



Propagation de fronts de matière et de chaleur dans une colonne d'adsorption modulée en pression pour la séparation de gaz

Karine Bonnot

► To cite this version:

Karine Bonnot. Propagation de fronts de matière et de chaleur dans une colonne d'adsorption modulée en pression pour la séparation de gaz. Alimentation et Nutrition. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2003. Français. NNT : 2003INPL006N . tel-01749760

HAL Id: tel-01749760

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749760>

Submitted on 29 Mar 2018

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.



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

1360354325

[IN] 2003 AUVRAY C.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy

Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages

Ecole doctorale RP2E

THÈSE

présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité : Génie Civil - Hydrosystèmes - Géotechnique

par

Christophe AUVRAY

VIEILLISSEMENT ET COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU GYPSE

Soutenue publiquement le 18 décembre 2003 devant la Commission d'Examen

Membres du jury :

Rapporteurs : **BEREST Pierre**

SHAO Jian-Fu

Examinateurs : **DIDIER Christophe**

FEUGA Bernard

Directeur de thèse : **HOMAND Françoise**

Co-Directeur de thèse : **HOXHA Dashnor**

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy

Laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages

Ecole doctorale RP2E

THÈSE

présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'I.N.P.L.

Spécialité : Génie Civil - Hydrosystèmes - Géotechnique

par

Christophe AUVRAY

VIEILLISSEMENT ET COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU GYPSE

Soutenue publiquement le 18 décembre 2003 devant la Commission d'Examen

Membres du jury :

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

Rapporteurs : **BEREST Pierre**

SHAO Jian-Fu

Examinateurs : **DIDIER Christophe**

FEUGA Bernard

Directeur de thèse : **HOMAND Françoise**

Co-Directeur de thèse : **HOXHA Dashnor**

Préambule

Tout travail est le résultat d'une collaboration humaine. Il m'est à présent indispensable de citer et de remercier celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail de thèse :

- Françoise Homand pour m'avoir accueilli au sein du LAEGO et pour son encadrement scientifique en tant que directeur de thèse.
- Dashnor Hoxha pour avoir co-dirigé mon travail de recherches mais également pour ces implications physico-mathématiques et modélisatrices.
- Pierre Bérest et Jian-Fu Shao pour avoir eu la lourde tâche d'être rapporteurs.
- Christophe Didier et Bernard Feuga pour avoir été examinateurs.
- Un certain nombre de personnes de l'INERIS : Christophe Didier, Mehdi Ghoreychi et Claudia Sorgi pour leur participation active et leurs critiques constructives lors de nos réunions de travail mais aussi Philippe Camus pour sa disponibilité lors des missions d'échantillonnage et d'instrumentation dans la carrière de Grozon.
- L'équipe technique du LAEGO mais plus particulièrement Laurent Schumacher pour sa disponibilité et Patrick Gaire pour tous les aspects montages électrotechniques et instrumentations.
- Messieurs Blanchet et Gutierrez pour leur autorisation d'accès respective dans la carrière de Livry Gargan et de Grozon.
- Monsieur Robert pour toutes ces informations lors de mes interrogations concernant l'exploitation des différents quartiers ; mais surtout pour sa très grande disponibilité lors de mes nombreuses visites techniques dans la carrière de Grozon sans laquelle je n'aurai pu effectuer un certain nombre d'échantillonnages et de relevés.
- Les différents personnels scientifiques et administratifs rencontrés dans plusieurs laboratoires ou unités de recherches scientifiques.

Je terminerai en remerciant Elise pour son soutien moral et pour avoir supporté mes humeurs mais aussi pour son « français » qui m'a été indispensable.

Je ne peux conclure sans oublier le courage de ma mère et sans avoir une pensée pour mon père et pour les autres membres de ma famille disparus pendant ces trois années.

*Au courage de ma mère,
A la mémoire de mon père.*

Sommaire

CHAPITRE 1

CADRE GENERAL

1.1- LES CARRIERES SOUTERRAINES DE GYPSE	22
1.1.1- Historique	22
1.1.2- Types d'exploitation.....	23
1.1.3- Types d'instabilité et dommages	24
1.2- LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE	26

CHAPITRE 2

DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LE GYPSE

2.1- INTRODUCTION	29
2.2- LE CRISTAL DE GYPSE.....	30
2.2.1- Les propriétés cristallographiques	30
2.2.2- Les propriétés physico-chimiques	31
2.2.3- Les propriétés physico-mécaniques	33
2.3- LES EXPLOITATIONS DE GYPSE.....	34
2.3.1- Les paramètres géologiques	34
2.3.2- Les paramètres physiques	34
2.3.3- Les paramètres mécaniques	35
2.4- CONCLUSION.....	38

CHAPITRE 3

LIVRY GARGAN ET GROZON : DEUX GISEMENTS DIFFERENTS

3.1- INTRODUCTION	41
3.2- LA CARRIERE DE LIVRY GARGAN	42
3.2.1- Le contexte géologique	42
3.2.2- Les caractéristiques de l'exploitation	45
3.3- LA CARRIERE DE GROZON.....	46
3.3.1- Le contexte géologique	46
3.3.2- Les caractéristiques de l'exploitation.....	50
3.4- CONCLUSION.....	52

CHAPITRE 4

VIEILLISSEMENT ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE

4.1- INTRODUCTION	55
4.2- LE VIEILLISSEMENT	57
4.2.1- Etude de la fracturation	57
4.2.2- Observations au microscope électronique à balayage	59
4.3- CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DU GYPSE SAIN ET VIEILLI.....	70
4.3.1- Caractérisation physique	70
4.3.1.1- Préparation des échantillons	70
4.3.1.2- Résultats de la caractérisation physique	70
4.3.1.3- Interprétation-Discussion – Paramètres physiques	73
4.3.2- Caractérisation mécanique	81
4.3.2.1- Préparation des échantillons et dispositif expérimental	81
4.3.2.2- Paramètres mesurés ou calculés	82
4.3.2.3- Résultats de la caractérisation mécanique	83
4.3.2.4- Interprétation-Discussion – Paramètres mécaniques	87
4.3.3- Influence de l'hygrométrie sur la résistance du gypse	99
4.3.3.1- Saturation partielle des échantillons	99
4.3.3.2- Résultats et commentaires	100
4.4- CONCLUSION	102

CHAPITRE 5

COMPORTEMENT DIFFERE

5.1- INTRODUCTION	105
5.2- MESURES IN SITU : DEPLACEMENT ET DEFORMATION	107
5.2.1- Dispositif des mesures	107
5.2.2- Résultats	108
5.2.2.1- Mesures de convergence et d'expansion	108
5.2.2.2- Traitement statistique des mesures de convergence et d'expansion : analyse saisonnière	112
5.2.3- Influence de l'hygrométrie sur le comportement différé des piliers de gypse	114
5.2.3.1- Mesures de l'hygrométrie et des précipitations	114
5.2.3.2- Corrélation entre l'hygrométrie et le comportement différé des piliers de gypse	116
5.3- ESSAIS DE LABORATOIRE : ESSAIS DE FLUAGE SOUS HYGROMETRIE CONTROLEE	118
5.3.1- Dispositif et protocole expérimentaux	118
5.3.1.1- Dispositif expérimental	118

5.3.1.2- Protocole expérimental	124
5.3.2- Programme expérimental	126
5.3.3- Résultats	128
5.3.3.1- Les essais de fluage sous hygrométrie contrôlée	128
5.3.3.2- Observations microscopiques post-fluage	140
5.3.3.3- Paramètres physico-mécaniques post-fluage	141
5.3.3.4- Des essais de fluage triaxiaux : influence de la contrainte	145
5.3.3.5- Des essais de « gonflement » : influence de l'hygrométrie	147
5.3.3.6- Conclusion	147
5.3.4- Interprétation-Discussion.....	148
5.3.4.1- Influence de l'hygrométrie	148
5.3.4.2- Influence de l'âge de l'exploitation	150
5.4- CONCLUSION.....	152

CHAPITRE 6

MODELISATION

6.1- INTRODUCTION	155
6.2- MODELISATION DU COMPORTEMENT INSTANTANE.....	156
6.2.1- Rappels	156
6.2.2- La modélisation	157
6.3- MODELISATION DU COMPORTEMENT DIFFERE	163
6.3.1- Modèles de fluage	163
6.3.2- Comportement différé du gypse	166
6.3.2.1- Développement du modèle	166
6.3.2.2- Détermination des paramètres	172
6.3.2.3- Simulations et interprétation.....	176
6.3.2.4- Validité de la distorsion critique.....	182
6.4- CONCLUSION.....	186
CONCLUSIONS GENERALES	187
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	191
ANNEXES.....	203

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau 1.1 - Accidents dans les carrières souterraines de gypse en France	25
--	----

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 - Module et contrainte de cisaillement et module d'élasticité	33
Tableau 2.2 - Paramètres physiques issus de la bibliographie	34
Tableau 2.3 - Paramètres mécaniques issus de la bibliographie.....	36

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 - Caractéristiques générales des deux types de gisement.....	52
--	----

CHAPITRE 4

Tableau 4.1 - Livry Gargan – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des blocs	71
Tableau 4.2 - Livry Gargan – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des sondages	72
Tableau 4.3 - Grozon – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des blocs	72
Tableau 4.4 - Grozon – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des sondages.....	73
Tableau 4.5 - Moyennes et écarts-types des différents paramètres des tableaux 4.1 & 4.3 pour chaque station et pour les deux carrières	73
Tableau 4.6 - Livry Gargan – Age d'exploitation actuel (2000) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs	83
Tableau 4.7 - Livry Gargan – Age d'exploitation intermédiaire (1950) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs	84
Tableau 4.8 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs	84
Tableau 4.9 - Livry Gargan – Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des sondages	85
Tableau 4.10 - Grozon – Age d'exploitation actuel (2000) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs	85
Tableau 4.11 - Grozon – Age d'exploitation intermédiaire (1970) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs	86
Tableau 4.12 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) - Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs.....	86

Tableau 4.13 - Grozon – Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des sondages	87
Tableau 4.14 - Moyennes et écarts-types de différents paramètres mécaniques des tableaux 4.6 à 4.8 et 4.10 à 4.12	87
Tableau 4.15 - Paramètres physiques et mécaniques relatifs à la saturation d'échantillons de gypse	101

CHAPITRE 5

Tableau 5.1 - Vitesses moyennes de fermeture de différentes galeries	109
Tableau 5.2 - Vitesses moyennes d'expansion des deux piliers de la station de mesures EC	109
Tableau 5.3 - Vitesses moyennes de déformation des deux piliers de la station de mesures EC	109
Tableau 5.4 - Correspondance entre la convergence d'une demi-galerie et l'expansion d'un demi-pilier de la station de mesures EC	110
Tableau 5.5 - Nature des sels utilisés et hygrométrie mesurée et attendue	120
Tableau 5.6 - Utilisation des jauge d'extensométrie et des capteurs de déplacements LVDT-Avantages et Inconvénients	123
Tableau 5.7 - Conditions expérimentales des essais de fluage monopalier	126
Tableau 5.8 - Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier	127
Tableau 5.9 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire	129
Tableau 5.10 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire	130
Tableau 5.11 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire	131
Tableau 5.12 - Seuil de dilatance pour les 3 essais de fluage avec une hygrométrie de 90%	132
Tableau 5.13 - Livry Gargan – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire	137
Tableau 5.14 - Livry Gargan – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire	139
Tableau 5.15 - Comparaison de la structure du gypse entre des échantillons témoins et des échantillons après fluage sous hygrométrie	141
Tableau 5.16 - Livry Gargan – Paramètres physico-mécaniques avant et après les essais de fluage	142
Tableau 5.17 - Grozon – Paramètres physico-mécaniques avant et après les essais de fluage	143

CHAPITRE 6

Tableau 6.1 - Variations de l'angle de frottement et de la cohésion en fonction de l'âge d'exploitation	158
Tableau 6.2 - Paramètres retenus dans le cadre des modélisations suivant le critère de Mohr-Coulomb	161
Tableau 6.3 - Relation entre les mécanismes potentiels de fluage et le paramètre α de la loi de Norton-Hoff	165
Tableau 6.4 - Paramètres B, m, k, n et b déterminés pour chaque hygrométrie (Age d'exploitation 1920)	173
Tableau 6.5 - Paramètres B, m, k, n et b définitifs (Age d'exploitation 1920).....	174
Tableau 6.6 - Paramètres (A_0 , χ) et ξ déterminés pour chaque hygrométrie (Age d'exploitation 1920)	174
Tableau 6.7 - Ensemble des paramètres de la dilatance (Age d'exploitation 1920)	175
Tableau 6.8 - Ensemble des paramètres définitifs permettant de simuler la distorsion et les déformations différencées mesurées pendant les essais de fluage (Age d'exploitation 1920)	175
Tableau 6.9 - Grozon – Ages d'exploitation 1920 et 2000 - Distorsion critique (valeur théorique)	182

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure 1.1 - Carrières souterraines et bassins producteurs de gypse en France.....	22
Figure 1.2 - Exploitation par chambres hautes en ogive, Livry Gargan	23
Figure 1.3 - Rupture de toit	24
Figure 1.4 - Evolution d'un pilier vers la ruine	24
Figure 1.5 - Effondrement généralisé (d'après Rode et al., 1989)	24
Figure 1.6 - Effondrement brutal (fontis) dans une zone industrielle.....	25

CHAPITRE 2

Figure 2.1 - Cristaux de gypse purs	30
Figure 2.2 - Représentation schématique de la maille élémentaire du réseau cristallin monoclinique du gypse.....	30
Figure 2.3 - Schéma structural d'un cristal de gypse aciculaire	31
Figure 2.4 - Squelette atomique d'une molécule de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mettant en évidence une molécule d'eau très faiblement liée au reste de la molécule	31
Figure 2.5 - Masses volumiques d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires	35
Figure 2.6 - Porosité d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires	35
Figure 2.7 - Résistance en traction indirecte d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires.....	36
Figure 2.8 - Résistance en compression uniaxiale d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires	37
Figure 2.9 - Modules de déformabilité issus de la bibliographie	37

CHAPITRE 3

Figure 3.1 - Localisation des carrières de Livry Gargan et de Grozon.....	41
Figure 3.2 - Livry Gargan – Log lithologique du secteur de la carrière	43
Figure 3.3 - Livry Gargan – Carte géologique schématique du secteur de la carrière	44
Figure 3.4 - Livry Gargan – Coupe géologique schématique du secteur de la carrière	44
Figure 3.5 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Remblayage partiel des chambres	45
Figure 3.6 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Déchaussement prononcé des piliers	45
Figure 3.7 - Schéma tectonique du secteur de Poligny-Grozon.....	46

Figure 3.8 - Coupes schématiques du secteur de Poligny-Grozon	47
Figure 3.9 - Grozon – Carte géologique schématique du secteur de la carrière.....	48
Figure 3.10 - Grozon – Log lithologique du secteur de la carrière	48
Figure 3.11 - Traces de dissolution dues à une circulation d'eau importante à proximité d'une zone fortement faillée	49
Figure 3.12 - Alternance gypse-anhydrite	49
Figure 3.13 - Grozon – Coupes géologiques locales où les niveaux de gypse sont identifiés	49
Figure 3.14 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Soufflage de mur.....	51
Figure 3.15 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Soufflage d'intercalaire	51
Figure 3.16 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Cloche d'éboulement	51
Figure 3.17 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Ecaillage de pilier.....	51

CHAPITRE 4

Figure 4.1 - Livry Gargan – Evolution de l'indice DS dans les deux sondages	58
Figure 4.2 - Grozon – Evolution de l'indice DS dans les deux sondages.....	58
Figure 4.3 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier.....	61
Figure 4.4 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier.....	63
Figure 4.5 - Grozon – Age d'exploitation récent – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier	65
Figure 4.6 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier	67
Figure 4.7 - Emplacement des mesures effectuées sur une éprouvette.....	70
Figure 4.8 - Masses volumiques issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âge de la zone exploitée)	74
Figure 4.9 - Porosités totales issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon	74
Figure 4.10 - Livry Gargan – Dispersion de différents paramètres physiques en fonction de l'âge d'exploitation.....	75
Figure 4.11 - Grozon – Dispersion de différents paramètres physiques en fonction de l'âge d'exploitation	76
Figure 4.12 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage LG1	77
Figure 4.13 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres physiques et mécaniques déterminés le long du sondage LG4	78
Figure 4.14 - Grozon – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage G1.....	79

Figure 4.15 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage G2.....	80
Figure 4.16 - Résistances en traction indirecte issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon	88
Figure 4.17 - Résistances en compression uniaxiale issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon	88
Figure 4.18 - Modules de déformabilité issus de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon	89
Figure 4.19 - Dispersion de différents paramètres mécaniques en fonction de l'âge d'exploitation	89
Figure 4.20 - Livry Gargan – Age d'exploitation actuel (2000) – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa.....	90
Figure 4.21 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900) – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa.....	90
Figure 4.22 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Rupture quasi-ductile dans le cas d'une compression uniaxiale (CS) et rupture ductile dans le cas d'une compression triaxiale (CT) avec une pression de confinement de 5 MPa.....	91
Figure 4.23 - Livry Gargan – Déformations plastiques déviatoriques en fonction du niveau de contrainte normé par rapport à la rupture	92
Figure 4.24 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent (2000) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale.....	92
Figure 4.25 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale.....	92
Figure 4.26 - Livry Gargan – Représentation des ruptures, seuils de dilatance et limite élastique dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$)	93
Figure 4.27 - Livry Gargan – Variation de l'angle de frottement et de la cohésion.....	93
Figure 4.28 - Grozon – Dispersion de différents paramètres mécaniques en fonction de l'âge d'exploitation.....	93
Figure 4.29 - Grozon – Age d'exploitation actuel (2000) – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa	94
Figure 4.30 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa	94
Figure 4.31 - Grozon – Rupture quasi-ductile dans le cas d'une compression uniaxiale (CS) et rupture ductile dans le cas d'une compression triaxiale (CT) avec une pression de confinement de 5 MPa	95
Figure 4.32 - Grozon – Déformations plastiques déviatoriques en fonction du niveau de contrainte normé par rapport à la rupture	96
Figure 4.33 - Grozon – Age d'exploitation récent (2000) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale	96

Figure 4.34 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale	96
Figure 4.35 - Grozon – Représentation des ruptures, seuils de dilatance et limite élastique dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$)	97
Figure 4.36 - Grozon – Variation de l'angle de frottement et de la cohésion	97
Figure 4.37 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage LG1	98
Figure 4.38 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage LG4	98
Figure 4.39 - Grozon – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage	99
Figure 4.40 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage G2.....	99
Figure 4.41 - Teneur en eau et degré de saturation en fonction de l'hygrométrie.....	101

