par les essais mécaniques sans que ses cristaux ne soient fracturés.

Toutes ces conclusions doivent être nuancées par le faible nombre de lames observées. En effet, nous disposons de peu d'échantillons testés en compression à différentes vitesses de chargement. Cependant, ces observations confirment les résultats obtenus notamment par *Wright* (2001) et *Gasc-Barbier* (2002) qui déjà soulignaient le rôle essentiel joué par la texture, la structure et les sulfures de fer dans la déformation et la rupture des argilites de l'Est.

## Modélisation phénoménologique du comportement viscoplastique endommageable des roches argileuses

**Objet :** *Dans ce chapitre, à l'aide du modèle viscoplastique de Lemaitre, nous allons modéliser le comportement mécanique de l'argilite de l'Est, de l'argilite de Tournemire et de la marne du mont d'Or à partir des résultats de l'étude expérimentale. Nous verrons alors que ce modèle viscoplastique ne permet pas de reproduire correctement le comportement de ces roches argileuses dont les déformations viscoplastiques ne se développent pas à volume constant.*

*Pour tenir compte de cette observation expérimentale et simuler le comportement volumique des roches, Hajdu (2004) a modifié le modèle de Lemaitre et introduit un paramètre  $\alpha$  exprimant la contractance ou la dilatance du matériau, et une variable  $\beta$  traduisant l'anisotropie d'endommagement. Nous nous servirons donc de ce modèle et identifierons les paramètres rhéologiques des trois roches argileuses étudiées.*

## 5.1 Modèle viscoplastique de Lemaitre

### 5.1.1 Expression générale

En introduisant le critère de plasticité de von Misès dans la loi d'écoulement de Perzyna, nous avons établi dans le chapitre 2, l'expression générale de la loi viscoplastique de Lemaitre sous sa forme matricielle :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \gamma \cdot (q - \sigma_s)^n \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^m \quad [5.1]$$

où :  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$  est la déformation viscoplastique équivalente =  $\int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \otimes \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} \right)^{\frac{1}{2}}$

$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp}$  est la vitesse de déformation viscoplastique équivalente =  $\left( \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{\partial t} \right)_{q=\text{cste}}$

$q$  est la contrainte déviatorique équivalente =  $\left( \frac{3}{2} \mathbf{S} \otimes \mathbf{S} \right)^{\frac{1}{2}}$  avec  $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S} - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \cdot \mathbf{I}$

$n$  et  $m$  sont paramètres caractéristiques du matériau.

$\gamma$  est la viscosité.

$\sigma_s$  est la contrainte seuil au-dessus de laquelle les déformations viscoplastiques se développent.

Cette loi de Lemaitre peut également apparaître sous une autre forme (*Lemaitre et Chaboche, 1996*) :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{1}{K^N} \cdot \boldsymbol{\sigma}^N (\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^{-N/M} \quad [5.2]$$

avec :  $\boldsymbol{\sigma}$ , la contrainte appliquée,

$N$ , l'exposant de viscosité,

$M$ , l'exposant d'écrouissage,

$K$ , le coefficient de résistance, exprimé en MPa.s.

Dans le cas d'une compression uniaxiale, en supposant  $\sigma_s = 0$ , les relations liant les deux jeux de paramètres ( $n, m, A$ ) et ( $N, M, K$ ) peuvent être établies par identification, et on montre aisément que :

$$N = n ; \quad K = \frac{1}{A^{1/n}} ; \quad M = - \frac{n}{m} \quad [5.3]$$

Il est possible de déduire de la formulation générale de la loi de Lemaitre l'expression des lois comportement en fluage, en relaxation et sous chargement monotone quasi statique, en se plaçant dans les conditions d'essais. Ces relations vont être établies dans les paragraphes suivants pour le cas d'une roche isotrope soumise à une compression uniaxiale. Par la suite, la loi viscoplastique de Lemaitre sera utilisée de manière égale sous l'une ou l'autre des formes présentées ci-dessus en fonction de la simplicité des expressions obtenues.

Ce modèle de Lemaitre ne faisant intervenir que la viscoplasticité du matériau sera appelé dans la suite de ce chapitre le *modèle viscoplastique de Lemaitre (VP)*.

### 5.1.2 Loi de déformation en fluage

A déviateur  $q$  constant, l'expression explicite de la loi de fluage  $\boldsymbol{\varepsilon} = f(t)$  pour une roche isotrope s'obtient par intégration de la loi de Lemaitre, en supposant le seuil de fluage nul,  $\boldsymbol{\sigma}_s = 0$ . Dans la direction axiale, on a alors :

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp}}{(\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp})^m} = A \cdot q^n dt \quad [5.4]$$

A  $t = 0$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} = 0$  donc en intégrant entre 0 et  $t$ , pour  $m \neq 1$  :

$$-\frac{(\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp})^{1-m}}{m-1} = A \cdot q^n \cdot t \quad [5.5]$$

$$\text{Soit : } \boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} = [(1-m) \cdot A \cdot q^n \cdot t]^{1/(1-m)} \quad [5.6]$$

Si on pose  $\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} = a \cdot q^\beta \cdot t^\alpha$ , il est facile de trouver par identification les relations liant ces deux jeux de paramètres à savoir :

$$\alpha = \frac{1}{1-m} ; \quad \beta = \frac{n}{1-m} ; \quad a = [-A(m-1)]^{1/(1-m)} = \left(\frac{A}{\alpha}\right)^\alpha \quad [5.7]$$

De la même manière, dans la direction latérale, on obtient :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}} \quad [5.8]$$

Les déformations viscoplastiques se développent à volume constant :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{vol}^{vp} = \boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} + 2\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} = 0 \quad [5.9]$$

Finalement, l'expression explicite de la loi de fluage, en condition uniaxiale, pour une roche isotrope, d'après le modèle viscoplastique de Lemaitre, est :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_1^{tot} = \frac{q}{E} + [(1-m) \cdot A \cdot q^n \cdot t]^{1/(1-m)} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3^{tot} = -\frac{\nu}{E} q - \frac{1}{2} [(1-m) \cdot A \cdot q^n \cdot t]^{1/(1-m)} \end{cases} \quad [5.10]$$

$$\text{ou : } \begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_1^{tot} = \frac{q}{E} + a \cdot q^\beta \cdot t^\alpha \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3^{tot} = -\frac{\nu}{E} q - \frac{1}{2} a \cdot q^\beta \cdot t^\alpha \end{cases} \quad [5.11]$$

$$\text{ou : } \begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_1^{\text{tot}} = \frac{q}{E} + \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3^{\text{tot}} = -\frac{v}{E}q - \frac{1}{2} \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}} \end{cases} \quad [5.12]$$

Ces formulations sont utilisées pour modéliser la phase de fluage primaire au cours de laquelle la vitesse de déformation décroît avec le temps. Lors de la phase de fluage secondaire la vitesse de déformation est constante : on aurait alors  $\alpha = 1$  ou  $m = 0$ .

### 5.1.3 Expression de la relaxation des contraintes

Dans l'essai de relaxation, la déformation totale est maintenue constante et on s'intéresse à l'évolution des contraintes en fonction du temps. On impose donc  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{tot}} = 0$ , et d'après la loi viscoplastique de Lemaitre, on a :

$$\frac{\dot{\boldsymbol{\sigma}}}{E} + A \cdot \boldsymbol{\sigma}^n \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}})^m = 0 \quad [5.13]$$

$$\text{D'où : } \frac{\dot{\boldsymbol{\sigma}}}{\boldsymbol{\sigma}^n} = -A \cdot E \cdot (\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}})^m \quad [5.14]$$

Il n'est pas possible de déduire l'expression littérale de la contrainte en fonction du temps lors d'un essai de relaxation à partir de cette équation car son intégration nécessite la connaissance de  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}}$  qui elle-même varie en fonction du temps. En effet, pendant la relaxation, les déformations viscoélastiques réversibles qui diminuent sont compensées par les déformations viscoplastiques, irréversibles, qui se développent, de sorte que la déformation totale de l'échantillon,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tot}}$ , reste constante puisque la vitesse de déformation totale est nulle :  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{tot}} = 0$ . Cette expression de la loi de relaxation permet néanmoins d'affirmer que la contrainte décroît et tend asymptotiquement vers une contrainte seuil,  $\boldsymbol{\sigma} = 0$  ou  $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}_s$ , reliée à la courbe limite.

### 5.1.4 Loi de comportement en chargement quasi statique

Dans un essai de compression uniaxiale monotone quasi statique, la vitesse de déformation  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  est imposée et la contrainte appliquée à l'échantillon augmente au cours du temps. Cependant, pour une vitesse de déformation suffisamment faible, la viscoplasticité du matériau peut se développer en temps réel de sorte que la vitesse de déformation viscoplastique tend vers la vitesse de déformation totale. La courbe limite est alors atteinte et l'hypothèse :  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{vp}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$  permet d'écrire :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{vp}} = \sqrt[m]{\frac{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}}{Aq^n}} \quad [5.15]$$

soit finalement :

$$\begin{cases} \varepsilon_1^{\text{tot}} = \frac{q}{E} + \sqrt[m]{\frac{\dot{\varepsilon}}{Aq^n}} \\ \varepsilon_3^{\text{tot}} = -\frac{\nu}{E}q - \frac{1}{2}\sqrt[m]{\frac{\dot{\varepsilon}}{Aq^n}} \end{cases} \quad [5.16]$$

ou :

$$\begin{cases} \varepsilon_1^{\text{tot}} = \frac{q}{E} + \sqrt[1-\frac{1}{\alpha}]{\frac{\dot{\varepsilon}}{\alpha a^{1/\alpha} q^{\beta/\alpha}}} \\ \varepsilon_3^{\text{tot}} = -\frac{\nu}{E}q - \frac{1}{2}\sqrt[1-\frac{1}{\alpha}]{\frac{\dot{\varepsilon}}{\alpha a^{1/\alpha} q^{\beta/\alpha}}} \end{cases} \quad [5.17]$$

ou encore :

$$\begin{cases} \varepsilon_1^{\text{tot}} = \frac{q}{E} + \left[ \left( \frac{K}{q} \right)^N \dot{\varepsilon} \right]^{\frac{M}{N}} \\ \varepsilon_3^{\text{tot}} = -\frac{\nu}{E}q - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{K}{q} \right)^N \dot{\varepsilon} \right]^{\frac{M}{N}} \end{cases} \quad [5.18]$$

### ***5.1.5 Récapitulatif des différents paramètres et formulations de la loi viscoplastique de Lemaitre***

Les lois de fluage, de relaxation et de chargement quasi statique, établies en compression uniaxiale, déduites de l'expression de la loi viscoplastique de Lemaitre en fonction des conditions d'essais sont répertoriées dans le Tableau 5.1.

Les relations liant les trois jeux de paramètres sont résumées dans le Tableau 5.2.

Paramètres	(A, n, m)	(a, α, β)	(M, N, K)
Loi en fluage	$\epsilon_1^{vp} = [(1-m).A.q^n.t]^{1/(1-m)}$	$\epsilon_1^{vp} = a.q^\beta.t^\alpha$	$\epsilon_1^{vp} = \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{N+M}}$
Loi en relaxation	$\frac{\dot{\sigma}}{\sigma^n} = -A.E.(\epsilon^{vp})^m$	$\frac{\dot{\sigma}}{\sigma^\alpha} = -\alpha.a^{1/\alpha}.E.(\epsilon^{vp})^{1-1/\alpha}$	$\frac{\dot{\sigma}}{\sigma^N} = -\frac{1}{K^N}.E.(\epsilon^{vp})^{-N/M}$
Loi sous chargement quasi statique	$\epsilon_1^{vp} = \sqrt[n]{\frac{\dot{\epsilon}}{Aq^n}}$	$\epsilon_1^{vp} = 1 - \frac{1}{\alpha} \sqrt[n]{\frac{\dot{\epsilon}}{\alpha a^{1/\alpha} q^{\beta/\alpha}}}$	$\epsilon_1^{vp} = \left[ \left( \frac{K}{q} \right)^N \dot{\epsilon} \right]^{\frac{M}{N}}$

Tableau 5.1 : Expressions des lois en fluage, en relaxation et sous chargement quasi statique en fonction du jeu de paramètres choisis.

Jeu de paramètres	(A, n, m)	(a, α, β)	(M, N, K)
A	-	$\alpha.a^{1/\alpha}$	$\frac{1}{K^N}$
n	-	$\frac{\beta}{\alpha}$	N
m	-	$1 - \frac{1}{\alpha}$	$-\frac{N}{M}$
a	$[-A(m-1)]^{1/(1-m)}$	-	$\left[ \frac{1}{K^N} \frac{M+N}{M} \right]^{\frac{M}{M+N}}$
α	$\frac{1}{1-m}$	-	$\frac{M}{M+N}$
β	$\frac{n}{1-m}$	-	$\frac{MN}{M+N}$
M	$-\frac{n}{m}$	$\frac{\beta}{1-\alpha}$	-
N	n	$\frac{\beta}{\alpha}$	-
K	$\frac{1}{A^{1/n}}$	$\frac{1}{\alpha^{\alpha/\beta} a^{1/\beta}}$	-

Tableau 5.2 : Récapitulatif des relations liant les différents jeux de paramètres du modèle viscoplastique de Lemaitre.

## 5.2 Méthodes d'identification des paramètres du modèle VP

Les méthodes de calage et les équations établies dans ce paragraphe correspondent uniquement au cas d'un chargement uniaxial. Elles supposent de plus le développement des déformations viscoplastiques à volume constant, conformément aux hypothèses du modèle utilisé. Rappelons également que les lois de comportement en fluage, sous chargement quasi statique et en relaxation d'après le modèle VP ont été établies dans le cas d'une roche isotrope. Cependant, l'argilite de Tournemire, l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or sont anisotropes et considérées comme orthotropes de révolution. Expérimentalement, nous avons mesuré des déformations transversales légèrement différentes dans les directions  $\bar{s}$  et  $\bar{t}$  :  $\epsilon_{tt} \neq \epsilon_{ss}$  pour nos échantillons d'orientation  $\theta = 45^\circ$  ou  $90^\circ$  et une distorsion  $\epsilon_{nt}$  des échantillons d'orientation  $\theta = 45^\circ$ . L'approximation d'isotropie revient donc à considérer que les déformations  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{ss}$  sont équivalentes lorsque  $\theta \neq 0^\circ$  et que la distorsion  $\epsilon_{nt}$  est négligeable lorsque  $\theta = 45^\circ$ .

### 5.2.1 Identification à partir des résultats d'un essai de chargement quasi statique en compression uniaxiale

Nous avons vu qu'au cours d'un essai de chargement quasi statique, la viscosité du matériau peut se développer en temps réel si la vitesse de déformation est suffisamment faible pour que l'on soit sur la courbe limite. La vitesse de déformation axiale viscoplastique,  $\dot{\epsilon}_1^{vp}$ , tend alors vers la vitesse de déformation imposée,  $\dot{\epsilon}$ .

Avec l'hypothèse  $\dot{\epsilon}_1^{vp} = \dot{\epsilon}$ , la loi de Lemaitre s'écrit :

$$\dot{\epsilon} = A \cdot q^n \cdot (\epsilon_1^{vp})^m \quad [5.19]$$

On en déduit :

$$\text{Ln } \dot{\epsilon} = \text{Ln } A + n \cdot \text{Ln } q + m \cdot \text{Ln } \epsilon_1^{vp} \quad [5.20]$$

Soit :

$$\text{Ln } q = \frac{1}{n} (\text{Ln } \dot{\epsilon} - \text{Ln } A) - \frac{m}{n} \text{Ln } \epsilon_1^{vp} \quad [5.21]$$

Le logarithme des déformations viscoplastiques de l'échantillon doit donc être une fonction linéaire du logarithme du déviateur de contrainte imposé. Dans un repère  $(\text{Ln } q, \text{Ln } \epsilon_1^{vp})$ , l'équation de la droite obtenue permet de connaître (Figure 5.1) :

- $-\frac{m}{n}$ , la pente de la droite
- $\frac{1}{n} (\text{Ln } \dot{\epsilon} - \text{Ln } A)$ , l'ordonnée à l'origine

De là :  $m = -n \cdot \text{pente de la droite}$

$$A = \exp(\text{ordonnée à l'origine} \cdot n + \text{Ln } \dot{\epsilon})$$



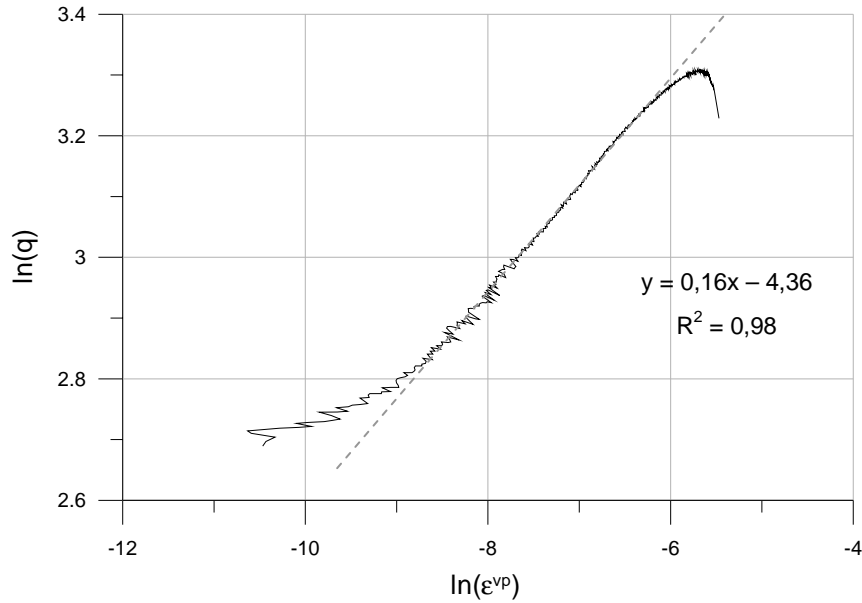


Figure 5.1 : Evolution du déviateur en fonction de la déformation axiale viscoplastique dans un diagramme bilogarithmique : essai de chargement quasi statique 0°-1 EST 05558 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8} s^{-1}$ ).

Les deux paramètres,  $m$  et  $A$ , sont ainsi reliés à  $n$ , qui reste donc le seul paramètre à ajuster. Il est généralement déterminé par dichotomie, en cherchant à minimiser l'écart entre les courbes expérimentale et théorique, évalué par la méthode des moindres carrés.

Le détail de cette procédure d'identification appliquée aux résultats de l'essai de chargement quasi statique 0°-1 EST 05558 est présenté dans l'Annexe C.

### 5.2.2 Identification à partir des résultats d'un essai de fluage en compression uniaxiale

Dans le cas d'un essai de fluage, comprenant un seul palier de chargement, pour calculer les déformations axiales viscoplastiques, l'expression explicite de la loi de Lemaitre sous sa forme la plus simple donnant est :

$$\epsilon_1^{vp} = a \cdot q^\beta \cdot t^\alpha \quad [5.22]$$

Le calage analytique des essais de fluage passe donc par l'ajustement des trois paramètres :  $a$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ . Etant donnée leur expression théorique, les courbes expérimentales peuvent être tracées dans un repère bilogarithmique où la déformation axiale viscoplastique s'écrit :

$$\ln \epsilon_1^{vp} = \ln a + \beta \ln q + \alpha \ln t \quad [5.23]$$

Une régression linéaire sur la droite  $\ln \epsilon_1^{vp} = f(\ln t)$  obtenue, donne :

- $\alpha$  : pente de la droite
- $\ln a + \beta \ln q$  : ordonnée à l'origine

Connaissant  $q$ , le déviateur de contrainte appliqué, il ne reste qu'un paramètre à ajuster,  $a$  ou  $\beta$ , généralement déterminé par dichotomie, en minimisant l'écart entre les courbes expérimentale et

théorique par la méthode des moindres carrés.

La Figure 5.2 illustre cette analyse à partir des résultats de l'essai de fluage réalisé sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-2 EST 05558. Elle est détaillée dans l'Annexe C.

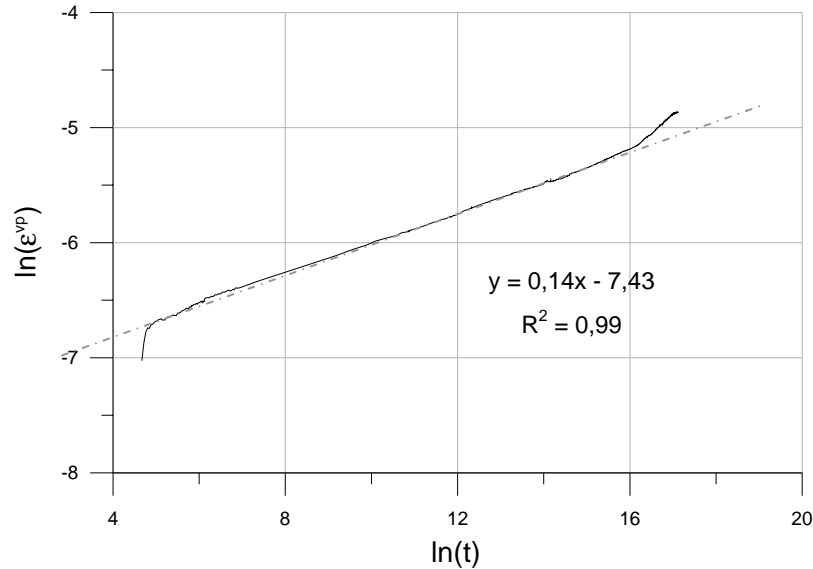


Figure 5.2 : Evolution des déformations viscoplastiques en fonction du temps dans un graphe bilogarithmique : Essai de fluage sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-2 EST 05558.

Dans le cas d'un essai de fluage multipalier, à chaque incrément de contrainte, il faut tenir compte de la déformation élastique observée au palier précédent, et déplacer l'origine des temps. Si entre  $t = 0$  et  $t = t_1$ , l'échantillon est soumis à un déviateur  $q = q_1$ , puis entre  $t = t_1$  et  $t = t_2$ , à  $q = q_2$ , la déformation axiale totale s'écrit alors :

$$- \quad 0 < t < t_1 :$$

$$q = q_1 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon^{\text{tot}}(t) = \frac{q_1}{E_1} + a \cdot q_1^\beta \cdot t^\alpha \quad [5.24]$$

$$- \quad t_1 < t < t_2 :$$

$$q = q_2 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon^{\text{tot}}(t) = \frac{(q_2 - q_1)}{E_2} + a \cdot q_2^\beta \cdot (t - t_1)^\alpha \quad [5.25]$$

### 5.2.3 Simulation d'un essai de relaxation

Pendant l'essai de relaxation, les déformations viscoélastiques réversibles qui diminuent sont compensées par les déformations viscoplastiques irréversibles qui se développent, de sorte que  $\varepsilon^{\text{tot}} = \text{constante}$  et  $\dot{\varepsilon} = 0$ .

Analytiquement, il est possible de simuler un essai de relaxation bien que l'expression littérale de la loi de relaxation en fonction du temps soit impossible à déterminer sans celle de  $\varepsilon^{\text{vp}} = f(t)$ . Pour cela, il suffit de connaître la contrainte initiale imposée à l'échantillon,  $q_0$ , et de fixer un pas de temps,  $\Delta t$ . L'évolution de la contrainte est alors calculée grâce à la relation de récurrence :

$$\begin{aligned} \text{A } t = 0 : \quad (\epsilon^{vp})_0 &= A \cdot (1 - m)^{1/(1-m)} \cdot q^{n/(1-m)} \cdot \Delta t^{1/(1-m)} & [5.26] \\ q &= q_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{A } t = k \cdot \Delta t : \quad (\epsilon^{vp})_k &= (\dot{\epsilon}^{vp})_{k-1} \cdot \Delta t + (\epsilon^{vp})_{k-1} = A \cdot (q_{k-1})^n \cdot [(\epsilon^{vp})_{k-1}]^m \cdot \Delta t + (\epsilon^{vp})_{k-1} & [5.27] \\ q_k &= q_{k-1} - E \cdot (\dot{\epsilon}^{vp})_{k-1} \cdot \Delta t = q_{k-1} - E \cdot A \cdot (q_{k-1})^n \cdot [(\epsilon^{vp})_{k-1}]^m \cdot \Delta t \end{aligned}$$

E est le module d'élasticité et (A, n, m) les paramètres de la loi de Lemaitre.

## 5.3 Simulation des résultats expérimentaux

### 5.3.1 Comportement de l'argilite de l'Est

La méthode d'identification des paramètres viscoplastiques développée au paragraphe 5.2.1 a été appliquée aux essais de chargement quasi statique réalisés sur les échantillons d'argilite de l'Est 0°-1 EST 05558 à ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) et 0°-1 EST 05633 à ( $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). Le paramètre n a été ajusté par dichotomie en cherchant à minimiser l'écart entre la courbe théorique et la courbe expérimentale évalué par la méthode des moindres carrés. Les deux autres paramètres de la loi, A et m, ont été calculés à l'aide de leurs expressions en fonction de n. Les jeux de paramètres obtenus sont répertoriés dans le Tableau 5.3. Ils ont permis d'obtenir une très bonne superposition des courbes expérimentales et analytiques, comme on peut le voir sur la Figure 5.3 et la Figure 5.4.

Nous ne présentons qu'une simulation du développement des déformations axiales. En effet, avec ces jeux de paramètres et le coefficient de Poisson mesuré, les courbes analytiques et expérimentales correspondant à la déformation latérale ne peuvent coïncider puisque l'une des hypothèses de ce modèle est :  $\epsilon_{vol}^{vp} = 0$ . Expérimentalement, cette hypothèse n'est pas vérifiée pour l'argilite de l'Est.

En ce qui concerne l'essai de fluage 0°-2 EST 05558, dans un premier temps, nous avons ôté de la déformation totale mesurée, la partie instantanée supposée élastique, et tracé l'évolution de la déformation viscoplastique en fonction du temps dans un graphe bilogarithmique (Figure 5.2). La méthode d'ajustement des paramètres explicitée au paragraphe 5.2.2 a été utilisée : La pente de la droite obtenue dans le graphe bilogarithmique nous a donné directement  $\alpha$  ; le paramètre  $\beta$  a été ajusté par dichotomie en minimisant l'écart entre la courbe théorique et la courbe expérimentale (méthode des moindres carrés), le paramètre a étant déduit de la valeur de  $\beta$ . Le résultat de la simulation est présenté sur la Figure 5.5. Les paramètres identifiés sont répertoriés dans le Tableau 5.4.

Le modèle VP ne modélise que la phase de fluage primaire et ne permet pas de prendre en compte l'endommagement de la roche qui se manifeste lors de l'accélération des déformations. D'où le décalage observé dès que la vitesse de déformation viscoplastique se stabilise lors de la phase de fluage secondaire (Figure 5.5).

Les différences observées entre les jeux de paramètres identifiés sur les essais de fluage et de chargement quasi statique seront discutées dans le paragraphe 5.3.4.

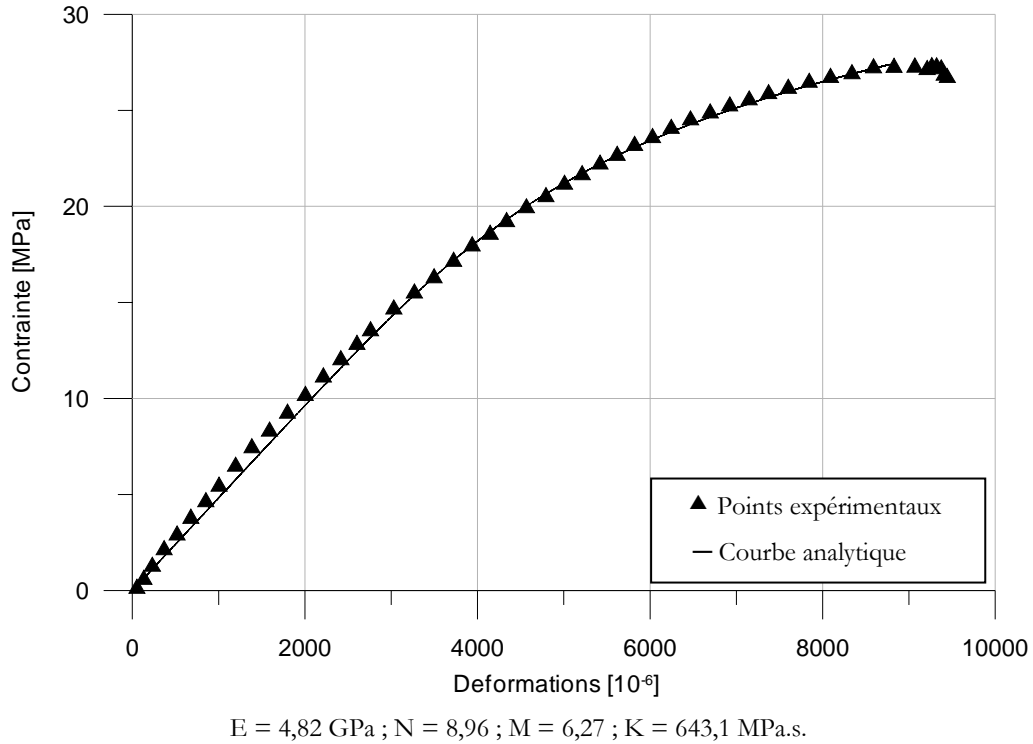


Figure 5.3 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique  $0^{\circ}$ -1 EST 05558 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ) à l'aide du modèle VP : Evolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

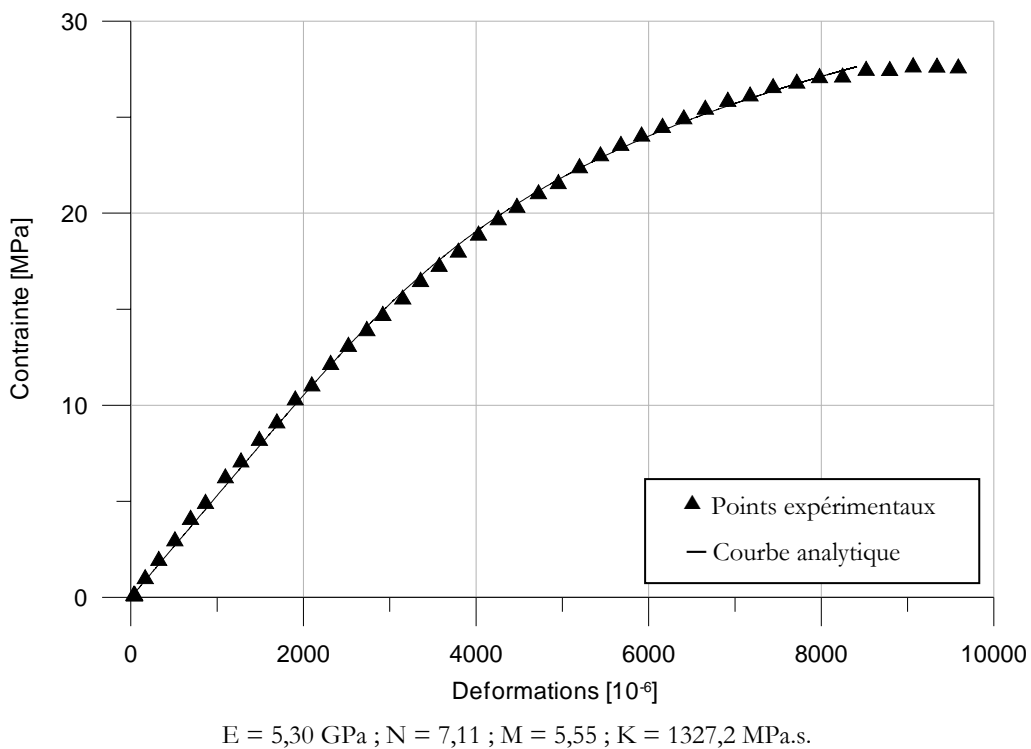


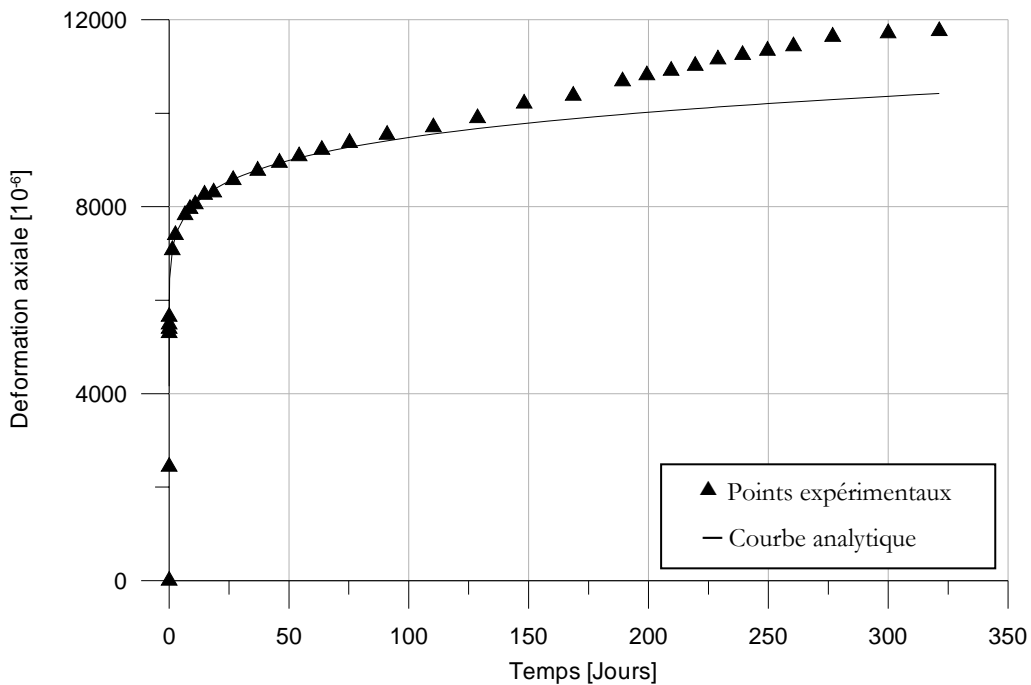
Figure 5.4 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique  $0^{\circ}$ -1 EST 05633 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) à l'aide du modèle VP : Evolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

Echantillon	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
0°-1 EST 05558	10 <sup>-8</sup>	4,82	8,96	-1,43	6,88.10 <sup>-26</sup>	8,96	6,27	643,1	4,72.10 <sup>-11</sup>	0,42	3,73
0°-1 EST 05633	10 <sup>-6</sup>	5,30	7,11	-1,28	6,25.10 <sup>-23</sup>	7,11	5,55	1327,2	2,62.10 <sup>-10</sup>	0,44	3,12

Tableau 5.3 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir des essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de l'Est.

Echantillon	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
0°-1 EST 05558	6,20	15,59	-6,17	7,95 10 <sup>-47</sup>	15,59	2,53	905,6	4,87 10 <sup>-7</sup>	0,14	2,18

Tableau 5.4 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir de l'essai fluage réalisé sur l'argilite de l'Est.



E = 6,20 GPa ; N = 15,59 ; M = 2,53 ; K = 905,6 MPa.s.

Figure 5.5 : Simulation analytique de l'essai de fluage 0°-2 EST 05558 à l'aide du modèle VP : Evolution de la déformation axiale en fonction du temps.

### 5.3.2 Comportement de la marne du Mont d'or

Avec le modèle VP, il a été possible de simuler analytiquement les essais de fluage de longue durée et les essais de chargement quasi statique réalisés sur la marne du Mont d'or.

Comme pour l'argilite de l'Est, l'identification des paramètres du modèle de Lemaitre n'a été réalisée que sur les déformations axiales. Expérimentalement, l'hypothèse  $\epsilon_{vol}^{vp} = 0$  n'est pas vérifiée pour la marne du Mont d'Or. La superposition des courbes expérimentales et théoriques correspondant à la déformation latérale n'est donc pas possible avec le coefficient de Poisson mesuré.

Sur les 4 essais de chargement quasi statique, le même travail de calage analytique a été réalisé. Les fonctions  $\text{Ln}q = f(\text{Ln}\epsilon^{vp})$  ont été tracées afin de déterminer les relations liant  $m$  et  $A$  au paramètre  $n$  puis, par dichotomie, nous avons fait varier ce paramètre afin d'obtenir la meilleure superposition des courbes expérimentales et théoriques, en minimisant l'écart entre elles, évalué la méthode des moindres carrés. Finalement, le modèle reproduit fidèlement le comportement mécanique de la marne du Mont d'Or en compression uniaxiale quasi statique avec les paramètres répertoriés dans le Tableau 5.5 mais ne modélise pas la rupture de l'échantillon (Figure 5.6).

Dans le cas des essais de fluage MO 4.1 et MO 13.1, seules les courbes enveloppes, sans les cycles de décharge, ont été prises en considération pour la modélisation. Les simulations obtenues pour les essais MO 4.1 et MO 13.1 sont très satisfaisantes comme le montrent la Figure 5.7. Les paramètres viscoplastiques identifiés sont répertoriés dans le Tableau 5.6.

Echantillon	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
MO 9.1	8.10 <sup>-7</sup>	20,40	6,68	-2,80	3.10 <sup>-26</sup>	6,68	2,39	6,62 10 <sup>3</sup>	2,73 10 <sup>-7</sup>	0,26	1,76
MO 9.2	8.10 <sup>-7</sup>	24,60	6,26	-3,01	1. 10 <sup>-25</sup>	6,26	2,08	9,85 10 <sup>3</sup>	8,24 10 <sup>-7</sup>	0,25	1,56
MO 11.1	8.10 <sup>-9</sup>	23,50	6,40	-3,10	1.10 <sup>-29</sup>	6,40	2,06	3,40 10 <sup>4</sup>	1,19 10 <sup>-7</sup>	0,24	1,56
MO 1.1	6.10 <sup>-8</sup>	10,50	6,20	-2,87	1.10 <sup>-25</sup>	6,20	2,16	1,08 10 <sup>4</sup>	4,92 10 <sup>-7</sup>	0,26	1,60

Tableau 5.5 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir des essais de chargement quasi statique réalisés sur la marne du Mont d'Or.

Echantillon	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
MO 4.1	23,00	1,18	1,18	1,18.10 <sup>-22</sup>	1,18	0,31	3,83 10 <sup>18</sup>	3,43 10 <sup>-5</sup>	0,21	0,25
MO 13.1	26,75	2,85	2,85	8.10 <sup>-24</sup>	2,85	0,79	1,27 10 <sup>8</sup>	1,36 10 <sup>-5</sup>	0,22	0,62

Tableau 5.6 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir des essais de fluage multipalier réalisés sur la marne du Mont d'Or.

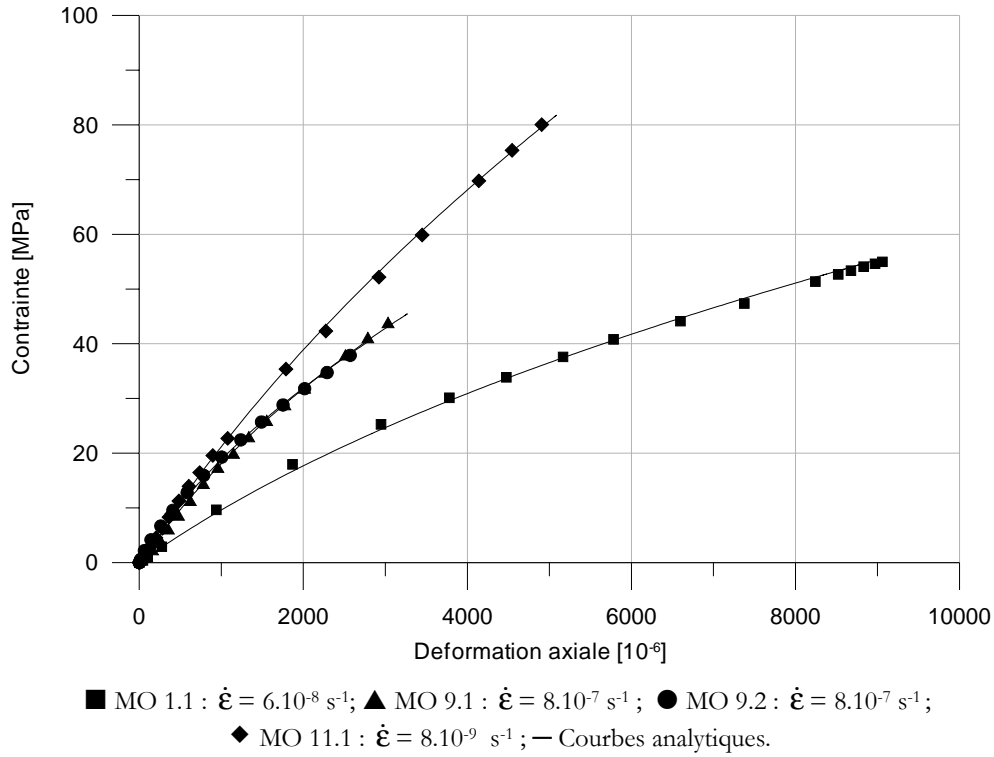


Figure 5.6 : Simulations analytiques des essais de chargement quasi statique réalisés sur la Mont d'Or à l'aide du modèle VP : évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

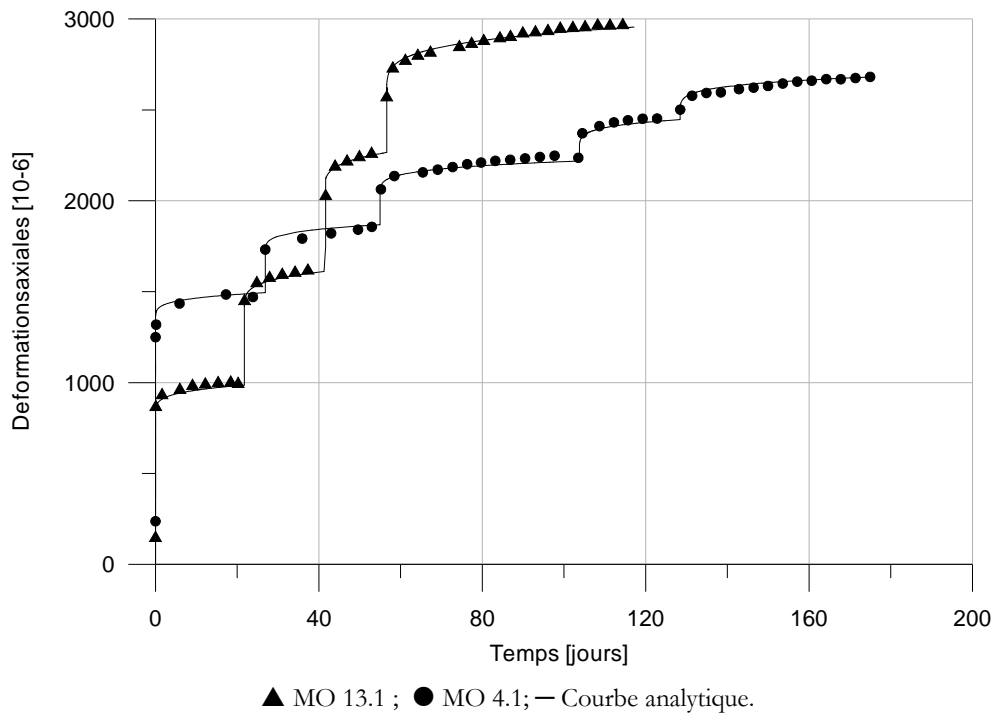


Figure 5.7 : Simulations analytiques des essais de fluage MO 4.1 et MO 13.1 réalisés sur la marne du Mont d'Or à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

### 5.3.3 Comportement de l'argilite de Tournemire

Le modèle VP décrit dans les paragraphes précédents a été utilisé pour modéliser le comportement de l'argilite de Tournemire testée en fluage et en chargement quasi statique. Comme pour l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or, les déformations viscoplastiques de l'argilite de Tournemire ne se développent pas à volume constant. L'hypothèse  $\epsilon_{vol}^{vp} = 0$  n'étant pas vérifiée expérimentalement pour l'argilite de Tournemire, la superposition des courbes expérimentales et théoriques correspondant à la déformation latérale n'est pas possible avec le coefficient de Poisson mesuré. L'identification des paramètres du modèle de Lemaitre n'a donc été réalisée qu'à partir de l'évolution des déformations axiales.

Les huit essais de fluage multipalier réalisés sur l'argilite de Tournemire ont été modélisés avec le modèle viscoplastique de Lemaitre de manière très satisfaisante pour le fluage primaire, comme le montrent les figures présentées dans les pages suivantes (Figure 5.8 à Figure 5.12). Les paramètres déterminés sont répertoriés dans le Tableau 5.7.

Deux de ces essais de longue durée nous ont permis d'observer la phase de fluage tertiaire. Mais le modèle viscoplastique de Lemaitre ne permet pas de modéliser le développement progressif de l'endommagement qui s'accompagne d'une accélération de la vitesse de déformation avant la rupture de l'échantillon. Avec ce modèle non endommageable, la prévision de la rupture est impossible.

Les résultats des simulations des essais de chargement quasistatique sont présentés sur la Figure 5.13 et la Figure 5.14. Les jeux de paramètres déterminés sont répertoriés dans le Tableau 5.8.

Ech.	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
M4 630.1	15,00*	2,71	-4,41	1,94 10 <sup>-29</sup>	2,71	0,61	3,89 10 <sup>10</sup>	6,79 10 <sup>-6</sup>	0,18	0,50
M4 630.2	16,05*	1,27	-1,75	1,66 10 <sup>-18</sup>	1,27	0,72	1,11 10 <sup>14</sup>	4,88 10 <sup>-7</sup>	0,36	0,46
M4 890.2	32,30*	2,38	-1,67	1,59 10 <sup>-20</sup>	2,38	1,42	2,15 10 <sup>8</sup>	5,55 10 <sup>-8</sup>	0,37	0,89
M4 970.1	17,00*	2,21	-3,66	5,29 10 <sup>-26</sup>	2,21	0,60	2,80 10 <sup>11</sup>	5,26 10 <sup>-6</sup>	0,21	0,47
M5 1500.1	15,67*	0,99	-1,164	1,52 10 <sup>-17</sup>	0,99	0,61	8,33 10 <sup>16</sup>	6,21 10 <sup>-7</sup>	0,38	0,38
M5 3395.2	19,56*	0,76	-1,56	3,21 10 <sup>-17</sup>	0,76	0,49	4,91 10 <sup>21</sup>	5,28 10 <sup>-7</sup>	0,39	0,30
M5 3140.2	16,50*	0,80	-1,63	4,68 10 <sup>-17</sup>	0,80	0,49	2,58 10 <sup>20</sup>	3,83 10 <sup>-6</sup>	0,21	0,64
M5 400.1	15,99*	1,04	-1,27	2,14 10 <sup>-16</sup>	1,04	0,82	1,26 10 <sup>15</sup>	1,83 10 <sup>-7</sup>	0,44	0,46

\* calculé sur les déformations axiales mesurées lors du premier palier de chargement.

Tableau 5.7 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir des essais de fluage multipalier réalisés sur l'argilite de Tournemire.



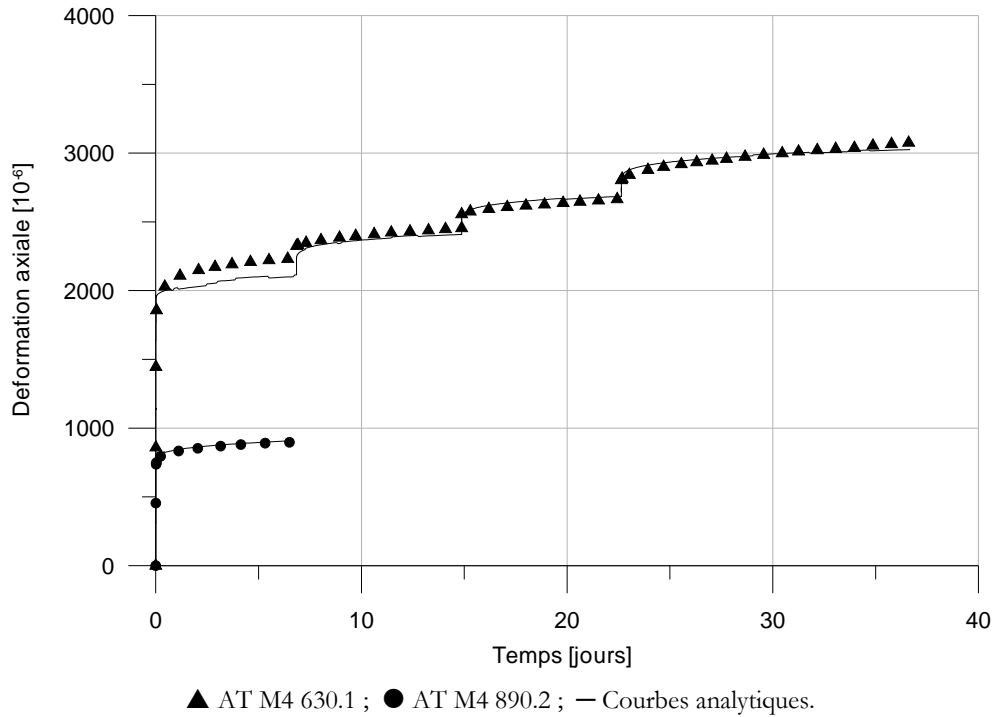


Figure 5.8 : Simulations analytiques des essais de fluage multipalier réalisés sur les échantillons AT M4 890.2 et AT M4 630.1 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

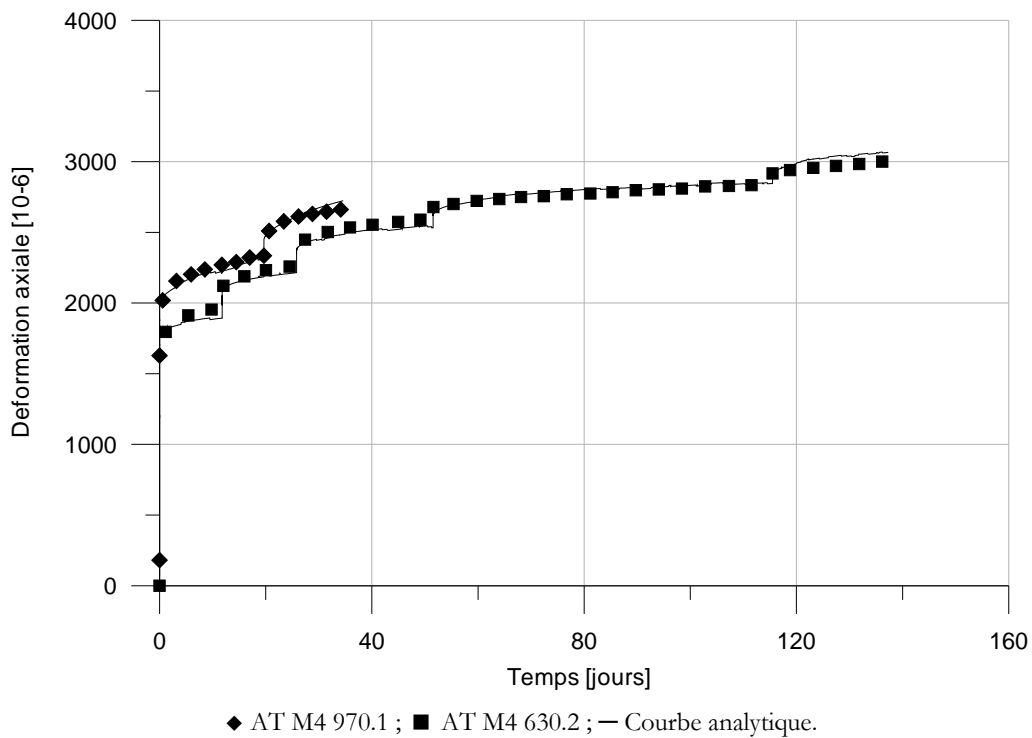


Figure 5.9 : Simulations analytiques des essais de fluage multipalier réalisés sur les échantillons AT M4 970.1 et AT M4 630.2 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

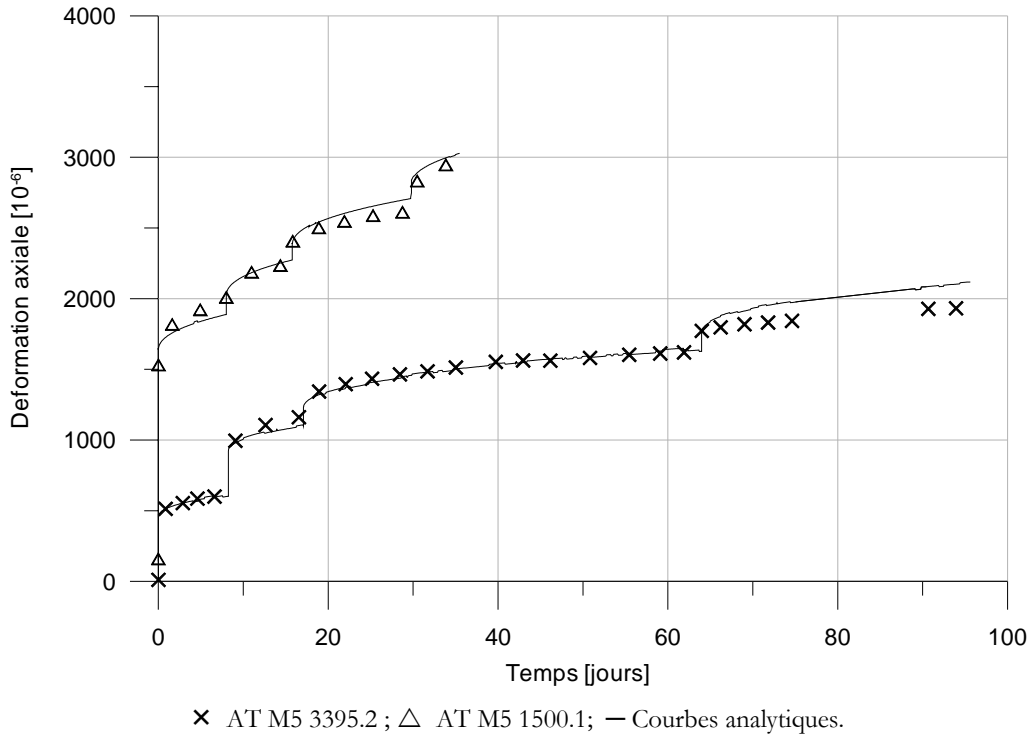


Figure 5.10 : Simulations analytiques des essais de fluage multipalier réalisés sur les échantillons AT M5 3395.2 et AT M5 1500.1 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

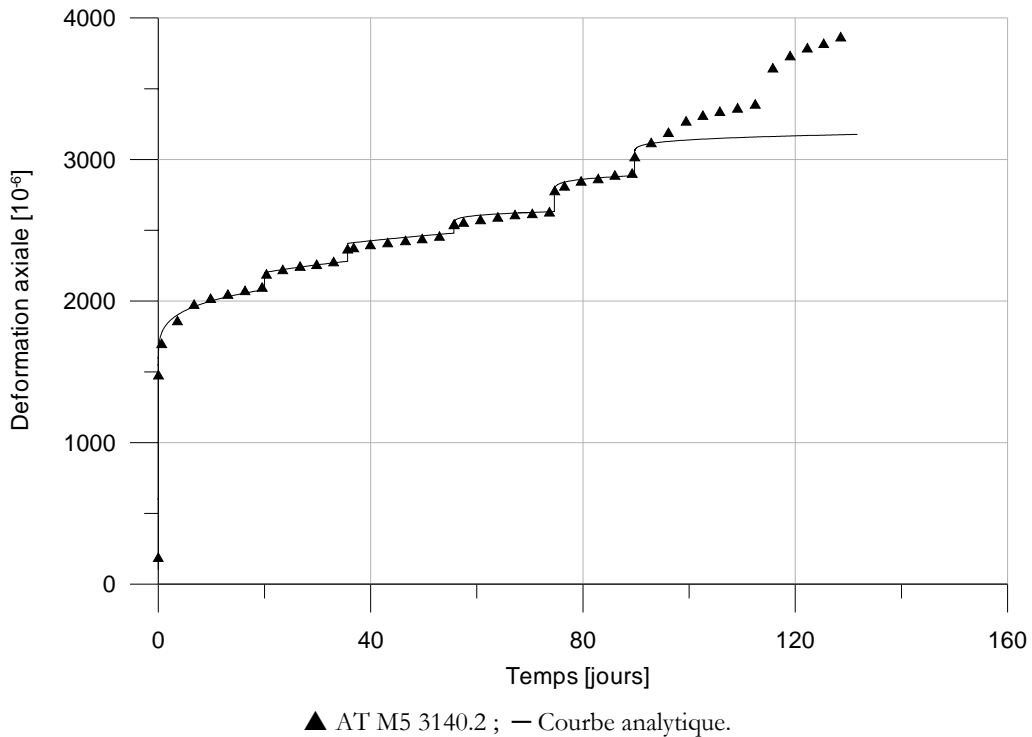


Figure 5.11 : Simulation analytique de l'essai de fluage multipalier réalisé sur l'échantillon AT M5 3140.2 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

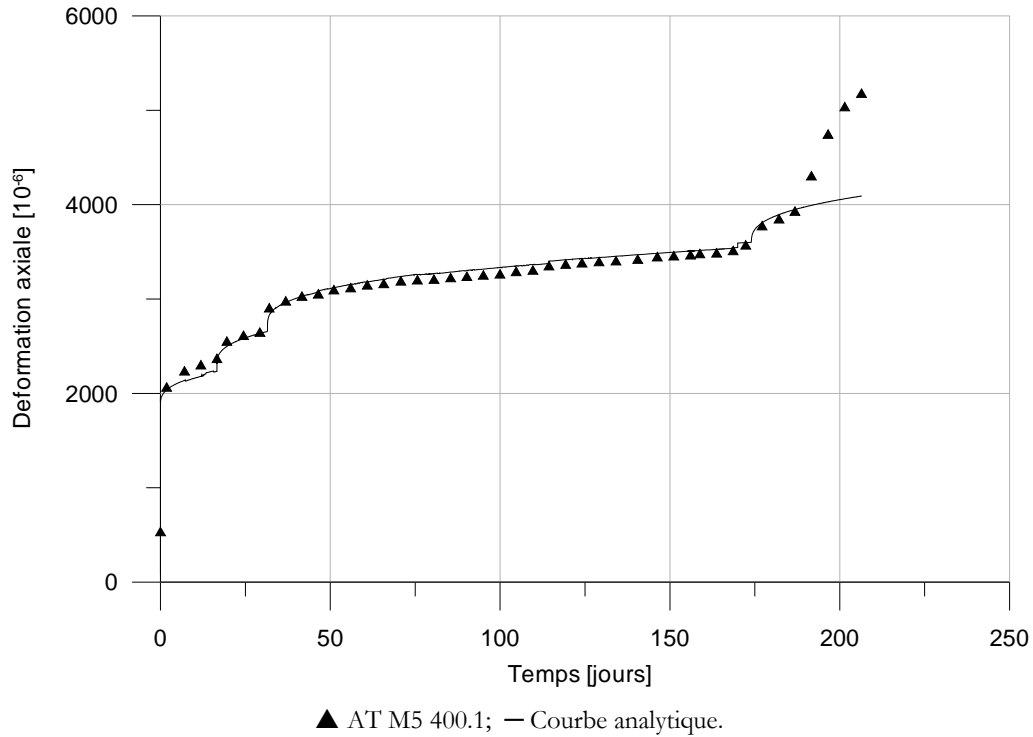


Figure 5.12 : Simulation analytique de l'essai de fluage multipalier réalisé sur l'échantillon AT M5 400.1 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la déformation axiale en fonction du temps.

Ech.	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
M5 2200.1	2,7 10 <sup>-7</sup>	21,50	23,10	-5,00	6,75 10 <sup>-53</sup>	23,10	4,62	181	2,72E-09	0,17	3,85
M5 3395.3	3 10 <sup>-7</sup>	27,10	14,20	-3,35	3,80 10 <sup>-40</sup>	14,20	4,24	596	1,22E-09	0,23	3,26
M5 3140.1	5 10 <sup>-8</sup>	23,80	13,33	-3,24	3,00 10 <sup>-39</sup>	13,33	4,11	776	1,16E-09	0,24	3,14
M4 890.1	1,6 10 <sup>-8</sup>	15,80	15,02	-5,2	8,49 10 <sup>-49</sup>	15,02	2,89	1590	2,37E-08	0,16	2,42

Tableau 5.8 : Paramètres du modèle VP identifiés à partir des essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de Tournemire.

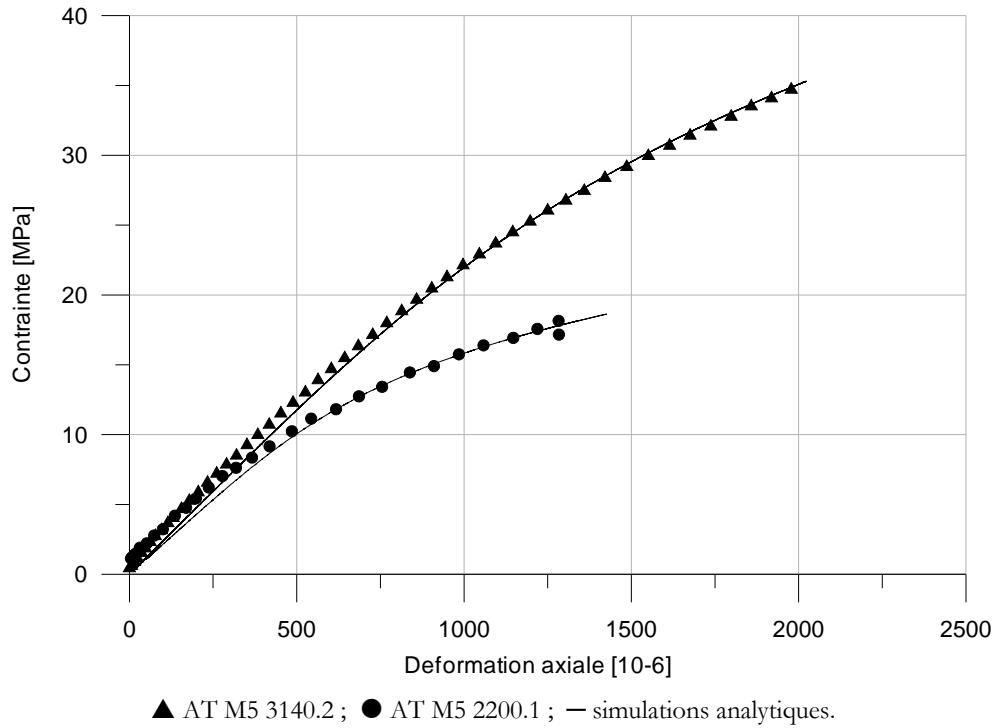


Figure 5.13 : Simulations analytiques des essais de chargement quasistatique réalisés sur les échantillons AT M5 3140.2 et AT M5 2200.1 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

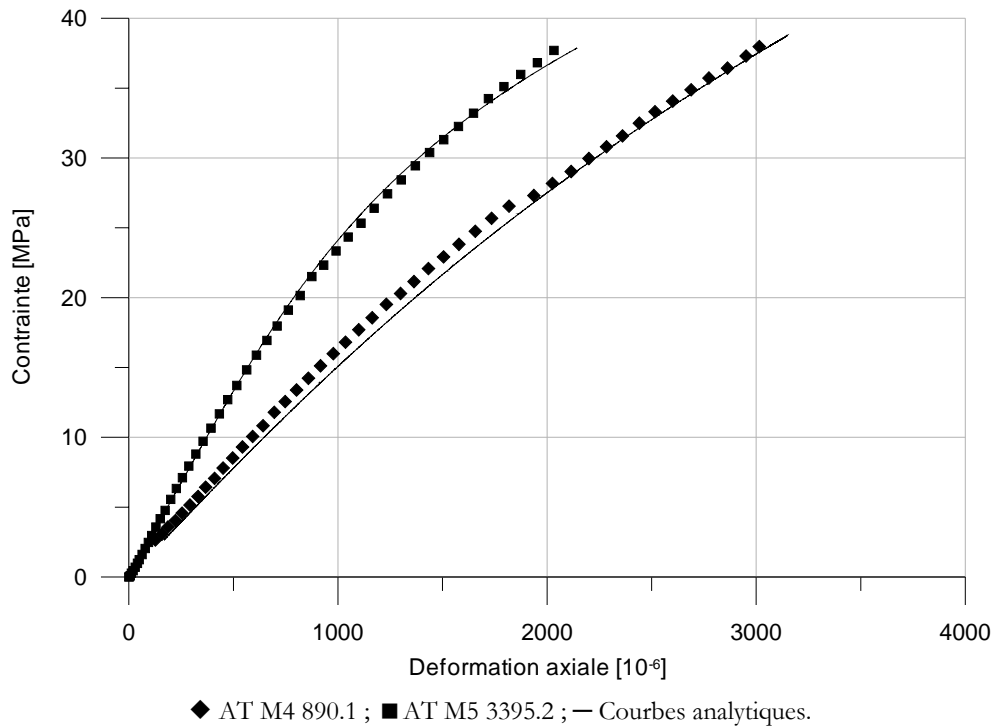


Figure 5.14 : Simulations analytiques des essais de chargement quasistatique réalisés sur les échantillons AT M4 890.1 et AT M5 3395.2 d'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VP : évolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale.

### 5.3.4 Analyse statistique des résultats

Tous les paramètres du modèle VP déterminés à partir des calages présentés dans les paragraphes précédents sont répertoriés dans le Tableau 5.9, ainsi que les modules élastiques qui ont été mesurés expérimentalement. Pour ce récapitulatif, nous nous sommes limités aux seuls paramètres E, M, N et K. De ces résultats, ressortent plusieurs constatations.

En première approximation, il semble que pour un même type d'essais et une même roche, les paramètres de la loi de Lemaitre soient du même ordre de grandeur. Les plages de variation sont tout de même étendues, en particulier pour le paramètre K.

Pour une même roche, les jeux de paramètres déterminés à partir des essais de fluage et de chargement quasi statique présentent des différences notables. Pour la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire, les paramètres N et M sont plus faibles en fluage qu'en chargement quasi statique. On observe le phénomène inverse sur l'argilite de l'Est : le paramètre N est deux fois plus élevé en fluage qu'en chargement quasi statique. Le paramètre K est beaucoup plus élevé en fluage qu'en chargement quasi statique, excepté pour l'argilite de l'Est sur laquelle on ne constate pas de variation significative.

D'après la loi de Lemaitre, N est l'exposant de viscosité, M traduit l'écrouissage et K [MPa.s] exprime la résistance du matériau. L'étude paramétrique réalisée par Hajdu (2003) montre que plus N et M sont faibles plus les déformations viscoplastiques sont importantes. Lorsque K diminue, la résistance de la roche diminue et sa déformabilité augmente.

Ces premiers résultats de calage font apparaître que la viscosité de l'argilite de Tournemire et de la marne du Mont d'Or s'est exprimée davantage en fluage qu'en chargement quasi statique pendant nos essais. Cela peut être dû au fait que les vitesses imposées lors des essais de chargement quasistatique sur ces deux roches n'étaient pas suffisamment faibles pour permettre un développement de la viscosité en temps réel. Une meilleure détermination des paramètres du modèle VP serait certainement obtenue avec des essais à des vitesses de déformation plus faibles et donc plus proches de celle de la courbe limite.

D'après les calages réalisés sur les essais de fluage, il semble que l'argilite de Tournemire soit plus visqueuse que l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or : son exposant N est en effet plus faible que pour les deux autres roches. De ces trois roches argileuses, c'est également celle qui contient la plus forte proportion d'argiles (55%).

A partir de ces résultats, il est possible de calculer la valeur moyenne de chaque paramètre pour chacune des roches. Cependant, les formules de statistiques habituelles doivent être légèrement modifiées pour tenir compte de l'incertitude introduite par le faible nombre de valeurs déterminées (Annexe B). Dans le cas de lots inférieurs à 30 échantillons, l'écart-type se calcule avec l'expression suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n - 1}} \quad [5.28]$$

Les  $X_i$  sont les différentes valeurs prises par la variable et  $X_m$  est la moyenne algébrique de ces valeurs. n est le nombre d'échantillons contenus dans le lot considéré. L'intervalle dans lequel se trouve le paramètre que l'on cherche à évaluer est défini par :

$$I = [X_m - t_n m ; X_m + t_n m] \quad [5.29]$$

avec  $m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  et  $t_n$ , le coefficient de Student qui dépend du nombre d'échantillons, n, et de la

probabilité de trouver le paramètre dans l'intervalle calculé.

Ce traitement statistique a été appliqué à l'ensemble des paramètres identifiés sur les résultats de l'étude expérimentale. Les valeurs moyennes pour chaque roche ainsi que les intervalles de probabilité à 95% sont répertoriés dans le Tableau 5.10. L'hypothèse  $\dot{\epsilon}^{vp} = \dot{\epsilon}$  admise pour le calage des essais de chargement quasistatique n'étant vraisemblablement pas vérifiée pour les vitesses de déformations imposées à l'argilite de Tournemire, nous avons choisi de calculer les moyennes des paramètres de l'argilite de Tournemire en ne tenant compte que des résultats obtenus à partir des essais de fluage. En revanche, pour la marne du Mont d'Or, tous les résultats des calages ont été pris en compte, étant donné le peu d'essais de fluage réalisés.

Plus N, M et K sont faibles, plus les déformations viscoplastiques sont importantes. Les valeurs extrêmes des intervalles de variation des paramètres définissent donc en théorie deux jeux de paramètres limites, bornant la modélisation du comportement de la roche. Cependant, du fait du petit nombre de valeurs, ces intervalles sont très larges et apportent donc peu d'information la réponse mécanique de la roche à une sollicitation donnée. Par exemple, un échantillon d'argilite de l'Est, soumis pendant 30 jours à un déviateur de 30 MPa, présenterait une déformation axiale viscoplastique comprise entre  $1,6 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}/\text{m}$  (pour  $N = 21,62$  ;  $M = 9,71$  et  $K = 1815,4$ ) et  $2,6 \cdot 10^{13} \mu\text{m}/\text{m}$  (avec  $N = -0,52$  ;  $M = -0,14$  et  $K = 101,8$ ). De la même manière, le jeu de paramètres moyens est difficilement utilisable : il n'a pas de sens mécanique et n'est pas représentatif du comportement de la roche.

Afin de les comparer, les jeux de paramètres identifiés ont été utilisés pour simuler analytiquement un essai de fluage sous 30 MPa. Les courbes obtenues définissent un fuseau caractérisant la réponse mécanique de la roche à cette sollicitation. Les résultats de ces simulations sont présentés sur les Figure 5.15 à Figure 5.17.

Nous avons ensuite tracé la courbe de fluage moyenne pour chaque roche telle que, quel que soit le temps  $t$ , la déformation viscoplastique moyenne est la moyenne des déformations viscoplastiques calculées avec chacun des jeux de paramètres. L'identification des paramètres viscoplastiques du modèle VP à partir de cette courbe nous donne un jeu de paramètres moyen. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 5.11 et représenté sur la Figure 5.18.

Les résultats sont assez dispersés pour la marne du Mont d'Or : la déformation axiale viscoplastique varie de  $1200 \mu\text{m}/\text{m}$  à  $8950 \mu\text{m}/\text{m}$  au bout de 100 jours sous 30 MPa. Cette dispersion reflète celle des résultats expérimentaux, le lot d'échantillons n'étant pas homogène (provenance, teneur en eau, saturation, endommagement...)

D'après cette simulation et malgré son paramètre de viscosité, N, faible, l'argilite de Tournemire présente au bout de 100 jours une déformation viscoplastique bien moins importante que l'argilite de l'Est et la marne du Mont d'Or. Le paramètre de résistance, K très élevé pour cette roche diminue en effet sa déformabilité. De plus, les résultats expérimentaux que nous avons utilisés pour identifier les paramètres viscoplastiques de l'argilite de Tournemire proviennent d'essais de fluage de longue durée réalisés sur des échantillons d'orientation  $\theta = 90^\circ$ . Le déviateur de contrainte est donc appliqué parallèlement aux plans de stratification de la roche. Or, *Rejeb* (2003) a montré que dans cette direction la déformation est environ 30 % plus faible que dans le cas où le déviateur est appliqué perpendiculairement au litage ( $\theta = 0^\circ$ ). Cette simulation sous-estime donc la déformation axiale de l'argilite de Tournemire si on la compare à celle d'échantillon d'argilite de l'Est ou de marne du Mont d'Or orientés à  $\theta = 0^\circ$ .