CHAPITRE 5

Figure 5.1 - Localisation des stations de mesures	107
Figure 5.2 - Dispositif de mesures entre 4 piliers de la station EC.....	108
Figure 5.3 - Convergence horizontale de différentes galeries.....	108
Figure 5.4 - Expansion des deux piliers de la station EC	109
Figure 5.5 - Convergence horizontale de différentes galeries lors des premières années de mesures	111
Figure 5.6 - Expansion de deux piliers de la station EC lors des premières années de mesures	111
Figure 5.7 - Variation des indices saisonniers des convergences horizontales de différentes galeries	113
Figure 5.8 - Variation des indices saisonniers d'expansion des deux piliers de la station EC	113
Figure 5.9 - Hygrométrie dans deux quartiers où l'aérage est différent	114
Figure 5.10 - Hygrométrie dans deux quartiers corrélée avec les précipitations.....	115
Figure 5.11 - Mesures de convergence dans deux quartiers où l'aérage est différent....	116
Figure 5.12 - Quartier avec aérage forcé – Corrélation entre la convergence d'une galerie et l'hygrométrie.....	117
Figure 5.13 - Quartier avec aérage naturel (faible) – Corrélation entre la convergence d'une galerie et l'hygrométrie	117
Figure 5.14 - Schéma d'un bâti de fluage et des éléments annexes	119
Figure 5.15 - Instrumentation d'une éprouvette avec des jauge d'extensométrie	121
Figure 5.16 - Instrumentation d'une éprouvette avec des capteurs de déplacements LVDT	122

Figure 5.17 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps des essais de fluage monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%)	129
Figure 5.18 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries	129
Figure 5.19 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Courbes déformation-temps des essais de fluage monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%) (.....	130
Figure 5.20 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries différentes	130
Figure 5.21 - Grozon – Age d'exploitation 192 0– Courbes déformation-temps des essais de fluage monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%)	131
Figure 5.22 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries différentes	131
Figure 5.23 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie initiale de 90%	133
Figure 5.24 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries intiales de 30% et 60%	133
Figure 5.25 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie de 90%.....	134
Figure 5.26 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95%	134
Figure 5.27 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps de l'essai de fluage monopalier sous une hygrométrie de 30%	135
Figure 5.28 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage monopalier sous des hygrométries de 30% et 90%	136
Figure 5.29 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1900 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage monopalier sous des hygrométries de 30% et 60%	136
Figure 5.30 - Livry Gargan – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée sous une hygrométrie de 30%.....	136
Figure 5.31 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95%	138
Figure 5.32- Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95%	139
Figure 5.33 - Axes d'observation des éprouvettes au microscope électronique à balayage	140
Figure 5.34 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Essai de compression isotrope avec un échantillon témoin - Courbes contrainte-déformation	144
Figure 5.35 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°16 - Courbes contrainte-déformation.....	144

Figure 5.36 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°XII' - Courbes contrainte-déformation.....	144
Figure 5.37 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°XII' - Courbes contrainte-déformation.....	144
Figure 5.38 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 – Essai de compression isotrope avec un échantillon témoin - Courbes contrainte-déformation	144
Figure 5.39 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°11 - Courbes contrainte-déformation	144
Figure 5.40 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique.....	146
Figure 5.41 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique	146
Figure 5.42 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique	146
Figure 5.43 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps en fonction de l'hygrométrie (contrainte nulle)	147
Figure 5.44 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes déformation-temps en fonction de l'hygrométrie (contrainte nulle).....	147

CHAPITRE 6

Figure 6.1 - Grozon – Ages d'exploitation 2000 et 1920 – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et triaxiale.....	156
Figure 6.2 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 2000 et 1900 – Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et triaxiale.....	156
Figure 6.3 - Grozon – Ages d'exploitation 2000 et 1920 – Rupture, seuil de dilatance et limite élastique dans le plan ($p'-q'$)	157
Figure 6.4 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 2000 et 1900 – Rupture, seuil de dilatance et limite élastique dans le plan ($p'-q'$)	157
Figure 6.5 - Grozon – Variations de l'angle de frottement et de la cohésion entre la limite élastique et la rupture.....	158
Figure 6.6 - Livry Gargan – Variations de l'angle de frottement et de la cohésion entre la limite élastique et la rupture	158
Figure 6.7 - Grozon – Ages d'exploitation 2000 et 1920 – Déformations volumiques plastiques en fonction de la distorsion plastique	159
Figure 6.8 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 2000 et 1900 – Déformations volumiques plastiques en fonction de la distorsion plastique	159
Figure 6.9 - Géométrie et conditions limites du modèle général utilisé pour les simulations	160

Figure 6.10 - Géométries de la couche 1 et contraintes initiales à envisager selon la dimension et le plan de modélisation choisis	161
Figure 6.11 - Localisation des trois profils sur lesquels ont été calculées les contraintes verticales et horizontales.....	162
Figure 6.12 - Evolution de la contrainte verticale dans un pilier le long des trois profils B1, M1 et P1.....	162
Figure 6.13 - Evolution de la contrainte horizontale dans un pilier le long des trois profils B1, M1 et P1	162
Figure 6.14 - Essai n°XII – Déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée	167
Figure 6.15 - Essai n°XII – Agrandissement de la partie initiale déformation volumique différée-distorsion différée	167
Figure 6.16 - Essai n°XIII' – Déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée	168
Figure 6.17 - Essai n°IX – Evolution des déformations volumiques en fonction de la distorsion différée (la contrainte et l'hygrométrie varient).....	168
Figure 6.18 - Essai n°IX – Phase transitoire (T) où l'hygrométrie passe de 90% à 60% puis à 30%.....	168
Figure 6.19 - Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique (Grozon – essai de fluage triaxial).....	169
Figure 6.20 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Augmentation des paramètres B et k avec l'hygrométrie	174
Figure 6.21 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Diminution du paramètre A_0 avec l'augmentation de l'hygrométrie (χ est fixé à 0,32).....	175
Figure 6.22 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation	176
Figure 6.23 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée et simulation	176
Figure 6.24 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)	176
Figure 6.25 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 60% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)	176
Figure 6.26 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)	177
Figure 6.27 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)	177
Figure 6.28 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 95% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)	177
Figure 6.29 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométries 30% et 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation	178

Figure 6.30 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométries 60% et 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation	178
Figure 6.31 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)	178
Figure 6.32 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 60% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)	178
Figure 6.33 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)	179
Figure 6.34 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation	179
Figure 6.35 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation	179
Figure 6.36 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 95% – Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation	180
Figure 6.37 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométries 30% et 90% – Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation	180
Figure 6.38 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 95% – Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation	180
Figure 6.39 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Evolution de γ_t théorique en fonction de l'hygrométrie et de la contrainte	183
Figure 6.40 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 30% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier	183
Figure 6.41 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 60% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier	183
Figure 6.42 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 75% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier	183
Figure 6.43 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 90% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier	183
Figure 6.44 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 95% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II de trois paliers	184
Figure 6.45 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Hygrométrie 90% – Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II de quatre paliers	184

Notations

c	cohésion
D	seuil de dilatance
DS	indice d'espacement entre fractures
δ_0	angle de la dilatance initial
δ_∞	angle de la dilatance limite
E et n	module de Young et coefficient de Poisson statiques
E_{dyn} et n_{dyn}	module de Young et coefficient de Poisson dynamiques
E_T	module de déformation transversale
E_{tg} et n_{tg}	module de Young et coefficient de Poisson tangents
ε_i	composante principale du tenseur des déformations
ε_v	déformations volumiques plastiques
ϕ	angle de frottement
G	module de cisaillement
G_0 ou U	énergie d'activation
γ_d	distorsion différée
γ_t	distorsion critique
γ_p	distorsion plastique
γ_{vp}	distorsion viscoplastique
K	module de compressibilité ou coefficient de résistance (utilisé pour la modélisation)
K_N	perméabilité à l'azote
Le	imite élastique
m	puissance de la contrainte dans la loi de Norton
M	exposant d'écrouissage
n	puissance de la contrainte dans la loi de Lemaitre
N	exposant de viscosité
n_f	porosité de fissure
n_{Hg}	porosité au Mercure
n_{tot}	porosité totale
n_w	porosité accessible à l'eau
p	contrainte moyenne
Pc	pression de confinement
q	contrainte déviatorique
R	résistance à la compression ou à la traction
Rc	résistance en compression uniaxiale
ρ_s	masse volumique sèche
ρ_σ	masse volumique des grains
Sr	degré de saturation
σ_i	composante principale du tenseur des contraintes
U	énergie d'activation
V_p	vitesse des ondes ultrasonores P
V_s	vitesse des ondes ultrasonores S
W	teneur en eau naturelle pondérale

CHAPITRE 1

CADRE GENERAL

Les problèmes de stabilité des carrières souterraines sont aujourd’hui abordés différemment grâce à l’apparition de nouvelles données techniques et sociales. L’urbanisation qui est de plus en plus dense, génère des chargements statiques et dynamiques supplémentaires. Les fluctuations du niveau des nappes peuvent également remettre en cause la stabilité d’ouvrages souterrains. De plus, il faut ajouter un paramètre très important : l’oubli des plans d’exploitation concernant les très vieux quartiers.

Les affaissements, qui n’atteignaient autrefois que des terrains en culture, menacent aujourd’hui des axes de communication, zones d’habitation et industries. Ces risques ont suscité la préoccupation des populations mais aussi des législateurs. La mise en œuvre de moyens d’estimation et de prévention des risques ont donc été nécessaires.

Dans ce domaine, des progrès scientifiques ont été réalisés. La compréhension du comportement des roches en tenant compte de leur endommagement, de leur vieillissement et des phénomènes de couplage a connu des avancées importantes. Cependant, il reste encore de nombreuses interrogations quant à une roche en particulier.

Dans le cadre des activités de la Direction des risques du sol et du sous-sol de l’Institut National de l’Environnement Industriel et des RISques (INERIS), un important programme de recherche a été mis en place pour faire progresser la compréhension des phénomènes physico-chimico-mécaniques à l’origine du comportement à long terme des ouvrages en milieu rocheux. Ce programme initié par l’INERIS en 2001 dans le cadre du Budget Civil de Recherche et Développement (BCDR) intitulé « Contribution méthodologique et expérimentale à l’étude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vieillissement » a nécessité la collaboration très active du Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages (LaEGO). Le programme de recherche du BCDR est organisé autour des 4 axes :

- 1. Synthèse des connaissances et phases d’enquête ;
- 2. Analyse méthodologique et expérimentale du vieillissement ;
- 3. Prise en compte du long terme dans les diagnostics de stabilité ;
- 4. Instrumentation sur site et constitution d’une base de données.

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse réalisé au LaEGO se situe au niveau des axes 2 et 3. Le programme expérimental a été mis en place sur un matériau particulier : le gypse. Il a été choisi pour différentes raisons :

- la répartition de son exploitation souterraine est nationale ;
- les deux tiers de la production nationale sont à proximité ou sous des zones fortement urbanisées ;
- son comportement mécanique à long terme est mal connu, peu d’études scientifiques ont été réalisées.

Il est bien évident, que ces expérimentations ont permis d’apporter des connaissances sur le choix d’un futur site d’instrumentation mais également sur le choix de l’instrumentation elle-même.

Les financements de l’INERIS, du LaEGO, et du Ministère de la Recherche ont permis la réalisation de ce travail.

1.1- LES CARRIERES SOUTERRAINES DE GYPSE

1.1.1- Historique

« Du XI^{ème} au XIII^{ème} siècle, la France a charrié plus de pierre que l'Egypte en n'importe quelle période de son histoire, bien que la Grande Pyramide à elle seule ait un volume de 2 500 000 m³... » Gimpel, 1975. Cette phrase résume d'elle-même l'ampleur des vides occasionnés par l'extraction de la pierre pour la construction et la sculpture. L'exploitation du gypse y a participé.

Actuellement, c'est le Bassin parisien qui fournit les 2/3 de la production française de gypse. Le sous-sol parisien recèlerait 68% des réserves nationales, les 32% restants se répartissant entre la Provence, le Jura, les Alpes, la Charente et la Lorraine (Figure 1.1). Le principal débouché de cette matière première, à hauteur de 80%, est la fabrication de plâtre, 11 des 20 unités de production françaises étant situées en Ile-de-France. Le reste est valorisé comme additifs pour le ciment (Lagny et al., 2001).

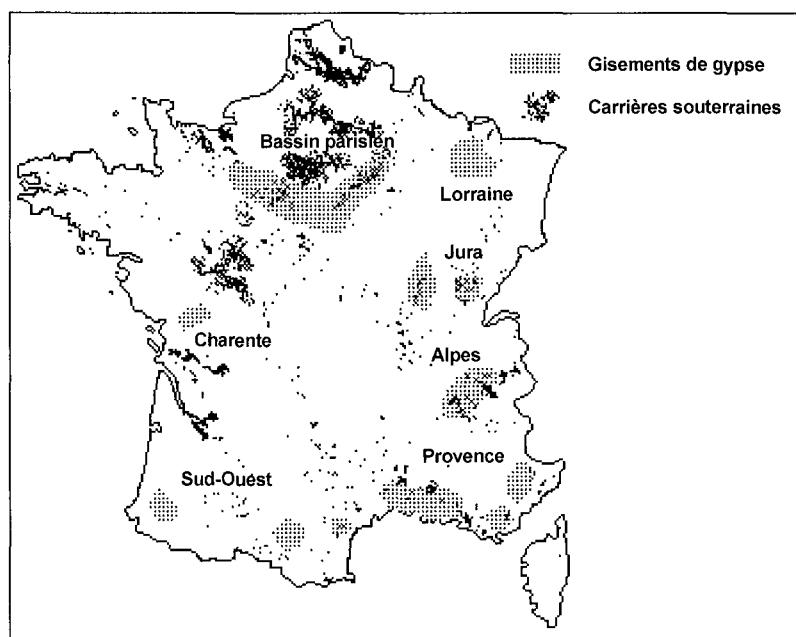


Figure 1.1 - Carrières souterraines et bassins producteurs de gypse en France (d'après BRGM, 2003)

En 1999, la production mondiale (carrières à ciel ouvert et souterraines) était estimée à 108 millions de tonnes. La France se classait premier producteur européen et neuvième producteur mondial avec 4,5 millions de tonnes (Lagny et al., 2001). La production française est assurée par deux grands groupes industriels :

- Lafarge Plâtres : carrières de Mazan (84), de Courtry (77) et de Salies (64) ;
- BPB Placo : carrières de Cormeilles-en-Parisis et Montmorency (95), de Livry Gargan et Vaujours (93), de Saint-Jean de Maurienne (73), de Pouillon (40), de Grozon (39) et de Lazer (05).

BPB Placo est né au lendemain de la Seconde Guerre mondiale : en 1946, le ministère de l'Urbanisme incita les trois plus grandes entreprises du plâtre en France à se regrouper pour produire la plaque de plâtre inventée aux Etats-Unis en 1890 par Augustin Sackett et introduite en Grande-Bretagne en 1917. Ce dernier avait démontré ses qualités pour construire « rapidement, économiquement, sainement et à l'abri du feu ». Les entreprises Lambert Frères et Cie, les Ets Poliet et Chausson et la Société des Plâtrières Modernes de Grozon se regroupèrent donc au sein de Placoplâtre, qui devint BPB Placo en 1953 avec l'entrée de BPB Industry Ltd.

Parmi toutes ces exploitations, deux d'entre elles ont retenu notre attention : Livry Gargan et Grozon. Elles ont été choisies pour les raisons suivantes :

- leur facilité d'accès et leur ancienneté ;
- la connaissance des sites grâce à d'anciennes études de stabilité et de dimensionnement d'exploitation ;
- leur intérêt géologique : Livry Gargan est un gisement stratiforme et Grozon en bordure de chaîne montagneuse est un dépôt plissé et fracturé ;
- l'intérêt et l'implication de l'exploitant à participer aux différentes études scientifiques.

1.1.2- Types d'exploitation

Les méthodes d'exploitation sont très diversifiées. Elles sont adaptées au cours des temps aux qualités de résistance des matériaux excavés. Plusieurs méthodes ont été répertoriées dans la région parisienne (Vachat, 1982 ; Josien, 1995) :

- piliers tournés ;
- galeries en rameaux par hagues et bourrage et dépilage ;
- galeries trapézoïdales ;
- chambres hautes en ogive (Figure 1.2) ;
- chambres et piliers abandonnés.

Les exploitations anciennes étaient anarchiques. Les plans d'exploitation étaient très approximatifs voire inexistant. Au fil des âges et en particulier au XX^{ème} siècle, les tracés de galeries ont été redéfinis grâce à la mécanisation. La méthode actuelle par chambres et piliers permet d'obtenir un taux de défruitemment de 75 % dans les travaux récents mais il peut varier de 70 à 85 % dans les zones de travaux anciens (Dejean et Tritsch 1976). Grâce à des moyens de localisation de plus en plus précis, le respect du dimensionnement et de la superposition des piliers est devenu plus facile.



Figure 1.2 - Exploitation par chambres hautes en ogive, Livry Gargan

1.1.3- Types d'instabilité et dommages

Les instabilités sont dues à un surcroît de contraintes suite à l'excavation. Elles peuvent être favorisées par des paramètres qualifiés d'externes comme les infiltrations d'eau ou bien d'éventuels battements de nappes. Elles prennent des formes diverses selon plusieurs critères :

- la géométrie de l'exploitation ;
- les propriétés mécaniques des matériaux mis en jeu ;
- la tectonique du site.

Les différents désordres peuvent se classer en trois catégories (Delaunay, 1977 ; Bonvallet, 1978 ; Vachat, 1982 ; Beaufrère, 1985 ; Rode et al. 1989) :

- La chute de toit d'une galerie (Figure 1.3) : si l'épaisseur de recouvrement est faible, le fontis peut atteindre la surface. Les éléments pouvant favoriser la formation de fontis sont nombreux. Nous pouvons citer par exemple un taux de défruitement élevé, la fracturation, les infiltrations dans les réseaux de fracture et les niveaux perméables, les événements météorologiques exceptionnels, la formation de poches de dissolution, l'absence de bancs suffisamment raides dans les terrains de recouvrement pour stopper l'évolution du fontis.
- L'effondrement de pilier (Figure 1.4) : il peut présenter un défaut comme une faille ou bien un réseau de fissures plus dense que son environnement proche, il peut être sous-dimensionné. Il commence par s'effriter et atteint une forme de diabolo, caractéristique de l'état post-rupture.
- L'effondrement généralisé (Figure 1.5) : il est la conséquence des deux premiers désordres. Il se traduit par un affaissement simultané d'une zone constituée de plusieurs chambres et piliers. Les manifestations en surface sont des dépressions de plusieurs hectares voire dizaines d'hectares, à fond irrégulier, si plusieurs piliers ont résisté.

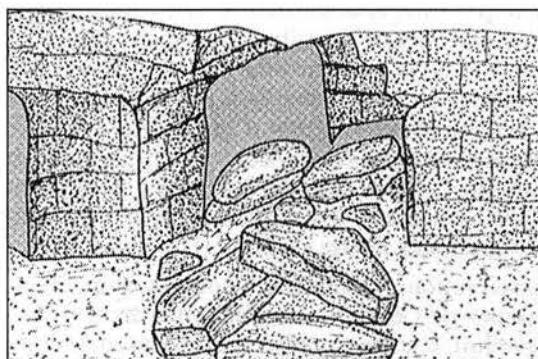


Figure 1.3 - Rupture de toit
(d'après Rode et al., 1989)

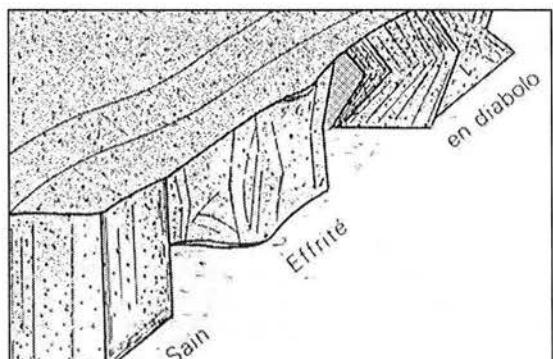


Figure 1.4 - Evolution d'un pilier vers la ruine
(d'après Rode et al., 1989)

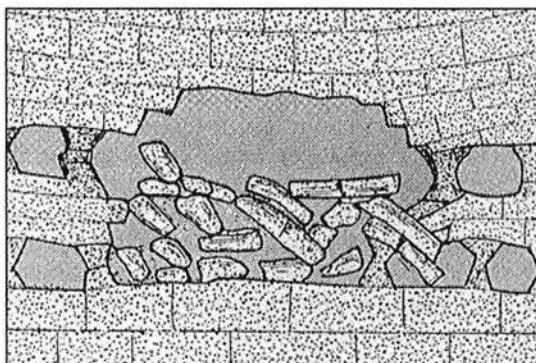


Figure 1.5 - Effondrement généralisé
(d'après Rode et al., 1989)

Lorsque l'urbanisation était inexiste ou peu dense, les effondrements survenaient généralement dans des champs, des zones non habitées. Les accidents touchaient alors éventuellement les ouvriers travaillant dans les galeries.

Aujourd'hui, les conséquences humaines, économiques et environnementales sont beaucoup plus importantes.

En 1991, à Chanteloup les Vignes, suite à l'effondrement d'un quartier d'exploitation d'une carrière de gypse abandonnée, une personne a été ensevelie et son corps n'a pu être retrouvé. D'autres exemples peuvent être cités, ils sont regroupés dans le tableau 1.1.

*Tableau 1.1 - Accidents dans les carrières souterraines de gypse en France
(d'après Chambon et al. 1983, Josien 1995 et Thorin 1995)*

ANNEE	SITE	MORTS	CAUSES INVOQUEES
1899	Pantin	3	Toit marneux désagrégé par les nappes d'eau
1904	La Fourchette	2	Eaux d'infiltration
1905	Livry Gargan	0	Faillle affectant le gisement (infiltration)
1905	St-Jean de Maurienne	0	Dimensions des chambres, crevasses, eau
1928	Ivry en Montagne	0	Taux de défruiteme non respecté
1943, 1961	Plateau de Vitry	0	Délitage des piliers
1959, 1962	Port-Maron	0	Fissuration du toit, poinçonnage du mur
1979	Rosny-sous-Bois (Figure 1.6)	0	Ruine d'un quartier de carrière abandonnée
1991	Chanteloup les Vignes	1	

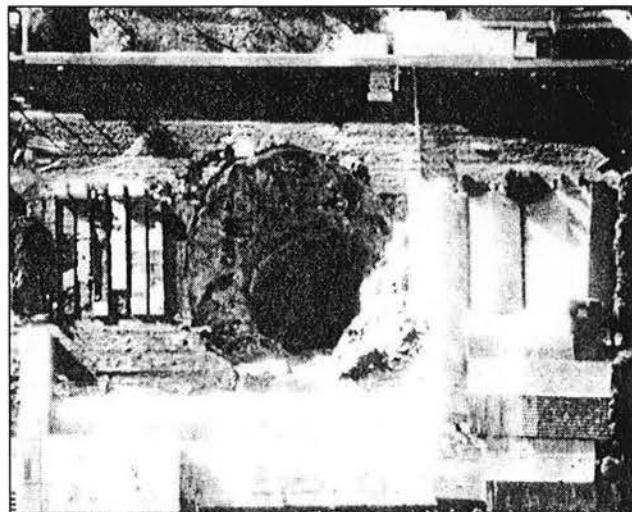


Figure 1.6 - Effondrement brutal (fontis) dans une zone industrielle (Rosny-sous-Bois, Seine-Saint-Denis, octobre 1979, d'après Toulemont, 1988)

Devant la gravité des conséquences d'un effondrement majeur d'une carrière souterraine de gypse (en exploitation ou abandonnée), la compréhension des phénomènes physico-chimico-mécaniques à l'origine du comportement à long terme du gypse s'avère indispensable.

1.2- LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE

Le comportement rhéologique et le vieillissement du gypse sont mal connu. A partir d'une étude expérimentale des caractéristiques pétrographiques, physiques et mécaniques du gypse de deux carrières souterraines, le comportement rhéologique à court et à long terme sera présenté. Les mécanismes de déformation différée et les mécanismes activés entraînant son vieillissement seront également pris en compte. Ces différents résultats permettront de proposer un modèle de comportement rhéologique.

Afin de répondre à ces attentes, la démarche scientifique proposée s'articule autour de deux fils conducteurs : le comportement à court terme et le comportement à long terme du gypse.

Les chapitres 2 et 3 de ce mémoire permettent tout d'abord de prendre connaissance des particularités du cristal de gypse et de ses gisements. En effet, le chapitre 2 dresse un bilan non exhaustif des connaissances du cristal de gypse et plus particulièrement de ses propriétés cristallographiques, physico-chimiques et physico-mécaniques. Il est complété par une énumération des environnements géologiques d'un certain nombre de gisements répertoriés dans la littérature internationale et des caractéristiques physiques et mécaniques de ces gypses.

Le chapitre 3 constitue la matière première des futures études expérimentales. Il présente les deux sites retenus, leurs caractéristiques géologiques et géotechniques.

Les deux chapitres suivants nous font entrer dans le vif du sujet. Le chapitre 4 précise la nature du vieillissement du gypse grâce à des observations d'échantillons au microscope électronique à balayage. La caractérisation physico-mécanique du matériau sain, mais aussi vieilli, vient compléter ce quatrième chapitre.

Le chapitre 5 constitue le deuxième fil conducteur de ce mémoire : l'étude du comportement différé de ce matériau. Deux échelles de grandeurs sont prises en compte : la première est consacrée au comportement différé de piliers de gypse et la seconde partie s'intéresse au comportement différé d'échantillons centimétriques de gypse.

Le dernier chapitre met un point d'honneur à l'étude expérimentale du comportement rhéologique du gypse. Une loi de comportement dans un cadre de couplages hydro-chimico-mécaniques est ainsi proposée.

CHAPITRE 2

DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LE GYPSE

2.1- INTRODUCTION

Le cristal de gypse a fait l'objet de nombreuses études : sa croissance en présence de différents additifs, sa solubilité dans des solutions aqueuses contenant différents additifs, ... Ces faciès ont été largement répertoriés. L'application de ces différents travaux est l'étude du matériau plâtre en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques.

Dans ce chapitre, les propriétés cristallographiques du monocristal de gypse, et ses propriétés physico-chimiques et physico-mécaniques sont brièvement présentées. Elles permettent de s'imprégner de ce matériau particulier.

Suite à une étude bibliographique sur les gisements de gypse, deux grands ensembles se distinguent d'un point de vue géologique, physique et mécanique. Par conséquent, deux sites exploités ont été retenus pour observer, mesurer et calculer les paramètres ou caractéristiques cristallographiques, physiques et mécaniques du gypse. Il s'agit de la carrière de Livry Gargan située en région parisienne et de la carrière de Grozon située dans le Jura.

Les différents paramètres géologiques, physiques et mécaniques de plusieurs gisements sont cités. Les contextes géographiques et géologiques des carrières de Livry Gargan et de Grozon ainsi que les caractéristiques pétrographiques sont présentés dans le chapitre 3. Les différents paramètres physico-mécaniques des gypses des deux carrières sont présentés dans le chapitre 4.

2.2- LE CRISTAL DE GYPSE

2.2.1- Les propriétés cristallographiques

Le gypse est un sulfate de calcium dihydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sa dureté est 2 et il appartient à la famille des évaporites (Figure 2.1). Il cristallise dans le système monoclinique (Ogniben, 1955 ; Jong et Bouman, 1959). Les paramètres de la maille élémentaire sont les suivants (Cole et Lancucki, 1974 ; Heijnen et Hartman, 1991 ; Sipple, 1999) :

- $a = 5,6 \text{ \AA}$;
- $b = 15,2 \text{ \AA}$;
- $c = 6,5 \text{ \AA}$
- $\beta = 118^\circ$.

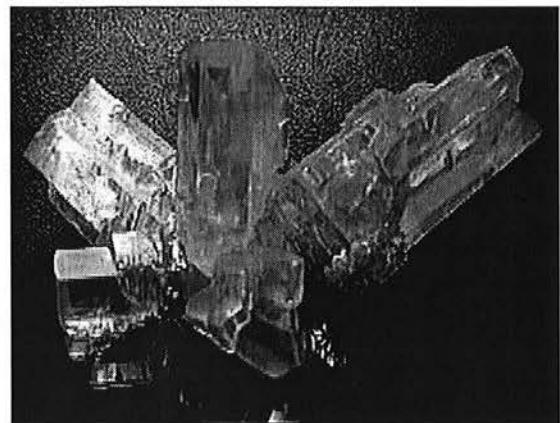


Figure 2.1 - Cristaux de gypse purs

La représentation schématique de la maille élémentaire du système monoclinique est sur la figure 2.2. Le cristal présente un clivage parfait (010) où les fractures obtenues sont lisses et deux autres clivages secondaires (100) et (011) où les fractures sont respectivement fibreuses et conchoïdales (Williams, 1988 ; Sipple, 1999).

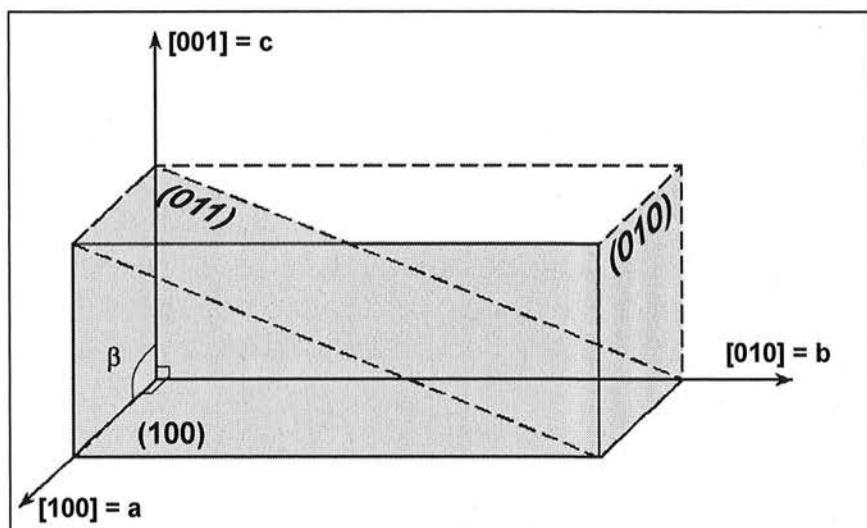


Figure 2.2 - Représentation schématique de la maille élémentaire du réseau cristallin monoclinique du gypse (les 3 faces référencées sont les plans des 3 principaux clivages)

En solution aqueuse pure, le cristal de gypse a un faciès majoritairement aciculaire (Figure 2.3). Le gypse est constitué de doubles feuillets de CaSO_4 parallèles au plan [010] unis entre eux par des molécules d'eau (Braitsch 1971 ; Bosbach et Rammensee, 1994). D'après Mandal et Mandal (2002), une des deux molécules d'eau constitutives est sous la

forme d'un anion qui a la possibilité de se séparer très facilement (Figure 2.4). La migration de ces molécules peut être initiée par des variations de l'hygrométrie (Finot et al., 1997 ; Finot et al., 2001).

L'adhésion de plusieurs monocristaux de gypse dans l'air dépend de trois types de forces : Van der Waals, électrostatique et capillaire. Typiquement, le contact entre les faces (010) est dû aux forces de Van der Waals, elles sont assurées par les molécules d'eau. Les forces électrostatiques résultent de l'attraction des ions calcium et des ions sulfate entre les différentes couches. Les forces capillaires sont mesurées avec une hygrométrie supérieure à 35% et elles sont couplées avec les deux autres forces (Finot et al., 2001). D'après Meers et Spiers (1995) mais aussi Meers et al. (1997), la grande réactivité du gypse avec l'eau permet de prendre en compte, à long terme, des mécanismes hydrochimico-mécaniques et de négliger des mécanismes hydro-mécaniques.

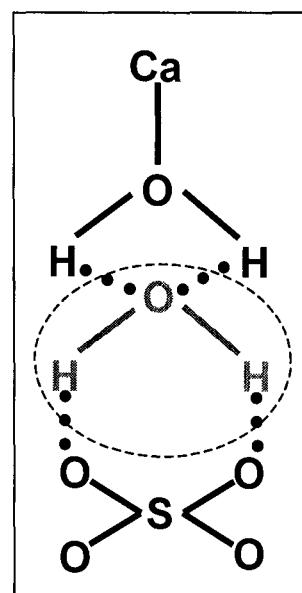
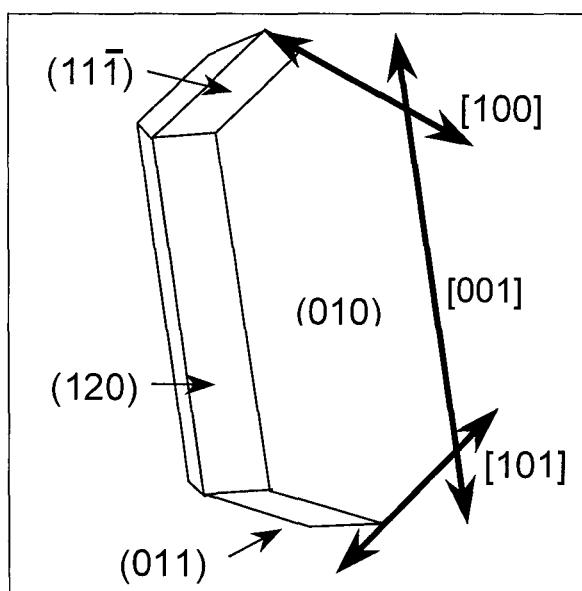


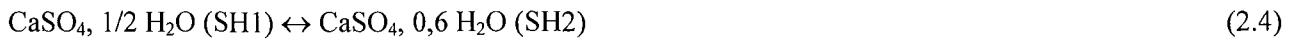
Figure 2.4 - Squelette atomique d'une molécule de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, mettant en évidence une molécule d'eau très faiblement liée au reste de la molécule (d'après Mandal et Mandal, 2002)

2.2.2- Les propriétés physico-chimiques

Le système $\text{CaSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ comporte 5 phases solides différentes qui sont :

- le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et une phase sous hydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 0,6\text{H}_2\text{O}$ (SH2) ;
- le semihydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (SH1), il existe à l'état naturel sous le nom de bassanite. Il est souvent distingué par deux variétés microstructurales, une bien cristallisée et une autre poreuse ;
- l'anhydrite (CaSO_4) soluble (AIII) et l'insoluble (All).

Les réactions entre les différentes phases sont les suivantes (Posnjak, 1940 ; MacDonald, 1953 ; Conley et Bundy, 1958 ; Karmazsin et al., 1979) :



La réaction (2.1) endothermique et la réaction (2.3) exothermique sont irréversibles, les réactions (2.2) et (2.4) sont réversibles. Il existe des phases sous-hydratées ayant d'autres stœchiométries, le nombre de molécules d'eau varie entre 0,5 et 0,8. De nombreux articles traitent de ce sujet (Karmazsin et al., 1979 ; Bushuev et Borisov, 1982 ; Kuzel et Hauner, 1987 ; Bezou et al., 1990, 1995).

Des essais de dissolution de longue durée (3 à 6 jours) réalisé avec un gypse triasique en utilisant un perméamètre radial convergent (type Bernaix avec une charge de 12 kPa) ont permis de déterminer un taux de dissolution compris entre 10^{-6} et 10^{-4} g/s (Fabre et Dayre, 1982).

A température ambiante, la solubilité du gypse Eocène de la région parisienne mesurée par Jardin (1975) est de 0,24%. Avec du gypse quaternaire de Crète, à 20°C, la solubilité est de 0,2% (Braitsch, 1971). Pour une température de 10°C, la solubilité d'un gypse Oligo-miocène de Turquie est de 0,25% (Irfan et Ozkaya, 1981). Les conséquences dans la nature avec un écoulement de 1 m/s sont la dissolution de 1 mètre de gypse sur une année ; ce matériau se dissout entre 50 et 100 fois plus vite qu'un calcaire (Cooper et Waltham, 1999). La solubilité du gypse varie peu avec la température. Elle présente un maximum à proximité de 40°C avec une valeur légèrement supérieure à 2 g/l. La solubilité de l'anhydrite diminue de manière plus importante lorsque la température augmente. En dessous de 42°C l'anhydrite est plus soluble que le gypse. La comparaison des constantes de solubilité des deux minéraux à 25 °C et sous une atmosphère marque bien la différence (Robinet 1990) : l'anhydrite : $K_s = 4,2 \cdot 10^{-5}$; le gypse : $K_s = 2,5 \cdot 10^{-4}$.

Jeschke et al. (2001) a déterminé une vitesse de dissolution de 10^{-5} mmol/cm²/s dans une eau saturée à 50% de sulfate de calcium. Cette vitesse dépend, sans autre réaction que la dissolution des ions, des conditions de la dissolution et de deux processus :

- La réaction chimique se produisant à la surface dépend de la composition chimique à la surface ;
- La vitesse de dissolution est fonction de la diffusion moléculaire à travers une couche d'épaisseur bornée.

Les équations de dissolution du gypse et de l'anhydrite s'écrivent de la manière suivante (Conley et Bundy, 1958 ; James et Lupton, 1978 ; James et Kirkpatrick, 1980) :

$$\text{pour le gypse : } \frac{\partial M}{\partial t} = K A_s (C_s - C) \quad (2.5)$$

$$\text{pour l'anhydrite : } \frac{\partial M}{\partial t} = K A_s (C_s - C)^2 \quad (2.6)$$

A_s : surface cristalline en contact

K : vitesse de dissolution constante fonction de la température, de la salinité et du flux

M : masse de CaSO_4 dissoute

C_s : concentration de la solution saturée

C : concentration à un instant t

La dissolution du gypse dans un milieu clos, en l'absence de mouvement de l'eau, est gouvernée par le phénomène de la diffusion moléculaire. Elle dépend de l'écart entre la concentration à saturation et la concentration de l'eau au contact de l'échantillon. Celui-ci étant très important au départ, la dissolution apparaît relativement rapidement. Mais, sous le seul effet de la diffusion moléculaire, les particules se propagent très lentement dans le liquide de sorte que la concentration dans la couche en contact avec le gypse approche de la valeur de la solution saturée. La dissolution devient alors très lente, elle tend vers une valeur minimale. Après 200 heures, la dissolution est passée de $7 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Robinet, 1990 ; Deletie et al., 1990).

2.2.3- Les propriétés physico-mécaniques

La densité du gypse est de 2,3. Les vitesses des ondes ultrasonores P et S sont respectivement de $5200 \pm 300 \text{ m.s}^{-1}$ et $3300 \pm 300 \text{ m.s}^{-1}$ (Nettleton, 1940 ; Birch, 1966 ; Gardner et al., 1974 ; Panet 1976).