Roche	Echantillon	E [GPa]	$\dot{\epsilon}$ [s <sup>-1</sup> ]	N	M	K
Argilite de l'Est	0°-1 EST 05558	4,83	10 <sup>-8</sup>	8,96	6,27	643,1
	0°-1 EST 05633	5,30	10 <sup>-6</sup>	7,11	5,55	1327,2
	0°-1 EST 05558	6,20	/	15,59	2,53	905,6
Marne du Mont d'Or	MO 9.1	20,40	8.10 <sup>-7</sup>	6,68	2,39	6,62 10 <sup>3</sup>
	MO 9.2	24,60	8.10 <sup>-7</sup>	6,26	2,08	9,85 10 <sup>3</sup>
	MO 11.1	23,50	8.10 <sup>-9</sup>	6,40	2,06	3,40 10 <sup>4</sup>
	MO 1.1	10,50	6.10 <sup>-8</sup>	6,20	2,16	1,08 10 <sup>4</sup>
	MO 4.1	23,00*	/	1,18	0,31	3,83 10 <sup>18</sup>
	MO 13.1	26,75*	/	2,85	0,79	1,27 10 <sup>8</sup>
Argilite de Tournemire	AT M5 2200	21,50	2,7 10 <sup>-7</sup>	23,10	4,62	181,3
	AT M5 3395.3	27,10	3 10 <sup>-7</sup>	14,20	4,24	596,3
	AT M5 3140.1	23,80	5 10 <sup>-8</sup>	13,33	4,11	776,1
	AT M4 890.1	15,80	1,6 10 <sup>-8</sup>	15,02	2,89	1586,6
	AT M4 630.1	15,00*	/	2,71	0,61	3,89 10 <sup>10</sup>
	AT M4 630.2	16,05*	/	1,27	0,72	1,11 10 <sup>14</sup>
	AT M4 890.2	32,30*	/	2,38	1,42	2,15 10 <sup>8</sup>
	AT M4 970.1	17,00*	/	2,21	0,60	2,80 10 <sup>11</sup>
	AT M5 1500.1	15,67*	/	0,99	0,61	8,33 10 <sup>16</sup>
	AT M5 3395.2	19,56*	/	0,76	0,49	4,91 10 <sup>21</sup>
	AT M5 3140.2	16,50*	/	0,80	0,49	2,58 10 <sup>20</sup>
	AT M5 400.1	15,99*	/	1,04	0,82	1,26 10 <sup>15</sup>

\* calculé sur les déformations axiales mesurées lors du premier palier de chargement.

Tableau 5.9 : Récapitulatif des paramètres du modèle VP calés sur les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire.

Roches	Paramètres	E [GPa]	N	M	K
Argilite de l'Est	Moyenne $X_m$	5,44	10,55	4,78	958,6
	Estimation de l'écart-type $\sigma_{n-1}$	0,70	4,46	1,98	345,1
	I Intervalle de probabilité à 95 %	[3,72 ; 7,17]	[-0,52 ; 21,62]	[-0,14 ; 9,71]	[101,8 ; 1815,4]
Marne du Mont d'Or	Moyenne $X_m$	21,46	4,93	1,63	2,54 10 <sup>7*</sup>
	Estimation de l'écart-type $\sigma_{n-1}$	5,76	2,32	0,86	5,08 10 <sup>7*</sup>
	I Intervalle de probabilité à 95 %	[15,42 ; 27,50]	[2,49 ; 7,37]	[0,73 ; 2,53]	[0 ; 8,86 10 <sup>7</sup> ]*
Argilite de Tournemire	Moyenne $X_m$	18,51**	1,52**	0,72**	6,46 10 <sup>20**</sup>
	Estimation de l'écart type $\sigma_{n-1}$	5,74**	0,78**	0,30**	1,72 10 <sup>21**</sup>
	I Intervalle de probabilité à 95 %	[13,70 ; 23,32]**	[0,86 ; 2,18]**	[0,46 ; 0,97]	[0 ; 2,09 10 <sup>21</sup> ]**

\* valeurs obtenues en enlevant de la série la valeur extrême ; \*\* évalués sur les essais de fluage.

Tableau 5.10 : Paramètres moyens du modèle VP pour les trois roches argileuses étudiées.

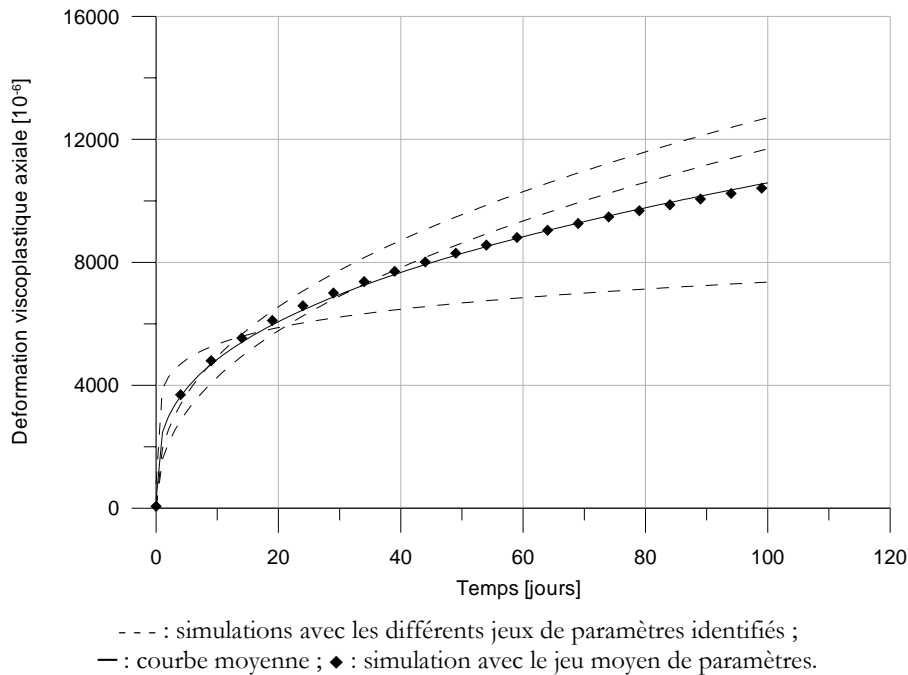


Figure 5.15 : Simulations d'un essai de fluage sous 30 MPa avec les différents jeux de paramètres viscoplastiques du modèle VP, identifiés sur l'argilite de l'Est.



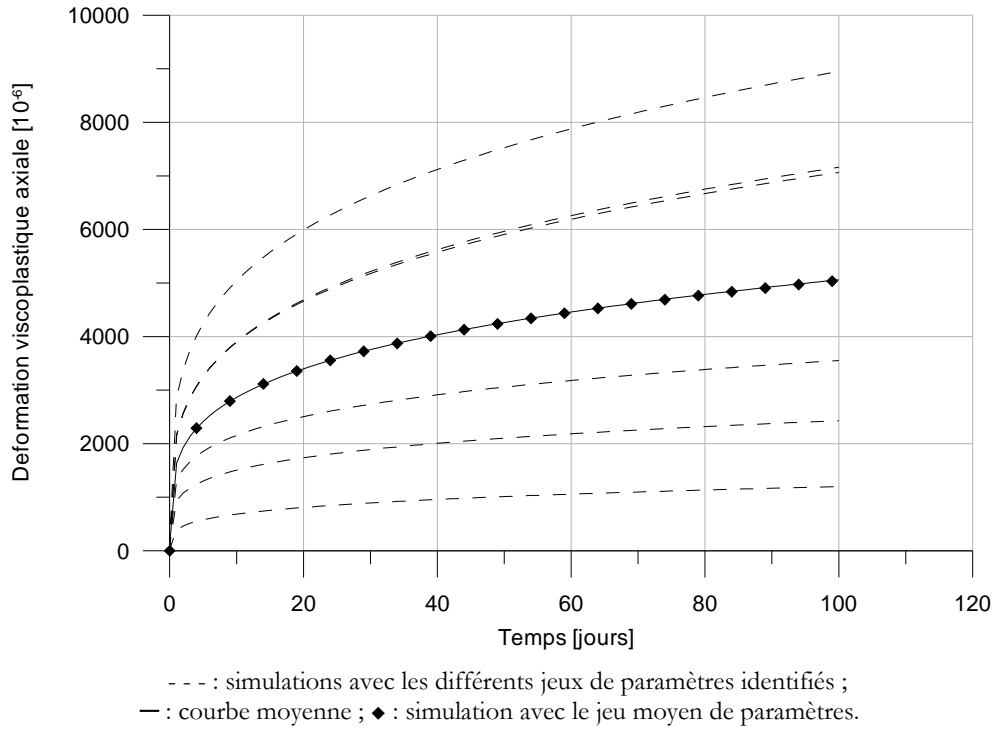


Figure 5.16 : Simulations d'un essai de fluage sous 30 MPa avec les différents jeux de paramètres viscoplastiques du modèle VP identifiés sur la marne du Mont d'Or.

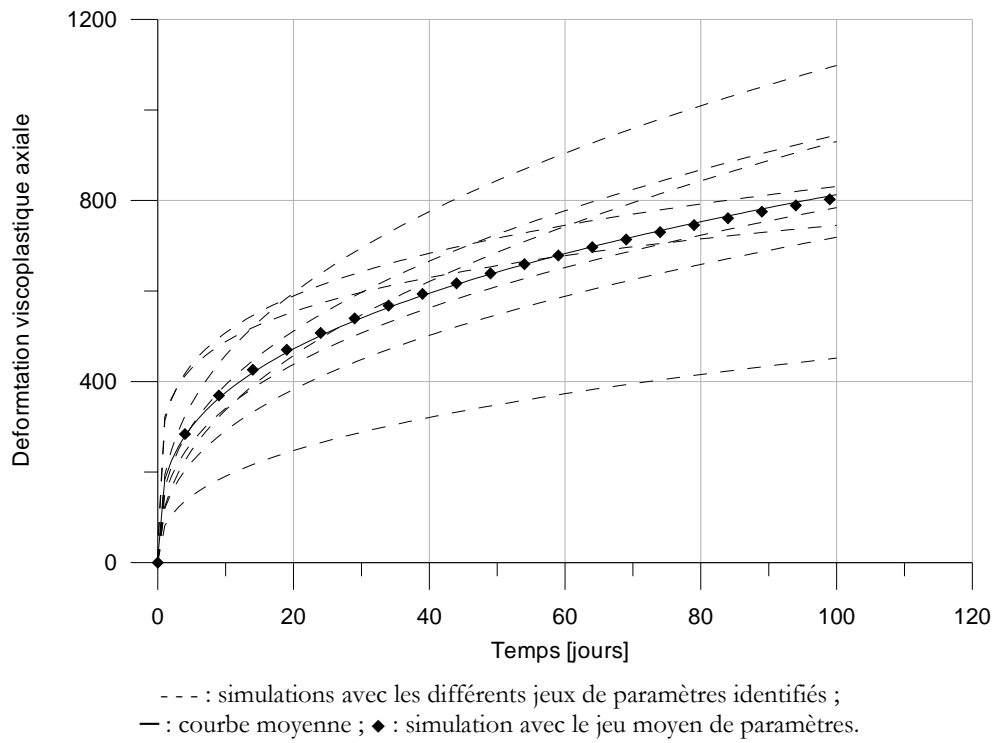


Figure 5.17 : Simulations d'un essai de fluage sous 30 MPa avec les différents jeux de paramètres viscoplastiques du modèle VP identifiés sur l'argilite de Tournemire.

Roches	N	M	K [MPa.s]
Argilite de l'Est	8,36	3,99	1256,8
Marne du Mont d'Or	4,07	1,32	4,23 10 <sup>5</sup>
Argilite de Tournemire	1,42	0,68	2,68 10 <sup>13</sup>

Tableau 5.11 : Jeux moyens de paramètres viscoplastiques du modèle VP pour les trois roches étudiées.

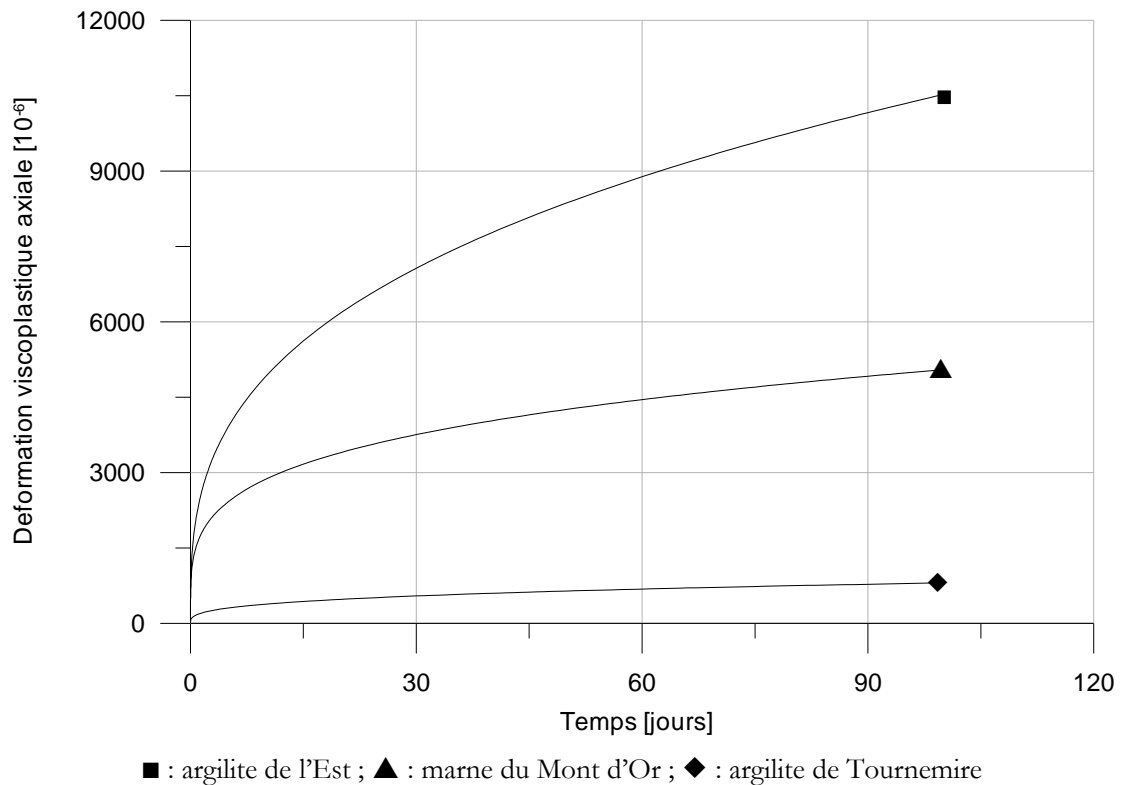


Figure 5.18 : Simulations analytiques d'un essai de fluage sous un déviateur de 30 MPa avec les jeux moyens de paramètres viscoplastiques de l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire (modèle VP).

## 5.4 Modèles viscoplastiques endommageables en condition uniaxiale

Nous avons vu au chapitre 2 que pour prévoir la rupture différée, la prise en compte de l'endommagement progressif de la roche et de son comportement volumique (dilatance) est indispensable. Etudions à présent les modèles viscoplastiques de Lemaitre tenant compte de ces observations expérimentales.

### 5.4.1 Modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre en condition uniaxiale

Dans le paragraphe 2.7.6, nous avons montré que la loi constitutive du modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre s'écrit :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{3}{2} \frac{1}{1-D} \left[ \frac{\sigma_{eq}}{(1-D)K(\epsilon^{vp})^{1/M}} \right]^N \frac{S}{\sigma_{eq}} \quad [5.30]$$

De plus, pour représenter l'évolution de la variable d'endommagement  $D$ , Rabotnov (1969), a proposé la fonction :

$$\dot{D} = \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r (1-D)^{-k} \quad [5.31]$$

où  $A$ ,  $r$  et  $k$  sont des caractéristiques de l'endommagement de fluage du matériau.

L'intégration de cette fonction, à contrainte constante, permet de déterminer l'expression du temps à la rupture pour un essai de fluage en compression uniaxiale :

$$\frac{dD}{(1-D)^{-k}} = \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r dt \quad [5.32]$$

La condition : à  $t = 0$ ,  $D = 0$ , donne la constante d'intégration. Ainsi :

$$D = 1 - \left[ 1 - (1+k) \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r t \right]^{\frac{1}{1+k}} \quad [5.33]$$

Comme à la rupture,  $D = 1$  :

$$t_{rupt} = \frac{1}{1+k} \left( \frac{\sigma}{A} \right)^{-r} \quad [5.34]$$

On en déduit :

$$D = 1 - \left[ 1 - \frac{t}{t_{rupt}} \right]^{\frac{1}{1+k}} \quad [5.35]$$

L'expression explicite de la loi de fluage s'obtient par intégration de l'équation [5.40] :

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^{-N/M}} = (1-D)^{-(N+1)} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N dt \quad [5.36]$$

Avec l'équation [5.44], on obtient :

$$(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^{N/M} d\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = \left[ 1 - \frac{t}{t_{rupt}} \right]^{1+k} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N dt \quad [5.37]$$

En intégrant cette expression, avec la condition initiale : à  $t = 0$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = 0$ , il vient :

$$\frac{M}{M+N} (\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^{N+M} = - t_{rupt} \frac{k+1}{k-n} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N \left[ \left( 1 - \frac{t}{t_{rupt}} \right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \quad [5.38]$$

Avec l'expression de  $t_{rupt}$ , on obtient finalement pour un essai de fluage en compression uniaxiale :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} = \left[ - \frac{M+N}{M(k-N)} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{A} \right)^{-r} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N \left[ \left( 1 - (k+1) \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{A} \right)^r t \right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.39]$$

De même, dans la direction transversale :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} = - \frac{1}{2} \left[ - \frac{M+N}{M(k-N)} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{A} \right)^{-r} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N \left[ \left( 1 - (k+1) \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{A} \right)^r t \right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.40]$$

La condition  $t = t_{rupt}$  dans l'équation précédente nous donne la déformation axiale à la rupture :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{1\,rupt}^{vp} = \left[ t_{rupt} \frac{k+1}{k-N} \frac{M+N}{M} \left( \frac{\boldsymbol{\sigma}}{K} \right)^N \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.41]$$

Ce modèle suppose toujours un développement des déformations viscoplastiques à volume constant, on vérifie bien que :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{vol}^{vp} = \boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} + 2\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} = 0 \quad [5.42]$$

Lors d'un essai de chargement uniaxial et quasi statique, d'après le modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre, la vitesse de déformation viscoplastique s'écrit :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{1}{1-D} \left[ \frac{\boldsymbol{\sigma}}{(1-D)K(\boldsymbol{\varepsilon}^{vp})^{1/M}} \right]^N = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = cste \quad [5.43]$$

On en déduit la loi de comportement sous chargement uniaxial quasi statique qui s'écrit :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} = \left( \frac{1}{1-D} \right)^{\frac{M}{N}} \left[ \frac{\boldsymbol{\sigma}}{(1-D)K} \right]^M (\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1)^{\frac{M}{N}} \quad [5.44]$$

Ce modèle de Lemaitre sera appelé dans la suite de ce chapitre, *modèle viscoplastique endommageable (VPE)*.

### 5.4.2 Modèle viscoplastique de Lemaitre avec prise en compte de la déformation volumique en condition uniaxiale

Nous avons établi dans le paragraphe 2.7.7.2 l'expression générale de la loi viscoplastique de Lemaitre avec prise en compte de la déformation volumique :

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{9}\alpha^2 + 1}} \dot{p} \left( \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{\sigma_{eq}} + \frac{\alpha \mathbf{I}}{3} \right) \quad [5.45]$$

Le comportement volumique est donc modélisé par le paramètre  $\alpha$  traduisant la contractance ( $\alpha > 0$ ) ou la dilatance ( $\alpha < 0$ ) du matériau. Cette loi est intégrable en condition uniaxiale et les expressions explicites des déformations axiales et transversales lors d'un essai de fluage uniaxial sont les suivantes :

$$\varepsilon_1 = \frac{q}{E} + \left( \frac{\alpha}{3} + 1 \right) \left( \frac{2}{9}\alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{N} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.46]$$

$$\varepsilon_3 = -\nu \frac{q}{E} + \left( -\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{2}{9}\alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.47]$$

avec :  $q$ , le déviateur de contrainte

$M$ ,  $N$  et  $K$ , les paramètres du modèle, caractéristiques du matériau.

La déformation volumique vaut alors pour une roche isotrope :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{vol}^{vp} = \boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} + 2\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} = \alpha \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{2}{9}\alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2M}} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.48]$$

De plus, d'après le modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique

différée, la vitesse de déformation viscoplastique vaut :

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{9}\alpha^2 + 1}} \dot{p} \left( \frac{3}{2} \frac{\mathbf{S}}{\sigma_{eq}} + \frac{\alpha \mathbf{I}}{3} \right) \quad [5.49]$$

$$\text{avec : } \dot{p} = \left( \sqrt{\frac{2}{9}\alpha^2 + 1} \right) \left\langle \frac{\sigma_{eq} + \alpha \sigma_m}{K p^{\frac{1}{M}}} \right\rangle^N \quad [5.50]$$

Dans le cas d'un essai de chargement uniaxial à vitesse constante et quasi statique, cette expression est équivalente à :

$$\dot{\epsilon}_1^{vp} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^N (p)^{-\frac{N}{M}} = \dot{\epsilon}_1 = \text{cste} \quad [5.51]$$

$$\text{soit : } \dot{\epsilon}_1^{vp} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^N \left( \frac{\sqrt{\frac{2}{9}\alpha^2 + 1}}{1 + \frac{\alpha}{3}} \epsilon_1^{vp} \right)^{-\frac{N}{M}} = \dot{\epsilon}_1 \quad [5.52]$$

On en déduit :

$$\left( \epsilon_1^{vp} \right)^{\frac{N}{M}} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right)^{\frac{M+N}{M}} \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^N \left( \frac{2}{9}\alpha^2 + 1 \right)^{-\frac{N}{2M}} \frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \quad [5.53]$$

donc la loi de comportement sous chargement uniaxial quasi statique s'écrit :

$$\epsilon_1^{vp} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right)^{\frac{M+N}{N}} \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^M \left( \frac{2}{9}\alpha^2 + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{\frac{M}{N}} \quad [5.54]$$

Ce modèle de Lemaitre modifié pour tenir compte du comportement volumique du matériau sera appelé dans la suite de ce chapitre, *modèle viscoplastique avec déformation volumique (VPD)*.

### 5.4.3 Loi constitutive viscoplastique avec dilatance et endommagement anisotrope proposée par Hajdu en configuration uniaxiale

Le modèle viscoplastique endommageable d'Hajdu (2003) a été présenté succinctement dans le paragraphe 2.7.7.3 sous sa forme tensorielle tridimensionnelle. Cependant, nos essais mécaniques sur l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire ont été réalisés en condition uniaxiale. Dans le cas de ces chemins de contrainte, en fluage ou chargement quasi statique, les équations du modèle se simplifient.

Dans le cas d'un chargement uniaxial, le tenseur des contraintes s'écrit :

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [5.55]$$

Le tenseur d'endommagement :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} \quad [5.56]$$

Le tenseur des contraintes effectives :

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1}{1-D_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [5.57]$$

Le déviateur effectif :

$$\tilde{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{\sigma_1}{1-D_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{1-D_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{1-D_1} \end{bmatrix} \quad [5.58]$$

Le tenseur  $\tilde{\tilde{\mathbf{S}}}$  :

$$\tilde{\tilde{\mathbf{S}}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} \frac{\sigma_1}{(1-D_1)(1-D_1)} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{(1-D_1)(1-D_3)} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{(1-D_1)(1-D_3)} \end{bmatrix} \quad [5.59]$$

La contrainte moyenne effective :

$$\tilde{\sigma}_m = \frac{1}{3} \frac{\sigma_1}{1-D_1} \quad [5.60]$$

la contrainte équivalente effective :

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_1}{1-D_1} \quad [5.61]$$

On en déduit :

- pour la direction axiale :

$$\dot{\epsilon}_1^{vp} = \frac{1}{1-D_1} \left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)}{(1-D_1)K p_1^{1/M}} \right)^N \quad [5.62]$$

- pour la direction transversale :

$$\dot{\epsilon}_3^{vp} = \frac{1}{1-D_3} \left(-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}\right) \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma_1}{(1-D_1)K p_3^{1/M}} \right)^N \quad [5.63]$$

On calcule les variables d'érouissage  $p_i$  :

$$p_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \epsilon_1^{vp} \frac{\sqrt{\left(\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1-D_1}\right)^2 + 2 \left(\frac{-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}}{1-D_3}\right)^2}}{\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1-D_1}} \quad [5.64]$$

$$p_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \epsilon_3^{vp} \frac{\sqrt{\left(\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1-D_1}\right)^2 + 2 \left(\frac{-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}}{1-D_3}\right)^2}}{\frac{-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}}{1-D_3}} \quad [5.65]$$

et l'évolution des variables d'endommagement :

$$\dot{D}_1 = \beta \left( \frac{\sigma_1}{A(1-D_3)^{2q}} \right)^r \quad [5.66]$$

$$\dot{D}_3 = \left( \frac{\sigma_1}{A(1-D_3)^{2q}} \right)^r \quad [5.67]$$

Les équations d'évolution de l'endommagement s'écrivent sous forme intégrée, avec les conditions  $\sigma_1 = \text{cste}$  et  $t = 0$  implique  $D_1$  et  $D_3 = 0$  :



$$1 - D_1 = \left[ 1 - \beta (2qr + 1) \left( \frac{\sigma_1}{\Lambda} \right)^r t \right]^{\frac{1}{2qr+1}} \quad [5.68]$$

$$1 - D_3 = \left[ 1 - (2qr + 1) \left( \frac{\sigma_1}{\Lambda} \right)^r t \right]^{\frac{1}{2qr+1}} \quad [5.69]$$

Ce système d'équations ([5.61] à [5.68]) n'admet pas de solutions analytiques pour  $\epsilon_1^{vp}$  et  $\epsilon_3^{vp}$ .

Dans la suite du chapitre, le modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique et de l'anisotropie d'endommagement, proposé par Hajdu sera appelée *modèle viscoplastique avec déformation volumique et endommagement anisotrope (VPDEA)*.

## 5.5 Procédures d'identification des paramètres du modèle VPDEA

### 5.5.1 Identification des paramètres du modèle VPDEA à partir d'un essai de fluage

La non-intégrabilité des lois constitutives du modèle VPDEA ne permet pas d'établir d'expression analytique explicite de la loi de fluage. Pour identifier les paramètres du modèle, nous allons donc dans un premier temps exploiter les modèles viscoplastique (VP), viscoplastique endommageable (VPE) et viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique (VPD).

A partir de la loi de fluage du modèle VP, nous avons vu qu'il était possible de déterminer analytiquement les paramètres viscoplastiques M, N et K, modélisant la phase de fluage primaire. La méthode d'identification est décrite au paragraphe 5.2.2.

Comme la loi viscoplastique de Lemaitre, la loi du modèle VPD peut être intégrée analytiquement à contrainte constante. Les expressions des déformations viscoplastiques d'une roche isotrope,  $\epsilon_{nn}^{vp}$  et  $\epsilon_{tt}^{vp}$ , sont alors :

$$\epsilon_{nn}^{vp} = \left( \frac{\alpha}{3} + 1 \right) \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{N} \left( \frac{\left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.70]$$

$$\epsilon_{tt}^{vp} = \left( -\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.71]$$

Dans un repère bilogarithmique, la déformation viscoplastique est donc une fonction linéaire du temps ( $\epsilon_{tt}^{vp}$  est négatif par convention) :

$$\ln \epsilon_{nn}^{vp} = \frac{M}{M+N} \ln \left[ \left( \frac{\alpha}{3} + 1 \right) \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{N} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \sigma}{K} \right)^N \right] \right] + \frac{M}{M+N} \ln t \quad [5.72]$$

$$\ln(-\epsilon_{tt}^{vp}) = \frac{M}{M+N} \ln \left[ \left( \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{N} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \sigma}{K} \right)^N \right] \right] + \frac{M}{M+N} \ln t \quad [5.73]$$

que l'on peut écrire sous la forme simplifiée :

$$\ln \epsilon_{nn}^{vp} = A_{nn} + C \ln t = \frac{M}{M+N} \ln B_{nn} + C \ln t \quad [5.74]$$

$$\ln(-\epsilon_{tt}^{vp}) = A_{tt} + C \ln t = \frac{M}{M+N} \ln B_{tt} + C \ln t \quad [5.75]$$

avec A l'ordonnée à l'origine, fonction de B, et C la pente des droites obtenues, les indices correspondant à la déformations à partir desquelles ces coefficients ont été calculés.

On en déduit donc :

$$\frac{\exp\left(\frac{A_{nn}}{C}\right)}{\exp\left(\frac{A_{tt}}{C}\right)} = \frac{B_{nn}}{B_{tt}} = \frac{\frac{\alpha}{3} + 1}{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{3}} \quad [5.76]$$

ce qui permet de déterminer la valeur du paramètre  $\alpha$ .

On doit également avoir P, la pente des droites tracées telle que :

$$P = \frac{M}{M+N} \quad [5.77]$$

De plus, dans ce modèle, la déformation volumique viscoplastique vaut :

$$\epsilon_{vol}^{vp} = \epsilon_1^{vp} + 2\epsilon_3^{vp} = \alpha \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{-N}{2M}} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.78]$$

Le logarithme de  $\epsilon_{vol}^{vp}$  est donc une fonction linéaire du logarithme du temps (pour  $\alpha > 0$ , on est en contractance) :

$$\ln \varepsilon_{\text{vol}}^{\text{vp}} = \ln \alpha + \frac{M}{M+N} \left[ \ln \left( \frac{M+N}{M} \right) - \frac{N}{2M} \ln \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right) + N \ln \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \sigma}{K} \right) \right] + \frac{M}{M+N} \ln t \quad [5.79]$$

Dans un repère bilogarithmique, l'ordonnée à l'origine de cette droite, C, vaut donc :

$$C = \ln \alpha + \frac{M}{M+N} \ln \left( \frac{M+N}{M} \right) - \frac{N}{2(M+N)} \ln \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right) + \frac{MN}{M+N} \ln \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) + \frac{MN}{M+N} \ln \left( \frac{\sigma}{K} \right) \quad [5.80]$$

En supposant M, N, K et  $\sigma$  connus, le paramètre  $\alpha$  est solution de l'équation :

$$0 = \ln \alpha - \frac{N}{2(M+N)} \ln \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right) + \frac{MN}{M+N} \ln \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) + C' \quad [5.81]$$

$$\text{avec : } C' = \frac{M}{M+N} \ln \left( \frac{M+N}{M} \right) + \frac{MN}{M+N} \ln \left( \frac{\sigma}{K} \right) - C \quad [5.82]$$

Connaissant M, N, K et  $\sigma$ , il est donc possible de déterminer le paramètre  $\alpha$  du modèle VPD. Ce modèle perd son intégrabilité lorsqu'il est couplée à un endommagement anisotrope (modèle VPDEA). Cependant, dans le modèle VPDEA, le cas  $\beta = 1$  (endommagement isotrope) et  $\alpha = 0$  (développement des déformations viscoplastiques à volume constant) correspond à l'étude du modèle VPE que nous allons exploiter à présent.

D'après le modèle VPE, lors d'un essai de fluage uniaxial, les déformations viscoplastiques d'une roche isotrope obéissent aux lois suivantes :

$$\varepsilon_1^{\text{vp}} = \left[ -\frac{M+N}{M(k-N)} \left( \frac{\sigma}{A} \right)^{-r} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^N \left[ \left( 1 - (k+1) \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r t \right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.83]$$

$$\varepsilon_3^{\text{vp}} = -\frac{1}{2} \left[ -\frac{M+N}{M(k-N)} \left( \frac{\sigma}{A} \right)^{-r} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^N \left[ \left( 1 - (k+1) \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r t \right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.84]$$

De plus, la déformation axiale à la rupture vaut :

$$\varepsilon_{1 \text{ rupt}}^{\text{vp}} = \left[ t_{\text{rupt}} \frac{k+1}{k-N} \frac{M+N}{M} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^N \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [5.85]$$

A partir de cette relation, connaissant les paramètres viscoplastiques M, N et K ainsi que le déviateur de contrainte appliqué  $\sigma$ , on peut déduire des résultats de l'essai (mesures de  $\varepsilon_{1 \text{ rupt}}^{\text{vp}}$  et  $t_{\text{rupt}}$ ) la valeur du paramètre k :

$$k = \frac{1 + N \cdot \xi}{\xi - 1} \quad [5.86]$$

$$\text{avec : } \xi = \frac{\left(\epsilon_{1 \text{ rupt}}^{\text{vp}}\right)^{\frac{M+N}{M}}}{t_{\text{rupt}} \frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N} \quad [5.87]$$

Les paramètres  $A$  et  $r$  sont liés par la relation :

$$t_{\text{rupt}} = \frac{1}{1+k} \left(\frac{\sigma}{A}\right)^{-r} \quad [5.88]$$

$$\text{soit : } A = \sigma \left[ (1+k) \left(t_{\text{rupt}}\right)^{\frac{1}{r}} \right] \quad [5.89]$$

Il est à noter que dans le modèle VPDEA, le paramètre  $q$  correspond à :

$$q = \frac{k}{2r} \quad [5.90]$$

Les paramètres d'endommagement ne sont accessibles que si l'on dispose d'informations sur la rupture différée de la roche :  $\epsilon_{1 \text{ rupt}}^{\text{vp}}$  et  $t_{\text{rupt}}$ . Cependant, si l'essai de fluage n'a pas été mené jusqu'à la rupture de l'échantillon et si seul le fluage primaire a été observé, le modèle VPE et le modèle VPDEA sont inadaptés.

Il est rare que l'essai de fluage étudié ne comporte qu'un seul palier de chargement permettant d'explorer les phases de fluage primaire, secondaire et tertiaire. Dans le cas d'un essai multipalier, en théorie, il faut tenir compte de l'endommagement atteint à chaque palier.

Si entre  $t = 0$  et  $t = t_1$ , l'échantillon est soumis à une contrainte uniaxiale  $\sigma = \sigma_1$ , puis entre  $t = t_1$  et  $t = t_2$ , à  $\sigma = \sigma_2$ , la variable d'endommagement s'écrit :

-  $0 < t < t_1$  :

$$\sigma = \sigma_1 \quad \Rightarrow \quad D = 1 - \left[ 1 - (1+k) \left(\frac{\sigma_1}{A}\right)^r t \right]^{\frac{1}{1+k}} \quad [5.91]$$

-  $t_1 < t < t_2$  :

$$\sigma = \sigma_2 \quad \Rightarrow \quad D = 2 - \left[ 1 - (1+k) \left(\frac{\sigma_1}{A}\right)^r t \right]^{\frac{1}{1+k}} - \left[ 1 - (1+k) \left(\frac{\sigma_2}{A}\right)^r (t - t_1) \right]^{\frac{1}{1+k}} \quad [5.92]$$

La rupture se produit lorsque la variable d'endommagement  $D$  atteint la valeur critique de 1. Pour un essai comportant  $N$  paliers de chargement ( $N > 1$ ) :

$$D = \sum_{i=1}^N D_i \quad [5.93]$$

$$\text{Donc : } 1 = N - \sum_{i=1}^N \left[ 1 - (1+k) \left( \frac{\sigma_i}{A} \right)^r (t_i - t_{i-1}) \right] \quad [5.94]$$

avec  $t_0 = 0$  et  $t_N = t_{\text{rupt}}$ .

Connaissant  $N$ , les différents paliers de chargement  $\sigma_i$  et les  $t_i$ , cette équation nous donne une relation liant les paramètres d'endommagement  $(A, k, r)$ .

Cependant, pour déterminer les paramètres d'endommagement à partir d'un essai de fluage multipalier, en première approximation, il est possible de ne considérer que le dernier palier de chargement. Cette simplification équivaut à supposer que la valeur de la variable d'endommagement  $D$ , atteinte à la fin du palier précédent est négligeable devant 1. Puisque qu'aucune accélération de la déformation n'a été détectée au cours des paliers précédents, la dernière phase de l'essai peut être isolée. On se ramène de cette manière au cas d'un essai de fluage monopulier pour la détermination des paramètres  $(A, k, r)$ .

Dans le modèle VPDEA, la rupture différée de la roche intervient lorsqu'un des composants de la variable d'endommagement tensorielle atteint une valeur critique. En compression uniaxiale, c'est la composante transversale, dont l'évolution est plus rapide que la composante axiale, qui détermine l'instant de la rupture. En fluage, l'expression analytique de  $D_{tt}$  s'écrit :

$$D_3 = 1 - \left[ 1 - (2qr + 1) \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r t \right]^{\frac{1}{2qr+1}} \quad [5.95]$$

Pour  $D_3 = 1$ , les paramètres  $(A, k, r)$  ou  $(A, q, r)$  identifiés avec le VPE vérifient bien l'équation, qui reste valable dans le modèle VPDEA :

$$t_{\text{rupt}} = \frac{1}{1+k} \left( \frac{\sigma}{A} \right)^{-r} \quad [5.96]$$

Pour un essai multipalier, on obtient une série équivalente à l'équation établie plus haut.

De plus :

$$1 - D_1 = \left[ 1 - \beta (2qr + 1) \left( \frac{\sigma_1}{A} \right)^r t \right]^{\frac{1}{2qr+1}} \quad [5.97]$$

$$\dot{\epsilon}_1^{\text{vp}} = \frac{1}{1 - D_1} \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right)}{(1 - D_1) K p_1^{1/M}} \right)^N \quad [5.98]$$

$$\text{et : } p_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \epsilon_1^{\text{vp}} \frac{\sqrt{\left( \frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1 - D_1} \right)^2 + 2 \left( \frac{-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}}{1 - D_3} \right)^2}}{1 + \frac{\alpha}{3}} \frac{1}{1 - D_1}} \quad [5.99]$$

Ces équations ne permettent pas d'obtenir l'expression littérale donnant le paramètre  $\beta$  en fonction des autres paramètres du modèle. Cependant, connaissant le paramètre de dilatance  $\alpha$ , les paramètres viscoplastiques ( $M, N, K$ ) et les paramètres d'endommagement ( $A, q, r$ ), il est possible d'identifier le paramètre  $\beta$  en le faisant varier, par dichotomie, jusqu'à obtenir la meilleure superposition des courbes de fluage expérimentales et théoriques.

L'étude successive des modèles VP, VPD, VPE permet donc d'identifier les paramètres viscoplastiques ( $M, N, K$ ), les paramètres d'endommagement ( $A, k, r$ ) et le paramètre de dilatance  $\alpha$ . Ils peuvent ensuite être utilisés dans le modèle VPDEA. Le paramètre d'anisotropie  $\beta$  reste ensuite le seul paramètre à déterminer.

Cette analyse des résultats d'un essai de fluage à partir de différents modèles nous a permis d'établir une procédure d'identification des huit paramètres du modèle VPDEA. Elle est résumée par le diagramme de la Figure 5.19.

Les ajustements consistent en de très petites variations autour des valeurs déterminées à l'étape précédente afin de mieux faire correspondre les courbes expérimentales et théoriques. Les triplets successifs de paramètres viscoplastiques ( $M, N, K$ )<sub>i</sub> sont donc des paramètres d'ajustement. Les calages sont réalisés en faisant varier le paramètre et en minimisant, par dichotomie, l'écart entre les courbes expérimentales et théoriques, calculé par la méthode des moindres carrés. Cette procédure d'identification des paramètres est illustrée dans l'annexe C.

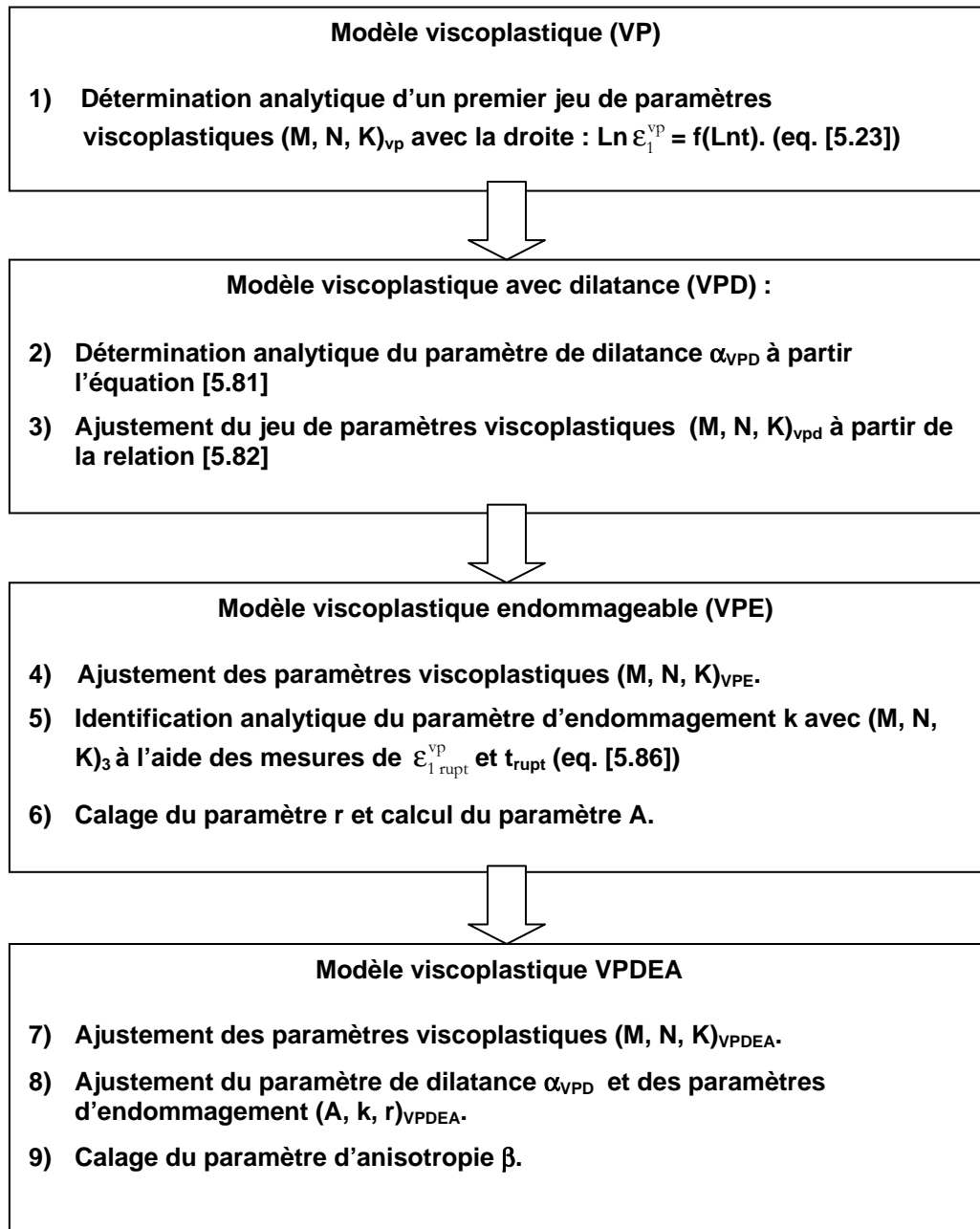


Figure 5.19 : Procédure générale d'identification des paramètres du modèle VPDEA à partir des résultats d'un essai de fluage mené jusqu'à la rupture de l'échantillon.

### 5.5.2 Identification des paramètres à partir d'un essai de compression uniaxiale quasi statique

Les équations du modèle VPDEA étant non intégrables, même en condition de chargement uniaxial quasi statique, les expressions explicites des déformations viscoplastiques sont impossibles à établir pour ce type d'essai. Pour leur modélisation, les déformations élastiques et viscoplastiques sont calculées par récurrence, en fixant un pas de temps  $\Delta t$  et en admettant l'hypothèse de partition de la déformation, soit :

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_1 = \boldsymbol{\varepsilon}_1^e + \boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_3 = \boldsymbol{\varepsilon}_3^e + \boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp} \end{cases} \quad [5.100]$$

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_1^e)_{t+\Delta t} = \frac{\boldsymbol{\sigma}}{(1-D_1)E} \Delta t + (\boldsymbol{\varepsilon}_1^e)_t \quad [5.101]$$

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp})_{t+\Delta t} = \left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) \left(\frac{1}{1-(D_1)_t}\right) \left[ \frac{\left(\frac{\alpha}{3} + 1\right) (\boldsymbol{\sigma})_t}{K(1-(D_1)_t)(p_1)_t^{1/M}} \right]^N \Delta t + (\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp})_t \quad [5.102]$$

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_3^e)_{t+\Delta t} = \frac{-\nu \boldsymbol{\sigma}}{(1-D_1)E} \Delta t + (\boldsymbol{\varepsilon}_3^e)_t \quad [5.103]$$

$$(\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp})_{t+\Delta t} = \left(\frac{\alpha}{3} - \frac{1}{2}\right) \left(\frac{1}{1-(D_3)_t}\right) \left[ \frac{\left(\frac{\alpha}{3} + 1\right) (\boldsymbol{\sigma})_t}{K(1-(D_1)_t)(p_3)_t^{1/M}} \right]^N \Delta t + (\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp})_t \quad [5.104]$$

avec :

$$(p_1)_t = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} (\boldsymbol{\varepsilon}_1^{vp})_t \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1 - (D_1)_t}\right)^2 + 2 \left(\frac{\frac{\alpha}{3} - \frac{1}{2}}{1 - (D_3)_t}\right)^2}}{\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1 - (D_1)_t}} \quad [5.105]$$

$$(p_3)_t = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} (\boldsymbol{\varepsilon}_3^{vp})_t \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1 - (D_1)_t}\right)^2 + 2 \left(\frac{\frac{\alpha}{3} - \frac{1}{2}}{1 - (D_3)_t}\right)^2}}{\frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{1 - (D_1)_t}} \quad [5.106]$$



$$\text{et : } (D_1)_t = (D_1)_{t-\Delta t} + \beta \left( \frac{\sigma_t}{A(1-(D_3)_{t-\Delta t})^{2q}} \right)^r \Delta t \quad [5.107]$$

$$(D_3)_t = (D_3)_{t-\Delta t} + \beta \left( \frac{\sigma_t}{A(1-(D_3)_{t-\Delta t})^{2q}} \right)^r \Delta t \quad [5.108]$$

Avec ces formules, un calcul pas à pas permet de modéliser un essai de chargement quasi statique.

Pour identifier les paramètres du modèle VPDEA à partir d'essais de chargement quasi statique, nous allons devoir procéder par étape et étudier dans un premier temps les modèles VP, VPE et VPD.

Grâce à la loi de chargement quasi statique établie avec le modèle viscoplastique de Lemaitre, nous avons vu qu'il était possible de déterminer analytiquement les paramètres viscoplastiques M, N et K à partir de la droite  $\text{Ln } \epsilon_1^{\text{vp}} = f(\text{Ln } \sigma)$ . La méthode d'identification est décrite au paragraphe 5.2.1.

Nous avons établi dans le paragraphe précédent que d'après le modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique différée (VPD), la déformation axiale viscoplastique obéit à la loi :

$$\epsilon_1^{\text{vp}} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right)^{\frac{M+N}{N}} \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^M \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{\frac{M}{N}} \quad [5.109]$$

Dans un repère bilogarithmique, la déformation axiale est donc une fonction de la contrainte axiale appliquée :

$$\text{Ln } \epsilon_1^{\text{vp}} = \frac{M+N}{N} \text{Ln} \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) + M \text{Ln} \left( \frac{1 + \frac{\alpha}{3}}{K} \right) + M \text{Ln}(\sigma) - \frac{1}{2} \text{Ln} \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right) - \frac{M}{N} \text{Ln}(\dot{\epsilon}_1) \quad [5.110]$$

La pente de la droite obtenue, P, vérifie :

$$P = M \quad [5.111]$$

Et l'ordonnée à l'origine, C, vaut :

$$C = \frac{M+N}{N} \text{Ln} \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) + M \text{Ln} \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) - M \text{Ln}(K) - \frac{1}{2} \text{Ln} \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right) - \frac{M}{N} \text{Ln}(\dot{\epsilon}_1) \quad [5.112]$$

Connaissant les paramètres viscoplastiques (M, N, K) et la vitesse de sollicitation de l'échantillon, la solution de cette équation donne le paramètre de dilataance  $\alpha$ .

Nous avons établi que lors d'un essai de chargement uniaxial et quasi statique, d'après le modèle VPE, la déformation axiale viscoplastique s'écrit :

$$\epsilon_1^{\text{vp}} = \left( \frac{1}{1-D} \right)^{\frac{M}{N}} \left[ \frac{\sigma}{(1-D)K} \right]^M (\dot{\epsilon}_1)^{-\frac{M}{N}} \quad [5.113]$$

Or,  $D$ , la variable d'endommagement est une fonction de  $\sigma$  (Rabotnov, 1969), telle que :

$$\dot{D} = \left( \frac{\sigma}{A} \right)^r (1-D)^{-k} \quad [5.114]$$

Ce système d'équations n'admet pas de solution analytique. Pour identifier les paramètres ( $A$ ,  $q$ ,  $r$ ), nous avons eu recours à l'étude paramétrique réalisée par Hajdu (2003). En simulant des essais de chargement quasi statique, il a montré que (Figure 5.20) :

- $A$ , le coefficient de ténacité influence l'amplitude des déformations axiales : la déviation des courbes par rapport à la droite élastique est comparable pour différentes valeurs de  $A$  avant que la contrainte ne dépasse le seuil à partir duquel l'endommagement devient sensible.
- $q$ , le paramètre de progressivité de l'endommagement, détermine la phase post-pic : avec  $q$  élevé, le modèle présente une rupture fragile, sans radoucissement.
- $r$ , l'exposant d'endommagement, influence la sensibilité à la vitesse de sollicitation. Plus  $r$  est grand, moins l'écart entre les courbes théoriques obtenues pour deux vitesses de déformation différentes est important.

En faisant varier un à un, par dichotomie, les paramètres d'endommagement, nous avons cherché la meilleure superposition des courbes expérimentale et théorique. A partir d'un jeu de paramètres ajustés sur un essai de fluage, l'exposant  $r$  est déterminé en premier, puis  $A$  et enfin  $q$ .

Finalement, grâce au modèle viscoplastique de Lemaitre, les paramètres ( $M$ ,  $N$ ,  $K$ ) ont pu être identifiés analytiquement. Le paramètre de dilatance  $\alpha$  est accessible à partir des équations du modèle viscoplastique avec dilatance. Enfin, les paramètres d'endommagement ( $A$ ,  $q$ ,  $r$ ) peuvent être déterminés à l'aide de l'étude paramétrique d'Hajdu (2003).

Si l'on connaît ( $M$ ,  $N$ ,  $K$ ), ( $A$ ,  $q$ ,  $r$ ) et  $\alpha$ , dans le modèle VPDEA, le paramètre d'anisotropie de l'endommagement,  $\beta$ , reste donc le seul paramètre à identifier. Il est alors déterminé par ajustements successifs jusqu'à obtenir la meilleure superposition des courbes expérimentale et théorique, leur écart étant évalué par la méthode des moindres carrés.

Cette analyse des résultats d'un essai de compression uniaxiale à vitesse quasi statique à partir de différents modèles nous a permis d'établir une procédure d'identification des paramètres du modèle VPDEA. Elle est résumée par le diagramme de la Figure 5.21.

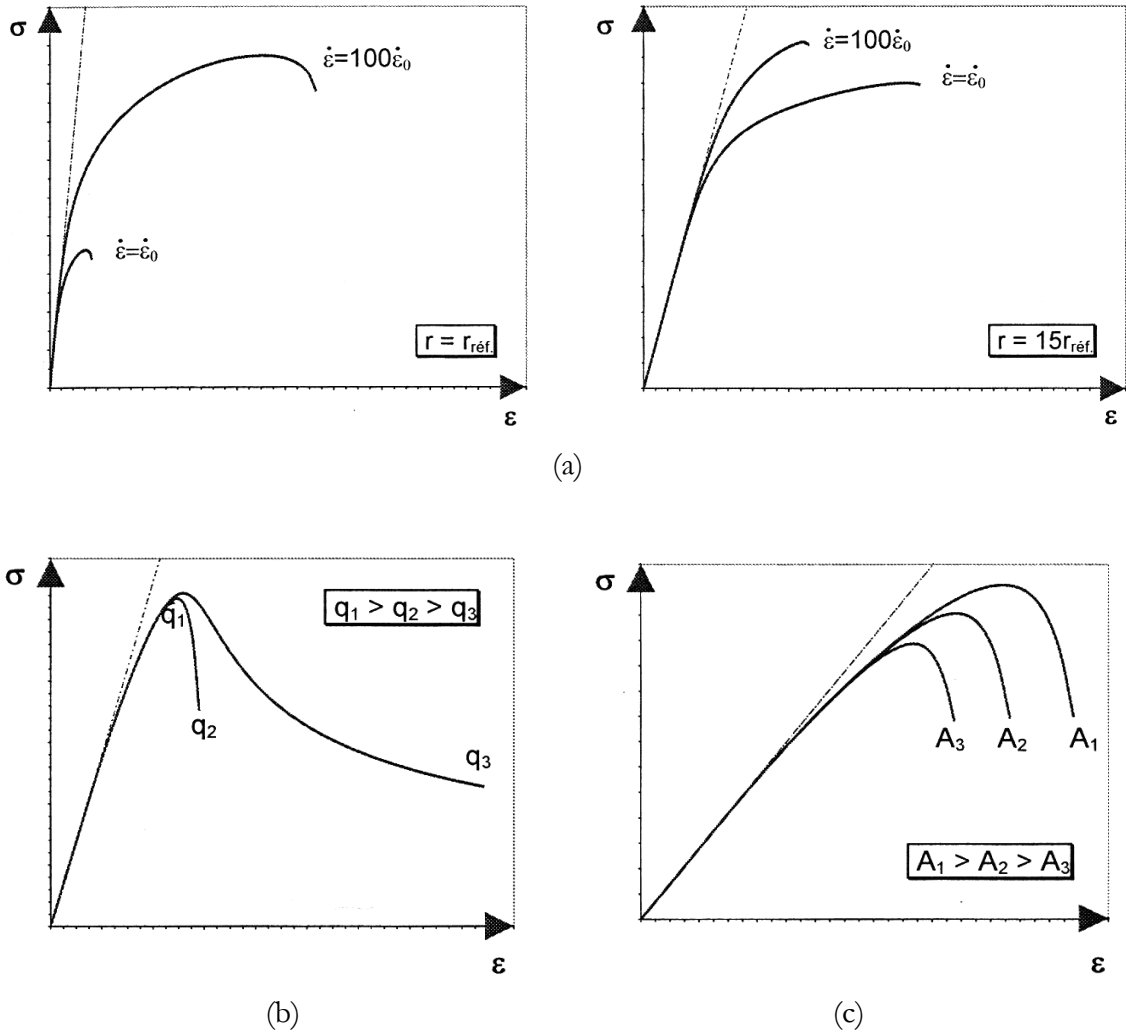


Figure 5.20 : Résultats de l'étude paramétrique réalisée par Hajdu (2003) : Influence des paramètres d'endommagement sur la courbe théorique contrainte-déformation obtenue en compression uniaxiale quasi statique avec le modèle de Lemaitre endommageable.

(a) : Influence de l'exposant d'endommagement,  $r$  ; (b) : Influence du paramètre de progressivité de l'endommagement ( $q$ ) ; Influence du coefficient de ténacité,  $A$ .

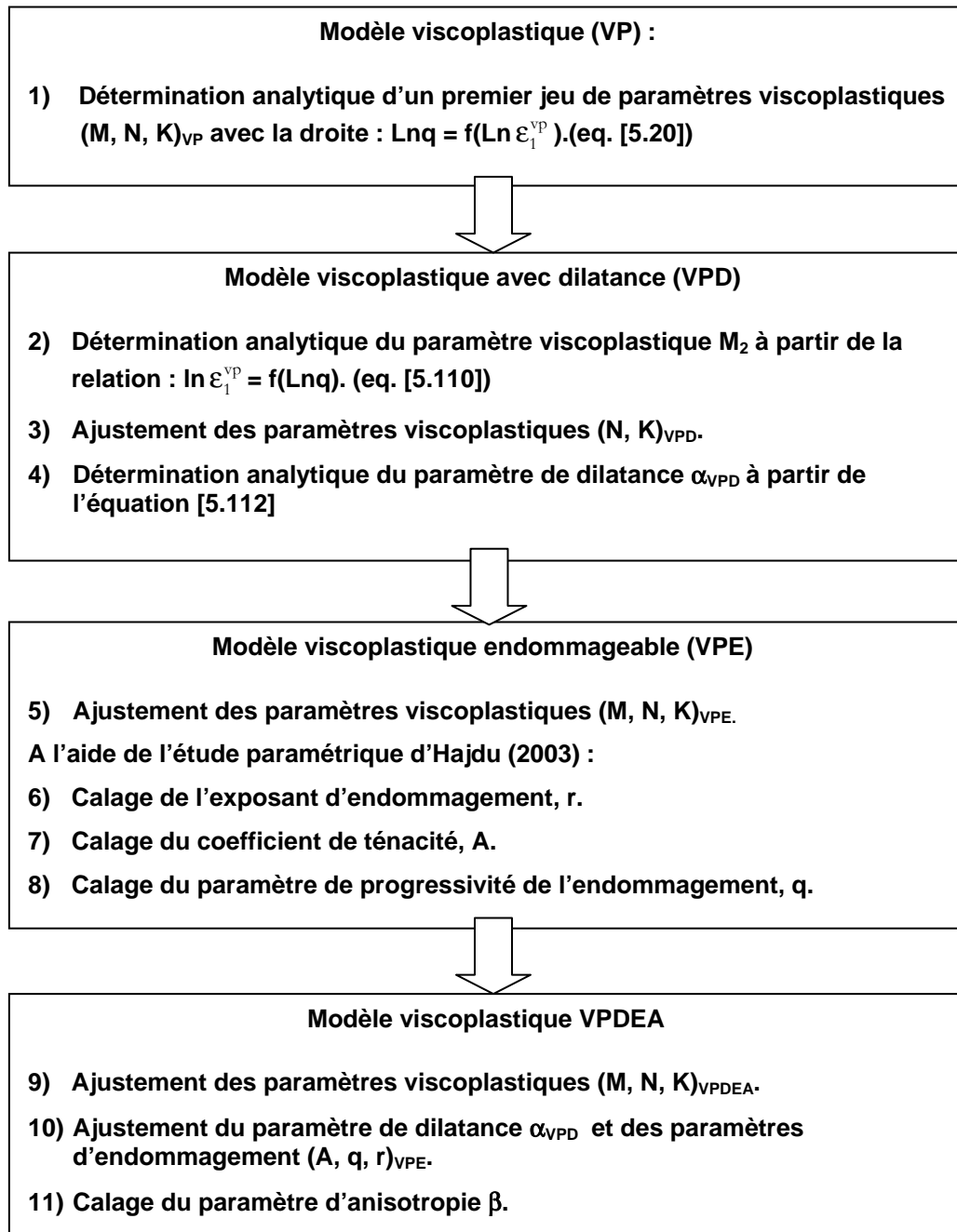


Figure 5.21 : Procédure générale d'identification des paramètres du modèle VPDEA à partir des résultats d'un essai de chargement quasi statique mené jusqu'à la rupture de l'échantillon.

## 5.6 Simulation du comportement mécanique des roches argileuses avec le modèle VPDEA

Nous avons vu précédemment que le modèle viscoplastique de Lemaitre, avec les paramètres  $N$ ,  $M$  et  $K$ , ne permet pas prévoir la rupture différée de la roche lors d'un essai de fluage. Une modélisation plus réaliste du comportement viscoplastique de nos trois roches argileuses devrait être possible à l'aide le modèle VPDEA qui, avec ses dix paramètres (élasticité :  $E$ ,  $\nu$  ; viscosité :  $N$ ,  $M$ ,  $K$ ,  $\alpha$  ; endommagement :  $A$ ,  $r$ ,  $q$ ,  $\beta$ ), prend en compte le comportement volumique du matériau et également l'anisotropie d'endommagement.

### 5.6.1 Essais de fluage

Lors de l'essai de fluage 0°-2 EST 05558, l'échantillon d'argilite de l'Est a présenté un comportement contractant durant la phase de fluage primaire puis dilatant au cours de la phase de fluage secondaire. Dans un premier temps, seule la phase de contractance a été modélisée. L'endommagement de la roche n'étant pas pris en compte, cette modélisation correspond au calage du modèle VPD. Son résultat est présenté sur la Figure 5.22. Hajdu avait également réalisé ce travail et identifié un jeu de paramètres légèrement différent, avec un module élastique plus grand,  $E = 7,0$  GPa (Figure 5.23).

Pour une meilleure modélisation, il est indispensable de tenir compte de l'endommagement du matériau. Nous présentons sur la Figure 5.24 la simulation de cet essai réalisée par Hajdu ; les paramètres utilisés proviennent d'identifications à partir de résultats d'autres essais réalisés sur le même matériau. Comme on peut le voir sur ce graphe, ce modèle s'est montré particulièrement bien adapté à la modélisation du comportement mécanique différé de d'argilite de l'Est. L'évolution complexe de la déformation volumique a pu être expliquée par la combinaison du comportement viscoplastique contractant et du développement d'un endommagement anisotrope.

La valeur négative de  $q$  génère une évolution concave de la variable d'endommagement à contrainte constante : le taux de croissance de la variable  $D$  est alors une fonction décroissante du temps. Cette condition est nécessaire pour simuler l'apparition précoce de l'endommagement de l'argilite et son développement lent.

Quatre jeux de paramètres ont finalement été identifiés grâce aux résultats de l'essai de fluage 0°-2 EST 05558. Le premier calage utilisait la loi viscoplastique de Lemaitre (modèle VP), le second et le troisième prenaient en compte la contractance du matériau lors du fluage primaire (modèle VPD), le dernier avec le modèle VPDEA, intégrait en plus le développement progressif et anisotrope de l'endommagement. Un récapitulatif des différents jeux de paramètres déterminés sur cet essai est présenté dans le Tableau 5.12. D'après ces résultats, il semble que la prise en compte du comportement volumique de l'échantillon durant l'essai de fluage augmente légèrement la valeur des paramètres  $N$  (viscosité) et  $M$  (écrouissage) et diminue celle du paramètre  $K$  (résistance).

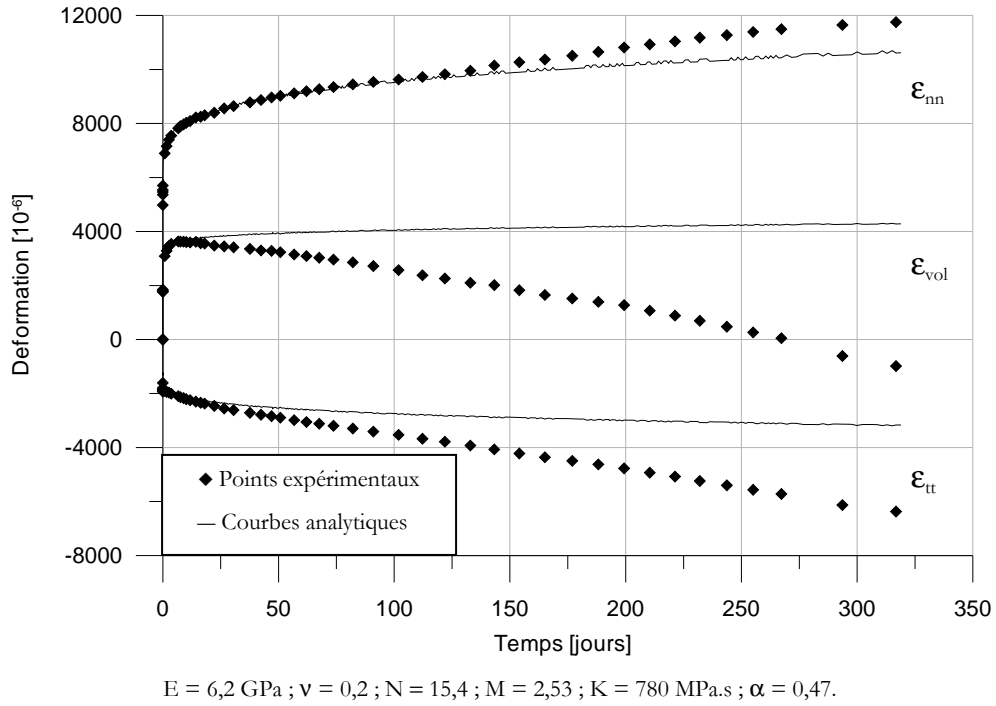


Figure 5.22 : Simulation analytique de l'essai de fluage 0°-2 EST 05558 à l'aide du VPD : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.

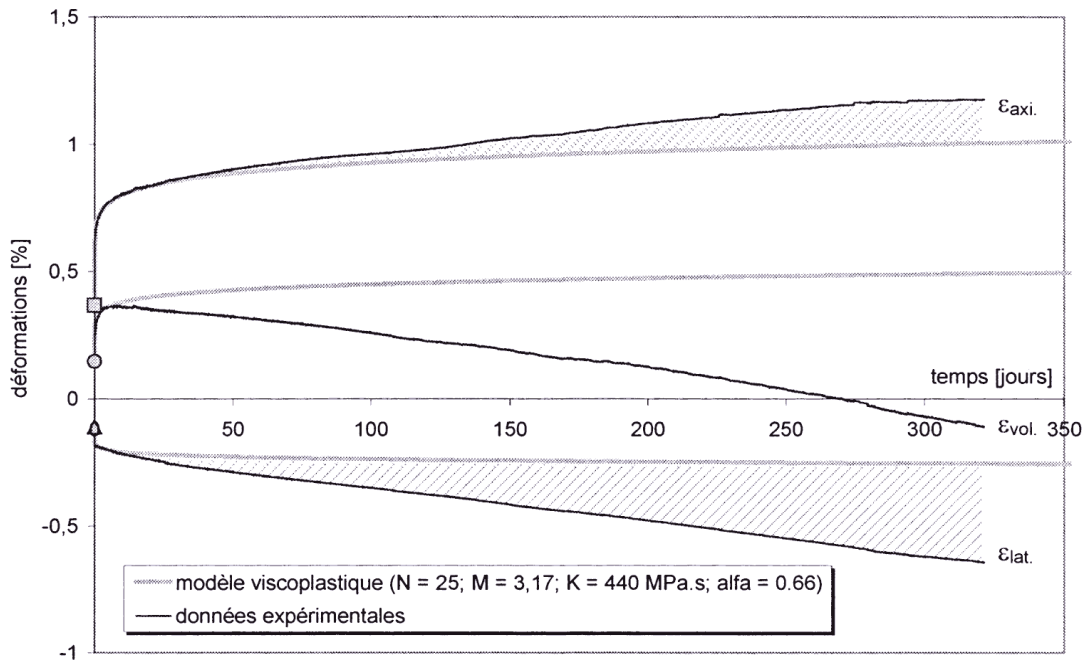
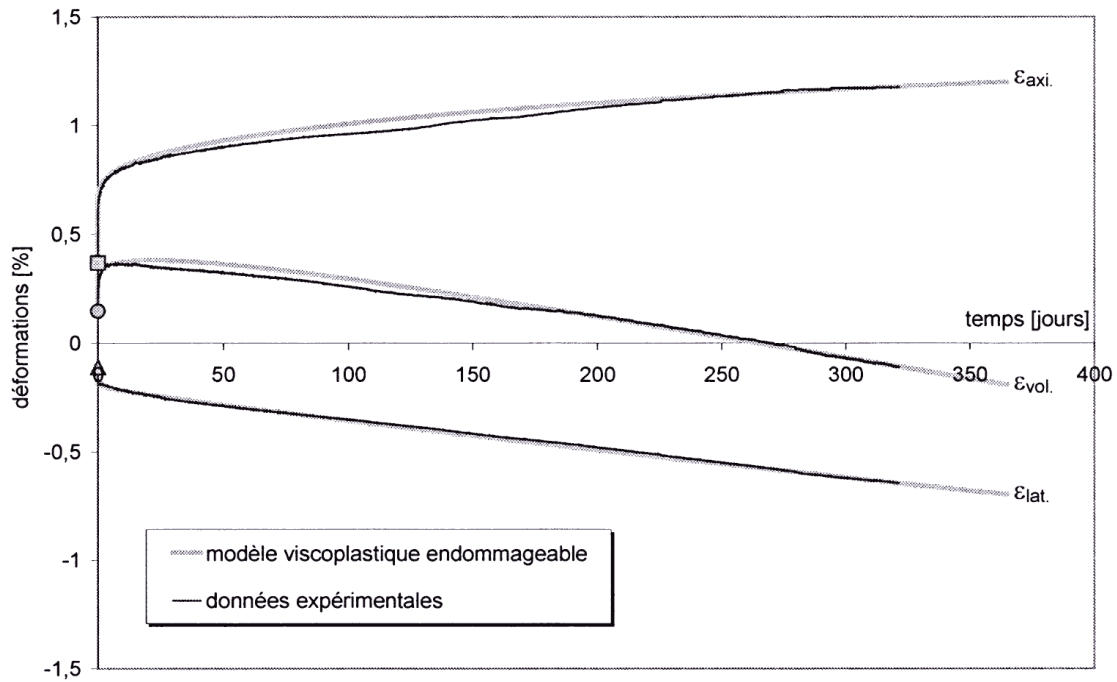


Figure 5.23 : Comparaison entre la simulation obtenue avec le modèle VPD et les courbes expérimentales, d'après Hajdu (2003) : Le domaine d'écart est représenté par les zones hachurées.



$E = 7000 \text{ MPa}$  ;  $\nu = 0.3$  ;  $N = 25$  ;  $M = 3.17$  ;  $K = 440 \text{ MPa.s}$  ;  $\alpha = 0.66$  ;  $r = 11.3$  ;  $q = -0.25$  ;  $A = 115.5 \text{ MPa.s}$  ;  $\beta = 0.29$

Figure 5.24 : Simulation de l'essai de fluage  $0^\circ$ -2 EST 05558 d'argilite de l'Est à l'aide du modèle viscoplastique VPDEA, d'après Hajdu (2003).

Modèle	E	$\nu$	N	M	K [MPa.s]	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
VP	6,2	0,2	15,59	2,53	905,6	/	/	/	/	/
VPD	6,2	0,2	15,40	2,53	780	0,47	/	/	/	/
VPD*	7,0	0,3	25	3,17	440	0,66	/	/	/	/
VPDEA*	7,0	0,3	25	3,17	440	0,66	11,3	-0,25	115,5	0,29

\* Hajdu (2003).

Tableau 5.12 : Paramètres des modèles VP, VPD et VPDEA déterminés sur les résultats de l'essai de fluage uniaxial monopulier sous 26 MPa réalisé sur l'argilite de l'Est.

Pour modéliser le comportement mécanique de la marne du Mont d'Or, nous avons utilisé le modèle viscoplastique avec prise en compte de la variation volumique (VPD). En effet, dans les deux essais de fluage multipalier réalisés sur cette roche, même si des phases de fluage secondaire ont été observées, aucune information concernant la rupture différée de la roche n'a pu être obtenue. La prise en compte de l'endommagement dans la simulation des essais n'est donc pas possible. En revanche, les déformations viscoplastiques ne se sont pas développées à volume constant : les deux échantillons ont un comportement fortement contractant tout au long de ces essais de longue durée. Il est donc important de tenir compte de ces observations dans la modélisation.