Le passage de l'anhydrite au gypse entraîne une augmentation de volume maximale de 100% avec une pression théorique de 20 MPa. La pression maximale de 14 MPa mesurée lors de ce changement de phase correspond à la pression d'hydratation de l'anhydrite et donc au gain de molécule d'eau (Hudson, 1984 ; Yuzer, 1982 ; Krause, 1976 ; Müller-Salzburg et Gotz, 1976 ; Grob, 1976 ; Henke, 1976). Elle est donc proportionnelle à ce nombre de molécules d'eau gagnées (Winkler, 1975).

Cette réaction réversible entraîne une modification texturale mais également structurale de la roche où des reliques d'anhydrite peuvent subsister dans une matrice de gypse. Des reliques de gypse sont possibles dans une matrice d'anhydrite (Grob, 1976 ; Holliday, 1970).

Williams (1988) et Sipple (1999) récapitulent quelques coefficients relatifs au module d'élasticité et à la contrainte limite de rupture au cisaillement d'un cristal de gypse (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 - Module et contrainte de cisaillement et module d'élasticité (d'après Williams, 1988 ; Sipple, 1999 ; les valeurs sont données à titre indicatif et uniquement comme ordre de grandeur)

FISSURATION EN MODE 2 (Cisaillement)			
Face	Direction	Module de cisaillement G (GPa)	Contrainte de cisaillement τ (MPa)
(010)	[001]	2,85	0,58
(010)	[100]	2,02	1,36
(100)	[001]	2,96	18,5
(011)	[100]	0,96	14,3

MODULE DE DEFORMABILITE DE LA FACE CRISTALLINE (010)	
Direction	Module de déformabilité (GPa)
[001]	4
[010]	6
[100]	8

Les valeurs du module de déformabilité et de la résistance au glissement les plus faibles sont mesurées dans le plan (010) selon la direction [001]. Dans la direction [100], les valeurs du module de déformabilité et de la résistance au glissement sont les plus élevées. Par conséquent, le glissement dans le plan (010) se manifeste préférentiellement selon la direction [001] (Williams, 1988 ; Finot et al., 1997 ; Sipple, 1999).

2.3- LES EXPLOITATIONS DE GYPSE

2.3.1- Les paramètres géologiques

D'un point de vue géologique, il existe deux grands ensembles : les bassins sédimentaires tabulaires et les bassins sédimentaires tectonisés.

Tout d'abord, le contexte tabulaire correspond aux gisements d'âges Paléogène-Quaternaire répertoriés. Cet âge correspond aussi bien à des gisements de gypse se trouvant en Turquie (Gumusoglu et Ukler, 1982) ou bien en Grèce (Papadopoulos et al., 1994) que des gisements situés en France dans la région parisienne (Asanza, 1985 ; Durville et al., 1993 ; Fine, 1999 ; Jardin, 1975 ; Massieu et Durville, 1992, 1997 ; Massieu, 1996 ; Watelet et Tritsch, 1996, 1997).

Le deuxième contexte sédimentaire a subi des contraintes tectoniques importantes et il est donc qualifié d'orogénique. L'âge de ces gisements étudiés s'étend du Permien au Keuper. Cet âge concerne des gisements situés en Allemagne (Baumann, 1984), en Grande-Bretagne (Bell, 1981 ; Bilgin, 1982), au Maroc (El Ghorfi et Giafferi, 1991), en Italie (Olgaard et al., 1995) mais également des gisements se trouvant en France (Lyon et Bescond, 1996 ; Tritsch et Dejean, 1976 ; Fabre et Dayre, 1982 ; Piguet et Tritsch, 1986 ; Watelet, 1991).

Les deux sites retenus (Livry Gargan en région parisienne d'âge Paléogène et Grozon dans le Jura appartenant au Keuper) représentent donc bien les deux contextes géologiques.

2.3.2- Les paramètres physiques

Deux ensembles de paramètres physiques ont été relevés suite aux différentes études faites sur plusieurs gypses provenant de gisements différents. Tous les résultats trouvés dans la littérature internationale sont regroupés dans le tableau 2.2. Ils sont séparés en deux groupes qui correspondent aux deux contextes géologiques : tabulaire et orogénique.

Tableau 2.2 - Paramètres physiques issus de la bibliographie

	Origine	Lieu	Age	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Porosité totale (%)	Vitesse des ondes P (m.s ⁻¹)
Contexte tabulaire	Asanza (1985)	Bassin Parisien	Eocène	2,24	11,5	4000
	Durville (1993)	Bassin Parisien	Eocène	2,31-2,45	16,6	2000-4500
	EMP (1972)	Bassin Parisien	Eocène	2,13-2,30	-	-
	Gumusoglu (1982)	Turquie	Quaternaire	2,28	17,4	-
	Massieu (1992)	Bassin Parisien	Eocène	-	13,6-24	-
	Massieu (1996)	Bassin Parisien	Eocène	-	16	4000
	Massieu (1997)	Bassin Parisien	Eocène	2,1	10	-
	Papadopoulos (1994)	Grèce	Néogène	2,05-2,67	12	-
	SIMECSOL (1995)	Bassin Parisien	Eocène	2,11	-	-
Contexte orogénique	Bell (1981)	Grande-Bretagne	Permien	2,39	3,4	-
	Bilgin (1982)	Grande-Bretagne	Permien	2,26	-	-
	El Ghorfi (1991)	Maroc	Trias	2,19	4,6	-
	Fabre (1982)	Alpes	Trias	2,23-2,31	1,3-6	-
	Olgaard (1995)	Italie	Trias	-	0,5	-
	Piguet (1986)	Jura	Trias	2,2-2,3	-	4000
	Tritsch (1976)	Jura	Keuper	-	1	-

A partir de ces données, il est intéressant de regarder une éventuelle corrélation entre les paramètres physiques et le contexte géologique. Les deux paramètres les plus représentés sur l'ensemble des données sont la masse volumique et la porosité totale des échantillons. La valeur moyenne de la masse volumique d'échantillons de gypse provenant du contexte orogénique est supérieure à celle du contexte tabulaire (Figure 2.5). La valeur moyenne de la porosité est supérieure dans un contexte tabulaire (Figure 2.6).

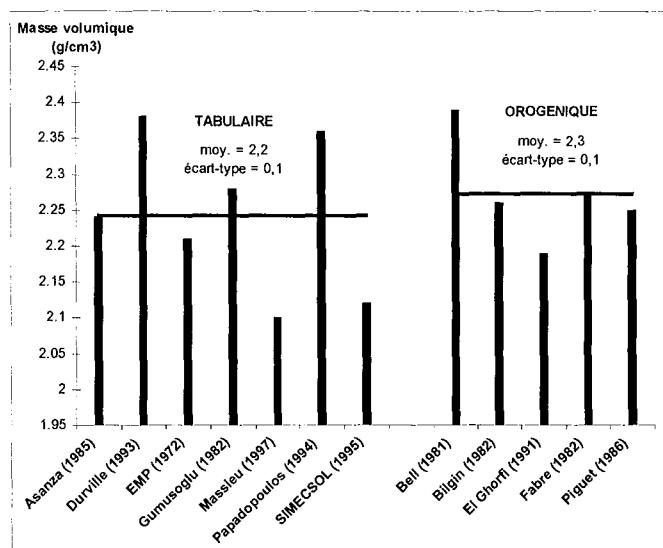


Figure 2.5 - Masses volumiques d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires

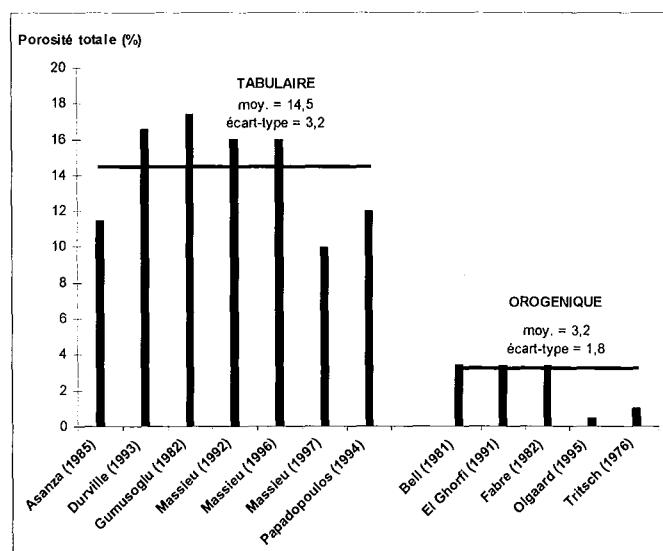


Figure 2.6 - Porosité d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires

2.3.3- Les paramètres mécaniques

Deux ensembles de paramètres mécaniques ont été relevés suite aux différentes études faites sur différents gisements. Tous les résultats trouvés dans la littérature internationale sont dans le tableau 2.3. Ils sont séparés en deux groupes qui correspondent aux deux contextes géologiques : tabulaire et orogénique.

A partir de ces données, il est intéressant de regarder une éventuelle corrélation entre les paramètres mécaniques et le contexte géologique. La valeur moyenne de la résistance en traction indirecte (Figure 2.7) et en compression uniaxiale (Figure 2.8) d'échantillons de gypse provenant du domaine tabulaire est plus faible que celle du domaine orogénique. Cette variation est également visible pour le module de déformabilité (Figure 2.9).

Il est intéressant de remarquer que les différents écarts-types calculés pour le contexte orogénique sont supérieurs à ceux calculés pour le contexte tabulaire. Ce résultat n'est pas surprenant du fait des différences structurales importantes dans un contexte orogénique (fractures, failles et plis) et des différences de pureté du gypse.

Tableau 2.3 - Paramètres mécaniques issus de la bibliographie

	Origine	Lieu	Age	Résistance en traction indirecte (MPa)	Résistance en compression simple (MPa)	Module de déformabilité (GPa)
Contexte tabulaire	Asanza (1985)	Bassin Parisien	Eocène		21,5	19,6
	Durville (1993)	Bassin Parisien	Eocène			14
	Fine (1999)	Bassin Parisien	Eocène		17,5	
	Gumusoglu (1982)	Turquie	Quaternaire		20,4	9,5
	Jardin (1975)	Bassin Parisien	Eocène		20	
	Massieu (1997)	Bassin Parisien	Eocène	1,5	14	4,5
	Massieu (1996)	Bassin Parisien	Eocène	1,3	12,5	
	Massieu (1992)	Bassin Parisien	Eocène	1	17,7	
	Papdopoulos (1994)	Grèce	Néogène	1,7	8,3	1,9
	Watelet (1996)	Bassin Parisien	Eocène	0,6	9,5	3,3
Contexte orogénique	Baumann (1984)	Allemagne	Trias			10
	Bell (1981)	Grande-Bretagne	Permien	4,15	30,5	26,8
	El Ghorfi (1991)	Grande-Bretagne	Trias		27,5	24,8
	Fabre (1982)	Alpes	Trias		34,5	23
	Lyon (1996)	Alpes	Keuper	1,7	14,8	20
	Piguet (1986)	Jura	Trias	4	28,5	10,7
	Tritsch (1976)	Jura	Keuper	2,7	25	

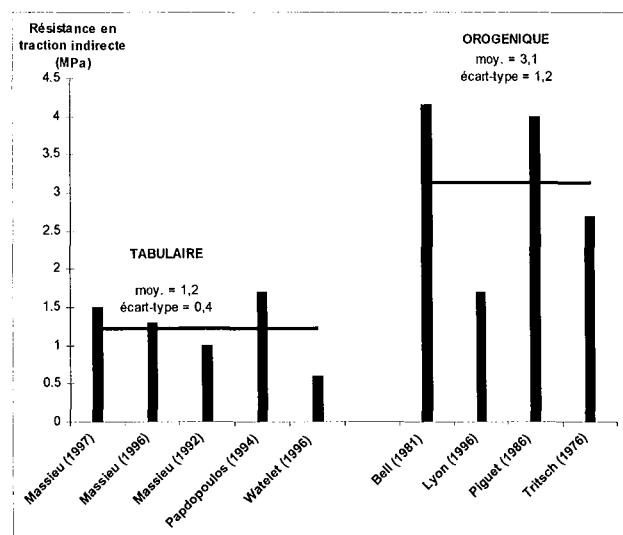


Figure 2.7 - Résistance en traction indirecte d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires

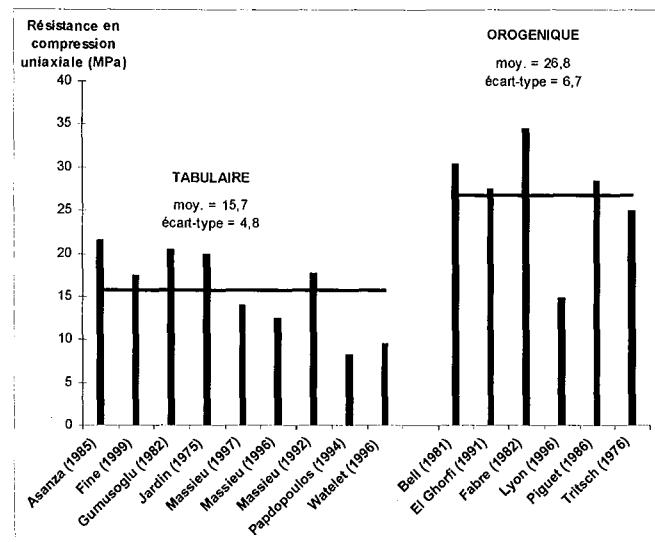


Figure 2.8 - Résistance en compression uniaxiale d'échantillons de gypse provenant des deux contextes sédimentaires

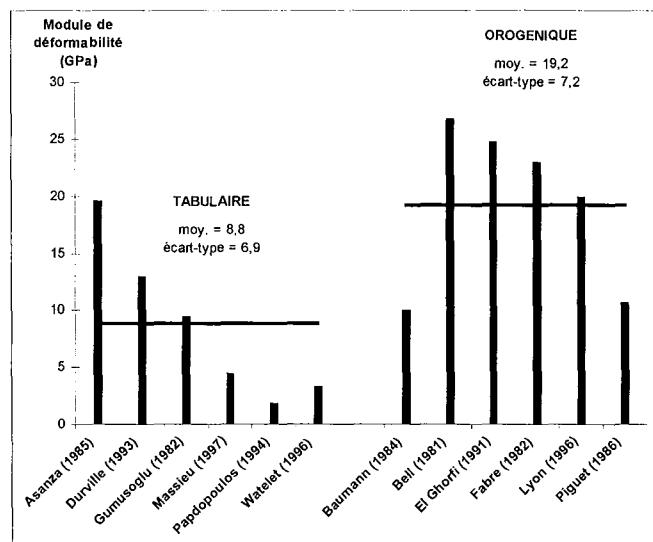


Figure 2.9 - Modules de déformabilité issus de la bibliographie

2.4- CONCLUSION

Cet aperçu des propriétés cristallographiques, physico-chimiques et physico-mécaniques permet de rendre compte de la nature particulière de ce matériau. Ces différents caractères seront rappelés dans la suite des travaux.

Ces données bibliographiques ne sont pas exhaustives, elles résument un grand nombre d'informations traitant en particulier de la cristallographie du gypse et elles sont indispensables pour la compréhension et l'interprétation des différents résultats exposés ultérieurement.

Les paramètres géologiques, physiques et mécaniques des différents gisements de gypse étudiés se classent dans deux groupes qui sont plus ou moins distincts en fonction des paramètres retenus. Le premier ensemble correspond aux gisements « tabulaires » et le second aux gisements « orogéniques ».

D'une manière générale, il existe une plus grande dispersion des paramètres mécaniques pour le domaine « orogénique » par rapport au domaine « tabulaire ». Cette dispersion est principalement due à la structure du gisement qui dans le cas tabulaire est beaucoup plus uniforme que dans le cas de l'orogénique où sont présents de nombreuses failles et plis. D'autres facteurs peuvent également intervenir comme l'épaisseur et l'homogénéité des couches de gypse des gisements mais également les conditions de sédimentation.

CHAPITRE 3

**LIVRY GARGAN ET GROZON
DEUX GIEMENTS DIFFERENTS**

3.1- INTRODUCTION

Les deux carrières souterraines, précédemment citées dans le chapitre « Données bibliographiques sur le gypse », appartiennent à deux régions géographiques différentes. La carrière souterraine de Livry Gargan se situe en région parisienne, à 20 kilomètres à l'est de Paris et à 30 kilomètres au sud-ouest de Meaux (Figure 3.1). Le site de la carrière souterraine de Grozon se situe dans le Jura (Est de la France) à environ 30 kilomètres au sud-ouest de Dôle et à 60 kilomètres environ au sud de Besançon (Figure 3.1).



Figure 3.1 - Localisation des carrières de Livry Gargan et de Grozon

La situation géologique de ces deux carrières est également différente. Dans le chapitre « Données bibliographiques sur le gypse », le contexte sédimentaire de la carrière de Livry Gargan est qualifié de tabulaire et celui de la carrière de Grozon d'orogénique. Cette qualification reposait jusqu'à présent uniquement sur des considérations bibliographiques. Dans la suite de ce chapitre, les contextes géologiques régionaux et locaux de ces deux carrières seront développés. Les caractéristiques sont détaillées pour chacune des deux exploitations.

3.2- LA CARRIERE DE LIVRY GARGAN

3.2.1- Le contexte géologique

La Marne traverse d'est en ouest la région de l'exploitation délimitant deux secteurs bien distincts :

- Au nord, une vallée très large où l'érosion a dégagé quelques buttes témoins comme celle de Livry Gargan ;
- Au sud, un vaste plateau uniforme entamé par quelques petits vallons constitués par les affluents de la Marne.

Une particularité géologique est à signaler, c'est le changement latéral de faciès du Ludien. Le faciès gypseux (Masses et marnes du gypse) est localisé sur la rive droite de la Marne et le faciès calcaire (Calcaire de Champigny) est situé en rive gauche (Figure 3.4).

Les assises géologiques présentent un pendage assez régulier vers le nord en rive gauche de la Marne. Sur la rive droite, le pendage s'inverse et devient sud. D'une façon générale, la pente est faible et dépasse rarement 5 pour mille. La série lithologique comprend les formations allant de l'Eocène moyen et supérieur à l'Oligocène (d'après Caudron et Labourguigne, 1971).

D'un point de vue local, la carrière souterraine de Livry Gargan est située dans le Ludien qui a une puissance de 60 mètres (Caudron et Labourguigne, 1971). Cet étage correspond à l'installation d'un régime lagunaire qui va se traduire au nord de la Marne par un faciès sursalé où se déposent alternativement des masses de gypse saccharoïde et des bancs de marnes à intercalations gypseuses. Il est défini de bas en haut (Figure 3.2) :

- La Quatrième Masse de gypse : c'est un gypse saccharoïde à fort pourcentage d'argile. Son équivalent latéral vers le sud-ouest est le Calcaire de Noisy-le-Sec.
- Les Marnes à Pholadomyes : elles représentent le dernier épisode marin ou laguno-marin avant l'installation du régime laguno-lacustre qui va conduire au dépôt de gypse et de son équivalent latéral, le Calcaire de Champigny. Elles sont largement transgressives, calcareuses et magnésiennes. De couleurs jaunâtres à grisâtres avec des niveaux plus argileux gris bleutés, des cristaux de gypse secondaire ont pu s'y développer.
- La Troisième Masse de gypse : plus marneuse que les deux premières, de nombreux cristaux sont en forme de pieds d'alouette dans une masse saccharoïde.
- Les Marnes à Lucines : calcareuses grises, jaunâtres ou grises-bleutées, la fraction argileuse est constituée en partie de smectites. Elles sont entrecoupées de bancs de gypse lenticulaire ou pieds d'alouette.
- La Deuxième Masse de gypse : ce sont des bancs de gypse saccharoïde séparés par plusieurs lits de gypse pieds d'alouette réguliers et par quelques lits marneux.
- Les Marnes d'entre-deux-masses : très litées, elles offrent une succession de bancs de marnes calcaires, dolomitiques ou gypseuses, au milieu desquels se sont développés irrégulièrement des cristaux de gypse saccharoïde ou de fer de lance. La fraction argileuse est constituée essentiellement sépiolite.