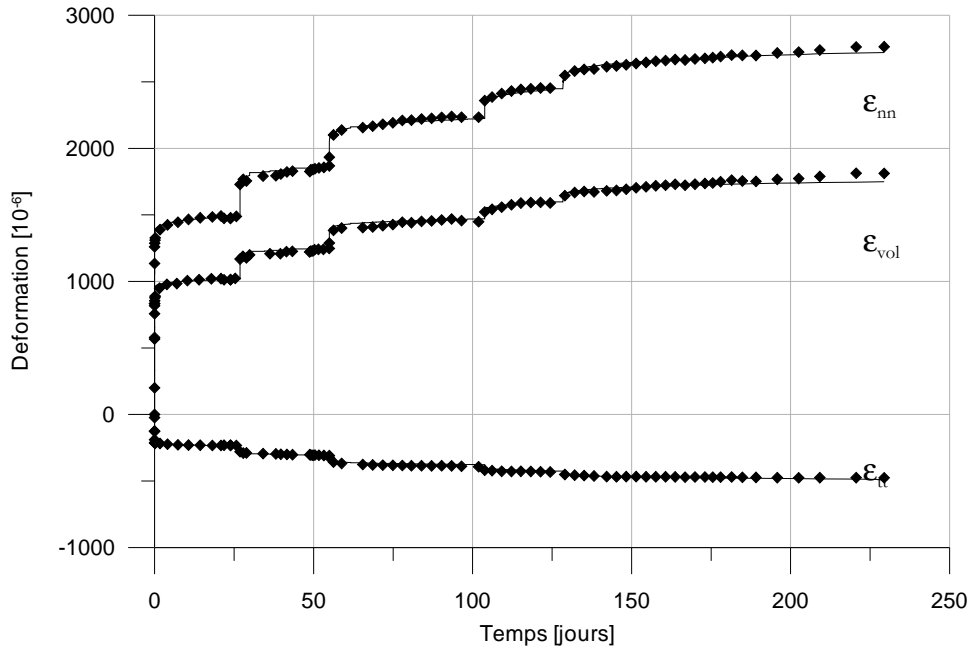
La méthode d'identification utilisée a été décrite dans les paragraphes 5.2.2 et 5.5.1. Les deux jeux de paramètres déterminés sont rappelés dans le Tableau 5.13 ; les simulations d'essais sont présentées sur la Figure 5.25 et la Figure 5.26.

Les six paramètres de ce modèle suffisent à décrire correctement le comportement différé de la marne du Mont d'Or observé mais le modèle ne permet pas de prévoir la rupture différée de la roche puisque nous ne disposons d'aucune information expérimentale sur cette phase.

<b>Echantillon</b>	<b>E [GPa]</b>	<b><math>\nu</math></b>	<b>N</b>	<b>M</b>	<b>K [MPa.s]</b>	<b><math>\alpha</math></b>
MO 4.1	23,0	0,15	1,07	0,31	$1,27 \cdot 10^{18}$	0,65
MO 13.1	26,8	0,13	2,85	0,79	$2,36 \cdot 10^6$	0,05

*Tableau 5.13 : Paramètres du modèle VPD identifiés à partir des résultats des essais de fluage multipalier MO 4.1 et MO 13.1 réalisés la marne du Mont d'Or.*

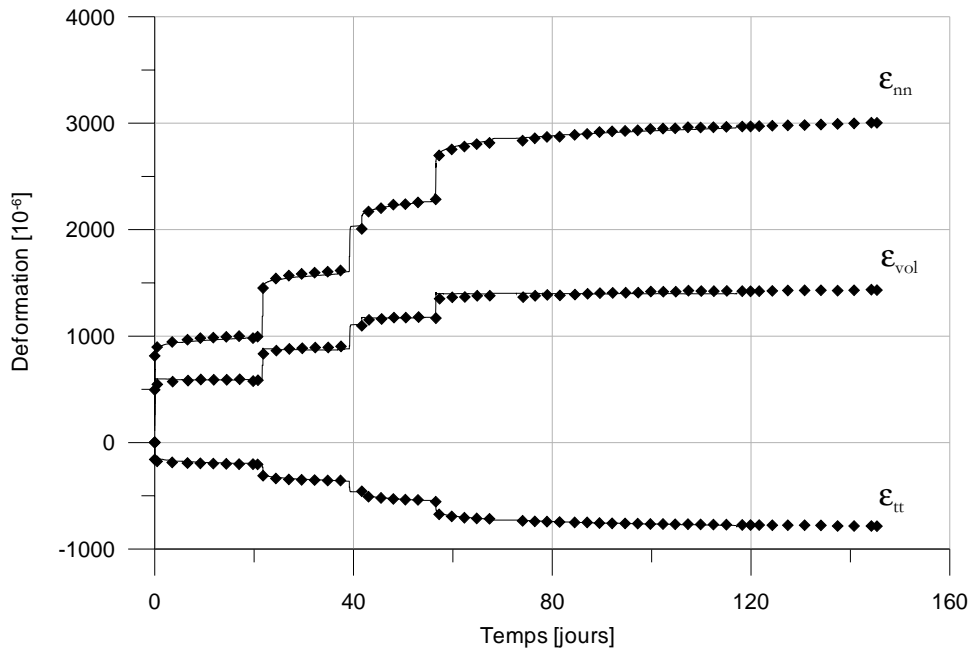




$E = 23,0 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,15$  ;  $N = 1,07$  ;  $M = 0,31$  ;  $K = 1,27 \cdot 10^{18} \text{ MPa}\cdot\text{s}$  ;  $\alpha = 0,65$ .

◆ Points expérimentaux ; — simulation analytique.

Figure 5.25 : Simulation analytique de l'essai de fluage MO 4.1 à l'aide du modèle VPD : évolution des déformations axiales, transversales et volumiques en fonction du temps.



$E = 26,8 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,13$  ;  $N = 2,85$  ;  $M = 0,79$  ;  $K = 2,36 \cdot 10^6 \text{ MPa}\cdot\text{s}$  ;  $\alpha = 0,05$ .

◆ Points expérimentaux ; — simulation analytique.

Figure 5.26 : Simulation analytique de l'essai de fluage MO 13.1 à l'aide du modèle VPD : évolution des déformations axiales, transversales et volumiques en fonction du temps.

Pour modéliser le comportement en fluage de l'argilite de Tournemire, nous avons utilisé différents modèles.

Lors des essais AT M4 890.2 et AT M4 970.1, seul le fluage primaire a été observé. Ces essais ont donc été simulés à l'aide du modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique et a permis d'identifier les paramètres ( $M$ ,  $N$ ,  $K$ ,  $\alpha$ ) en appliquant la procédure explicitée au paragraphe 5.5.1.

Lors des essais de fluage multipalier AT M5 3140.2, AT M5 400.1, les trois phases de fluage ont pu être observées. Les informations essentielles données par le temps à la rupture,  $t_{rupt}$  et la déformation viscoplastique axiale à la rupture,  $\epsilon_{rupt}^{vp}$  nous ont permis d'identifier les 8 paramètres du modèle VPDEA en suivant la procédure décrite à la Figure 5.19.

Lors de l'essai AT M4 630.2, les déformations viscoplastiques se sont développées à volume constant ( $\alpha = 0$ ) et les phases de fluage primaire et secondaire ont pu être observées. Les paramètres du modèle VPE ont donc pu être identifiés en suivant la méthode décrite au paragraphe 5.5.1.

Lors des essais AT M4 630.1, AT M5 1500.1 et AT M5 3395.2, les phases de fluage primaire et secondaire ont été observées ; ces essais ont donc pu être simulés avec le modèle VPDEA, bien qu'ils n'aient pas été menés jusqu'à la rupture de l'échantillon. Ces échantillons ont eu des comportements volumiques très différents, contractants ou dilatants.

Les résultats des simulations obtenues pour les huit essais de fluage sont présentés sur les figures suivantes, les jeux de paramètres sont répertoriés dans le Tableau 5.14 ; pour le module d'Young,  $E$ , et le coefficient de Poisson,  $\nu$ , nous avons repris les valeurs mesurées. Les divergences parfois visibles sur les graphes présentés sont en partie dues à l'hypothèse d'isotropie de nos échantillons alors que l'argilite de Tournemire est anisotrope. Expérimentalement, nous avons mesuré des déformations transversales légèrement différentes dans les directions  $\vec{s}$  et  $\vec{t}$  :  $\epsilon_{tt} \neq \epsilon_{ss}$ . L'approximation faite revient donc à considérer que les déformations  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{ss}$  sont identiques ce qui explique certaines divergences observées (Figure 5.28).

On observe une faible dispersion des résultats malgré quelques valeurs singulières. La diversité des comportements volumiques de l'argilite de Tournemire lors de ces essais de fluage se répercute directement sur le paramètre  $\alpha$  qui peut être positif (contractance) ou négatif (dilatance).

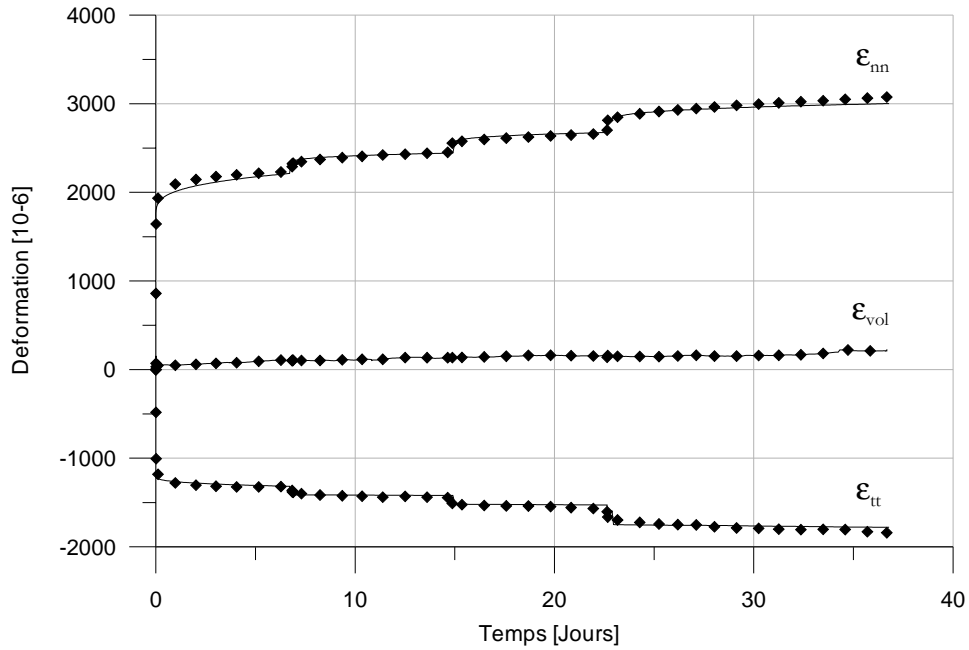
Le traitement statistique appliqué aux résultats de l'identification des paramètres du modèle VP (§ 5.3.4) a été réutilisé sur ces paramètres. L'essai AT M4 890.2 a été exclu de cette analyse du fait de ses résultats divergents par rapport aux autres identifications. Les paramètres moyens et leurs intervalles de variation sont présentés dans le Tableau 5.15. Les intervalles de variation sont relativement peu étendus et pourraient être resserrés par l'augmentation du nombre d'essais. L'anisotropie d'évolution de l'endommagement semble non négligeable d'après l'intervalle de variation du paramètre  $\beta$ , qui éloigne le comportement mécanique de l'argilite de Tournemire d'un développement isotrope de l'endommagement dans lequel  $\beta$  serait égal à 1.

Ech.	E [GPa]	$\nu$	N	M	K	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
M4 630.1	15,00	0,47	2,73	0,62	$3,87 \cdot 10^{10}$	0,71	8,5	-2	107,0	0,5
M4 630.2	16,05	0,45	1,29	0,73	$1,11 \cdot 10^{14}$	0	/	/	/	/
M4 890.2	32,30	0,44	2,38	1,42	$2,15 \cdot 10^8$	0,6	/	/	/	/
M4 970.1	17,00	0,49	2,19	0,58	$2,80 \cdot 10^{11}$	-0,62	/	/	/	/
M5 1500.1	15,67	0,38	0,98	0,61	$8,33 \cdot 10^{16}$	0,13	20,7	0,1	75,0	0,9
M5 3395.2	19,56	0,38	0,76	0,49	$4,91 \cdot 10^{21}$	0,69	49	-1,1	9,5	0,6
M5 3140.2	16,50	0,35	0,82	0,48	$2,58 \cdot 10^{20}$	0,91	12,6	0,02	120,0	0,7
M5 400.1	15,99	0,47	0,98	0,82	$1,26 \cdot 10^{15}$	-0,84	13,7	0,07	121,1	0,9

Tableau 5.14 : Paramètres des modèles VPD et VPDEA identifiés à partir des essais de fluage réalisés sur l'argilite de Tournemire.

Paramètres	E [GPa]	$\nu$	N	M	K	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
Moyenne $\bar{X}_m$	18,51	0,43	1,51	0,72	$6,46 \cdot 10^{20}$	0,20	20,90	-0,58	86,5	0,72
Estimation de l'écart-type $\sigma_{n-1}$	5,74	0,05	0,79	0,30	$1,72 \cdot 10^{21}$	0,65	16,31	0,94	46,9	0,18
I Intervalle de probabilité à 95 %	[13,70 ; 23,32]	[0,39 ; 0,47]	[0,85 ; 2,18]	[0,46 ; 0,97]	[0 ; $2,09 \cdot 10^{21}$ ]	[-0,35 ; 0,74]	[0,62 ; 41,18]	[-1,75 ; 0,59]	[28,2 ; 144,8]	[0,50 ; 0,94]

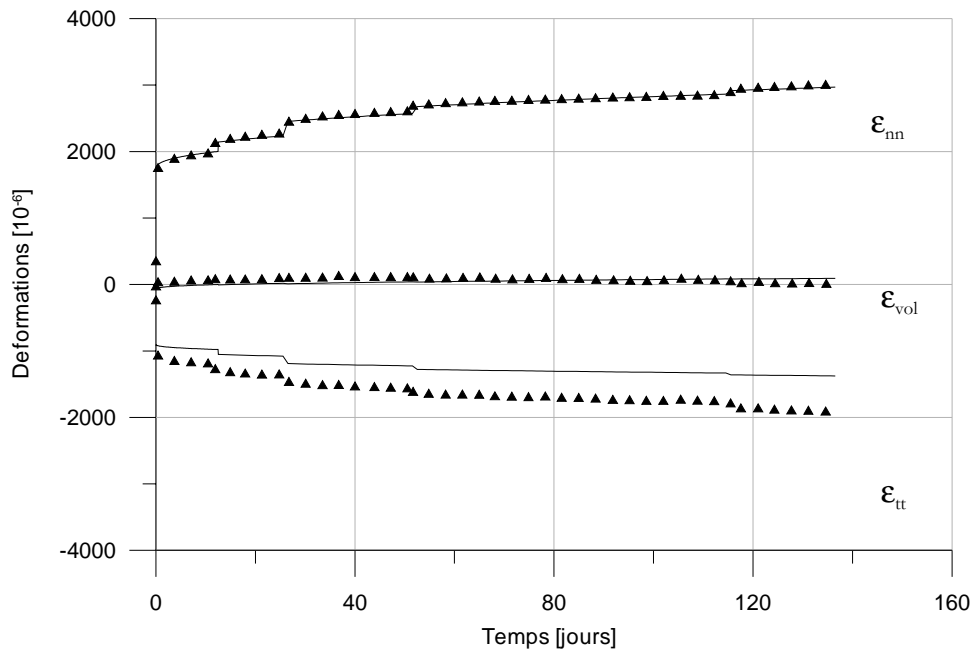
Tableau 5.15 : Paramètres moyens du modèle VPDEA déterminé à partir des essais de fluage réalisés sur l'argilite de Tournemire.



$E = 15 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,47$  ;  $N = 2,73$  ;  $M = 0,62$  ;  $K = 3,87 \cdot 10^{10}$  ;  $\alpha = 0,71$  ;  $r = 8,5$  ;  $q = -2$  ;  $A = 107,0$  ;  $\beta = 0,5$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.27 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M4 630.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.



$E = 16,05 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,45$  ;  $N = 1,29$  ;  $M = 0,73$  ;  $K = 1,11 \cdot 10^{14}$  ;  $\alpha = 0$ .

▲ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.28 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M4 630.2 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPD : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.

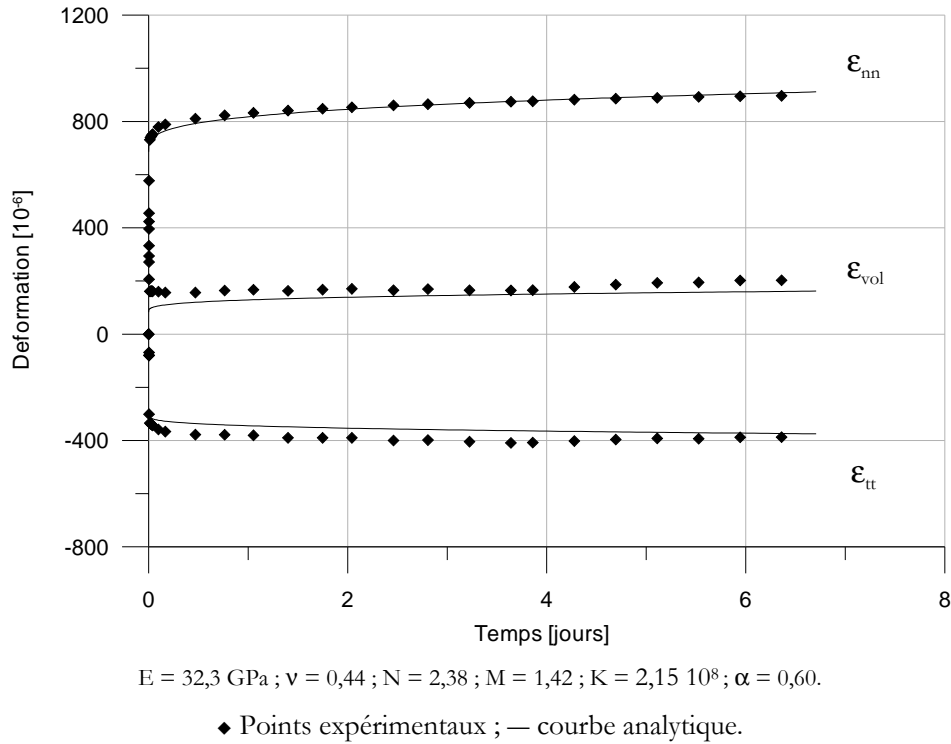


Figure 5.29 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M4 890.2 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPD : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.

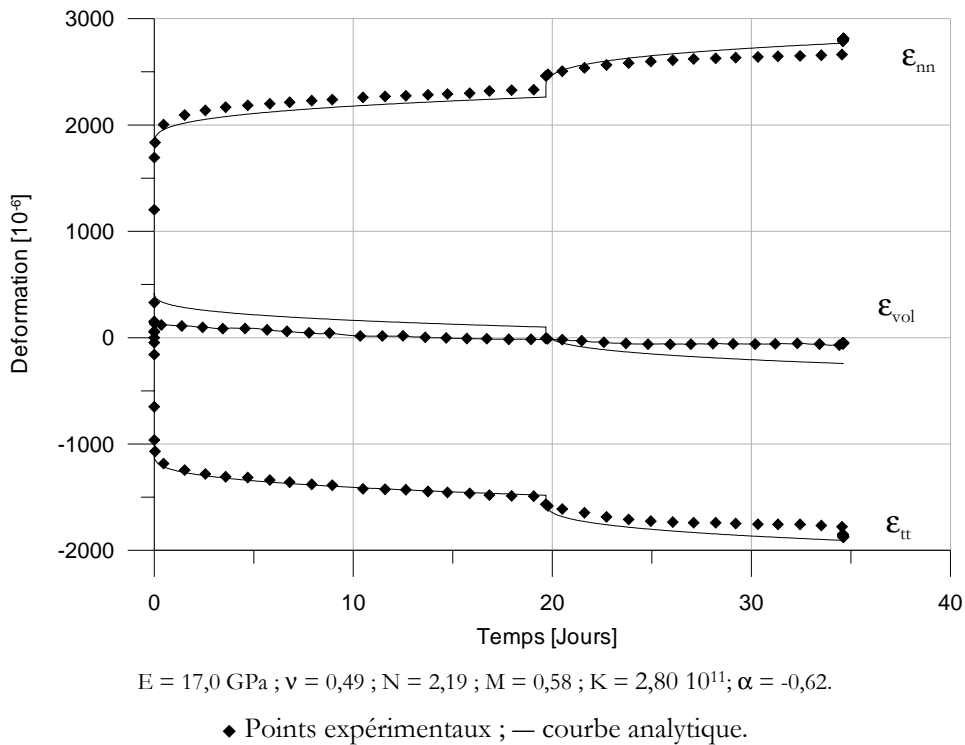
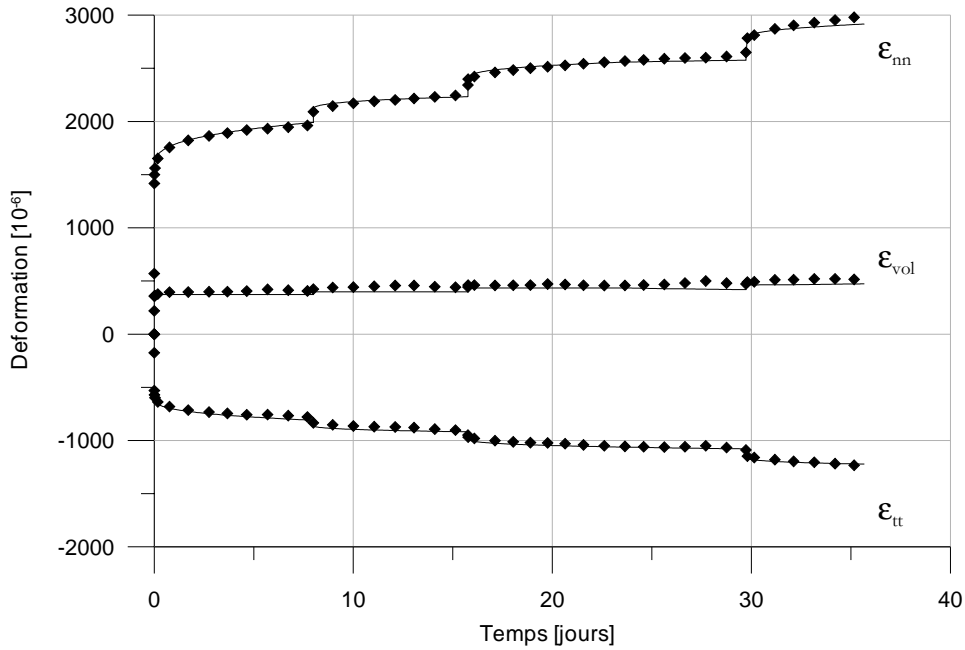


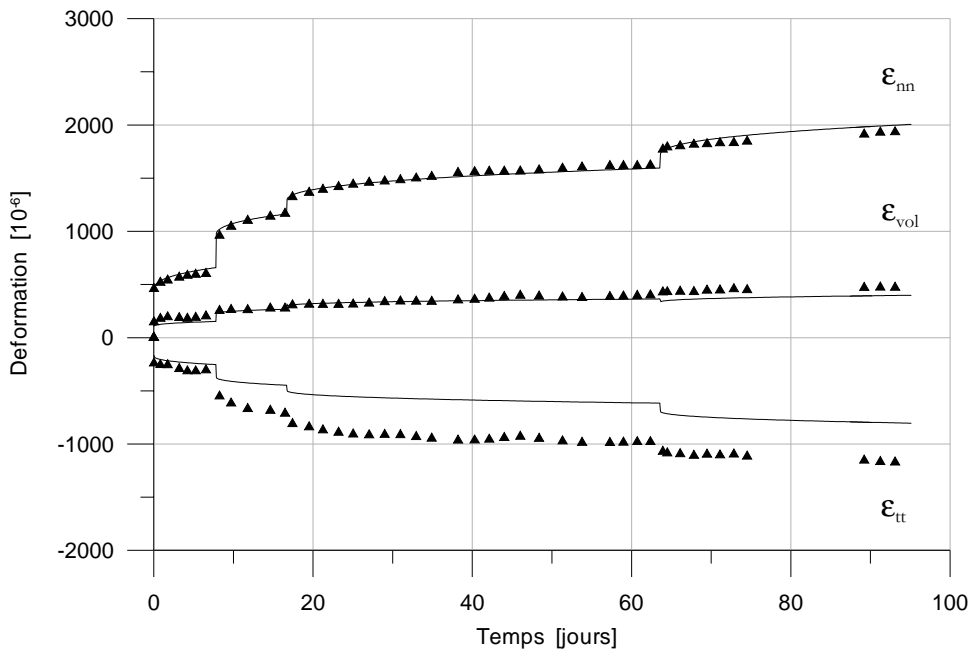
Figure 5.30 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M4 970.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPD : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.



$E = 15,67 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,38$  ;  $N = 0,98$  ;  $M = 0,61$  ;  $K = 8,33 \cdot 10^{16}$  ;  $\alpha = 0,13$  ;  $r = 20,7$  ;  $q = 0,1$  ;  $A = 75,0$  ;  $\beta = 0,9$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

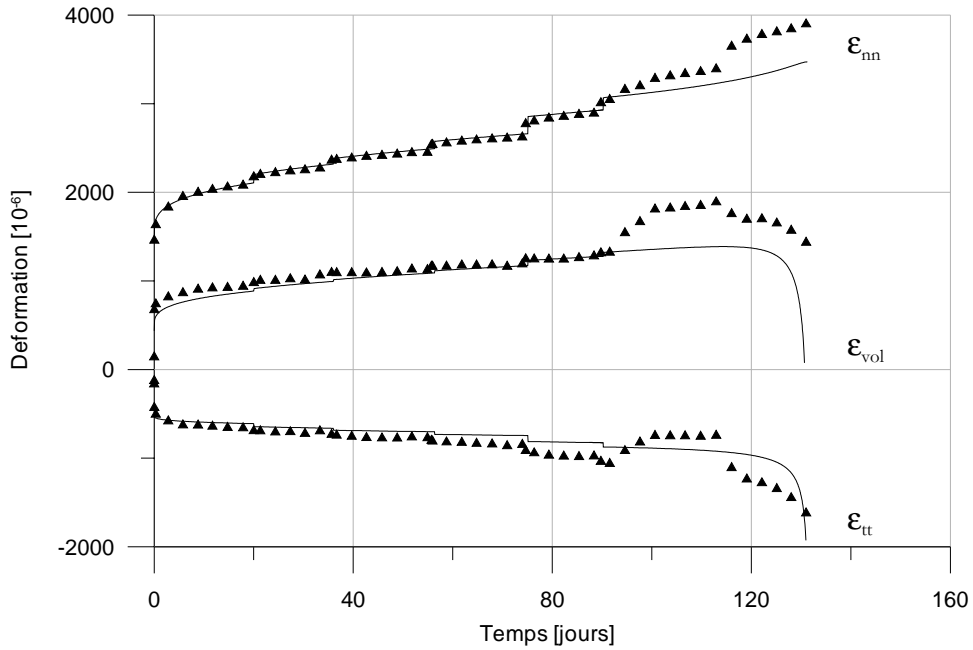
Figure 5.31 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M5 1500.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.



$E = 19,56 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,38$  ;  $N = 0,76$  ;  $M = 0,49$  ;  $K = 4,91 \cdot 10^{21}$  ;  $\alpha = 0,69$  ;  $r = 49$  ;  $q = -1,1$  ;  $A = 9,5$  ;  $\beta = 0,6$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

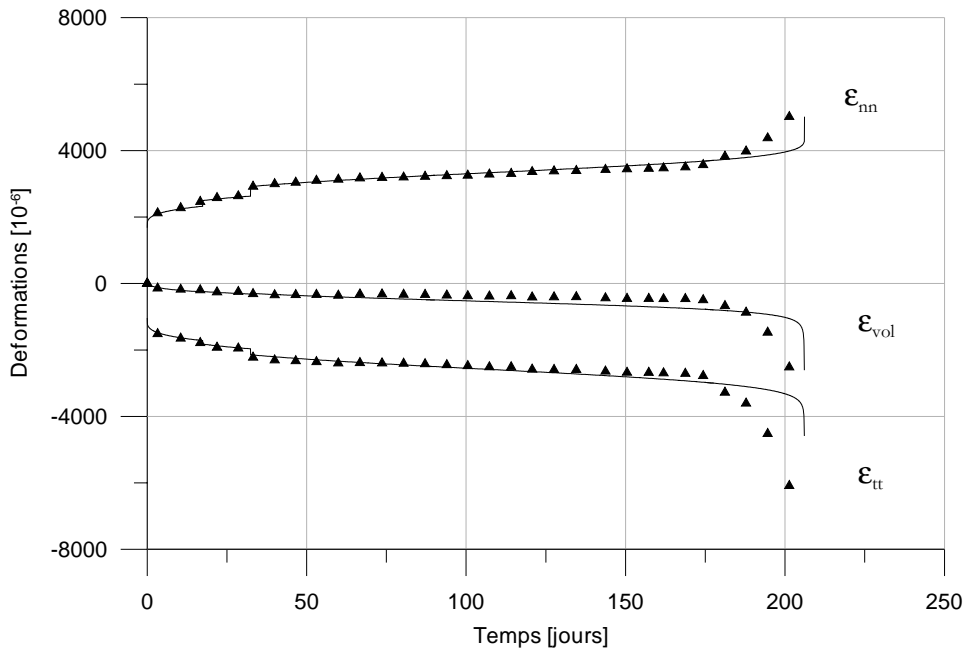
Figure 5.32 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M5 3395.2 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.



$E = 16,5 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,35$  ;  $N = 0,82$  ;  $M = 0,48$  ;  $K = 2,58 \cdot 10^{20}$  ;  $\alpha = 0,91$  ;  $r = 12,6$  ;  $q = 0,02$  ;  $\Lambda = 120,0$  ;  $\beta = 0,7$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.33 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M5 3140.2 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.



$E = 15,99 \text{ GPa}$  ;  $\nu = 0,47$  ;  $N = 0,98$  ;  $M = 0,82$  ;  $K = 1,26 \cdot 10^{15}$  ;  $\alpha = -0,84$  ;  $r = 13,7$  ;  $q = 0,07$  ;  $\Lambda = 121,1$  ;  $\beta = 0,9$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.34 : Simulation analytique de l'essai de fluage AT M5 400.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction du temps.

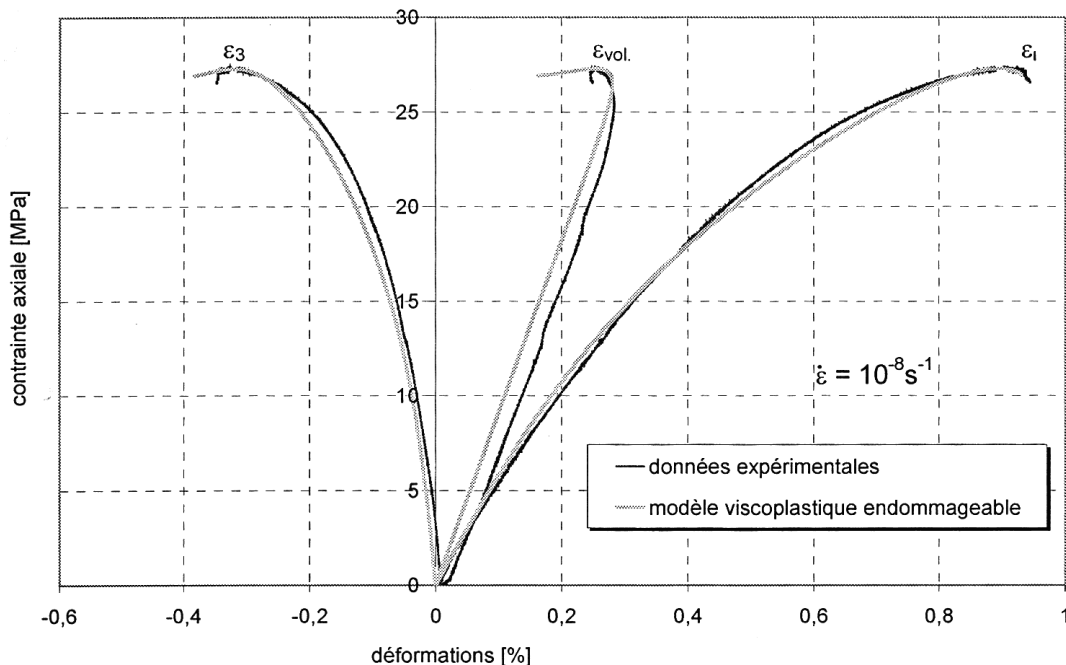
### 5.6.2 Essais de chargement quasi statique

Les résultats de l'essai de chargement quasi statique réalisé sur l'argilite de l'Est à la vitesse de  $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  ont déjà fait l'objet d'un calage avec le modèle VPDEA d'Hajdu (Hajdu, 2003). Nous rappelons dans le Tableau 5.16, les paramètres du modèle déterminés par Hajdu pour cette roche.

L'essai de fluage réalisé sur l'argilite de l'Est avait mis en évidence l'existence d'une phase de contractance avant la dilatance et la rupture de l'échantillon. Cependant, lors de cet essai de chargement quasi statique, ce comportement volumique particulier n'a pas été observé. La déformation volumique ne présente pas de contractance viscoplastique en compression uniaxiale, même pour une vitesse de déformation très faible :  $\alpha = 0$ .

Ech.	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	$\nu$	N	M	K	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
EST 0°-1 05558	$10^{-8}$	6,0	0,17	25	3,17	340	0	11,3	0,25	95,5	0,29

Tableau 5.16 : Paramètres du modèle d'Hajdu résultant du calage sur l'essai de chargement quasi statique réalisé sur l'argilite de l'Est.



$E = 6000 \text{ MPa}$  ;  $\nu = 0.17$  ;  $N = 25$  ;  $M = 3.17$  ;  $K = 340 \text{ MPa.s}$  ;  $\alpha = 0$  ;  $r = 11.3$  ;  $q = 0.25$  ;  $A = 95.5 \text{ MPa.s}$  ;  $\beta = 0.29$

Figure 5.35 : Simulation de l'essai de compression uniaxiale quasi statique réalisé sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-1 EST 05558 avec le modèle VPDEA, d'après Hajdu (2003).



Les résultats des essais de chargement quasi statique sur la marne du Mont d'Or étant trop dispersés, nous ne les avons pas simulés analytiquement avec le modèle VPDEA. Nous avons estimé que, la vitesse de déformation n'étant pas suffisamment faible pour que l'on soit sur la courbe limite, les paramètres déterminés n'auraient de toute façon pas été significatifs du comportement viscoplastique de cette roche.

Pour reproduire fidèlement le comportement mécanique de l'argilite de Tournemire, nous avons utilisé le modèle VPDEA. Nous avons repris les valeurs du modèle d'Young E, et du coefficient de Poisson,  $\nu$ , mesurées durant l'étude expérimentale. L'ajustement des paramètres du modèle a été réalisé en suivant la procédure décrite dans le paragraphe 5.5.2. Les résultats obtenus sont présentés sur les Figure 5.36 à Figure 5.39 pour les quatre essais de chargement quasi statique ; les jeux de paramètres ainsi déterminés sont répertoriés dans le Tableau 5.17.

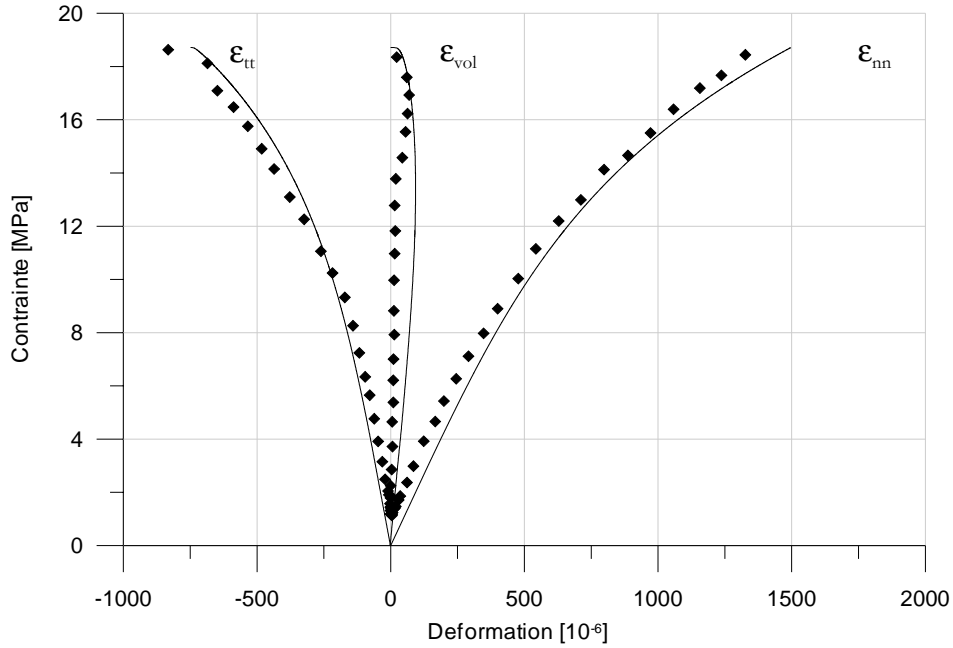
La déformation volumique théorique a été calculée comme la somme de la déformation axiale et le double de la déformation transversale, données par le modèle :

$$\epsilon_{vol}^{modèle} = \epsilon_{nn}^{modèle} + 2\epsilon_{tt}^{modèle} \quad [5.115]$$

Cette formule est valable dans le cas de roches isotropes. Cependant, l'argilite de Tournemire est anisotrope et nous avons mesuré des déformations transversales légèrement différentes dans les directions  $\bar{s}$  et  $\bar{t}$  :  $\epsilon_{tt} \neq \epsilon_{ss}$  pour nos échantillons d'orientation  $\theta = 90^\circ$ . L'approximation revient donc à considérer que les déformations  $\epsilon_{tt}$  et  $\epsilon_{ss}$  sont identiques, ce qui peut générer certaines divergences.

Ech.	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	$\nu$	N	M	K	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
M5 2200.1	$2,7 \cdot 10^{-7}$	21,50	0,4	23,10	4,62	200	-0,18	7,5	3	80	0,2
M5 3395.3	$3 \cdot 10^{-7}$	27,10	0,18	20	4,24	500	0,02	13	2	87	0,4
M5 3140.1	$5 \cdot 10^{-8}$	23,80	0,22	21	4,11	450	-0,4	15,5	2	87	0,4
M4 890.1	$1,6 \cdot 10^{-8}$	15,80	0,28	21	4,3	400	-0,4	15,5	1,6	95	0,5

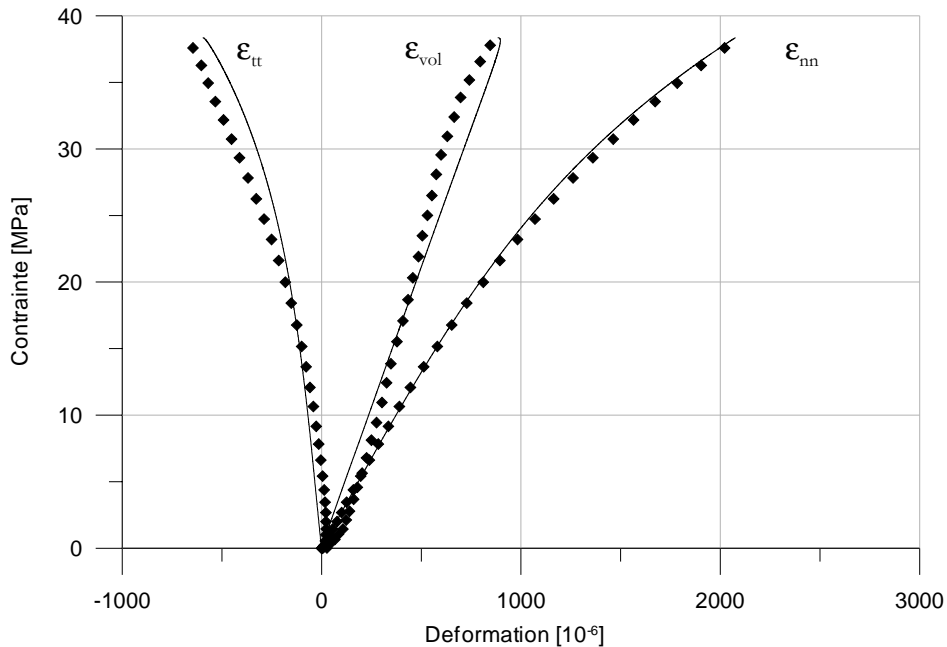
Tableau 5.17 : Paramètres du modèle VPDEA résultant du calage sur les essais de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de Tournemire.



$\dot{\epsilon} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ;  $E = 21,50 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,4$ ;  $N = 23,10$ ;  $M = 4,62$ ;  $K = 200$ ;  $\alpha = -0,18$ ;  $r = 7,5$ ;  $q = 3$ ;  $A = 80$ ;  $\beta = 0,2$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

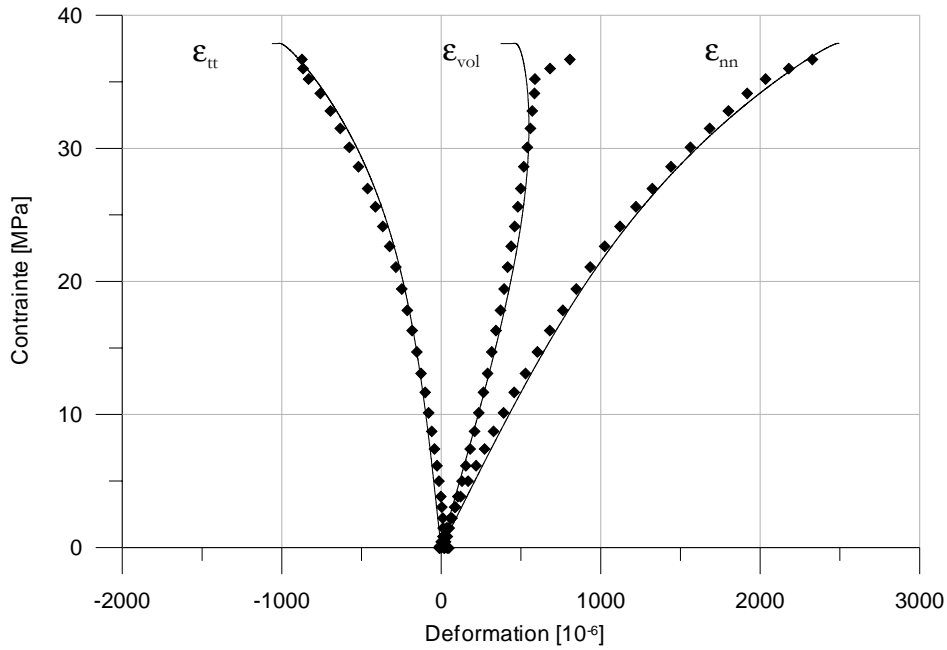
Figure 5.36 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique AT M5 2200.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction de la contrainte axiale.



$\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ;  $E = 27,10 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,18$ ;  $N = 20$ ;  $M = 4,24$ ;  $K = 500$ ;  $\alpha = 0,02$ ;  $r = 13$ ;  $q = 2$ ;  $A = 87$ ;  $\beta = 0,4$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

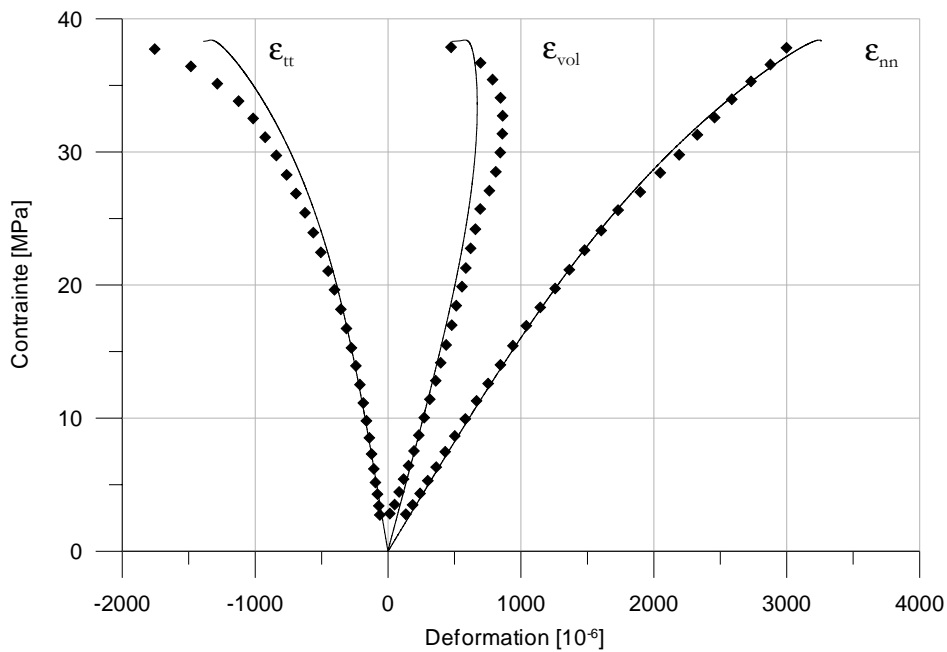
Figure 5.37 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique AT M5 3395.3 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction de la contrainte axiale.



$\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ;  $E = 23,80 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,22$ ;  $N = 21$ ;  $M = 4,11$ ;  $K = 450$ ;  $\alpha = -0,4$ ;  $r = 15,5$ ;  $q = 2$ ;  $\Lambda = 87$ ;  $\beta = 0,4$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.38 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique AT M5 3140.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction de la contrainte axiale.



$\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ;  $E = 15,80 \text{ GPa}$ ;  $\nu = 0,28$ ;  $N = 21$ ;  $M = 4,3$ ;  $K = 400$ ;  $\alpha = -0,4$ ;  $r = 15,5$ ;  $q = 1,6$ ;  $\Lambda = 95$ ;  $\beta = 0,5$ .

◆ Points expérimentaux ; — courbe analytique.

Figure 5.39 : Simulation analytique de l'essai de chargement quasi statique AT M4 890.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire à l'aide du modèle VPDEA : évolution des déformations axiale, transversale et volumique en fonction de la contrainte axiale.

### 5.6.3 Analyse statistique des résultats et discussion

Les quatre modèles viscoplastiques décrits dans les paragraphes précédents nous ont permis de simuler analytiquement le résultat des essais de fluage et de chargement quasi statique réalisés sur l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. L'ensemble des paramètres identifiés sont répertoriés dans le tableau de synthèse (Tableau 5.18).

Les résultats obtenus sur l'argilite de Tournemire, roche pour laquelle le comparatif est possible, font apparaître des différences importantes entre les jeux de paramètres identifiés sur les essais de fluage et sur les essais de chargement quasi statique.

En ce qui concerne, les paramètres viscoplastiques (M, N, K), comme nous l'avions déjà observé en identifiant les paramètres du modèle VP, le paramètre K, qui représente la raideur viscoplastique du modèle, est plus élevé en fluage qu'en compression uniaxiale lente, alors que l'observation inverse est possible sur le paramètre M qui traduit l'écrouissage de la roche. L'exposant N est lui bien supérieur en chargement quasi statique qu'en fluage, mettant en évidence que la viscosité de la roche s'est exprimée davantage en fluage. Les vitesses de déformation mises en œuvre dans les essais de chargement quasi statique sur l'argilite de Tournemire sont probablement supérieures à celle permettant d'atteindre la courbe limite.

Le développement des déformations viscoplastiques, traduit par le paramètre  $\alpha$  dans le modèle VPDEA, peut se révéler aussi bien contractant que dilatant, en fluage comme en compression uniaxiale à vitesse lente. En revanche, le paramètre  $q$ , positif ou négatif en fluage, est strictement positif en chargement quasi statique générant une évolution convexe de la variable d'endommagement. Ce résultat met en évidence l'apparition d'un endommagement précoce et son développement lent, lors des essais de chargement quasi statique.

L'anisotropie d'évolution de l'endommagement semble non négligeable d'après les valeurs du paramètre  $\beta$  identifiées qui éloignent le comportement mécanique de l'argilite de Tournemire d'un développement isotrope de l'endommagement dans lequel  $\beta$  serait égal à 1.

Afin de les comparer, les cinq jeux de paramètres du modèle VPDEA déterminés sur les essais de fluage réalisés sur l'argilite de Tournemire ont été utilisés pour simuler analytiquement un essai de fluage sous 33 MPa. Le résultat de ces simulations est présenté à la Figure 5.40. Les résultats sont assez dispersés : la déformation axiale viscoplastique à la rupture varie de 1064  $\mu\text{m}/\text{m}$  à 2081  $\mu\text{m}/\text{m}$ , la déformation transversale de -2833  $\mu\text{m}/\text{m}$  à -281  $\mu\text{m}/\text{m}$  et le temps à la rupture de 54 jours à 222 jours.

L'échelle de temps a été normalisée afin de pouvoir calculer une courbe moyenne telle que, quel que soit le temps normalisé  $t = t/t_{\text{rupt}}$ , la déformation viscoplastique moyenne est la moyenne des déformations viscoplastiques calculées avec chacun des jeux de paramètres (Figure 5.41). Nous avons pu retrouver l'évolution de la déformation axiale et transversale en fonction du temps en moyennant les coefficients de normalisation des cinq courbes, c'est-à-dire les cinq  $t_{\text{rupt}}$ . Cette courbe moyenne nous a permis d'identifier un jeu moyen de paramètres du modèle VPDEA modélisant le comportement de l'argilite de Tournemire en fluage. Il est donné dans le Tableau 5.19 et le calage est représenté sur la Figure 5.42.

Ne disposant pas d'information sur le fluage tertiaire de la marne du Mont d'Or et de trop peu de résultats expérimentaux sur l'argilite de l'Est, nous n'avons pu réaliser ce travail d'analyse pour ces deux autres roches.

Roche	Ech.	E [GPa]	$\nu$	N	M	K	$\alpha$	r	q	A	$\beta$
Argilite de l'Est*	0°-2 05558	7,0	0,3	25	3,17	440	0,66	11,3	-0,25	115,5	0,29
	0°-1 05558	6,0	0,17	25	3,17	340	0	11,3	0,25	95,5	0,29
Marne du Mont d'Or	MO 4.1	23,0	0,15	1,07	0,31	1,27.10 <sup>18</sup>	0,65	/	/	/	/
	MO 13.1	26,8	0,13	2,85	0,79	2,36 10 <sup>6</sup>	0,05	/	/	/	/
Argilite de Tournemire	M5 2200.1	21,50	0,4	23,10	4,62	200	-0,18	7,5	3	80	0,2
	M5 3395.3	27,10	0,18	20	4,24	500	0,02	13	2	87	0,4
	M5 3140.1	23,80	0,22	21	4,11	450	-0,4	15,5	2	87	0,4
	M4 890.1	15,80	0,28	21	4,3	400	-0,4	15,5	1,6	95	0,5
	M4 630.1	15,00	0,47	2,73	0,62	3,87 10 <sup>10</sup>	0,71	8,5	-2	107,0	0,5
	M4 630.2	16,05	0,45	1,29	0,73	1,11 10 <sup>14</sup>	0	/	/	/	/
	M4 890.2	32,30	0,44	2,38	1,42	2,15 10 <sup>8</sup>	0,6	/	/	/	/
	M4 970.1	17,00	0,49	2,19	0,58	2,80 10 <sup>11</sup>	-0,62	/	/	/	/
	M5 1500.1	15,67	0,38	0,98	0,61	8,33 10 <sup>16</sup>	0,13	20,7	0,1	75,0	0,9
	M5 3395.2	19,56	0,38	0,76	0,49	4,91 10 <sup>21</sup>	0,69	49	-1,1	9,5	0,6
	M5 3140.2	16,50	0,35	0,82	0,48	2,58 10 <sup>20</sup>	0,91	12,6	0,02	120,0	0,7
M5 400.1	15,99	0,47	0,98	0,82	1,26 10 <sup>15</sup>	-0,84	13,7	0,07	121,1	0,9	

\* Hajdu (2003).

Tableau 5.18 : Récapitulatif des paramètres du modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique irréversible et un endommagement anisotrope, d'Hajdu calés sur les résultats de l'étude expérimentale réalisée sur l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire.

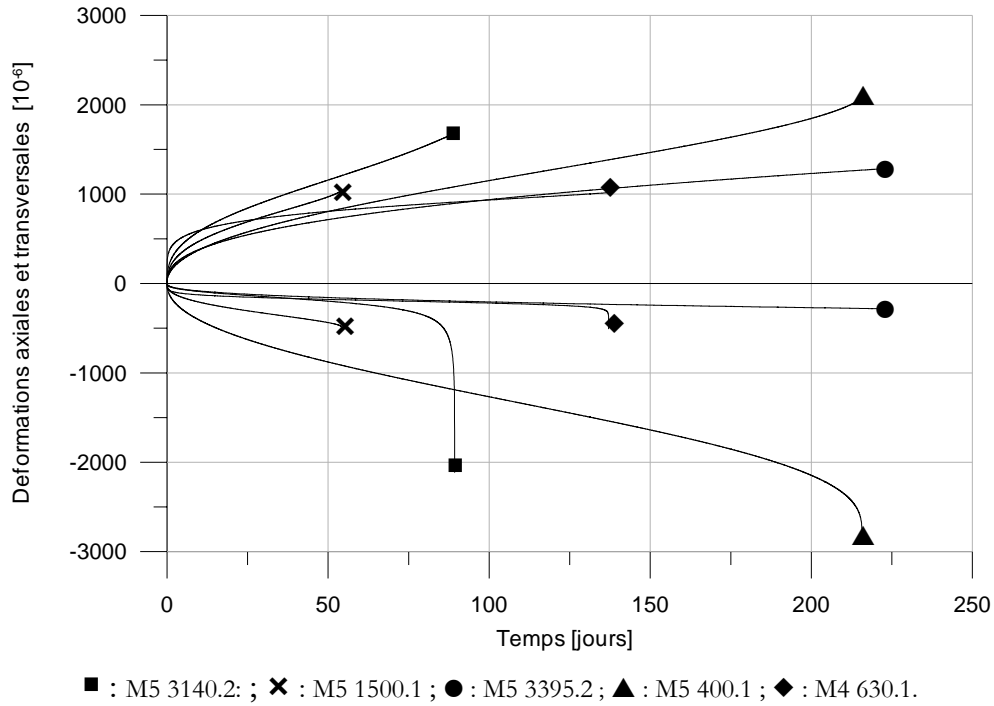


Figure 5.40 : Simulations d'un essai de fluage uniaxial sous 33 MPa avec les cinq jeux de paramètres identifiés pour l'argilite de Tournemire : évolution de la déformation axiale et transversale en fonction du temps.

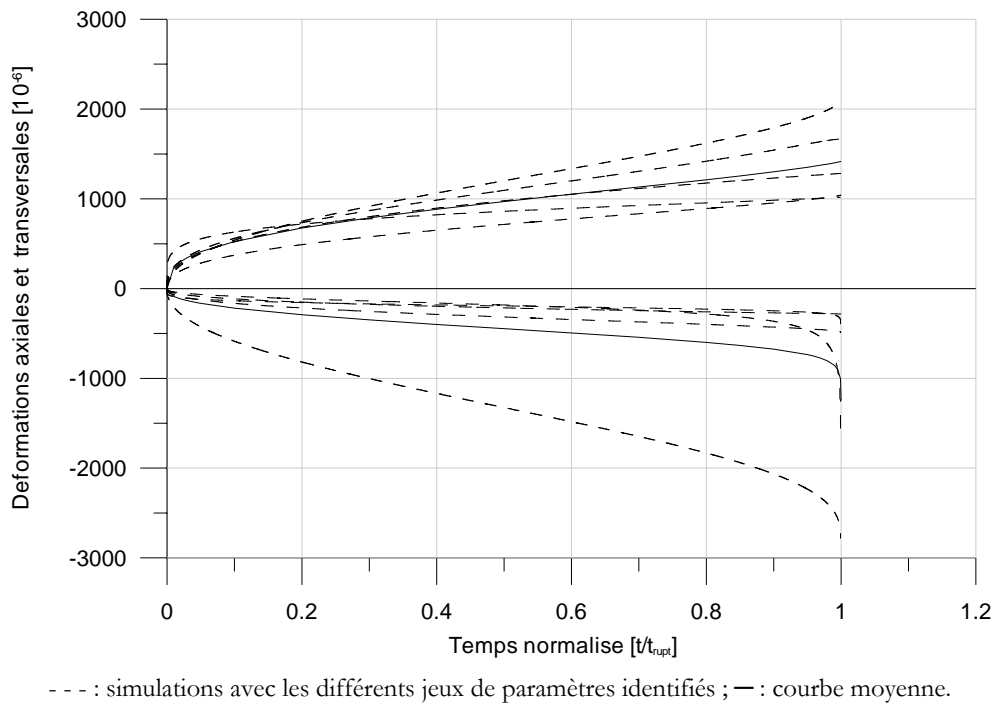


Figure 5.41 : Simulations d'un essai de fluage uniaxial sous 33 MPa avec les cinq jeux de paramètres identifiés pour l'argilite de Tournemire : évolution de la déformation axiale et transversale en fonction du temps normalisé ( $t/t_{rup}$ ).

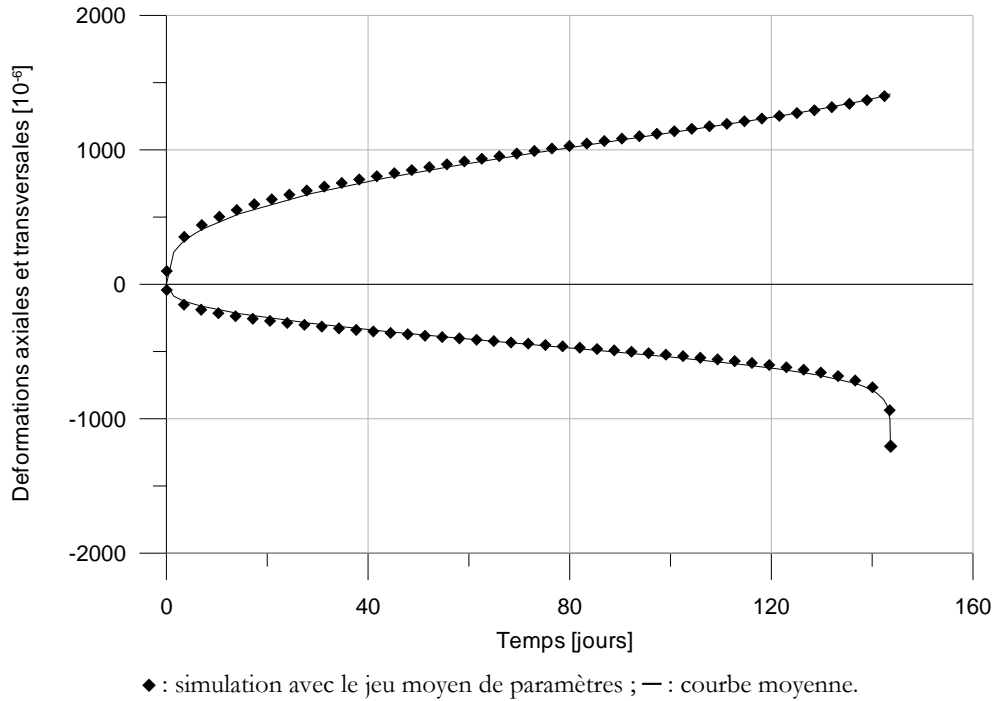


Figure 5.42 : Simulation analytique d'un essai de fluage sous un déviateur de 33 MPa avec le jeu moyen de paramètres du modèle VPDEA identifiés pour l'argilite de Tournemire.

Paramètres élastiques	Paramètres viscoplastiques	Paramètres d'endommagement	Comportement volumique et endommagement
$E = 16,54 \text{ GPa}$	$N = 1,41$	$r = 56$	$\alpha = 0,15$
$\nu = 0,43$	$M = 0,67$	$q = -0,016$	$\beta = 0,76$
	$K = 2,68 \cdot 10^{13}$	$A = 45$	

Tableau 5.19 : Jeu moyen de paramètres du modèle VPDEA pour l'argilite de Tournemire.

## 5.7 Conclusion

L'étude expérimentale du comportement mécanique différé de l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire a mis en évidence un développement des déformations viscoplastiques à volume non constant. Pour exploiter les résultats des essais de fluage et de chargement quasi statique, nous les avons simulés à l'aide de différents modèles basés sur la théorie viscoplastique de Perzyna et la loi de Lemaitre.

Le modèle VP n'a pas permis de reproduire parfaitement le comportement mécanique différé de nos trois roches argileuses. Le défaut principal de ce modèle réside dans le fait qu'il ne tient pas compte du développement de la déformation volumique irréversible observé expérimentalement. Ne permettant pas de prévoir la rupture de la roche, l'utilisation de cette loi viscoplastique pour la prévision des déformations sur des échelles de temps longues semble donc inadaptée.

Pour tenir compte des observations expérimentales, *Hajdu* (2003) a modifié la loi viscoplastique endommageable de Lemaitre et introduit deux nouveaux paramètres,  $\alpha$  et  $\beta$ , qui traduisent respectivement le comportement volumique du matériau (contractance, dilatance) et l'anisotropie d'endommagement.

Dans cette dernière partie, nous avons formalisé une procédure d'identification des paramètres de ce modèle et testé son efficacité à partir des résultats de l'étude expérimentale sur l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. Nous avons montré que le modèle VPDEA est capable de décrire différents phénomènes visqueux, en fluage et en chargement quasi statique. Les simulations analytiques concordent généralement très bien avec les données expérimentales. Plusieurs jeux de paramètres ont pu être ajustés. Utilisés dans une simulation d'essais de fluage, ils ont pu être comparés et nous ont permis d'identifier un jeu moyen de paramètres pour l'argilite de Tournemire.

La validation du modèle avec des mesures *in situ* nous semble maintenant nécessaire.





## Conclusions générales et perspectives

### 6.1 Conclusions

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire, consacré aux comportements mécaniques différés des roches argileuses, avait pour but était de mieux comprendre les mécanismes régissant le développement des déformations dues à la viscoplasticité de ce type de roches.

L'étude expérimentale, composée d'essais uniaxiaux de fluage et de chargement monotone quasi statique, a concerné trois roches argileuses aux compositions minéralogiques légèrement différentes : l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. Elle a montré d'importantes similitudes dans leurs réponses aux sollicitations mécaniques imposées.

En chargement uniaxial quasi statique, le comportement est notamment caractérisé par un développement de la déformation volumique, linéaire avec la contrainte, jusqu'à l'initiation de la dilatance, quelle que soit la vitesse de chargement ou l'orientation de la stratification. La dilatance, quand elle apparaît, est en général assez tardive donnant une contrainte de contraction maximale,  $\sigma_{cd}$  proche de la contrainte de rupture,  $\sigma_r$ . En compression simple, dès que la propagation des fissures devient instable, les caractéristiques mécaniques de ces roches argileuses se dégradent donc rapidement, menant l'échantillon à la rupture. La détermination du seuil d'initiation du fluage secondaire,  $\sigma_{cd}$  est rendue difficile et imprécise du fait du petit nombre de valeurs obtenues.

Les essais de fluage ont montré que l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire ont une forte aptitude au fluage. Les déformations différées de ces trois roches argileuses sous fort déviateur peuvent représenter 30 à 55 % de la déformation totale après à peine quelques semaines ou quelques mois d'essai.

Ces essais de fluage de longue durée ont surtout mis en évidence, en compression uniaxiale, avec des déviateurs proches de la résistance à la rupture ( $q > 90\%$  de  $\sigma_p$ ), l'existence d'une phase de fluage secondaire dans l'argilite de l'Est, la marne du Mont d'Or et l'argilite de Tournemire. Cette observation classique lors d'essais sur le sel gemme ou la glace est souvent discutée dans le cas des roches dites "dures" ou "fragiles". Jusque là, lors d'essais réalisés en laboratoire, l'argilite de l'Est n'avait pas présenté de phase de fluage secondaire nettement identifiable. La reproductibilité de notre essai n'ayant pu être testée faute d'échantillon, nous resterons prudents

sur sa conclusion. En revanche sous fort déviateur, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'or présentent des phases de fluage secondaire nettes où la vitesse de déformation viscoplastique est constante.

En superposant les courbes de la déformation viscoplastique en fonction du temps mesurées à chaque palier de déviateur, nous avons mis en évidence qu'au-delà d'un certain seuil de contrainte et/ou de déformation, le comportement en fluage de la roche n'est plus affecté par une faible augmentation du déviateur : lorsque le fluage secondaire est atteint au palier précédent, il se poursuit après l'augmentation de la charge, à une vitesse légèrement supérieure.

Lors de ces essais de fluage, nous avons également pu observer en calculant l'évolution de la déformation volumique que les déformations viscoplastiques ne se développent pas à volume constant. Cette observation expérimentale infirme donc une des hypothèses de la loi de Lemaitre. Cependant, les comportements volumiques en fluage de nos trois roches ont été très différents : contraction de l'échantillon durant la phase de fluage primaire puis initiation de la dilatance dès le fluage secondaire (argilite de l'Est), stricte contractance (marne du mont d'or), contractance en fluage primaire et secondaire puis dilatance en fluage tertiaire (argilite de Tournemire).

Au cours des essais de fluage sur la marne du Mont d'Or, nous avons mis en œuvre une série de cycles de charge-décharge. Même si une augmentation de la vitesse de fluage après un cycle de charge-décharge est perceptible, les effets des cycles varient d'un palier à l'autre et ce résultat reste à confirmer. La fréquence des cycles, très faible ( $1.10^{-5}$  Hz) et très inférieure à celles mis en œuvre habituellement (de 0,25 à 20 Hz pour les essais de fatigue de Mora, 1982) a cependant permis de montrer qu'à cette fréquence, les cycles étant entrecoupés de périodes de recouvrance de 24h, la décharge n'influence pas le comportement de la roche. Les niveaux de déformations axiales et transversales atteints avant la décharge et après la recharge sont identiques et le fluage reprend à la même vitesse. En revanche, après une période de recouvrance plus longue, on retrouve la courbure du fluage primaire après la recharge de l'échantillon.

Le dispositif mis au point pour les mesures de vitesses de propagation d'ondes soniques, à l'aide de capteurs PVDF, est parfaitement utilisable sur les roches argileuses : bien qu'atténués, les signaux reçus sont bien identifiables et le pointage de la première onde arrivée est relativement précis. Les résultats des mesures réalisées lors d'un essai de chargement quasi statique et d'un essai de fluage restent conformes aux prédictions théoriques. Lors du chargement quasi statique, la vitesse des ondes P augmente progressivement du fait de la contractance du matériau puis diminue à cause de l'endommagement de la roche (ouverture de fissures). Lors de l'essai de fluage, l'augmentation de la vitesse des ondes P est linéaire avec le temps durant le fluage primaire, puis diminue lors fluage secondaire et enfin, chute rapidement lors de la phase de fluage tertiaire.

A partir des échantillons rompus d'argilite de l'Est et de marne du Mont d'Or, plusieurs lames minces et épaisses ont été réalisées permettant de compléter l'étude expérimentale par une analyse microstructurale à l'aide d'observations au microscope optique et électronique. A température ambiante, le comportement mécanique différé des roches est essentiellement dû aux phénomènes de fluage cataclastique et granulaire. De cette étude au microscope optique et au MEB, il ressort que les déformations observées macroscopiquement lors des essais mécaniques sont essentiellement dues à la microfissuration de la matrice argileuse très influencée par l'anisotropie de l'argilite de l'Est et de la marne du Mont d'Or puisque les fissures verticales consécutives à la rupture fragile sont nettement déviées par le litage dans nos échantillons. On remarque également que le long des plans de microfissures, les particules argileuses semblent se réorienter face contre face. Ce réarrangement n'affecte qu'une zone de 10 à 20  $\mu\text{m}$  d'épaisseur autour de l'axe de la fissure. Présente sous forme d'agrégats framboïdaux constituant des zones de faiblesse, la pyrite influence fortement le développement de la fissuration de l'argilite de l'Est : elle est très souvent

cisaillée par les microfissures induites par les essais mécaniques sans que ses cristaux ne soient fracturés. Ces observations confirment les résultats obtenus notamment par *Wright* (2001) et *Gasc-Barbier* (2002) qui déjà soulignaient le rôle essentiel joué par la texture, la structure et les sulfures de fer dans la déformation et la rupture des argilites de l'Est.

Dans la dernière partie de cette thèse, pour exploiter les résultats des essais de fluage et de chargement quasi statique, nous les avons simulés à l'aide de différents modèles basés sur la théorie viscoplastique de Perzyna et la loi de Lemaitre.

Le modèle viscoplastique de Lemaitre, qui ne tient pas compte du développement de la déformation volumique irréversible observé expérimentalement, permet une modélisation du fluage primaire de la roche mais ne peut être utilisé pour prévoir sa rupture. Pour une meilleure simulation du comportement volumique des roches, nous avons utilisé le modèle VPDEA. Proposé par *Hajdu* (2003) qui a modifié la loi viscoplastique endommageable de Lemaitre, ce modèle introduit un paramètre  $\alpha$  exprimant la contractance ou la dilataance du matériau et une variable  $\beta$  traduisant l'anisotropie d'endommagement. Dans ce dernier chapitre, nous avons testé la validité du modèle VPDEA avec les résultats de nos essais sur l'argilite de l'Est, l'argilite de Tournemire et la marne du Mont d'Or. Ces simulations ont nécessité l'élaboration de procédures d'identification des paramètres à partir des résultats d'essais uniaxiaux de fluage ou de chargement monotone quasi statique. Les simulations analytiques obtenues concordent généralement très bien avec les données expérimentales et plusieurs jeux de paramètres ont pu être ajustés pour les trois roches. Des intervalles de variation pour les 10 paramètres du modèle VPDEA ont été calculés en tenant compte du faible nombre de valeurs et un jeu moyen de paramètre a pu être identifié pour modéliser le fluage de l'argilite de Tournemire.

## 6.2 Perspectives

Du point de vue expérimental, les premières conclusions de cette étude mériteraient d'être affinées au moyen d'autres essais de chargement quasi statique sur une plage de vitesse plus large et d'être complétées par des essais sur des éprouvettes d'orientation intermédiaire, 30°, 60° et 75°. Ces essais devraient permettre de quantifier plus précisément l'évolution des contraintes caractéristiques en fonction de l'orientation,  $\theta$ , des éprouvettes et de la vitesse de sollicitation. La détermination de la contrainte de contraction maximale  $\sigma_{cd}$  est en particulier essentielle puisque cette contrainte définit en théorie la résistance à long terme de la roche et le seuil d'initiation du fluage secondaire.

La durée des essais de fluage et leur difficulté de réalisation n'ont pas permis leur multiplication qui aurait pourtant amélioré la représentativité des résultats. Les conclusions présentées ici n'ont donc pas encore de caractère général pour le comportement des roches étudiées. Il serait intéressant de tester la reproductibilité des résultats pour en conforter les conclusions.

De plus, l'influence du cyclage sur les déformations viscoplastiques n'a pu être parfaitement quantifiée. Même si le rapprochement des résultats des essais de fluage statique et cyclique est très délicat, cette technique d'activation des déformations viscoplastiques doit être exploitée dans l'étude des comportements différés.

Les analyses microstructurales peuvent être complétées. Du fait de la complexité de leur réalisation et par manque de temps, aucune lame mince n'a été extraite des échantillons rompus d'argilite de Tournemire. Ce travail pourrait faire l'objet d'une étude future et s'intégrer dans une analyse plus complète des mécanismes de déformations à l'échelle microscopique.

Le comportement mécanique des roches dépend fortement des conditions thermiques et hydriques. Dans cette étude, nous nous sommes affranchis des phénomènes chimiques, thermiques et hydrauliques, pour n'étudier que les comportements différés d'origine mécanique. Il serait donc intéressant d'intégrer ces couplages pour une meilleure prévision des déformations à long terme des ouvrages souterrains.