- La Première Masse de gypse : c'est la masse la plus importante d'une vingtaine de mètres de puissance. Elle est constituée d'un gypse saccharoïde, blond roussâtre, avec des niveaux peu épais de marnes feuilletées.
- Les Marnes bleues d'Argenteuil : composées d'illites et de smectites, elles ont une teinte grise-bleutée à vert ocre au niveau de l'affleurement.
- Les Marnes blanches de Pantin : ce sont des marno-calcaires plus ou moins indurés qui, par dessiccation, se débitent en blocs prismatiques ; fissurés, ils favorisent la circulation des eaux et peuvent être le siège d'une nappe aquifère.

La Première Masse de gypse est exploitée sur le site de la carrière de Livry Gargan. Elle se situe dans la butte témoin. L'extension de cette carrière est résituée par rapport aux différents terrains géologiques affleurants sur la figure 3.3. Une coupe régionale nord-sud qui se trouve à l'est de la carte géologique permet de situer la topographie (buttes témoins et plateaux) et les différentes formations géologiques du Ludien (Figure 3.4). Elle permet également de mettre en évidence le changement de faciès latéral entre les masses de gypse au nord de la Marne et le Calcaire de Champigny au sud.

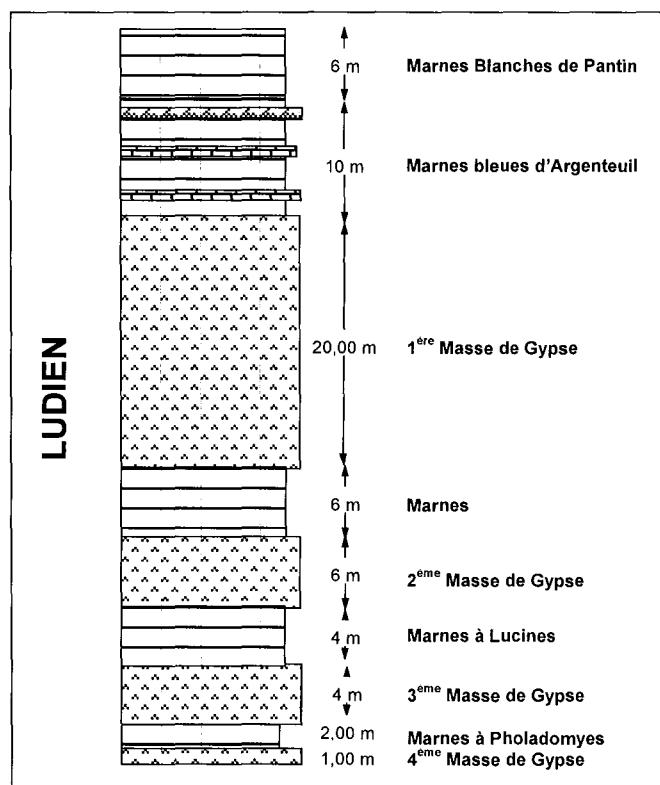


Figure 3.2 - Livry Gargan – Log lithologique du secteur de la carrière

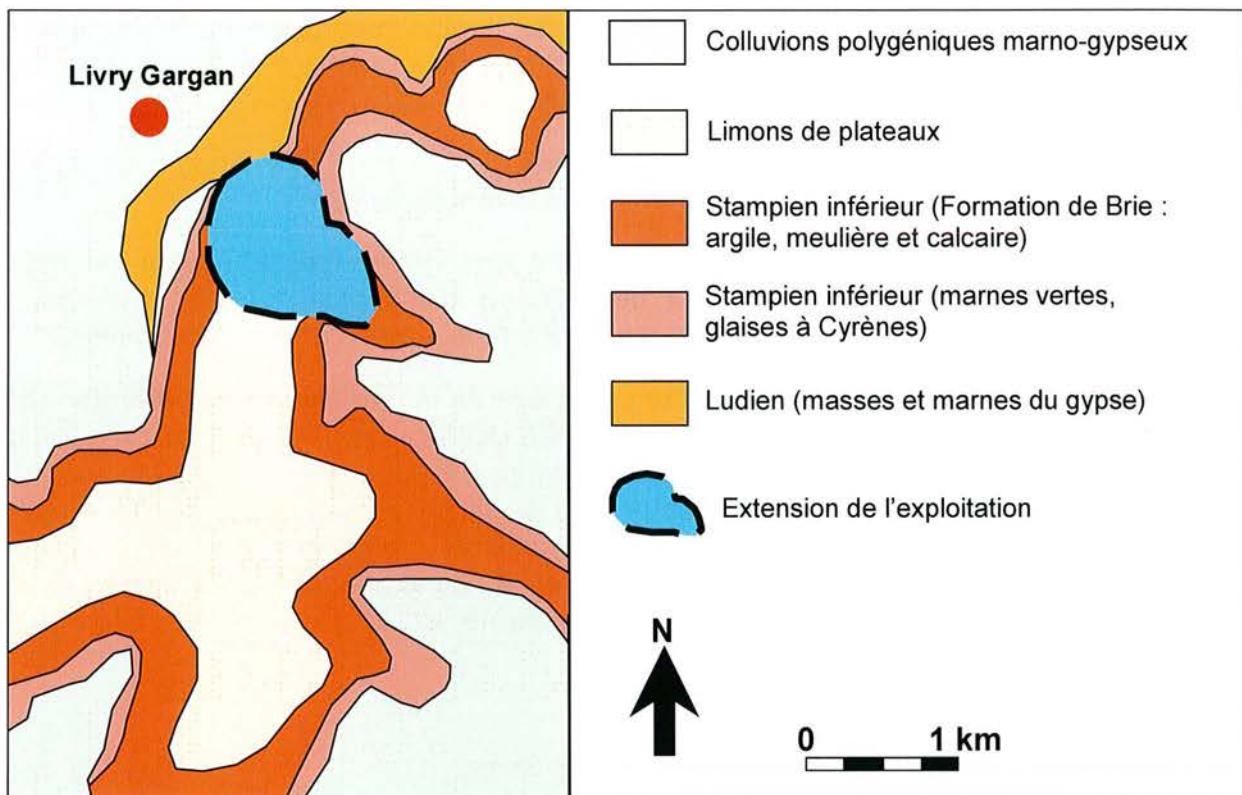


Figure 3.3- Livry Gargan – Carte géologique schématique du secteur de la carrière (d'après Caudron et Labourguigne, 1971)

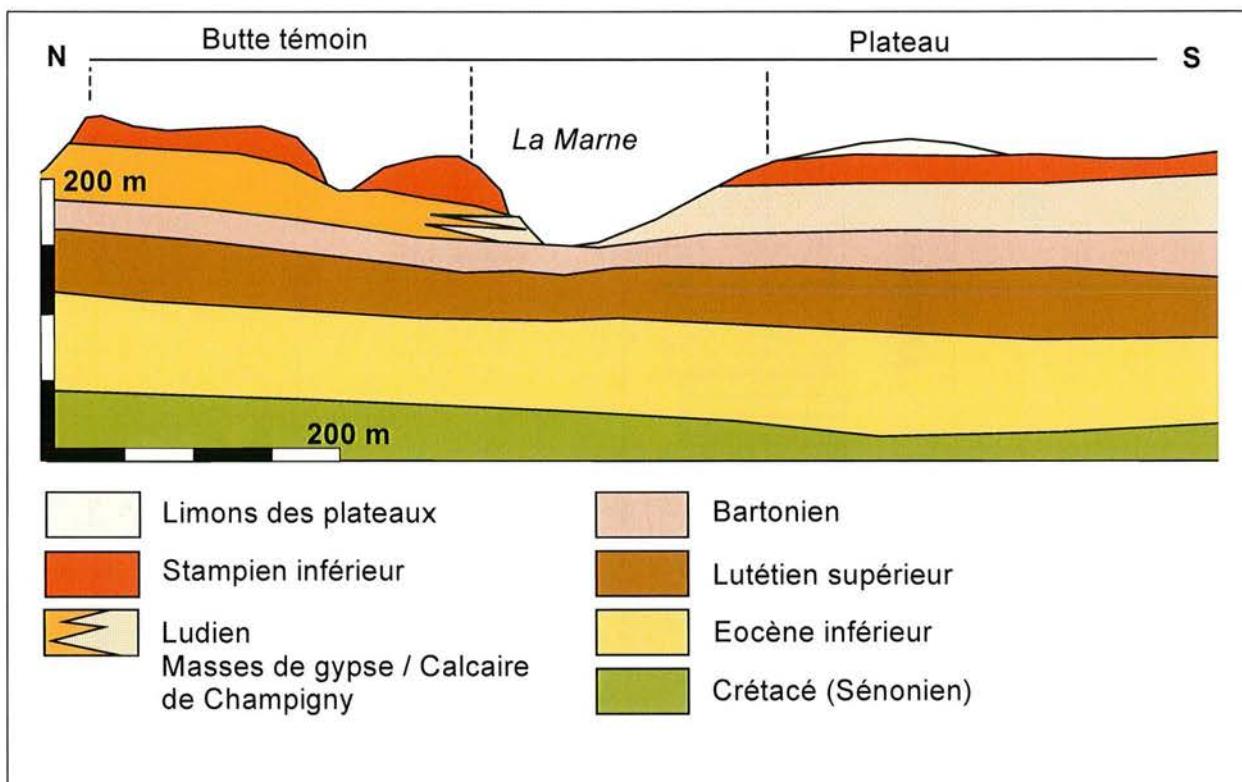


Figure 3.4 - Livry Gargan – Coupe géologique schématique du secteur de la carrière (d'après Caudron et Labourguigne, 1971)

3.2.2- Les caractéristiques de l'exploitation

L'exploitation du gisement de gypse de Livry Gargan est souterraine. Sa superficie représente environ 50 hectares. C'est la méthode des chambres et piliers abandonnés qui est utilisée. Les piliers mesurent environ 8 mètres par 8 mètres et ils font une hauteur maximale de 17 mètres. Le taux de défruitemment est de 78% environ, il peut être supérieur dans les anciens quartiers. Le recouvrement de cette exploitation ne dépasse pas 40 mètres.

Le schéma d'exploitation est le suivant :

- Un traçage de 7 mètres est tout d'abord réalisé.
- Un premier levage de 5 mètres est entrepris six mois après.
- Un deuxième levage de 5 mètres complète l'extraction du gypse.
- Quand l'élancement des piliers est maximum, un remblayage des chambres est indispensable afin d'éviter toute rupture de pilier. Il est réalisé au plus tard, six mois après le second levage sur une hauteur de 8 mètres (Figure 3.5). Le remblai est composé de tout venant inerte et il est uniquement compacté par le roulage des engins de remblaiement. Le remblayage peut être total sur une période de 3 à 5 ans.

Cette exploitation présente des quartiers d'âge d'exploitation très différents (de 1900 à nos jours) et encore accessibles. La technique d'exploitation est restée la même durant plus d'un siècle et la stabilité des travaux du début du XX^{ème} siècle est devenue précaire. Le schéma d'exploitation dans les vieux travaux est différent : les piliers mesurent environ 12 mètres de hauteur et il n'existe pas de remblayage (Figure 3.6).

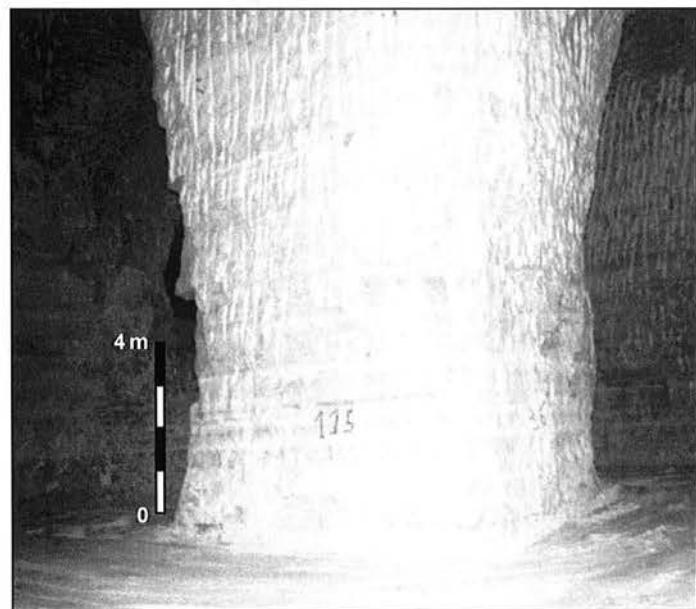


Figure 3.5 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent
Remblayage partiel des chambres

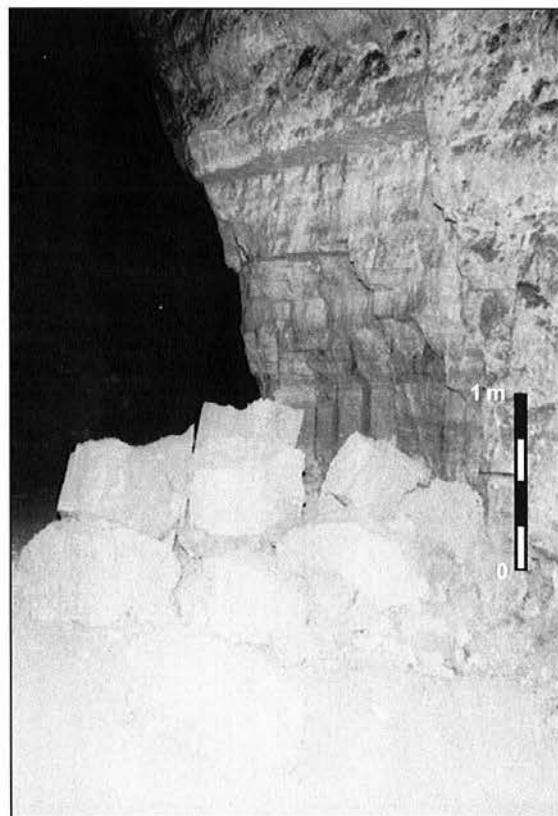


Figure 3.6 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Déchaussement prononcé des piliers

3.3- LA CARRIERE DE GROZON

3.3.1- Le contexte géologique

La carte géologique appartient à deux grandes régions naturelles d'une part et d'autre d'une limite oblique orientée S.SW-N.NE, passant approximativement par Sellières et Villeneuve-d'Aval (Figure 3.7) :

- A l'ouest de cette limite, la partie orientale de la Bresse est constituée de terrains tertiaires et quaternaires, région à topographie molle, largement boisée et parsemée d'étangs ;
- A l'est, le Jura externe où peuvent se distinguer deux zones :
 - dans l'angle sud-est de la carte, le bord du premier plateau jurassien entaillé par la profonde reculée de Poligny. Les couches affleurantes appartiennent au Jurassique moyen ;
 - entre le premier plateau et la zone de la Bresse, la zone du vignoble est formée de lanières tectoniques orientées d'abord S.SW-N.NE et amorçant, dans l'angle nord-est, une torsion qui les raccorde au faisceau salinois.

Les terrains qui affleurent dans le vignoble sont essentiellement triasiques et liasiques. Des lambeaux de Jurassique moyen coiffent certaines buttes qu'ils ont préservées de l'érosion. Le Jurassique supérieur forme une lanière, presque en limite de la zone de la Bresse, à la faveur d'accidents tectoniques complexes (Kerrien, 1982). Deux coupes géologiques régionales permettent de mettre en évidence les différentes structures tectoniques évoquées (Figure 3.8).

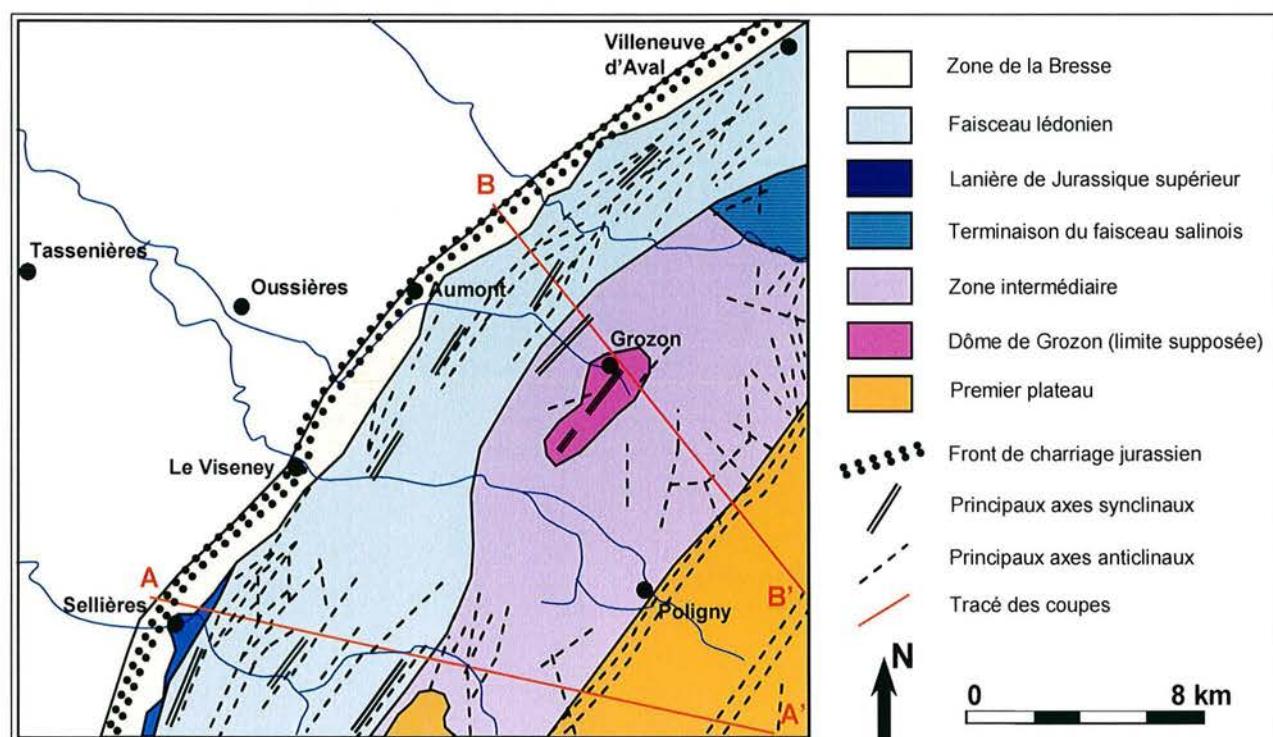


Figure 3.7 - Schéma tectonique du secteur de Poligny-Grozon (d'après Kerrien, 1982)