Enfin, après avoir exploité les résultats de l'étude expérimentale, la validation du modèle VPDEA avec des mesures *in situ* nous semble nécessaire, afin de prendre en compte l'effet d'échelle.

## Bibliographie

- [1] ADAMS F.D., NICHOLSON J.T., *An experimental investigation into the flow of marble*, Phil. Trans. Roy. Soc., London, Series A, Vol. 195, 363-401, 1901.
- [2] ADDA Y., DUPOUY J.M., PHILIBERT J., QUERE Y., *Eléments de métallurgie physique*, Vol. 5 : *Déformation plastique*, Documentation Française, Paris, 1979.
- [3] ALLIROT D., *Contribution à l'étude de l'anisotropie des déformations et la rupture d'une roche stratifiée*, Thèse de doctorat, Grenoble, 1976.
- [4] ALLIROT D., BOEHLER J.P., SAWCZUK A., *Irreversible deformation of an anisotropic rock under hydrostatic pressure*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 14, 77-83, 1977.
- [5] ALLIROT D., BOEHLER J.P., *Evolution des propriétés mécaniques d'une roche stratifiées sous pression de confinement*, In : Fourth International Congress on Rock Mechanics, Vol. 1, 15-22, 1979.
- [6] AMITRANO D., *Emission acoustique des roches et endommagement : Approches expérimentale et numérique, Application à la sismicité minière*, Thèse de doctorat, Grenoble, 1999.
- [7] ANDRA, *Geomechanical Data Meuse/Haute-Meuse ANDRA URL*, CDRom 01.0073, Laego, 2001.
- [8] ATTEWELL P.B., FARMER I.W., *Fatigue of behavior rock*, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., Vol. 10, 1-9, 1973.
- [9] AUBLIVE N., DJERAN-MAIGRE I., CHIARELLI A.S., CABRILLAC R., SU K., *Modélisation rhéologique des argilites de l'Est*, Actes du XV<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Nancy, 466-471, 2001.
- [10] AUVRAY C., HOMAND F., SORGI C., *The aging of gypsum in underground mines*, Engineering Geology, n°74, 183-196, 2004.
- [11] BAUER-PLAINDOUX C., TESSIER D., GHOREYCHI M., *Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : Importance de la relation calcite-argile*, CRAS Science de la Terre et des Planètes, série IIa, Vol. 326, n° 4, 231-237, 1998.
- [12] BAZANT Z.P., CHERN J.C., *Double power logarithmic law for concrete creep*, Cement and Concrete Research, Vol. 14, 793-806, 1984.
- [13] BEREST P., *Viscoplasticité en mécanique des roches*, Manuel de rhéologie, Presse des Ponts et Chaussées, 235-257, 1987.
- [14] BEREST P., BERGUES J., DUC N.M., *Comportement des roches au cours de la rupture : application à l'interprétation d'essais sur des tubes épais*, Revue française de Géotechnique, Vol. 9, 5-12, 1979.
- [15] BIENIASWSKI Z.T., *Mechanism of brittle fracture of rock. : Part I- Theory of the fracture process*, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., Vol. 4, 395-406, 1967.
- [16] BOEHLER J.P., *Lois de comportement anisotrope des milieux continus*, Journal de Mécanique, vol. 17, n°2, 153-190, 1978.
- [17] BOEHLER J.P., *Applications of tensor functions in solid mechanics*, Springer-Verlag, Wien, New York, chap. 1 à 7, 1987.

- [18] BOIDY E., *Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines*, Thèse de doctorat, Grenoble, 2002.
- [19] BOIDY E., BOUVARD A., PELLET F., *Back analysis of time-dependent behavior of a monitored tunnel*, International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier Science, Vol. 17, n°4, 415-424, 2002.
- [20] BOIDY E., PELLET F., *Identification of mechanical parameters for modelling time-dependant behaviour of shales*, Workshop ANDRA, Paris, 2000.
- [21] BOIDY E., PELLET F., BOULON M., *Numerical modeling of deep tunnels including time-dependent behavior*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics – IACMAG, Tucson, Arizona – US, 1663-1668, 2001.
- [22] CABRERA J., *Projet Tournemire : Synthèse des programmes de recherches*, Rapport IPSN DRPE/SERGP 01-19, 2001.
- [23] CABRERA J., VOLANT P., BAKER C., PETTITT W., YOUNG R.P., *Structural and geophysical investigations of the EDZ in indurated argillaceous media : The tunnel and the galleries of the IPSN Tournemire site*, Proc. of the 37<sup>th</sup> U.S. Rock Mech. Sympo. Vail, USA, 957-964, 1999.
- [24] CAILLIERE S., HENIN S., *Minéralogie des argiles*, Ed. Masson & Cie, 1963.
- [25] CARTER N.L., ANDERSON D.A., HANSEN F.D., KRANZ R.L., *Creep and creep rupture of granitic rocks, in Mechanical behavior of crustal rocks*, Geophysical Monograph, Vol. 24, 61-82, 1981.
- [26] CAZACU O., CRISTESCU N.D., SHAO J.F., *A new failure criterion for transversely isotropic rocks*, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 35, n°4-5, paper n°130, 1998.
- [27] CAZACU O., CRISTESCU N.D., SHAO J.F., HENRY J.P., *A new failure criterion for transversely isotropic solids*, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, Vol. 3, 89-103, 1998.
- [28] CHABOCHE J.L., *Sur l'utilisation des variables d'état interne pour la description du comportement viscoplastique et de la rupture par endommagement*, Symp. Franco-Polonais de Rhéologie et Mécanique, Cracovie, Pologne, 1977.
- [29] CHABOCHE J.L., *Une nouvelle condition unilatérale pour décrire le comportement des matériaux avec dommage anisotrope*, CRAS Paris, n°314, Série IIb, 1395-1401, 1992.
- [30] CHAMBON R., *General presentation of constitutive modelling of geomaterials*, Revue Française de Génie Civil, Vol. 4, n° 5, 9-31, 2000.
- [31] CHIARELLI A.S., *Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique de l'argilite de l'Est : Influence de la profondeur et de la teneur en eau*, Thèse de doctorat, Lille, 2000.
- [32] CHIN H.P., ROGERS J.D., *Creep parameters of rocks on an engineering scale*, Rock Mech. Rock Engn., Vol. 20, n° 2, 137-146, 1987.
- [33] COMITE FRANÇAIS DE MECANIQUE DES ROCHES, *Manuel de mécanique des roches*, Les presses de l'Ecole des Mines, Vol. 1 : Fondements, 265 pages, 2000.
- [34] COSTIN L.S., HOLCOMB D.J., *Time-dependent failure of rock under cyclic loading*, Tectonophysics, n° 79, 279-296, 1981.
- [35] COQUINOT Y., *Mise en évidence et caractérisation des phénomènes de dissolution et de cristallisation liés à la diagenèse dans les roches argileuses de la Meuse*, Mémoire de DEA, Lille, 2000.
- [36] CORDEBOIS J.P., SIDOROFF F., *Endommagement anisotrope en élasticité et plasticité*, Journal de Mécanique Théorique et Appliquée, n° spécial, 45-59, 1982.

- [37] COUVREUR J.F., THIMUS J.F., *Progressive failure of a porous limestone under cyclic loading revealed by ultrasonic attenuation*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 35, n°4-5, paper n°72, 1998.
- [38] CRISTESCU N.D., *Viscoplastic creep of rocks around horizontal tunnels*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, n°6, 453-459, 1985.
- [39] CRISTESCU N., HUNSCHE U., *Time Effects in Rocks Mechanics*, Ed. John Wiley & sons, New York, 1997.
- [40] CRISTESCU N., SILICIU I., *Viscoplasticity*, Ed. Martinus Nijhoff, The Hague, 1982.
- [41] CRUDEN D.M., *Single-increment creep experiments on rock under uniaxial compression*, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 8, 127-142, 1971.
- [42] CUXAC P., HOMAND F., *Propagation d'ondes ultrasoniques dans les roches anisotropes*, Revue française de Géotechnique, n°59, 19-55, 1992.
- [43] DAYRE M., *Quelques résultats d'essais de fluage de longue durée effectués en compression monoaxiale sur les roches. Problème de rhéologie et de mécanique des sols*, Symposium Franco-Polonais, Nice, 121-128, 1974.
- [44] DAVIS H.G., REYNOLDS S.J., *Structural Geology of rocks and regions*, chapter 4 : *Deformation mechanisms and microstructures*, Wiley, Second Edition, 150-202, 1996.
- [45] DELFOSSE RIBAY E., DJERAN MAIGRE I., CABRILLAC R., GOUVENOT D., *Comparaison des comportements au fluage et à la fatigue du sable injecté*, Revue Européenne de Génie Civil, Vol. 8, n°4, 419-437, 2004.
- [46] DELFOSSE RIBAY E., *Etude du comportement au fluage et sous chargement cyclique du sable injecté*, Thèse de doctorat, Cergy-Poitouise, 2001.
- [47] DJERAN-MAIGRE I., GASC-BARBIER M., *Hydromechanical modelling of experimentally compacted saturated argillaceous porous media*, Transport in Porous Media, Vol. 41, 81-103, 2000.
- [48] DJERAN-MAIGRE I., TESSIER D., GRUNBERGER D., VELDE B., VASSEUR G., *Evolution of microstructures and of macroscopic properties of some clays during experimental compaction*, Marine and Petroleum Geology, Vol. 15, 109-128, 1998.
- [49] DOWLING N. E., *Mechanical behavior of materials, Engineering methods for deformation, fracture and fatigue*, Prentice Hall, 2<sup>nd</sup> Ed., 1998.
- [50] DONATH F.A., *Experimental study of shear failure in anisotropic rocks*, Bull. Geol. Soc. Am., Vol. 72, 985-990, 1961.
- [51] DONATH F.A., *Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock*, In : State of stress in the Earth's crust, Amsterdam, Elsevier, 281-297, 1964.
- [52] DRAGON A., MROZ Z., *A continuum model for plastic-brittle behavior of rock and concrete*, Int. J. Engng. Sci., Vol. 17, 122-137, 1978.
- [53] DU BERNARD X., LABAUME P., *Bandes de déformation dans les grès : typologie en fonction de la composition minéralogique et du mode de déformation*, Milieux Granulaires et Sciences de la Terre - GdR Milieux Divisés, Paris, 2002.
- <http://www-lgit.obs.ujf-grenoble.fr/~xduberna/research/publications/documents/GdR-Midi2002.pdf>
- [54] DUSSEAULT M.B, FORDHAM C.J., *Time-dependant behavior of rocks*, In Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 3, 119-149, 1993.



- [55] EBERHARDT E., STIMPSON B. et STEAD D., *Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures*, Rock Mech. Rock Engng., Vol. 32, n°2, 81-99, 1999.
- [56] ESCOFFIER S., *Caractérisation expérimentale du comportement hydromécanique des argilites de Meuse/Haute-Marne*, Thèse de doctorat, 2001.
- [57] EWY R.T., COOK N.G.W., *Deformation and fracture around cylindrical openings in rock*, Int. J. Rock Mech. Min. sci. & Geomech. Abstr., Vol. 27, n°5, 387-427, 1990.
- [58] FABRE G., *Etude expérimentale et théorique du comportement mécanique différé de deux roches sédimentaires*, DEA, Université Joseph Fourier, 2001.
- [59] FABRE G., PELLET F., *Identification des caractéristiques visqueuses d'une roche argileuse*, Int. Symp. on Identification and Determination of Soil and Rock Parameters for Geotechnical Design, PARAM, Paris, 2002.
- [60] FODIL A., ALOULOU W., HICHER P.Y., *Viscoplastic behaviour of soft clay*, Géotechnique, n° 47, 581-591, 1997.
- [61] FOUCAULT A., RAOULT J.F., *Dictionnaire de géologie*, 5<sup>ème</sup> édition, Dunod, 2001.
- [62] FOURMAINTRAUX D., *Quantification des discontinuités de la roche et du massif rocheux, Méthodes et application*, Rev. Industrie Minérale, 12-20, 1975.
- [63] FOURMAINTRAUX D., *Caractérisation des roches : essais de laboratoire, dans : La Mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 39-56, 1976.
- [64] FRANCOIS D., PINEAU A., ZAOUI A., *Comportement mécanique des matériaux*, Tome 2 : *Viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique du contact*, Éditions Hermès, Paris, 1995.
- [65] FROST H.J., ASHBY M.F., *Deformation-mechanism maps : the plasticity and creep of metals and ceramics*, Pergamon Press, 1982.
- [66] GASC-BARBIER M., GHOREYCHI M., TEISSIER D., *Comportement mécanique de roches argileuses profondes : incidence de la texture*, Proceedings. of the 9<sup>th</sup> International Congress On Rock Mechanics, Balkema, Vol. 2, 595-600, 1999.
- [67] GASC-BARBIER M., *Étude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes : apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques*, Thèse de doctorat, Paris, 2002.
- [68] GATELIER N., *Étude expérimentale et théorique de l'endommagement des roches anisotropes*. Thèse de doctorat, Grenoble, 2001.
- [69] GATELIER N., PELLET F., LORET B., *Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests*, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 39, n°3, 335-354, 2002.
- [70] GHOREYCHI M., *Comportement thermo-hydro-mécanique des argilites de l'Est et son incidence sur les ouvrages souterrains*, in *Étude pour la faisabilité des stockages de déchets radioactifs*, Actes des journées scientifiques ANDRA, 397- 417, 1999.
- [71] GONZE P., *Techniques de calcul utilisées en congélation des terrains*, in *La thermomécanique des roches*, Manuels et Méthodes, BRGM, Vol.16, 1988.
- [72] GOODALL W., HALES R., WALTERS D.J., *On constitutive relations and failure criteria of an austenitic steel under cyclic loading at elevated temperature*, Creep in Structures, Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1980.
- [73] GRAISS G., MAHMOUD M.A., *Effect of Cyclic Stress Reduction on the Creep Behaviour of Al-Ag*

- and Al-Ag-Zr Alloys Containing gamma' and gamma Precipitates, Cryst. Res. Technol., Vol. 1, n°35, 95-100, 2000.
- [74] GRATIER J.P., *Estimation of volume changes by comparative chemical analyses in heterogeneously deformed rocks (folds with mass transfer)*, J. Struct. Geol., Vol. 5, 329-339, 1983.
- [75] GRATIER J.P., JENATTON L., *Deformation by solution-deposition, and reequilibration of fluid inclusions in crystals depending on temperature, internal pressure and stress*, J. Struct. Geol., Vol. 6, 189-200, 1984.
- [76] GRATIER J.P., GUIGUET R., *Experimental pressure solution deposition on quartz grains, the crucial effect of the nature of the fluid*, J. Struct. Geol., Vol. 8, 845-56, 1986.
- [77] GRATIER J.P., JENATTON L., TISSERAND D., GUIGUET R., *Indenter studies of swelling, creep and pressure solution of Bure argillite*, Applied Clay Sciences, Vol. 26, 459-472, 2004.
- [78] GRGIC D., HOMAND F., HOXHA D., *Instabilités des mines de fer abandonnées de Lorraine : approche hydromécanique*, Actes du XV<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Nancy, 529-534, 2001.
- [79] GRIFFITH A., *The theory of rupture*, in C. B. Biezeno et J. M. Burgers éd., 1<sup>st</sup> International Congress of Applied Mechanics, Delft, 55-63, 1924.
- [80] GRIGGS, *Hydrolytic weakening of quartz and other silicates*, Geophys. J. R. Astr. Soc., 14, 1967.
- [81] GROLIER J., FERNANDEZ A., HUCHER M., RISS J., *Les propriétés physiques des roches*, eds. Masson, Chap. 19 et 20, 336-410, 1991.
- [82] GUEGUEN Y., PALCIAUSKAS V., *Introduction à la physique des roches*, Hermann Editeurs des sciences et des arts, 1992.
- [83] HAIMSON B., *Strength, deformability, and micromechanics of brittle fracture in a crystalline rock under true triaxial compressive stresses*, ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 451-456, 2003.
- [84] HAIMSON B.C., *Mechanical behaviour of rock under cyclic loading*, Proceedings of the Third International Congress on Rock Mechanics, Denver, Vol. 2A, 373-378, 1974.
- [85] HAIMSON B.C, KIM C.M., *Mechanical behavior of rock under fatigue*, Proc. 13<sup>th</sup> Symp. Rock Mech., Illinois, USA, 845-863, 1972.
- [86] HAIMSON B.C, KIM C.M., *Acoustic emission and fatigue mechanism in rock*, Proc. 1<sup>st</sup> conf. Ac. Em., Mic. Seism, Ac. in geol., Pennsylvania, USA, 35-55, 1977.
- [87] HAJDU A., *Modélisation numérique du comportement viscoplastique endommageable des roches et application aux ouvrages souterrains de stockage*, Thèse de doctorat, Grenoble, 2003.
- [88] HOFER K.H, KNOLL P., *Investigations into the mechanism of creep deformation in corneillite and practical applications*, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 8, 61-73, 1971.
- [89] HOMAND F., HOXHA D., *Modélisation de l'endommagement anisotrope du granite de la Vienne*, Revue Française de Génie Civil, Vol. 6, n° 1, 35-47, 2002.
- [90] HOMAND F., MOREL E., CUXAC J.P., HAMMADE E., *Characterization of the moduli of an anisotropic rock using dynamic and static methods*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 30, n°5, 517-535, 1993.
- [91] HOMAND-ETIENNE F., *Action de la température sur les roches : Dilatation et fissuration*, Rock at Great Depth, Maury et Fourmaintraux eds, Balkema, Rotterdam, 371-378, 1989.
- [92] HOUPERT R., *Le comportement à la rupture des roches*, In : Comptes-rendus du congrès

- international de Mécanique des roches de Montreux, Vol. 3, 107-114, 1979.
- [93] HOXHA D., AUVRAY C., HOMAND F., GIRAUD A., DIDIER C., *Modélisation du comportement à long terme d'un gypse*, 16<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Nice, 2003.
- [94] HULT J., *Continuum damage mechanics Capabilities, limitations and promises*, Mechanisms of deformation and fracture, Pergamon Press, Oxford, 233-347, 1979.
- [95] International Society of Rock Mechanics (ISRM), *Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression*, Int. J. of Rock Mech & Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, 285-289, 1983.
- [96] JOUFFREY B., *Historique de la notion de dislocation*, dans : GROH P., KUBIN L.P., MARTIN J.L., *Dislocations et déformation plastique*, Yrivals, Les Editions de Physique, 1979.
- [97] JUNG J., *Précis de pétrographie*, Masson, 3<sup>ème</sup> édition revue et mise à jour, 1969.
- [98] KACHANOV L. M., *Time of the rupture process under creep conditions*, Izv. Adad. Nauk. USSR Otd. Tekh., Vol. 8, 26-31, 1958.
- [99] KEARY P., VINE F.J., *Global Tectonics*, Blackwell scientific Publ., Oxford, 2<sup>nd</sup> ed. 1991.
- [100] KHARCHAFI M., DESCOEUDRES F., Comportement différé des roches marneuses encaissant les tunnels, Colloque Mandanum Craies et Schistes, GBMR, Bruxelles, mars 1995.
- [101] KOSS S., BOEHLER J.P., *Les jauges grandes elongations*, In : Journée d'étude Extensométrie, Paris, Editions Ampère, 1990.
- [102] KWASNIEWSKI M.A., *Mechanical behavior of anisotropic rocks*, in Comprehensive Rock Engineering, Vol. 1 : Fundamentals, Pergamon Press, Oxford, 285-312, 1993.
- [103] KNIPE R.J., RUTTER E.H., *Deformation mechanisms*, Rheology and Tectonics, Geological Society Special Publications, n°54, London, 1990.
- [104] KRANZ R. L., *Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, 37-47, 1979.
- [105] LADANYI B., *Time-dependent response of Rock around tunnels*, in Comprehensive Rock Engineering, Vol. 2, Pergamon Press, Oxford, 77-111, 1993.
- [106] LAMA R.D., VUTUKURI V.S., *Handbook on mechanical properties of rocks*, Vol. 2, Chap. 6 : *Static Elastic Constants Rock*, Trans. Tech. publications, 1978.
- [107] LAVROV A., VERVOORT A., FILIMONOV Y., WEVERS M., MERTENS J., *Acoustic emission in host-rock material for radioactive waste disposal : Comparison between clay and rock salt*, Bulletin of Engineering Geology and the Environnement, Vol. 61, n°4, 379-387, 2002.
- [108] LECOMTE P., *Creep in rock salt*, Journal of Geology, Vol. 73, n°3, 469-484, 1965.
- [109] LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., *Aspect phénoménologiques de la rupture par endommagement*, Journal de Mécanique Appliquée, Vol. 2, n°3, 317-365, 1978.
- [110] LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., *Mécanique des matériaux solides*, Chap. 1 : *Éléments sur les mécanismes physiques de déformation et de rupture*, Dunod, 5-26, 1996.
- [111] LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., *Mécanique des matériaux solides*, Chap. 6 : *Viscoplasticité*, Dunod, 253-341, 1996.
- [112] LEMAITRE J., CHABOCHE J.L., *Mécanique des matériaux solides*, Chap. 7 : *Endommagement*, Dunod, 343-444, 1996.

- [113] LERAU J., SAINT LEU C., SIRIEYS P., *Anisotropie de la dilatance des roches schisteuses*, Rock Mechanics, Vol. 13, 185-196, 1981.
- [114] LI H.B., ZHAO J., LI T.J., *Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures*, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 36, 1057-1063, 1999.
- [115] LI H.B., ZHAO J., LI T.J., *Micromechanical modelling of mechanical properties of a granite under dynamic uniaxial compressive loads* Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 37, 923-935, 2000.
- [116] LOCKNER D.A., *The role of acoustic emission in the study of rock fracture*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, n°7, 883-899, 1993.
- [117] MARTIN C.D., CHANDLER N.A., *The progressive fracture of lac du Bonnet granite*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, n°6, 643-659, 1994.
- [118] MARTIN R.J., *Time-dependent crack growth in quartz and its application to the creep of rocks*, J. Geophys. Res., Vol. 77, 1406 - 1430, 1972.
- [119] MILLIEN A., *Comportement anisotrope du grès des Vosges : élastoplasticité, localisation, rupture*. Thèse de doctorat, Grenoble, 1993.
- [120] MORA S., *La fatigue cyclique des roches*, Thèse de doctorat, Nancy, 1982.
- [121] MORLIER P., *Le fluage des roches*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Vol. 217, 90-112, 1966.
- [122] MOTT N.F., *Brittle fracture in mild steel plates*, Engineering, 165, 1948.
- [123] MUNSON D.E., *Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 34, n°2, 233-247, 1997.
- [124] MUNSON D.E., DAWSON P.R., *A work hardening/recovery model of transient creep of salt during loading and unloading*, 23<sup>rd</sup> US Symp. Rock Mech, 299-307, 1982.
- [125] MYER L.R., KEMENY J.M., ZHENG Z., SUAREZ R., EWY R.T., COOK N.G.W., *Extensile cracking in porous rock under differential compressive stress*, Applied Mechanical Reviews, Vol. 45, n°8, 263-280, 1992.
- [126] NABARRO F., *Theory of crystal dislocations*, New York, 821 p., 1987.
- [127] Nuclear Energy Agency, Clay Club, Working group on Measurement and Physical Understanding of Groundwater Flow Through Argillaceous Media, *Water, gas and solute movement through argillaceous media*, Rapport CC~96/1, Presse de l'OCDE, Paris, 1996.
- [128] NIANDOU H., *Étude du comportement rhéologique et modélisation de l'argilite de Tournemire. Applications à la stabilité d'ouvrages souterrains*, Thèse de doctorat, Lille, 1994.
- [129] NIANDOU H., SHAO J.F., HENRY J.P., FOURMAINTRAUX D., *Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire shale*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 34, 3-16, 1997.
- [130] NISHIMATSU Y., HEROESEWOJO R., *Rheological properties of rocks under pulsating loads*, CR 3<sup>ème</sup> Congr. Soc. Internat. Méc. Roches, Denver, Vol IIA, 385-389, 1974.
- [131] NORTON F.H., *Creep of steel at high temperatures*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1929.
- [132] NOURY N., CHAMBEROD E., BENECH P, KALININ A.V., BLEUZE A., *An instrumentation based on the piezopolymer P(VDF-TrFE) for the analysis of the elastic parameters of rocks under stress*, Ultrasonics, Vol. 36, 257-262, 1998.

- [133] NUR A., SIMMONS G., *Stress induced velocity anisotropy in rock. An experimental study*, J. Geophys. Res., Vol. 74, 667-674, 1969.
- [134] ODQVIST F.K.G., *Historical Survey of development of creep mechanics from its beginnings in the last century to 1970*, Creep in structures, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1980.
- [135] OLSZAK W., PERZYNA P., *On elastic/viscoplastic soils*, Rhéologie et mécanique des sols, Symposium Franco-Polonais, Springer et Verlag, Grenoble, 44-57, 1964.
- [136] ÖZGENOĞLU A., *Intact Rock Classification based on time-dependent deformation properties*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol.35, n°4-5, paper n°16, 1998.
- [137] PELLET F., *Viscoplasticity and rock damage in modelling the long-term behaviour of underground excavations*", Chapitre 14, X Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce - MIR, Patron Editore, Torino, Italie, 423 – 448, 2004.
- [138] PELLET F., BOIDY E., BOUVARD A., HOTEIT N., *Viscoplastic behaviour of and damage to rock related to the design of underground waste depository cavities*, ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 893-898, 2003
- [139] PELLET F., FABRE G., *Comportement mécanique de roches argileuses lors d'essais de fluage de longue durée*, Colloque GdR FORPRO, La Grande-Motte, France, 2003.
- [140] PELLET F., GATELIER N., LORET B., *Experimental study of damage of an anisotropic rock using cyclic triaxial test*, Proceedings of the International Eurock Symposium, 2000, Aachen - Germany, 687-692, 2000.
- [141] PELLET F., HAJDU A., BOULON M., DELERUYELLE F., BESNUS F., *Numerical modeling of underground structures taking into account the visco-plastic behavior and damaging of rock*, Proceedings of the International Conference on Numerical Models in Geomechanics - NUMOG VIII, Roma - Italy, 399-404, 2002.
- [142] PELLET F., HAJDU A., DELERUYELLE F., BESNUS F., *A viscoplastic constitutive model including anisotropic damage for the time dependent mechanical behaviour of rock*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Wiley, à paraître, 2005.
- [143] PELLET F., SAHLI M., BOIDY E., BOULON M., *Modeling of time-dependent behavior of sandstones for deep underground openings*, Proceedings of the International Conference on Engineering and Technological Sciences - ICETS 2000, Session 5, Science Press, Beijing - China, 431-438, 2000.
- [144] PELLET F., ZERFA F.Z., *Numerical assessment of the excavation damaged zone around underground openings designed for radioactive wastes repositories*, 11<sup>th</sup> International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics, IACMAG, Torino, Italy, à paraître, 2005.
- [145] PELLET F., ZERFA F.Z., HAJDU A., DELERUYELLE F., BESNUS F., *Numerical modelling of the Excavated Damaged Zone around underground openings*, Proc. 3<sup>rd</sup> Asian Rock Mechanics Symposium, Kyoto, Japan, Vol. 1, 727-732, 2004.
- [146] PENG S., PODNIEKS E.R., *Relaxation and the behavior of failed rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, 699-712, 1972.
- [147] PERZYNA P., *The constitutive equations for rate-sensitive plastic materials*, Quart. Appl. Math., Vol. 20, 321-332, 1963.
- [148] PERZYNA P., *Fundamental problems in viscoplasticity*, Adv. Appl. Mech, Vol. 9, 247-377, 1966.

- [149] PETTTTT W.P., BAKER C., YOUNG R.P., *Using Acoustic Emission and Ultrasonic techniques for assessment of damage around critical engineering structures*, in Mining and Tunnel Innovation and Opportunity, Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, University of Toronto Press, 1161-1170, 2002.
- [150] POIRIER J.P., *Plasticité à haute température des solides cristallins*, Eyrolles, Paris, 1976.
- [151] POIRIER J. P., *Plastic rheology of crystals*, Mineral physics & crystallography, A handbook of physical constants, AGU Reference Shelf 2, T. J. Ahrens Ed., 237-247, 1995.
- [152] PUSH R., *Mechanism and Consequences of creep in cristalline rock*, In Comprehensive Rock Engineering, Vol. 2, Pergamon Press, 227-241, 1993.
- [153] RABOTNOV Y. N., *Creep rupture*, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Congr. Appl. Mech., Springer-Verlag, 342-349, 1969.
- [154] RAMAMURTHY T., *Strength and modulus responses of anisotropic rocks*, *Comprehensive Rocks engineering*, Vol. 1 : Fundamentals, Pergamon Press, Hudson J.A. Editor, 313-329, 1993.
- [155] RAY S.K., SARKAR M., SINGH T.N., *Effect of cyclic loading and strain rate on the mechanical behaviour of sandstone*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 36, 543-549, 1999.
- [156] REJEB A., *Time-dependent behaviour of Tournemire argillites (France)*, ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 955-960, 2003
- [157] REJEB A., HUMBERT B., VOUILLE G., *Projet Tournemire Programme mécanique, caractérisation du comportement mécanique au laboratoire*, IRSN, SERGD 99/07, avril 1999.
- [158] RENNER J., HETTKAMP T., RUMMEL F., *Rock mechanical characterization of an argillaceous host rock of a potential radioactive waste depository*, Rock Mech. Rock Engn, Vol. 33, n°3, 153-178, 2000.
- [159] RILEM Technical committees, *Recommendation : measurement of time-dependent strains of concrete*, RILEM TC 107-CSP in “Creep and shrinkage prediction models : principles of their formulation”, Materials and Structures, Vol. 31, n°212, 1998.
- [160] ROBERT A., FABRE D., *Rapport sur le gonflement*, Groupe de travail « Rupture en souterrain », Comité Français de mécanique des Roches, 1987.
- [161] ROUBAULT M., *Détermination des minéraux d'une roche au microscope polarisant*, Ed. Lamarre-Poinat, 1963.
- [162] ROUSSET G., GIRAUD A., *Stockage de déchets radioactifs dans l'argile*, Revue française de Géotechnique, n°74, 1996.
- [163] ROUSSET G., *Mise en évidence d'une diagenèse discrète dans les séquences sédimentaires peu perméables*, Actes des Journées ANDRA des Doctorants, Paris, 2001.
- [164] SAHLI M., *Lois d'écoulement visqueux des géomatériaux : Applications à un grès*, Thèse de doctorat, Lausanne, 1988.
- [165] SAHLI M., *Note technique : Vitesse de déformation et essais quasi statiques*, Revue française de Géotechnique, Vol. 51, p 69-73, 1990.
- [166] SAHLI M., PELLET F., BOIDY E., FABRE G., *Modeling of viscous behavior of rocks for deep tunnels*, ISRM regional symposium, Eurock, 2001.
- [167] SAINT-LEU C., LEREAU J., SYRIES P., *Mécanisme de rupture dans les schistes de Lacaune : influence de la pression isotrope*, Bull. Soc. Fr. Miné. Cristall., n° 101, 437-442, 1978.

- [168] SAMMONDS P.R., AYLING M.R., MEREDITH P.G., MURRELL S.A, JONES C., *A laboratory investigation of acoustic emission anelastic wave velocity changes during rock failure under triaxial stresses*, In *Rock at great depth*, Maury et Fourmaintraux éditeurs, , 233-240, 1989.
- [169] SAYERS C.M., VAN MUNSTER J.V., KING M.S., *Stress-induced ultrasonic anisotropy in Berea sandstone*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 11, 107-113, 1990.
- [170] SCHMITT L., *Etude du soutènement hydraulique des puits pétroliers dans les argilites par l'essai triaxial à confinement fluide direct*, Thèse de doctorat, 1994.
- [171] SCHOLTUS N., *Composition chimique de la solution dans les argilites du Callovo-oxfordien soumises à l'action simulée de composés rhizosphériques*, Actes des Journées ANDRA des Doctorants, Paris, 2001.
- [172] SCHOLZ C.H., *The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 58, n°1, 399-415, 1968.
- [173] SCHOLZ C.H., *Static fatigue of quartz*, *J. Geophys. Res.*, n° 77, 2104 – 2114, 1972.
- [174] SCHOLZ C.H., KOCZYNSKI T.A., *Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads*, *J. Geophys. Res.*, n° 84, 5525-55234, 1979.
- [175] SIDOROFF F., *On the formulation of plasticity and viscoplasticity with internal variables*, *Arch. Mech.*, Vol. 27, N°5-7, 807-819, 1975.
- [176] SIDOROFF F., *Variables internes en viscoélasticité et en plasticité*, Thèse de doctorat, Paris, 1976.
- [177] TER-STEPANIAN G., *Concentration du fluage avec le temps*, *Revue française de Géotechnique*, n°74, 1996.
- [178] THEVENIN E., *Rapport de reconnaissance par sondages carottés, Tunnel du Mont d'Or, Ligne de Dijon à Vallorbe*, SNCF, 2000.
- [179] TILLARD D., *Étude de la rupture dans les géomatériaux cohésifs. Application à la marne de Beaucaire*, Thèse de Doctorat, Grenoble, 1992.
- [180] TULLIS J. et YUND R. A., *Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar : Mechanisms and microstructures*, *Geology*, Vol. 15, 606-609, 1987.
- [181] VALES F., NGUYEN MINH D., GHARBI H., REJEB A., *Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale (France)*, *Applied Clay Science*, Vol. 26, 197-207, 2004.
- [182] VUAILLAT P., *Propriétés visqueuses d'une argile*, Thèse de doctorat, Grenoble, 1980.
- [183] WEISS J., MARSAN D., *Three-dimensional mapping of dislocation avalanches : Clustering and space/ time coupling*, *Science*, Vol. 299, 2003.
- [184] WEISS J., GRASSO J.R., MIGUEL M.C., VESPIGNANI A., ZAPPERI S., *Complexity in dislocation dynamics : experiments*, *Materials Science and Engineering*, n° 309-310 , 360-364, 2001.
- [185] WEISS J., LAHAIE F., GRASSO J.R., *Statistical analysis of dislocation dynamics during viscoplastic deformation from acoustic emission*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, 433-442, 2000.
- [186] WAWERSICK W.R., FAIRHURST C., *A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments*, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 7, 561-575, 1970.
- [187] WHITTAKER B.N., SINGH R.N., SUN G., *Rock Fracture Mechanics : Principles, design and applications*, *Developpements in Geotechnical Engineering*, Vol. 71, Elsevier Science Publication, 1992.

- [188] WRIGHT H., *Rôle de la minéralogie, de la texture et de la structure dans la déformation et la rupture des argilites de l'Est*, Thèse de doctorat , Cergy-Pontoise, 2001.
- [189] YANG C., ZHIYIN W., LUQING Z., RUIGUANG Z., NIANXING X., *Experimental investigation of creep behavior of salt rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 36, n° 2, 331-341, 2001.
- [190] ZHANG C., ROTHFUCHS T., *Experimental study of the hydro-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian argillite*, Applied Science, Vol. 26, 325-336, 2004.
- [191] ZHENG Q.S., COLLINS I.F., *The relationship between damage variables and their evolution laws and microstructural and physical properties*, Proc. R. Soc. Lond., 1469-1498, 1998.
- [192] ZOUBTSOV S., *Le fluage expérimental d'agrégats polyminéraux par dissolution cristallisation sous contrainte – Application à l'étude du comportement à long terme des argilites de Meuse/Haute-Marne*, Actes des Journées ANDRA des Doctorant, Paris, 2002.





## **Annexes**



## Annexe A

### Mesures de vitesses d'ondes soniques

Afin d'évaluer le degré d'anisotropie de structure des trois roches argileuses étudiées, des mesures de vitesses de propagation d'ondes soniques (P) ont été réalisées sur chaque éprouvette avant leur instrumentation, dans différentes directions : longitudinalement sur la hauteur de l'échantillon et diamétralement sur 2 diamètres à 0° et 90° (plan  $(\vec{n}, \vec{t})$ ) ou 4 diamètres à 0°, 45°, 90° et 135° (Figure A.1).

Il nous a parfois été impossible de faire certaine mesure, le signal étant trop faible pour être détecté, en particulier perpendiculairement au litage de l'échantillon.

Le contraste de vitesse a été calculé avec la formule suivante :

$$\text{Contraste} = \frac{V_{\text{rapide}} - V_{\text{lente}}}{V_{\text{lente}}} \times 100 \quad [\text{A.1}]$$

Le résultat de l'ensemble de ces mesures est présenté dans les tableaux des pages suivantes.

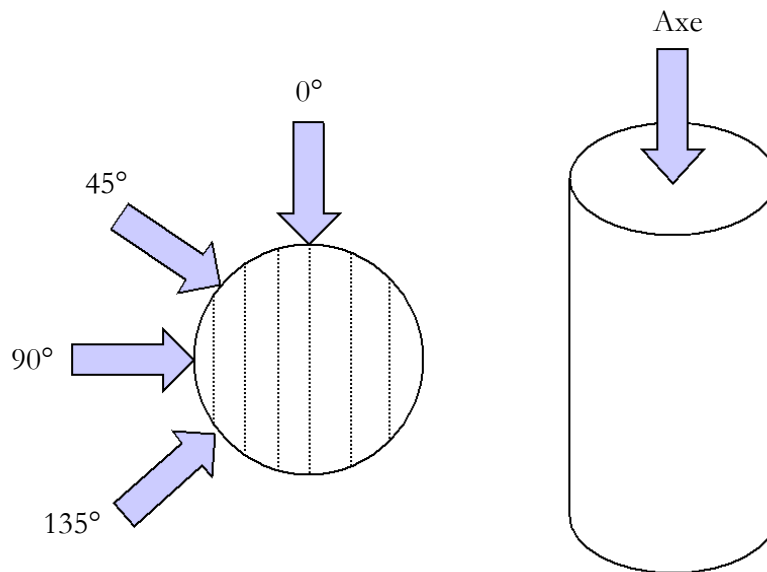


Figure A.0.1 : Direction des mesures de vitesses par rapport aux plans de litage de l'échantillon ( $\theta \neq 0^\circ$ )

Roche	Éch.	Poids volumique [kN/m <sup>3</sup> ]	Direction de la mesure	Longueur [mm]	Temps de parcours [μs]	Vitesse [m/s]	Contraste [%]
Argilite de l'Est	0°-1 EST 05633	23,79	Axe	79,61	26,71	2981	7
			0°	38,83	12,12	3203	
			45°	38,83	12,12	3203	
			90°	38,83	12,12	3203	
			135°	38,83	12,12	3203	
	0°-2 EST 05633	23,74	Axe	79,68	26,69	2985	10
			0°	39,83	12,15	3278	
			45°	39,83	12,15	3278	
			90°	39,83	12,15	3278	
			135°	39,83	12,15	3278	
	90°-1 EST 05633	23,72	Axe	78,67	23,44	3356	13
			0°	38,92	11,76	3309	
			45°	38,92	13,24	2939	
			90°	38,92	11,78	3303	
			135°	38,92	13,27	2933	
	0°-1 EST 05558	23,80	Axe	77,58	25,58	3187	11
			0°	39,15	11,68	3239	
			45°	39,15	11,68	2970	
			90°	39,15	11,68	3217	
			135°	39,15	11,68	2895	
0°-2 EST 05558	23,69	Axe	78,57	26,65	3033	12	
		0°	39,18	11,87	3352		
		45°	39,18	11,91	3352		
		90°	39,18	11,91	3352		
		135°	39,18	11,91	3352		
45°-1 EST 05558	23,79	Axe	78,91	24,76	3034	10	
		0°	38,19	11,79	3255		
		45°	38,19	12,86	3226		
		90°	38,19	11,87	3244		
		135°	38,19	13,19	3244		

Tableau A.1 : Mesures de célérité acoustique dans les échantillons d'argilite de l'Est.

Roche	Éch.	Poids volumique [kN/m <sup>3</sup> ]	Direction de la mesure	Longueur [mm]	Temps de parcours [µs]	Vitesse [m/s]	Contraste [%]
Marne du Mont d'Or	1.1	25,07	Axe	79,02	22,36	3534 ±	1
			0°	40,7	11,66	3491	
			45°	40,7	11,59	3512	
	4.1	25,47	Axe	76,01	16,81	4522	3
			0°	39,66	8,87	4471	
			45°	39,66	9,05	4385	
	9.1	25,17	Axe				10
			0°	39,55	10,04	3941	
			45°	39,55	11,04	3584	
			90°	39,55	10,04	3939	
			135°	39,55	11,04	3584	
	9.2	25,09	Axe				16
			0°	39,58	10,11	3915	
			45°	39,58	11,74	3373	
			90°	39,58	10,11	3917	
			135°	39,58	11,73	3373	
	11.1	25,34	Axe	76,9	19,30	3984	9
			0°	40,6	11,45	3546	
			45°	40,6	10,48	3874	
	11.2	25,08	Axe	76,9	19,30	3984	11
			0°	40,6	11,45	3546	
45°			40,6	10,48	3874		
13.1	25,42	Axe	77,33	19,58	3949	5	
		0°	40,6	10,2	3980		
		45°	40,6	10,69	3798		

Tableau A.2 : Mesures de célérité acoustique dans les échantillons de marne du Mont d'Or.

Roche	Éch.	Poids volumique [kN/m <sup>3</sup> ]	Direction de la mesure	Longueur [mm]	Temps de parcours [µs]	Vitesse [m/s]	Contraste [%]	
Argilite de Tournemire	AT M4 630.1	25,04	Axe	74,56	17,75	4201 ± 50	26	
			0°	35,36	8,60	4112 ± 100		
			90°	35,20	10,68	3296 ± 65		
	AT M4 630.2	25,03		Axe	74,43	17,55	4241 ± 51	36
				0°	35,34	8,31	4235 ± 107	
				90°	35,14	11,23	3129 ± 59	
	AT M4 890.1	25,03		Axe	74,99	17,56	4271 ± 51	27
				0°	35,2	8,68	4055 ± 98	
				90°	35,14	10,69	3287 ± 65	
	AT M4 890.2	24,97		Axe	74,63	17,70	4216 ± 50	23
				0°	35,40	9,03	3920 ± 91	
				90°	35,22	10,62	3316 ± 66	
	AT M4 970.1	24,88		Axe	78,43	19,024	4123 ± 46	/
				0°	35,26	11,7	3014 ± 54	
				90°	35,10			
	AT M5 400.1	24,90		Axe	78,68	19,57	4020 ± 43	37
				0°	35,25	8,88	3970 ± 94	
				90°	35,06	12,00	2922 ± 51	
	AT M5 1500.1	25,06		Axe	77,78	18,19	4276 ± 49	/
				0°	35,30	8,19	4310 ± 111	
				90°	35,10			
AT M5 2200.1	24,83		Axe	73,80	17,48	4222 ± 51	/	
			0°	35,56	8,61	4130 ± 101		
			90°	35,28	/	/		
AT M5 3140.1	24,88		Axe	75,20	17,91	4199 ± 49	/	
			0°	35,36	8,47	4175 ± 104		
			90°					
AT M5 3140.2	24,89		Axe	73,74	17,56	4199 ± 50	/	
			0°	35,56	8,54	4164 ± 102		
			90°					
AT M5 3395.2	24,93		Axe	73,74	17,55	4202 ± 50	34	
			0°	35,50	8,84	4016 ± 95		
			90°	35,26	11,47	3074 ± 56		
AT M5 3395.3	24,79		Axe	72,92	17,29	4217 ± 51	/	
			0°	35,42	8,24	4299 ± 110		
			90°					

Tableau A.3 : Mesures de célérité acoustique dans les échantillons d'argilite de Tournemire.

## Annexe B

### Etude statistique d'une série de mesures

En sciences expérimentales, le problème de l'estimation d'une grandeur à partir d'une série de mesures soulève la question récurrente du choix d'un bon estimateur statistique et du calcul de la précision de l'estimation qu'il donne.

Un bon estimateur statistique est une grandeur mathématique, calculée à partir d'un ensemble de données, et dont la valeur converge vers la grandeur recherchée lorsque le nombre de données augmente. Ainsi, la moyenne arithmétique,  $\bar{X}$ , est un bon estimateur si les mesures sont indépendantes et appartiennent à une même population statistique.

Toute détermination par une méthode statistique portant sur un échantillon n'est qu'une estimation. Le résultat n'est donc donné qu'avec une certaine précision et la probabilité pour la grandeur recherchée d'appartenir à cet intervalle. S'il existe des fluctuations ou des erreurs aléatoires, voire, comme en géomécanique, une dispersion naturelle, une mesure ne peut fournir qu'une estimation de la grandeur cherchée qui se trouve probablement dans un intervalle autour de cette estimation.

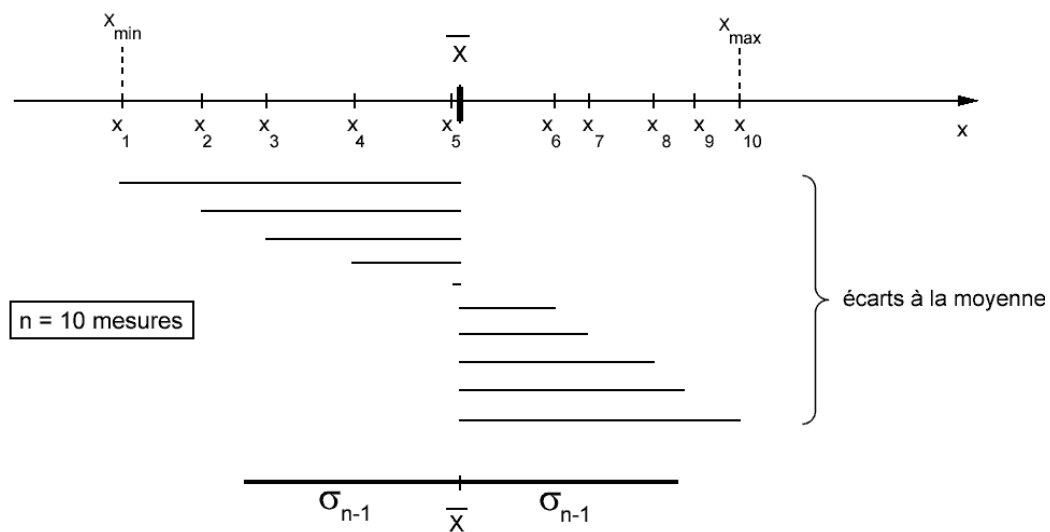


Figure B.1: Répartition des mesures par rapport à la moyenne et l'écart-type.

Pour modéliser les incertitudes dues aux imprécisions de la mesure et estimer l'intervalle de confiance et la probabilité que la grandeur cherchée y figure, le modèle le plus utilisé en physique est la répartition gaussienne. Cette modélisation suppose que si les  $N$  résultats des  $N$  mesures de la grandeur  $X$  sont indépendants (incertitude aléatoire), les mesures se répartissent selon une courbe de Gauss pour  $N$  suffisamment grand.

La courbe de Gauss est caractérisée par sa valeur centrale,  $\bar{X}$  qui est la moyenne arithmétique des  $N$  mesures et un étalement statistique appelé écart-type,  $\sigma$ .



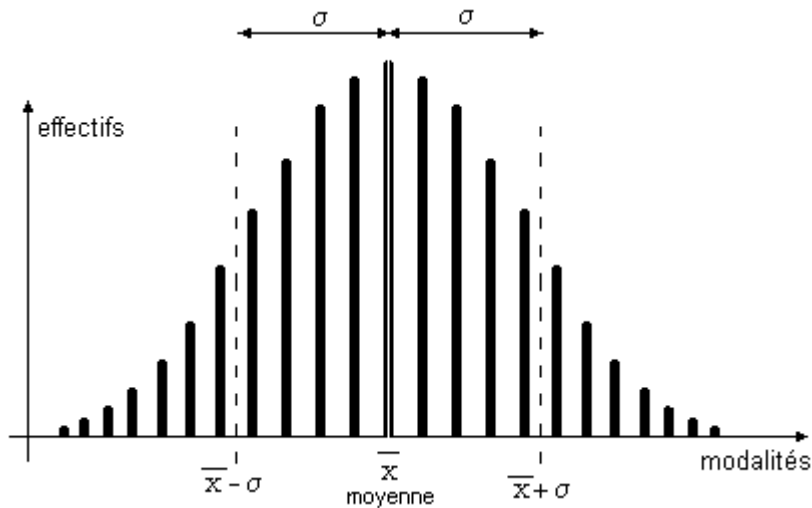


Figure B.2 : Répartition de Gauss.

En terme de probabilité, cette répartition signifie qu'une mesure  $N$  à :

- 68 % de chances d'appartenir à l'intervalle  $[m-\sigma ; m+\sigma]$
- 95 % de chances d'appartenir à l'intervalle  $[m-2\sigma ; m+2\sigma]$
- 99,8 % de chances d'appartenir à l'intervalle  $[m-3\sigma ; m+3\sigma]$

En admettant qu'une infinité de mesures se répartirait suivant cette courbe de Gauss, le problème consiste donc à partir d'une série de mesures expérimentales n'en fournissant qu'un échantillon, à estimer la moyenne et l'écart-type. Si les mesures sont bien des éléments de la même population, alors la moyenne de l'échantillon est le meilleur estimateur de la moyenne de la population, et le meilleur estimateur de l'écart-type est :

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n-1}} \quad [\text{B.1}]$$

Lorsque le nombre de mesures est faible, en général inférieur à 30, l'estimation est évidemment moins bonne et l'intervalle de confiance est pondéré d'un coefficient correctif augmentant d'autant plus la largeur de l'intervalle que le nombre de mesures est faible. Ce coefficient est appelé coefficient de Student et noté  $t_n$ , l'indice  $n$  correspondant à la probabilité en % d'y trouver la grandeur cherchée en fonction de l'échantillon de mesures. Un extrait de la table de Student (Tableau B.1) donne la valeur des coefficients pour quelques valeurs de  $N$  inférieures à 30 et  $n=95$  et  $99$  %.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	30
$t_{95}$	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09	2,04
$t_{99}$	63,7	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,11	3,01	2,95	2,90	2,86	2,76

Tableau B.1 : Table de Student.

La grandeur que l'on cherche à déterminer se trouve dans un intervalle I défini par  $t_n$ , fonction de la probabilité choisie, tel que :

$$I = [X_m - t_n m ; X_m + t_n m] \quad [B.2]$$

avec  $m = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$  [B.2]



## Annexe C

### Procédures d'identification analytique des paramètres des différents modèles viscoplastiques

Nous explicitons, dans cette annexe, les procédures d'identification des paramètres des différents modèles viscoplastiques utilisés pour simuler nos essais de fluage et de chargement quasi statique. Chaque méthode est illustrée avec les résultats d'un essai.

#### 1. Modèle viscoplastique de Lemaitre

##### 1.1 Identification des paramètres à partir des résultats d'un essai de fluage

Dans le cas d'un essai de fluage uniaxial, comprenant un seul palier de chargement, l'expression des déformations axiales viscoplastiques d'après la loi viscoplastique de Lemaitre est :

$$\epsilon_1^{vp} = a \cdot q^\beta \cdot t^\alpha \quad [C.1]$$

Le calage analytique des essais de fluage passe donc par l'ajustement des trois paramètres :  $a$ ,  $\alpha$  et  $\beta$ . Illustrons la procédure d'identification de ces paramètres avec les résultats de l'essai de fluage 0°-2 EST 05558 réalisé sur l'argilite de l'Est. Dans cet essai,  $q = 26,0$  MPa.

En traçant  $\ln \epsilon_1^{vp} = f(\ln t)$ , on obtient une droite comme on peut le voir sur la figure C.1. Son équation :  $y = 0,14x - 7,36$  nous donne :

- $\alpha = 0,14$
- $\ln a + \beta \ln q = - 7,36$

On obtient donc une relation liant  $a$  et  $\beta$  soit :

$$a = \exp(-(7,36 + \beta \ln q)) \quad [C.2]$$

Calculons l'écart  $\Delta$  entre la courbe expérimentale et la courbe théorique par la méthode des moindres carrés :

$$\Delta = \sum_{t=0}^{t=t_f} (\epsilon_{nn}^{théo} - \epsilon_{nn}^{expé})^2 \quad [C.3]$$

En faisant varier  $\beta$ , on cherche alors la valeur minimale de  $\Delta$ . On obtient ainsi  $\beta = 2,18$ , ce qui donne :  $a = 4,87 \cdot 10^{-7}$ . D'après les relations liant les jeux de paramètres, on en déduit les paramètres viscoplastiques répertoriés dans le tableau C.1.

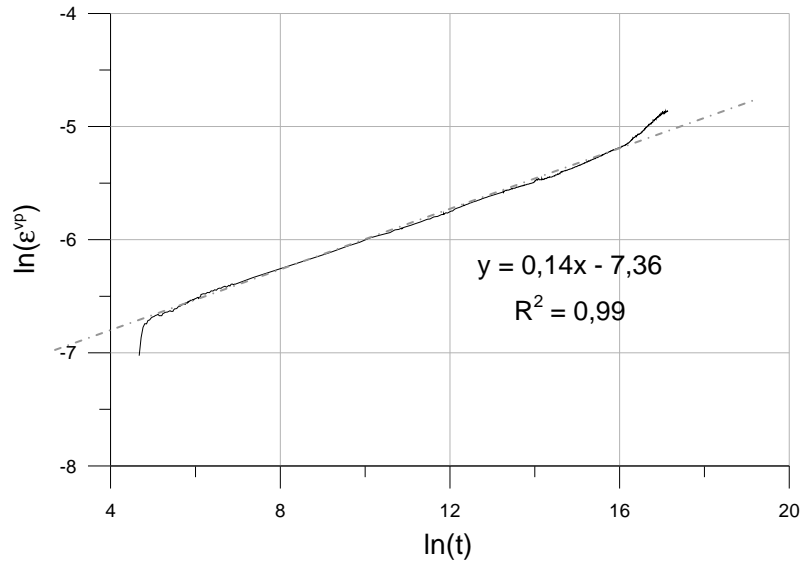


Figure C.1 : Evolution des déformations viscoplastiques en fonction du temps dans un graphe bilogarithmique : Essai de fluage sur l'échantillon d'argilite de l'Est 0°-2 EST 05558.

Echantillon	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	α	β
0°-1 EST 05558	6,20	15,59	-6,17	7,95 10 <sup>-47</sup>	15,59	2,53	905,6	4,87 10 <sup>-7</sup>	0,14	2,18

Tableau C.1 : Paramètres de la loi viscoplastique de Lemaitre identifiés à partir de l'essai fluage réalisé sur l'argilite de l'Est.

## 1.2 Identification des paramètres à partir des résultats d'un essai de chargement quasi statique

Au cours d'un essai de compression uniaxiale quasi statique, réalisé à vitesse de déformation suffisamment faible pour que l'on soit sur la courbe limite, la loi de Lemaitre s'écrit :

$$\dot{\epsilon} = A \cdot q^n \cdot (\epsilon_1^{vp})^m \quad [C.4]$$

Il nous faut donc identifier les trois paramètres viscoplastiques (A, n, m). Illustrons notre démarche avec les résultats de l'essai de chargement lent EST 0°-1 05558 réalisé sur l'argilite de l'Est.

Traçons d'abord  $\ln q = f(\ln \epsilon_1^{vp})$  (Figure C.2). La droite obtenue d'équation :  $y = 0,15x - 4,36$  nous donne :

$$- \frac{m}{n} = 0,15 \quad [C.5]$$

$$- \frac{1}{n} (\ln \dot{\epsilon} - \ln A) = - 4,20 \quad [C.6]$$

De là :  $m = -0,15.n$  [C.7]

$A = \exp(-4,20.n + \text{Ln} \dot{\epsilon})$  [C.8]

Dans cet essai,  $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . En faisant varier  $n$ , on cherche alors la meilleure superposition des courbes expérimentale et théorique en minimisant  $\Delta$ , l'écart entre elles. On obtient ainsi  $n = 8,96$  soit :  $m = -1,43$  et  $A = 1,09.10^{-25}$  (tableau C.2).

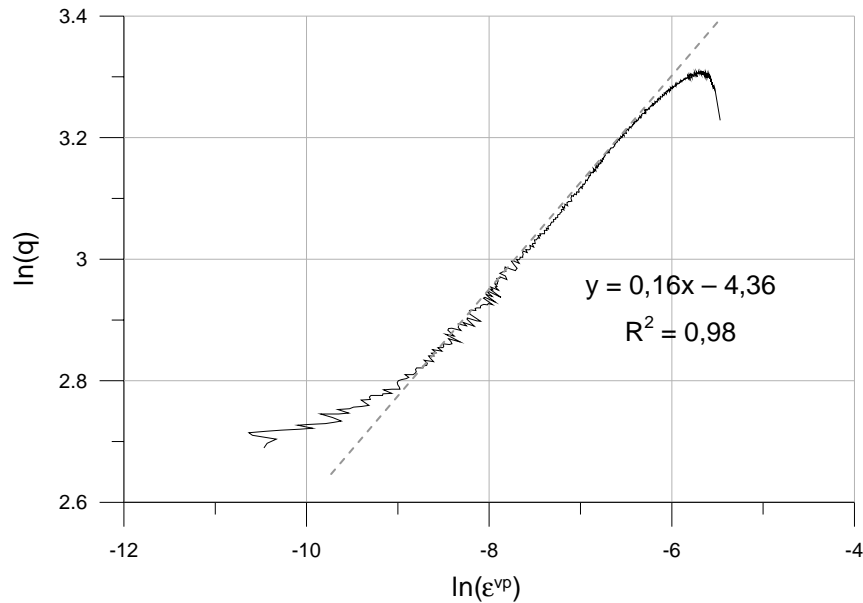


Figure C.2 : Evolution du déviateur en fonction de la déformation axiale viscoplastique dans un diagramme bilogarithmique : essai de chargement quasi statique EST 0°-1 05558 ( $\dot{\epsilon} = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ).

Echantillon	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	n	m	A [MPa.s <sup>-1</sup> ]	N	M	K [MPa.s]	a [s <sup>-1</sup> ]	$\alpha$	$\beta$
0°-1 EST 05558	10 <sup>-8</sup>	4,82	8,96	-1,43	6,88.10 <sup>-26</sup>	8,96	6,27	643,1	4,72.10 <sup>-11</sup>	0,42	3,73

Tableau C.2 : Paramètres de la loi viscoplastique de Lemaitre identifiés à partir de l'essai de chargement quasi statique EST 0°-1 05558 réalisé sur l'argilite de l'Est.

## 2. Modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique

### 2.1 Identification des paramètres à partir d'un essai de fluage

Supposons déterminés les paramètres viscoplastiques du modèle viscoplastique de Lemaitre (M, N, K). Pour prendre en compte le comportement volumique du matériau lorsque les déformations viscoplastiques ne se développent pas à volume constant, il nous faut identifier le paramètre  $\alpha$ .

Comme la loi viscoplastique de Lemaitre, la loi viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique différée (VPD) peut être intégrée analytiquement à contrainte constante. Les expressions des déformations viscoplastiques d'une roche isotrope,  $\epsilon_{nn}^{vp}$  et  $\epsilon_{tt}^{vp}$ , sont alors :

$$\epsilon_{nn}^{vp} = \left(\frac{\alpha}{3} + 1\right) \left(\frac{2}{9}\alpha^2 + 1\right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{N} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [C.9]$$

$$\epsilon_{tt}^{vp} = \left(-\frac{1}{2} + \frac{\alpha}{3}\right) \left(\frac{2}{9}\alpha^2 + 1\right)^{\frac{-N}{2(N+M)}} \left[ \frac{M+N}{M} \left( \frac{\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right)\sigma}{K} \right)^N t \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [C.10]$$

Utilisons les résultats de l'essai de fluage AT M5 400.1. L'analyse de cet essai avec le modèle viscoplastique de Lemaitre a permis de déterminer :

$$M = 0,67 ; \quad N = 1,14 ; \quad K = 3,76 \cdot 10^{15} \text{ MPa.s} \quad [C.11]$$

Traçons à présent  $\ln \epsilon_{nn}^{vp} = f(\ln t)$  et  $\ln(-\epsilon_{tt}^{vp}) = f(\ln t)$  (Figure C.3).

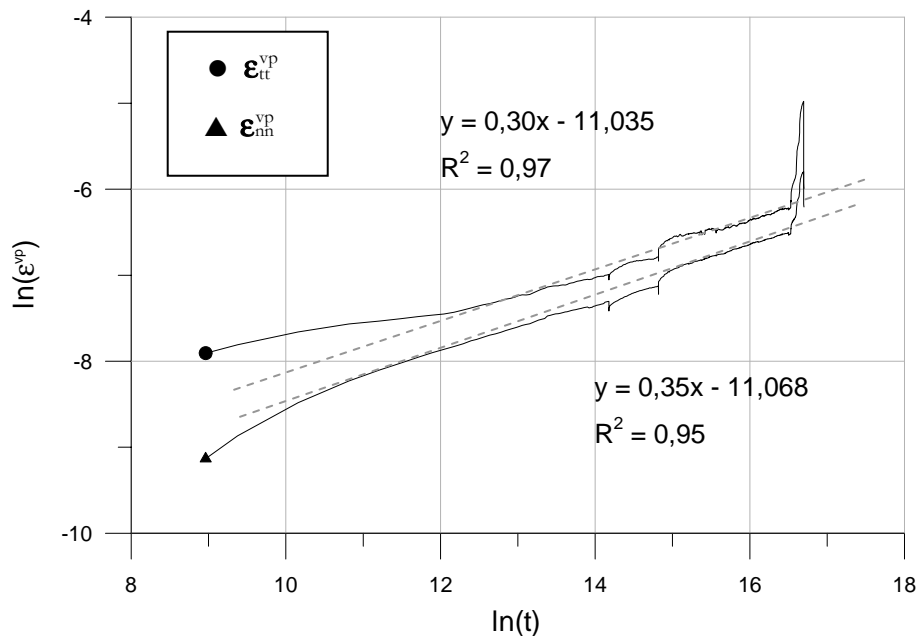


Figure C.3 : Logarithme des déformations viscoplastiques en fonction du logarithme du temps : essai de fluage AT M5 400.1 sur l'argilite de Tournemire.

Sur la figure C.3, on constate que les parties linéaires de ces deux courbes ont la même pente qui ne varie pas en fonction du déviateur.

$$\ln \epsilon_{nn}^{vp} = A_{nn} + C \ln t = \frac{M}{M+N} \ln B_{nn} + C \ln t \quad [C.12]$$

$$\ln \epsilon_{tt}^{vp} = A_{tt} + C \ln t = \frac{M}{M+N} \ln B_{tt} + C \ln t \quad [C.13]$$

avec A l'ordonnée à l'origine, fonction de B, et C la pente des droites obtenues, les indices correspondant à la déformations à partir desquelles ces coefficients ont été calculés.

Leurs équations nous donnent :

$$A_{nn} = - 11,068 \quad \text{et} \quad A_{tt} = - 11,035 \quad [C.14]$$

Comme  $\frac{M}{M+N} = 0,325 =$  pente moyenne, on en déduit :

$$\alpha = 3 \frac{\left( \frac{1}{2} \frac{B_{nn}}{B_{tt}} - 1 \right)}{\frac{B_{nn}}{B_{tt}} + 1} = -0,84 \quad [C.15]$$

La valeur de la pente moyenne des droites tracées permet d'ajuster les paramètres N et M afin d'obtenir la meilleure superposition des courbes expérimentale et théorique :

$$D = \frac{M}{M+N} = 0,325 \quad [C.16]$$

Finalement, pour ce modèle, les paramètres identifiés à partir des résultats de cet essai, sont (Tableau C.3) :

Echantillon	E [GPa]	N	M	K [MPa.s]	$\alpha$
AT M5 400.1	15,99	0,67	1,35	$2,97 \cdot 10^{13}$	- 0,84

Tableau C.3 : Paramètres du modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique identifiés à partir de l'essai de fluage AT M5 400.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire.

## 2.2 Identification des paramètres à partir d'un essai de chargement quasi statique

Dans le cas d'un essai de chargement uniaxial à vitesse constante et quasi statique, l'expression de la déformation viscoplastique axiale est la suivante :

$$\epsilon_1^{vp} = \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right)^{\frac{M+N}{N}} \left[ \left( 1 + \frac{\alpha}{3} \right) \left( \frac{\sigma}{K} \right) \right]^M \left( \frac{2}{9} \alpha^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{\dot{\epsilon}_1} \right)^{\frac{M}{N}} \quad [C.17]$$

Supposons déterminés les paramètres viscoplastiques du modèle viscoplastique de Lemaitre (M, N, K) : il nous faut maintenant identifier le paramètre  $\alpha$ . Appliquons la méthode décrite dans le paragraphe 5.5.2 aux résultats de l'essai de chargement quasi statique AT M4 890.1. Pour cet essai, les paramètres viscoplastiques identifiés sont :



$$N = 15,02 ; \quad M = 2,89 ; \quad K = 1586,6 \text{ MPa.s} \quad [C.18]$$

Traçons  $\ln(\epsilon_1^{vp}) = f(\ln q)$  (Figure C.4). La régression linéaire sur la partie linéaire de la courbe obtenue, d'équation  $y = 2,85x - 17,23$  vérifie :

$$M = 2,85 \quad [C.19]$$

Et l'ordonnée à l'origine, C :

$$-17,23 = \frac{M+N}{N} \ln\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) + M \ln\left(1 + \frac{\alpha}{3}\right) - M \ln(K) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2}{9} \alpha^2 + 1\right) - \frac{M}{N} \ln(\dot{\epsilon}_1) \quad [C.20]$$

Avec  $\dot{\epsilon} = 1,6 \cdot 10^{-8}$  s, la résolution de cette équation donne :

$$\alpha = 0,30 \quad [C.21]$$

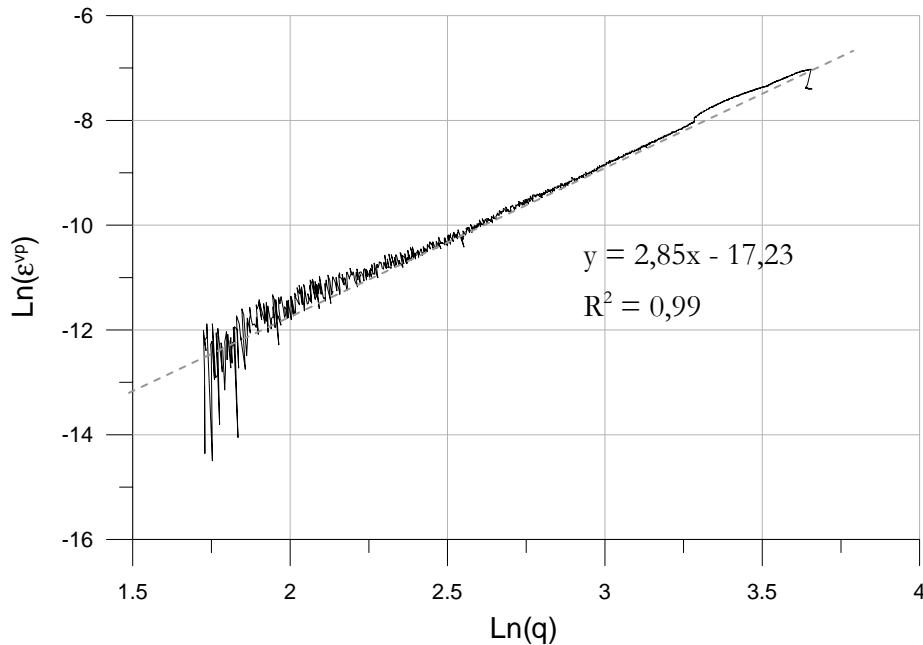


Figure C.4 : Logarithme des déformations viscoplastiques en fonction du logarithme de la contrainte axiale : essai de chargement quasi statique AT M4 890.1 sur l'argilite de Tournemire.

On en déduit les paramètres du tableau ci-dessous :

Echantillon	$\dot{\epsilon}$	E [GPa]	N	M	K [MPa.s]	$\alpha$
AT M4 890.1	$1,6 \cdot 10^{-8}$	15,8	15,02	2,85	1586,6	0,30

Tableau C.4 : Paramètres du modèle viscoplastique avec prise en compte de la déformation volumique identifiés à partir de l'essai de chargement quasi statique AT M4 890.1 réalisé sur l'argilite de Tournemire.

### 3. Identification des paramètres du modèle viscoplastique endommageable de Lemaitre à partir d'un essai de fluage

Dans le modèle viscoplastique endommageable, les déformations viscoplastiques sont supposées se développer à volume constant et l'endommagement est isotrope. Cette configuration correspond au modèle VPDEA dans le cas :  $\alpha = 0$  et  $\beta = 1$ .

D'après le modèle VPE, lors d'un essai de fluage uniaxial, les déformations viscoplastiques d'une roche isotrope suivent les lois suivantes :

$$\epsilon_1^{vp} = \left[ -\frac{M+N}{M(k-N)} \left(\frac{\sigma}{A}\right)^{-r} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N \left[ \left(1 - (k+1) \left(\frac{\sigma}{A}\right)^r t\right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [C.22]$$

$$\epsilon_3^{vp} = -\frac{1}{2} \left[ -\frac{M+N}{M(k-N)} \left(\frac{\sigma}{A}\right)^{-r} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N \left[ \left(1 - (k+1) \left(\frac{\sigma}{A}\right)^r t\right)^{\frac{k-N}{k+1}} - 1 \right] \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [C.23]$$

De plus, la déformation axiale à la rupture vaut :

$$\epsilon_{1\text{rupt}}^{vp} = \left[ t_{\text{rupt}} \frac{k+1}{k-N} \frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N \right]^{\frac{M}{M+N}} \quad [C.24]$$

Supposons déterminés les paramètres viscoplastiques grâce à une analyse préliminaire avec le modèle viscoplastique de Lemaitre. Pour prendre en compte l'endommagement de la roche dans les simulations de son comportement, il nous faut identifier ( $A$ ,  $k$  et  $r$ ).

Illustrons la procédure d'identification à l'aide des résultats de l'essai de fluage AT M5 400.1. Nous avons déterminé préalablement :

$$M = 0,67 ; \quad N = 1,35 ; \quad K = 2,97 \cdot 10^{13} \text{ MPa.s} \quad [C.25]$$

Lors de cet essai de fluage, 4 paliers de chargement ont été appliqués. La rupture s'est produite à  $t = 206,4$  jours sous un déviateur de  $37,5$  MPa. En première approximation, on peut considérer que l'endommagement atteint à la fin de l'avant-dernier palier est négligeable devant 1. Le dernier palier de chargement a duré  $36,4$  jours et la déformation viscoplastique axiale qu'il a généré vaut :  $\epsilon_{nn}^{vp} = 1612 \mu\text{m/m}$ .

$$\text{Or : } k = \frac{1 + N \cdot \xi}{\xi - 1} \quad [C.26]$$

$$\text{avec : } \xi = \frac{\left(\epsilon_{1\text{rupt}}^{vp}\right)^{\frac{M+N}{M}}}{t_{\text{rupt}} \frac{M+N}{M} \left(\frac{\sigma}{K}\right)^N} \quad [C.27]$$

On en déduit :

$$k = 1,995 \quad [C.28]$$

Il est à noter que dans le modèle VPDEA le paramètre  $q$  correspond à :

$$q = \frac{k}{2r} \quad [C.29]$$

Les paramètres  $A$  et  $r$  sont liés par la relation :

$$t_{rupt} = \frac{1}{1+k} \left( \frac{\sigma}{A} \right)^{-r} \quad [C.30]$$

soit :  $A = \sigma \left[ (1+k) (t_{rupt}) \right]^{\frac{1}{r}} \quad [C.31]$

En ajustant la valeur de  $r$  afin de minimiser l'écart entre les courbes théorique et expérimentale, calculé par la méthode des moindres carrés, on obtient  $r = 13,7$ . On en déduit les paramètres du modèle viscoplastique endommageable répertoriés dans le tableau C.5.

Ech.	E [GPa]	$\nu$	N	M	K [MPa.s]	r	q	A
AT M5 400.1	15,99	0,47	1,35	0,67	$3,76 \cdot 10^{15}$	13,7	0,07	121,1

Tableau C.5 : Paramètres du modèle d'Hajdu identifiés à partir de l'essai de fluage réalisé sur l'argilite de Tournemire.