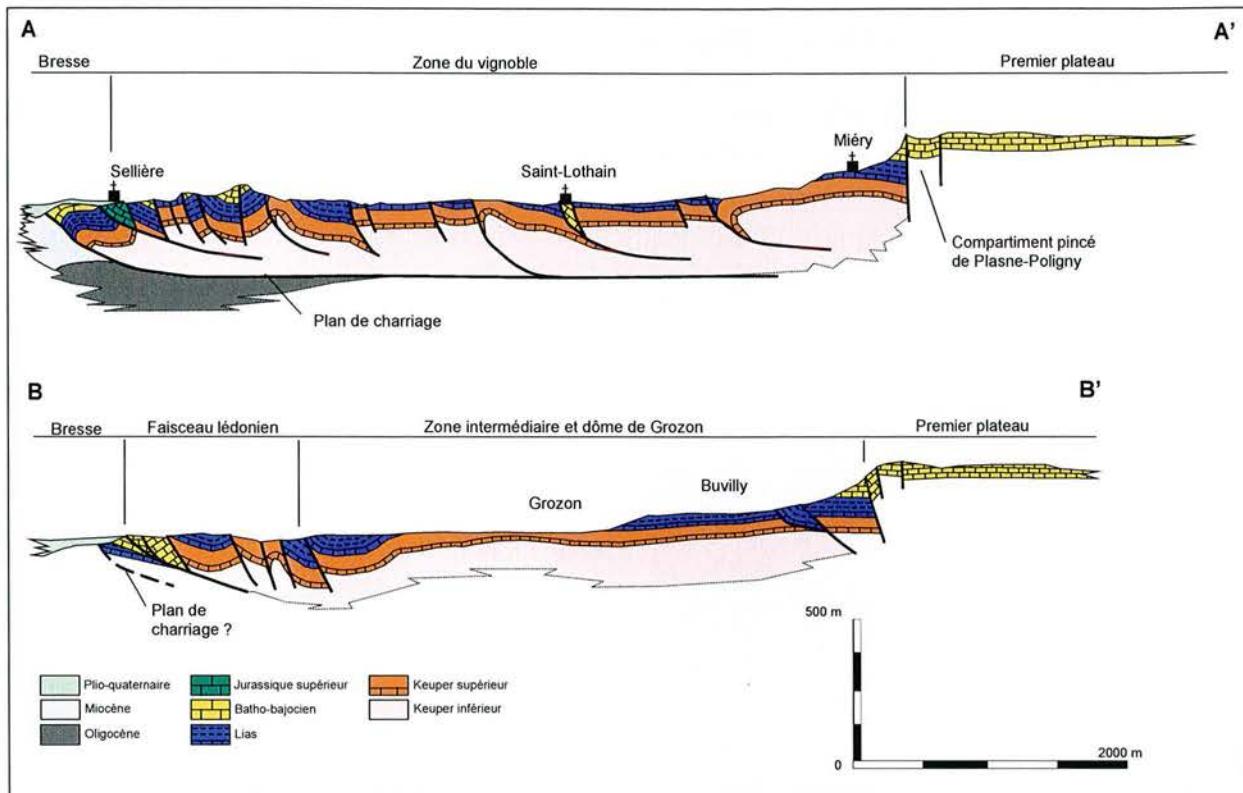


Figure 3.8 - Coupes schématiques du secteur de Poligny-Grozon (d'après Kerrien, 1982)

D'un point de vue local, la carrière souterraine de Grozon est située dans le Keuper supérieur, il a une puissance de 90 à 100 mètres (Bonte, 1953). Le Keuper supérieur est défini selon trois zones qui sont, de bas en haut :

- Zone I : marnes rouges à bancs d'anhydrite, épaisseur 35-40 mètres.
- Zone II : marnes souvent dolomitiques rouges et grises à niveaux de dolomie, d'anhydrite et de gypse. Au tiers supérieur de cette zone, un niveau dolomitique plus important, la Dolomie de deux mètres, constitue un banc-repère en sondage. Le gypse particulièrement développé à l'est de Grozon, y fait l'objet d'une exploitation avec une réserve de 2 millions de tonnes (James, 1963 ; Kaill, 1977).
- Zone III : environ 20 m, de marnes dolomitiques indurées, versicolores de teinte pâle, prenant à leurs parties supérieures une couleur généralement rouge violacée.

Au-dessus se trouve le Rhétien puis l'Hettangien et le Sinémurien-Lotharingien inférieur. Des dépôts quaternaires surmontent l'ensemble au sud-ouest de l'exploitation. La figure 3.9 permet de restituer les différentes formations géologiques par rapport à l'exploitation souterraine et la figure 3.10 présente le log lithologique de la zone exploitée. L'ensemble de la zone se trouve dans un contexte tectonique local très perturbé. De nombreuses failles inverses ou normales recoupent l'exploitation, leur orientation est généralement N-110 à N-120 correspondant à l'orogenèse alpine. De part et d'autre de ces accidents, la présence de zones bréchiques favorisent la venue et donc la circulation d'eau (James, 1963). La conséquence de ces circulations est la dissolution du gypse (Figure 3.11) qui provoque un remaniement de la série lithologique. Une série de trois coupes géologiques (symbolisée par N-S) permet de mettre en évidence la complexité structurale déjà évoquée sur la carte géologique du site de Grozon (Figure 3.13). La difficulté de l'exploitation est donc de pouvoir suivre les niveaux gypseux mais également de s'affranchir des zones où la tenue du massif est peu importante par le biais de cerclage

sur le parement des galeries. De plus, ces zones ont des propriétés chimiques peu intéressantes pour l'exploitant. Ce jeu de failles a encore un autre inconvénient : c'est souvent un lieu d'exhaure pour l'eau d'infiltration donc une dissolution importante du massif à cet endroit. Suite à ces constatations, quelques remarques s'imposent :

- Dans la perspective d'échantillonner du matériau gypseux, il est donc préférable de s'en éloigner pour obtenir un matériau « sain » dans le sens de la géomécanique.
- Enfin, le log lithologique ne met pas en évidence les alternances d'anhydrite et de gypse (Figure 3.12) au sein d'un même niveau gypseux, visibles sur les parements des galeries.

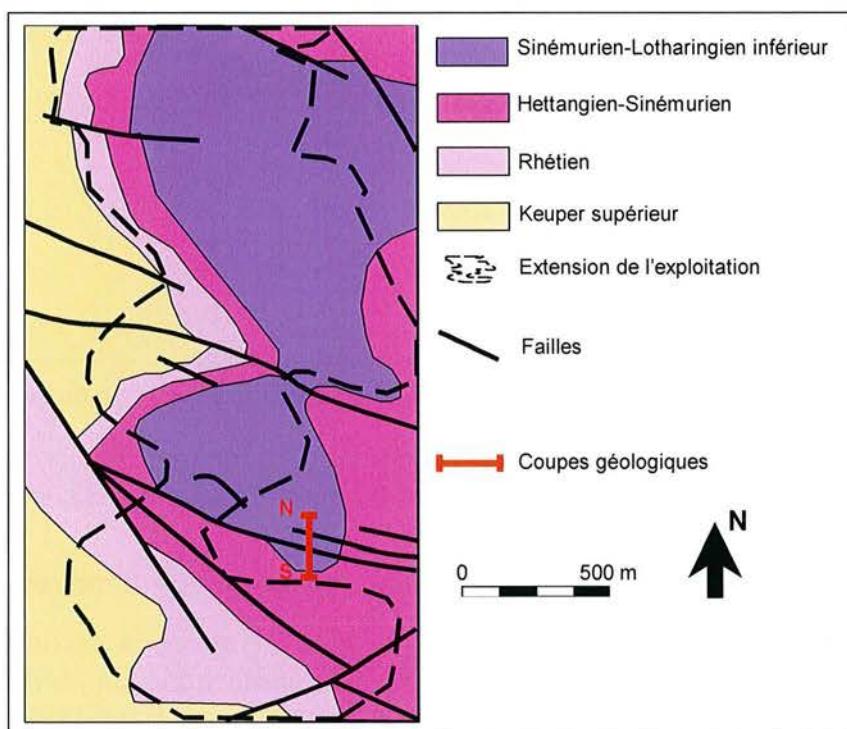


Figure 3.9 - Grozon – Carte géologique schématique du secteur de la carrière (d'après Kerrien, 1982)

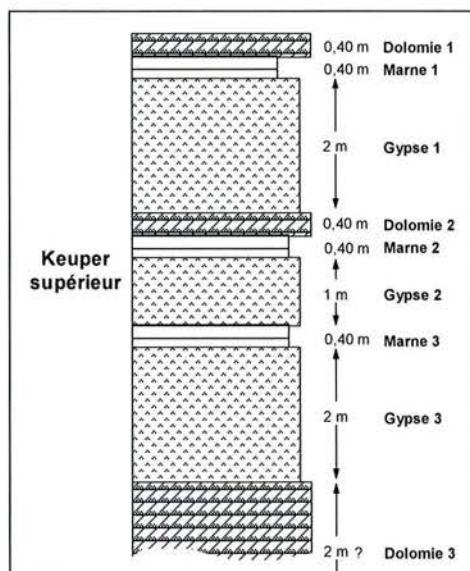


Figure 3.10 - Grozon – Log lithologique du secteur de la carrière

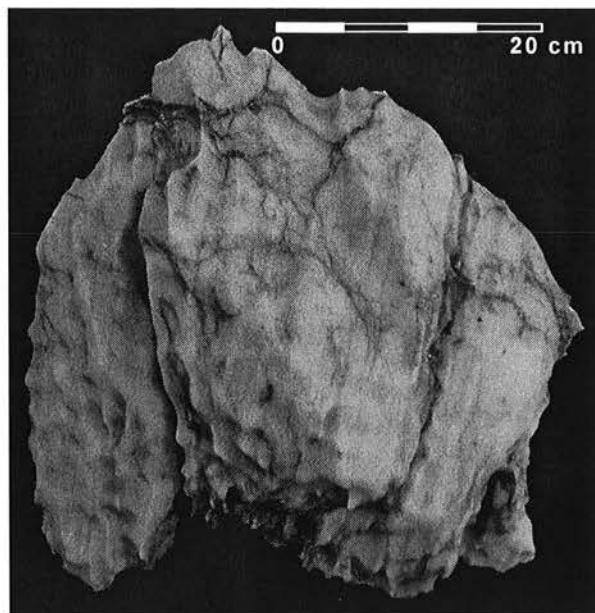


Figure 3.11 - Traces de dissolution dues à une circulation d'eau importante à proximité d'une zone fortement faillée

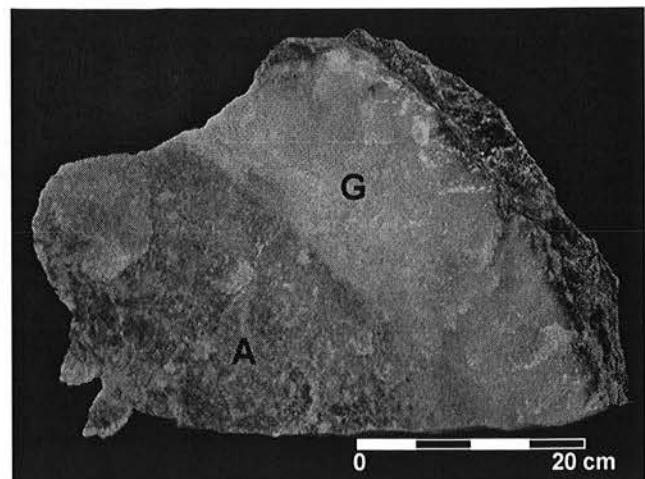


Figure 3.12 - Alternance gypse-anhydrite (gypse pur : G ; anhydrite pure : A)

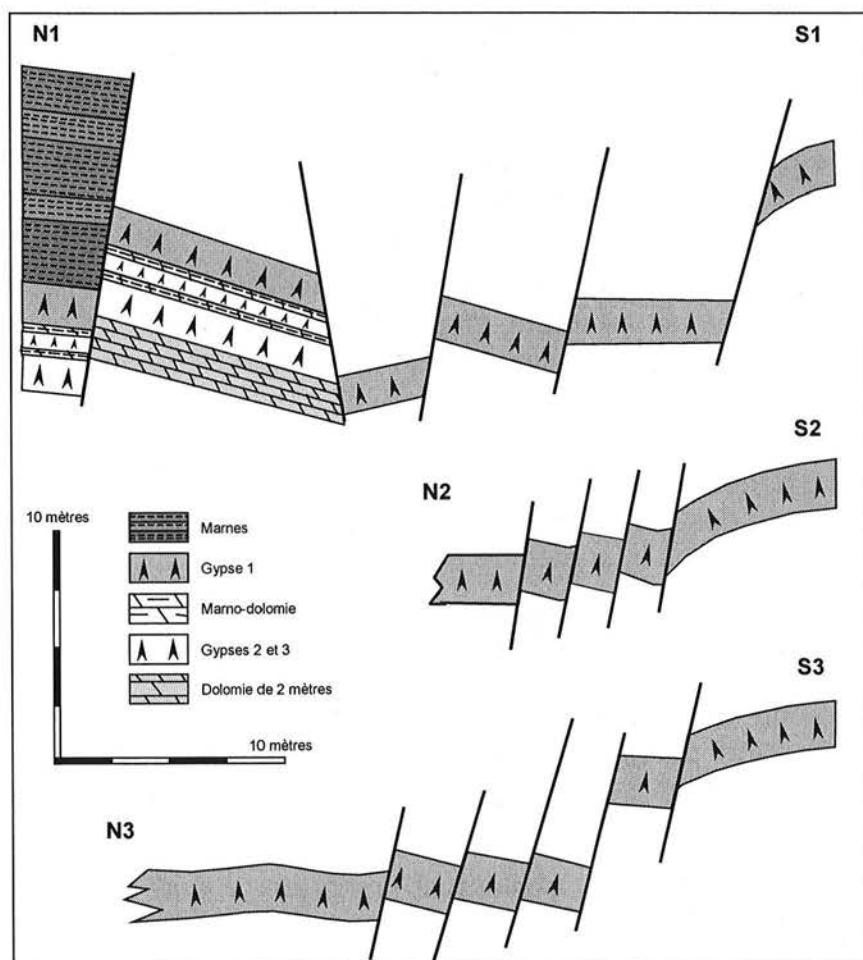


Figure 3.13 - Grozon – Coupes géologiques locales où les niveaux de gypse sont identifiés (d'après Kaill, 1977). La coupe N2-S2 se situe à l'ouest de la coupe N1-S1 et la coupe N3-S3 est à l'ouest de la coupe N2-S2. La distance entre les coupes est d'environ 50 mètres.

3.3.2- Les caractéristiques de l'exploitation

L'exploitation du gisement de gypse de Grozon est également souterraine. L'ensemble du site a actuellement une superficie d'environ 300 hectares. C'est la méthode des chambres et piliers abandonnés qui est utilisée. Les piliers mesurent environ 6 mètres par 6 mètres et ils font une hauteur maximale de 2,5 mètres environ. Le taux de défruitements est compris entre 75 et 78%. Cependant, ce schéma d'exploitation a varié à certaines époques et par exemple, pour de très vieux travaux (les années 1920), le taux de défruitements est supérieur à 80%. Le recouvrement de cette exploitation est compris entre 20 et 50 mètres.

Le schéma d'exploitation est le suivant :

- Une campagne de prospection est entreprise. Elle permet de faire une description géométrique de la future zone qui sera exploitée et d'en déterminer la pureté. Cette étape est indispensable étant donné les nombreuses failles et les différences de pureté. Le banc de gypse est choisi (banc 1 ou 3) et des galeries dites « préparatoires » sont excavées.
- Quand il s'agit du banc 3, la marne au toit est systématiquement « purgée » : son adhérence est très faible et sa chute serait inévitable dans une très bref délai.
- Dans une zone où les galeries préparatoires ont déjà été creusées, deux à trois fronts de taille sont exploités chaque jour sur une profondeur de 2 à 3 mètres.

Cette carrière souterraine présente des quartiers d'âges d'exploitation très différents : des quartiers encore accessibles datent de la fin du XIX^{ème} siècle. La technique d'exploitation est restée la même durant plus d'un siècle même si d'anciens quartiers présentent deux niveaux d'extraction. La superposition des piliers n'est pas toujours systématique. La stabilité des vieux travaux est devenue précaire avec le temps.

La carrière présente des instabilités plus ou moins importantes selon l'âge d'exploitation des quartiers. Le quartier actuellement exploité montre des piliers en parfait état, à l'inverse des quartiers d'âge d'exploitation ancien qui sont le siège de divers désordres de grande ampleur :

- Des soufflages de mur d'une hauteur d'ordre métrique peuvent complètement obstruer les galeries supérieures (Figure 3.14). Ils sont présents dans des secteurs situés à proximité des principales failles transverses au gisement ayant engendré la dissolution de la couche inférieure de gypse.
- Des soufflages d'intercalaires peuvent également être observés dans certains secteurs de travaux superposés (Figure 3.15).
- Un grand nombre de cloches d'éboulement est présent dans les quartiers anciens (Figure 3.16). Une partie de ces cloches a d'ailleurs donné naissance à des entonnoirs de fontis en surface, principalement en bordure de coteau, là où la planche de gypse laissée au toit était la plus faible.
- Les écaillages de piliers sont également nombreux (Figure 3.17). Ce phénomène est particulièrement spectaculaire dans certains secteurs de travaux exploités en couche 3. Les piliers présentent en leur sommet une couche de marnes sensible au fluage.

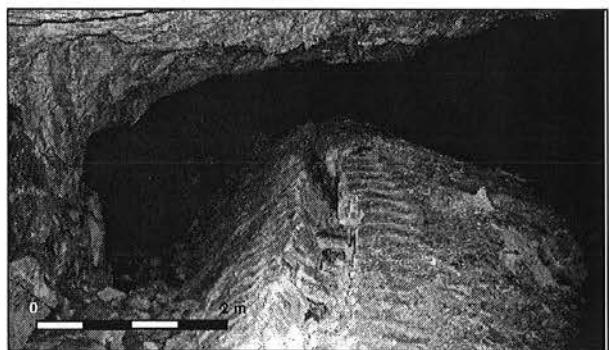


Figure 3.14 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Soufflage de mur



Figure 3.15 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Soufflage d'intercalaire

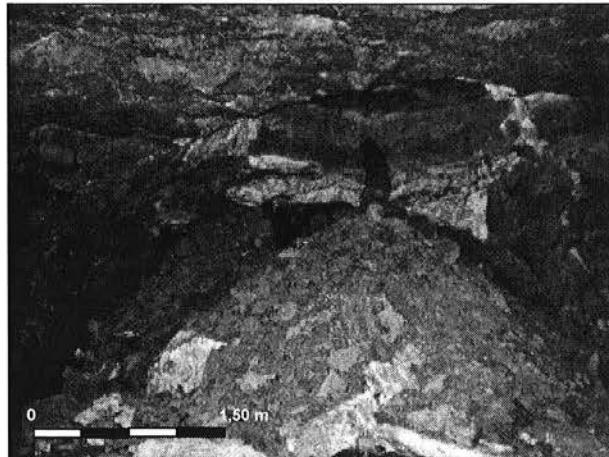


Figure 3.16 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Cloche d'éboulement

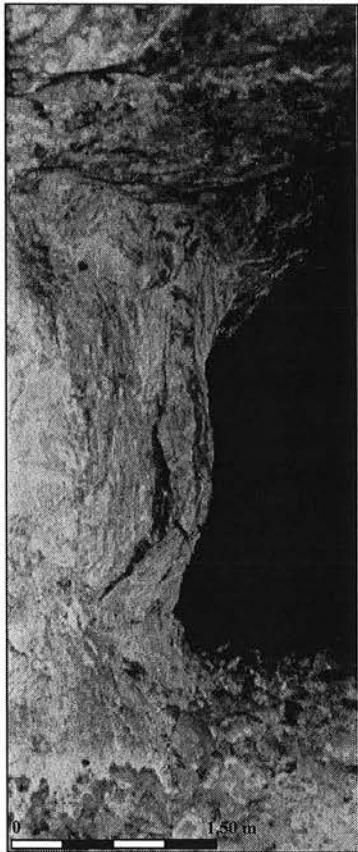


Figure 3.17 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Ecaillage de pilier

3.4- CONCLUSION

Par rapport aux différentes formations gypsifères présentes en France, le gypse d'âge triasique (Grozon) et le gypse éocène (Livry Gargan) sont représentatifs des deux principaux types de gisements gypseux.

Néanmoins, ces deux types de gisements sont totalement différents dans plusieurs domaines, que ce soit leur puissance ou bien leur contexte tectonique. Afin de pouvoir les comparer, le tableau 3.1 synthétise les différentes caractéristiques des deux sites.

Tableau 3.1 - Caractéristiques générales des deux types de gisement

	LIVRY GARGAN	GROZON
Localisation géographique	Région parisienne	Jura
Type d'exploitation	Chambre et pilier	Chambre et pilier (1 ou 2 niveaux)
Stratigraphie	Eocène	Keuper supérieur
Contexte sédimentaire	Tabulaire	Orogénique (failles, antiformes)
Aquifère	Nappe libre au-dessus du gypse	Eau d'infiltration
Puissance du gypse	4 niveaux (20 + 6 + 4 + 1 m)	3 niveaux (2 + 1 + 2 m)
Nature du gypse	Saccharoïde ; pureté ≈ 100%	Microcristallin ; pureté : 5 à 100%
Remblayage	OUI (travaux récents)	NON
Recouvrement	50 mètres de marno-calcaires	20 à 50 mètres de marno-calcaires
Taux de défruitement	78%	75% à plus de 80%

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer les différents désordres observés sur les sites de la carrière de Livry Gargan et de Grozon, mais ils ne seront pas tous étudiés. Nous nous intéresserons dans les chapitres suivants :

- au vieillissement du matériau gypse dans les deux carrières ;
- aux caractéristiques physico-mécaniques et au comportement mécanique différent des deux gypses en tenant compte de deux paramètres indépendants du matériau : l'hygrométrie de l'air et l'âge d'exploitation des échantillons.

CHAPITRE 4

VIEILLISSEMENT ET CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE

4.1- INTRODUCTION

Le terme vieillissement désigne l'altération des roches en milieu anthropisé. Il est utilisé en particulier dans le cadre des ouvrages souterrains pour désigner l'ensemble des modifications minéralogiques et physiques de la roche en fonction du temps, conduisant à une dégradation des propriétés hydrauliques ou mécaniques.

L'altération est la modification des propriétés physico-chimiques des minéraux et donc des roches, par les agents atmosphériques, par les eaux souterraines, par les eaux thermales et par les micro-organismes (Winkler, 1975 ; Foucault et Raoult, 1995).

L'altération d'une roche dépend en particulier du climat, de la température des eaux, de la nature des roches et de leur degré de fracturation ; elle a généralement pour effet de rendre les roches moins cohérentes ce qui facilite leur désintégration et leur rupture (Kasim et Shakoor, 1996 ; Gupta et Seshagiri Rao, 2000 ; Massuda, 2001). Elle s'illustre par des modifications macroscopiques telles que l'apparition de fissures, microfractures et macroporosité mais également par des dépôts dus à des transformations chimiques (Norbury et al., 1995 ; Chigira et Oyama, 1999 ; Oyama et Chigira, 1999). L'altération des roches (calcaires, tuffeau, grés, roches cristallines) par dissolution avec ou sans néoformation de minéraux, a été étudié par de nombreux auteurs (Farran et Thenoz, 1965 ; Auger, 1991 ; Furlan et Girardet, 1991 ; Chêne et al. 1999 ; Chigira et Oyama, 1999; Gupta et Seshagiri Rao, 2000).

Les causes de l'altération peuvent être classées en deux grandes catégories (Javey, 1972), qui regroupent, d'une part les causes externes, et d'autre part, les causes internes.

- Les causes dites « externes » caractérisent le milieu d'altération et se manifestent quelle que soit la nature de la roche. Ce sont des processus physiques liés surtout aux variations de température et d'humidité de l'air qui aboutissent à la désagrégation mécanique plus ou moins poussée des roches. Les processus chimiques se traduisent par une attaque des minéraux due à des solutions ou à des gaz plus ou moins agressifs. L'altération des roches est encore accentuée dans certains cas par des facteurs biologiques qui agissent soit directement par une action mécanique soit indirectement par une augmentation de l'agressivité des solutions ou à cause d'une dégradation de la matière organique présente dans les roches (Fusey et Hyvert, 1964 ; Winkler, 1966 ; Pochan et Jaton, 1967 ; Fassina, 1995 ; Gomez-Alarcon et al., 1995 ; Chen et al., 2000 ; Grgic et al., 2002 ; Delatioux et al., 2001 ; Ascaso et al., 2002).
- Les causes dites « internes » sont liées aux caractéristiques intrinsèques de la roche et déterminent leur altérabilité. Avec des conditions physico-chimiques identiques du milieu, les roches ont une résistance aux agents d'altération qui dépend de caractéristiques propres comme la composition chimique et minérale, la structure et la texture, la porosité, la perméabilité (Ramana et Gogte, 1982 ; Hasley et al., 1998 ; Gokceoglu et al, 2000 ; Jeannette, 2000 ; Canton et al., 2001 ; Inigo et Vicente-Tavera, 2001).

Dans le cadre de l'étude du vieillissement des ouvrages souterrains non revêtus, tous les facteurs externes ne sont pas pris en compte du fait des conditions particulières de cet environnement. Les paramètres essentiels sont l'eau sous forme liquide et sous forme vapeur. L'atmosphère minière joue un rôle important pour certaines roches qui se trouvent placées en milieu oxydant. Les facteurs biologiques peuvent être cités dans des cas très précis comme l'activité bactérienne conduisant à la dégradation des matières minérales mais également organiques présentes dans le minerai de fer de Lorraine

(Grgic et al., 2002). Les actions du gel et des cycles gel-dégel intervenant uniquement près des entrées de galerie sont bien évidemment écartées.

Cette première partie est suivie de la caractérisation physico-mécanique du gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon.

La caractérisation a été réalisée sur des échantillons de gypse prélevés sur les bords des piliers et provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents. Ce prélèvement a été réalisé à l'aide d'une barre à mine. Sur les blocs, l'axe vertical du pilier a été systématiquement repéré. Cette caractérisation a été complétée par une seconde avec des échantillons prélevés le long de sondages horizontaux dirigés vers le cœur des piliers. Afin de prélever un gypse comparable d'un point de vue stratigraphique et donc lithologique, les prélèvements des blocs sont à la même hauteur par rapport au mur des galeries. Cette condition n'a pas été respectée pour le gypse de Livry Gargan car la puissance du banc est de l'ordre de 20 mètres et un niveau repère est difficilement observable.

La caractérisation en fonction de l'âge d'exploitation a pour but de mettre en évidence d'éventuelles différences entre un gypse sain (provenant d'un quartier en cours d'exploitation et du cœur d'un pilier) et un gypse vieilli (provenant d'un quartier anciennement exploité et du bord d'un pilier).

Dans chacune des deux carrières, plusieurs quartiers d'âges d'exploitation différents ont été retenus pour effectuer les deux types de prélèvements :

- Pour la carrière de Livry Gargan, trois quartiers ont été retenus : le plus ancien a été exploité dans les années 1900, le deuxième date de 1950 et le troisième est actuellement en cours d'exploitation.
- Pour la carrière de Grozon, trois quartiers ont été également retenus : le plus ancien a été exploité dans les années 1920, le deuxième date de 1970 et le troisième est actuellement en cours d'exploitation.

Ce chapitre s'articule de la manière suivante : après l'étude du vieillissement au sens strict, les résultats de la caractérisation physique et mécanique du gypse sain et vieilli provenant des deux carrières sont présentés et interprétés. L'influence du vieillissement sur les paramètres physico-mécaniques est également présentée. Enfin, l'influence de l'hygrométrie sur la résistance du gypse est abordée à la fin de ce chapitre.

4.2- LE VIEILLISSEMENT

Une étude de la fracturation de piliers de gypse d'âges d'exploitation différents a été réalisée avant d'étudier et d'expliquer le vieillissement du gypse. Dans chacune de deux carrières, deux sondages horizontaux ont été effectués jusqu'au cœur de deux piliers.

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées sur des échantillons prélevés tous les dix ou quinze centimètres sur toute la longueur des sondages. Ces observations doivent permettre de décrire la structure cristalline des deux gypses ainsi que leur dégradation. Cette technique d'observation a été utilisée par Viles et Moses (1998) pour décrire des figures de dissolution causées artificiellement par une vaporisation d'acide sur des blocs de calcite et marbre. Aires-Baros et al. (1975) ont également observé au MEB des échantillons de roches ignées ayant subi des cycles d'humidification/séchage. Leurs observations avaient été complétées par des mesures de masse afin d'essayer de mettre en évidence les conséquences physiques du vieillissement.

4.2.1- Etude de la fracturation

Dans chacune des deux carrières, les deux sondages horizontaux réalisés jusqu'au cœur de deux piliers ont un âge d'exploitation différent. Leur répartition est la suivante :

- Pour la carrière de Livry Gargan : le quartier d'âge d'exploitation le plus ancien étudié, a été exploité dans les années 1950 et le second est actuellement en cours d'exploitation. Les deux piliers concernés par les sondages appartiennent au banc de gypse de la Première Masse (Figure 3.2 du chapitre « Livry Gargan et Grozon : deux gisements différents). Les deux sondages n'ont pas été effectués à la même hauteur par rapport au mur de l'exploitation. Des différences de texture peuvent être possibles.
- Pour la carrière de Grozon : le quartier d'âge d'exploitation le plus ancien étudié, a été exploité dans les années 1920, le second est actuellement en cours d'exploitation. Les deux piliers concernés par les sondages appartiennent au banc de gypse supérieur, Gypse 1 (Figure 3.10 du chapitre « Livry Gargan et Grozon : deux gisements différents). Les deux sondages ont été réalisés à la même hauteur par rapport au mur de la galerie.

Le gypse de Livry Gargan

Le sondage dans le pilier d'âge d'exploitation ancien de la carrière de Livry Gargan comporte des fissures et des fractures plus ou moins cicatrisées. La cristallisation dans ces fractures est de nature gypseuse. Certaines fractures ou fissures naturelles et occasionnées lors de l'exploitation semblent donc se cicatriser dans le temps. Ceci ressort bien sur la figure 4.1, montrant la variation de l'indice d'espacement entre fractures ouvertes (DS) (Bieniawski, 1976, 1984). Cet indice DS a été déterminé sur chaque passe de sondage (50 cm). Le sondage réalisé dans le pilier le plus ancien présente des valeurs de DS plus fortes que celui du pilier le plus récent.

L'orientation des fissures et fractures a été relevée sur les deux sondages. Une première famille est orientée perpendiculairement à l'axe du sondage, elle est majoritaire et correspond à une fracturation concentrique du pilier, qui induit le décollement d'écailles. La seconde famille est parallèle à l'axe du sondage et correspond à une fracturation radiale du pilier.

Le gypse de Grozon

De nombreuses fissures sont plus ou moins cicatrisées sur le sondage réalisé dans un pilier d'âge d'exploitation ancien de la carrière de Grozon. La cimentation, présente dans ces fissures, est de nature gypseuse. Certaines fractures ou fissures naturelles et occasionnées lors de l'exploitation semblent se cicatriser dans le temps. Ceci se traduit par un indice DS plus élevé dans le sondage réalisé dans le pilier le plus ancien (Figure 4.2).

Les fissures et fractures relevées sur les deux sondages sont orientées perpendiculairement à l'axe des sondages, elles correspondent à une fracturation concentrique des piliers, ce qui induit le décollement d'écailles. Quelques fractures, sont parallèles à l'axe des sondages, elles font parties de la fracturation radiale des piliers qui semble beaucoup moins marquée.

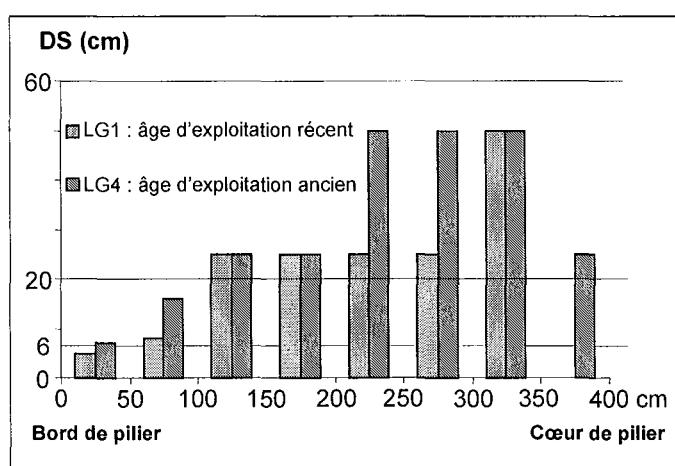


Figure 4.1 - Livry Gargan – Evolution de l'indice DS dans les deux sondages

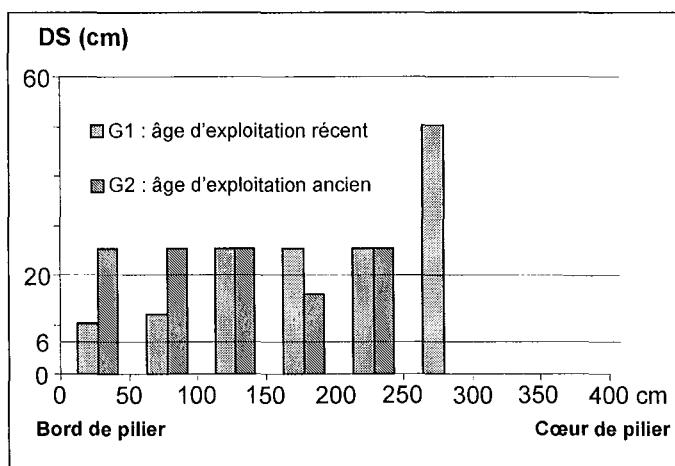


Figure 4.2 - Grozon – Evolution de l'indice DS dans les deux sondages

D'une manière générale, les observations de la fracturation suggèrent une cicatrisation de nature gypseuse qui est fonction du temps. Dans le processus de dégradation chimique du gypse des piliers, ces fractures dues à l'exploitation peuvent jouer un rôle important, car elles permettent une circulation plus aisée de l'humidité de l'air (aérage minier) et d'éventuelles infiltrations d'eau de surface.

4.2.2- Observations au microscope électronique à balayage

Le gypse de Livry Gargan

Le gypse de Livry Gargan est saccharoïde, les cristaux ont une taille généralement supérieure à un millimètre. Un litage de la granularité, d'une épaisseur centimétrique, est à noter. Des passées avec des cristaux de gypse majoritairement millimétriques alternent avec des passées nettement plus fines.

Les échantillons observés le long du sondage présentent des différences. Au bord du pilier, les cristaux de gypse sont corrodés du fait d'une dissolution marquée de leurs faces et de leurs extrémités. Des figures comparables ont été déjà décrites par Deletie et al. (1990) et Robinet (1990) dans du gypse à l'affleurement (dissolution naturelle). Aucune néoformation de minéraux n'a été observée.

Pour le quartier d'âge d'exploitation récent, les traces de dissolution observées sur les cristaux disparaissent au-delà de 1,5 mètre de profondeur vers le cœur du pilier (Figure 4.3). Les cristaux observés au cœur du pilier sont automorphes.

Pour le quartier d'âge d'exploitation ancien, les traces de dissolution sont observées jusqu'au cœur du pilier malgré la présence de quelques cristaux automorphes (Figure 4.4).

Le gypse de Grozon

Les cristaux du gypse provenant de la carrière de Grozon ont une taille infra-millimétrique et ne présentent pas d'orientation particulière. Ce gypse est donc microcristallin. Des différences entre les cristaux de gypse provenant des deux piliers d'âges d'exploitation différents ont été mises en évidence. Dans le quartier d'âge d'exploitation récent, de nombreux cristaux sont automorphes, quelques-uns présentent des traces de dissolution jusqu'aux premiers cinquante centimètres de profondeur vers le cœur du pilier. Au-delà de cette profondeur, elles disparaissent (Figure 4.5).

Les cristaux des échantillons prélevés dans le quartier d'âge d'exploitation ancien présentent des traces de dissolution qui sont quantitativement plus importantes. Les cristaux sont corrodés et les traces de dissolution sont observables jusqu'à plus d'un mètre de profondeur (Figure 4.6).

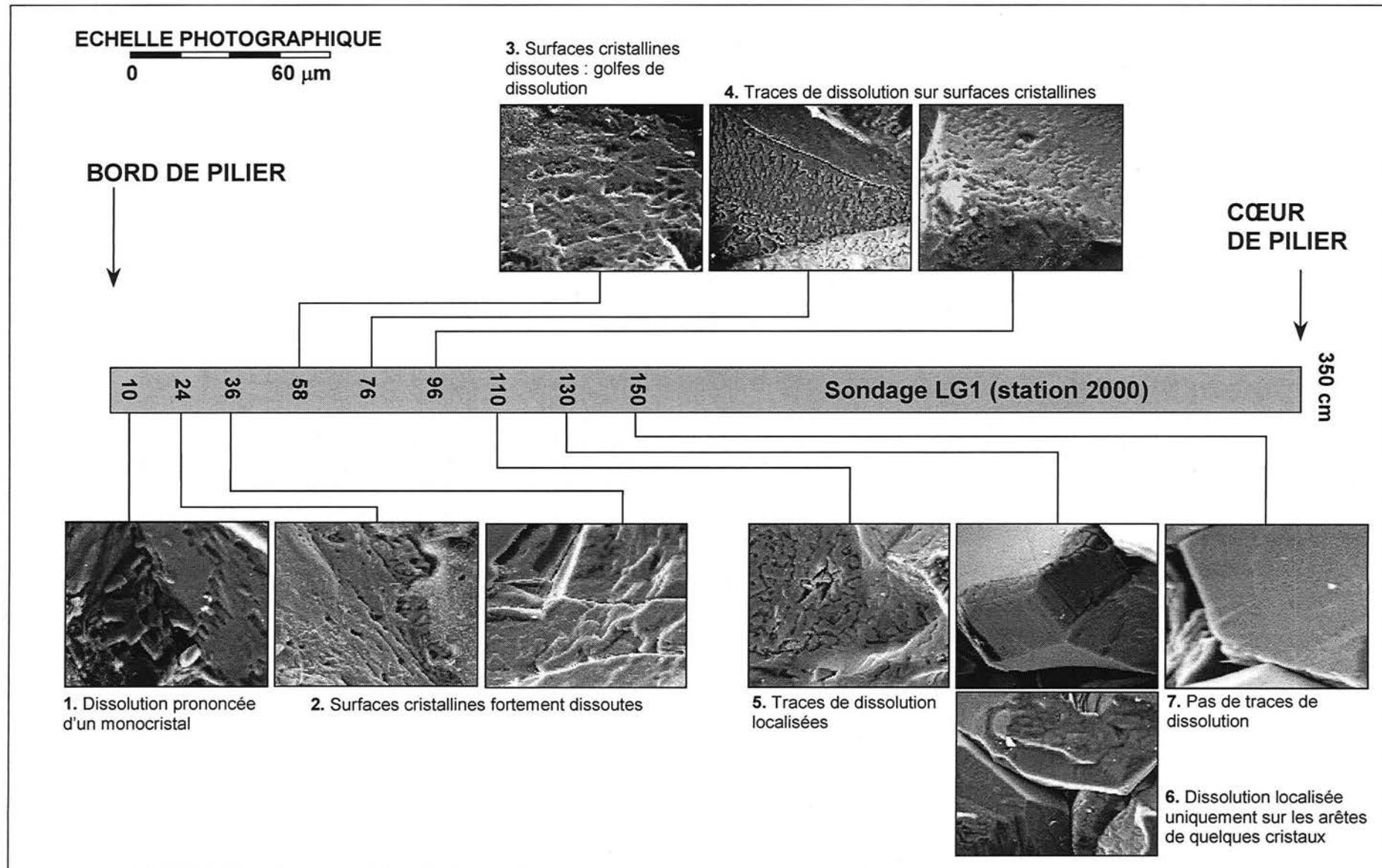


Figure 4.3 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier
(Grossissement : X500 ; les traces de dissolution disparaissent au-delà de 1,5 mètre vers le cœur du pilier ; synthèse de 40 photos environ)

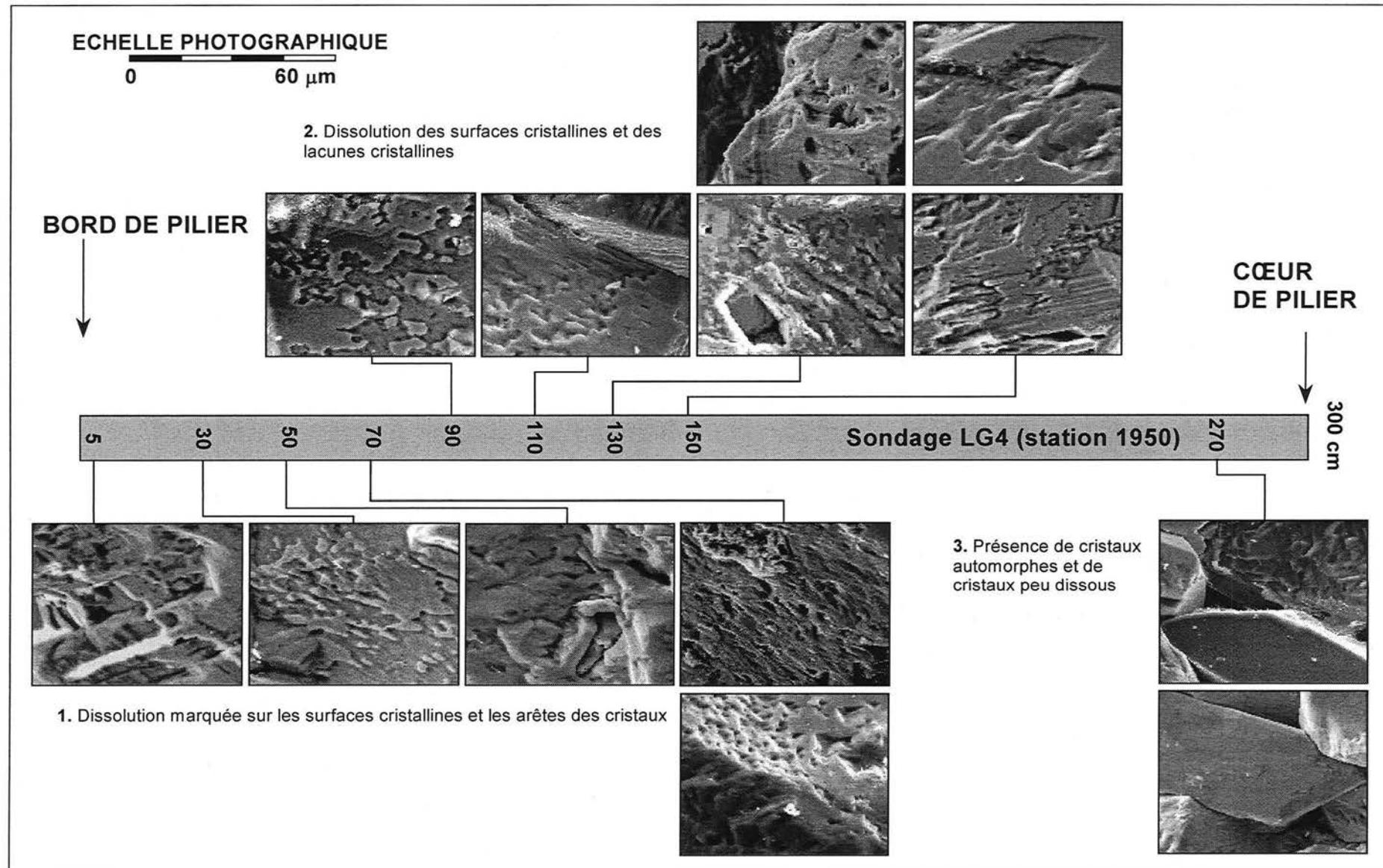


Figure 4.4 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier
(Grossissement : X500 ; les traces de dissolution apparentes jusqu'au cœur du pilier ; synthèse de 30 photos environ)

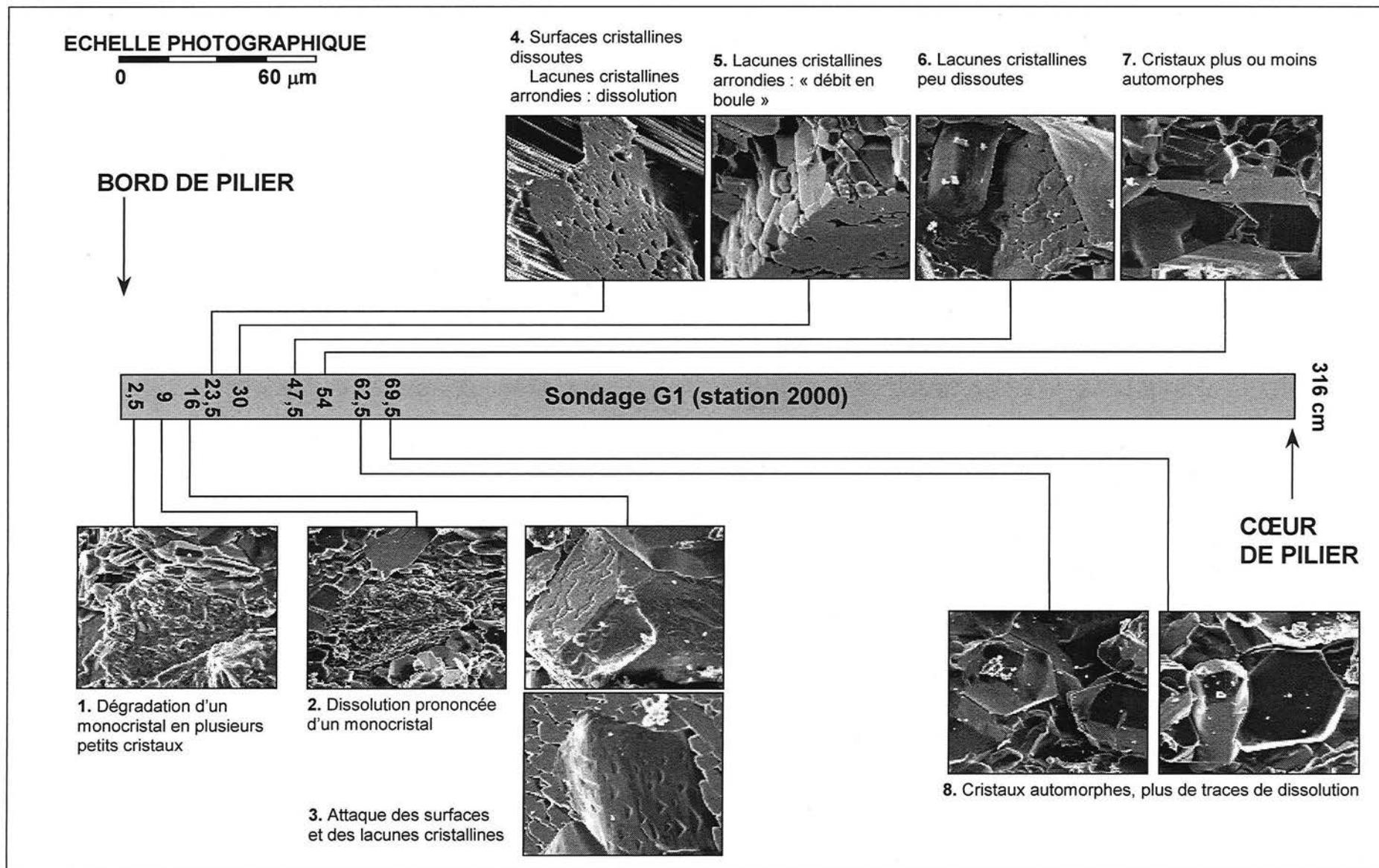


Figure 4.5 - Grozon – Age d'exploitation récent – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier
(Grossissement : X500 ; les traces de dissolution sur les premiers 50 cm et disparition progressive vers le cœur du pilier ; synthèse de 20 photos environ)

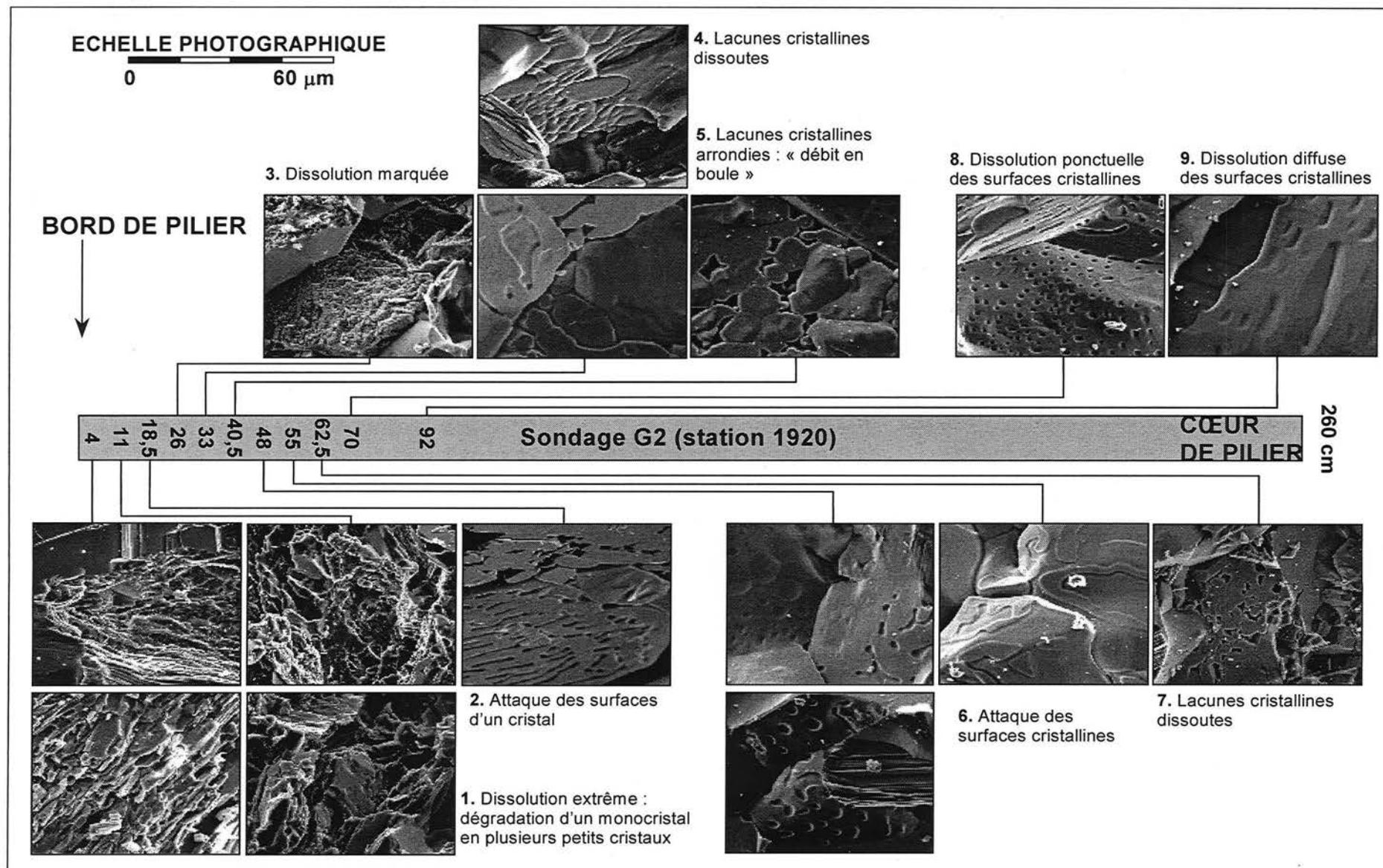


Figure 4.6 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Evolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord du pilier
(Grossissement : X500 ; les traces de dissolution sur le premier mètre et disparition progressive vers le cœur du pilier ; synthèse de 35 photos environ)

Finalement, les observations montrent que l'intensité de la dissolution du gypse décroît avec la distance, du parement vers le cœur du pilier. De plus, il semble que l'intensité de la dissolution décroisse plus rapidement dans les piliers de la carrière de Grozon que dans ceux de la carrière de Livry Gargan. Cette différence peut être expliquée par des différences texturales et structurales entre les piliers de gypse : ceux de Livry Gargan présentent une fracturation plus importante que ceux de Grozon.

La dissolution est due soit à l'humidité de l'air entretenue par l'aérage, soit aux arrivées des eaux superficielles (Grozon) ou de la nappe sus-jacente (Livry Gargan). Comme les dissolutions sont fonction de la distance au parement du pilier, c'est la première hypothèse qui sera retenue.

Ces dissolutions, fonction de la distance, dépendent du temps que met la vapeur d'eau à pénétrer dans le massif. Nous considérons qu'elles induisent un vieillissement de la roche.

L'étude des variations de paramètres physico-mécaniques devrait permettre de préciser le rôle de ces dissolutions. Ce point particulier est abordé dans la deuxième partie « Caractérisation physico-mécanique du gypse ».

4.3- CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE DU GYPSE SAIN ET VIEILLI

Ce deuxième point se décompose en trois parties : la première concerne la caractérisation physique, au sens large, du gypse des deux carrières. Après la description de la préparation des échantillons, les résultats sont présentés et discutés. La deuxième partie présente la caractérisation mécanique. La préparation des échantillons et le dispositif expérimental sont tout d'abord présentés. Les paramètres mesurés ou calculés sont développés et ils précèdent les résultats. Ces derniers sont interprétés et discutés. Enfin, l'influence de l'hygrométrie sur un paramètre particulier, la résistance du gypse en compression uniaxiale, est développée dans la troisième partie.

4.3.1- Caractérisation physique

4.3.1.1- Préparation des échantillons

Un usinage est nécessaire afin d'obtenir un certain nombre d'éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes sont obtenues par carottage avec un foret dont le diamètre est de 38 mm. Ce carottage a été effectué à l'eau. Les faces des éprouvettes cylindriques brutes ont été rectifiées pour obtenir un élancement 2. Comme pour le carottage, la rectification a été faite à l'eau.

Il est important de noter les difficultés rencontrées lors de l'usinage des éprouvettes de gypse à partir de blocs provenant des stations d'âge d'exploitation ancien. Ces blocs présentent des fissures parallèles à l'axe des piliers. Elles sont dues à l'écaillage des piliers. Pour les autres stations d'âge d'exploitation plus récent, aucun problème majeur d'usinage n'a été rencontré.

Afin de connaître les caractéristiques géométriques précises des éprouvettes, des mesures au pied à coulisse (Figure 4.7) sont faites systématiquement.

Toutes les éprouvettes sont passées à l'étuve à 50 °C car le gypse est un matériau sensible à la chaleur. Elles restent dans l'étuve pendant au moins 96 heures.

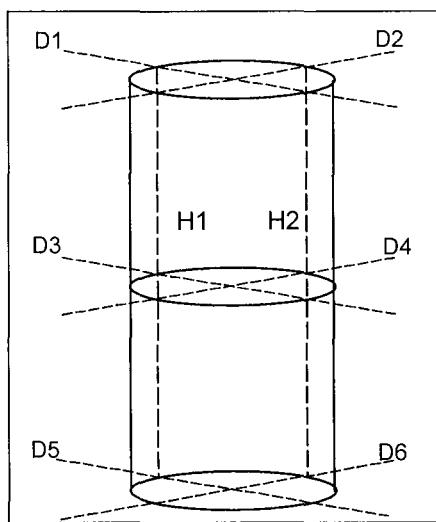


Figure 4.7 - Emplacement des mesures effectuées sur une éprouvette

4.3.1.2- Résultats de la caractérisation physique

La détermination des différents paramètres physiques est présentée dans l'annexe 4.1. Elle a été généralement établie à partir d'une norme AFNOR. Les valeurs des paramètres physiques des échantillons de gypse prélevés à partir des blocs détachés à la barre à

mine sur le bord des piliers dans la carrière de Livry Gargan sont présentées dans le tableau 4.1. Celles de la carrière de Grozon sont présentées dans le tableau 4.3.

Les paramètres physiques moyens des échantillons de gypse provenant des blocs détachés du bord des piliers de la carrière de Livry Gargan et de Grozon peuvent être calculés (Tableau 4.5). Pour la carrière de Livry Gargan, les blocs ont été prélevés à des hauteurs différentes par rapport au mur de la galerie. Une comparaison de ces paramètres entre les différentes stations n'est donc pas possible. A l'inverse, les paramètres déterminés pour le gypse de la carrière de Grozon pourront être comparés entre les différentes stations et donc en fonction de l'âge d'exploitation. Les blocs provenant des différentes stations ont été prélevés à la même hauteur.

Les valeurs des paramètres physiques des échantillons de gypse prélevés le long des sondages horizontaux réalisés jusqu'au cœur des piliers de la carrière de Livry Gargan sont présentées dans le tableau 4.2. Celles des sondages de la carrière de Grozon sont présentées dans le tableau 4.4. Les échantillons provenant des sondages réalisés dans les deux carrières ont été prélevés à différentes profondeurs vers le cœur des piliers. Le but de ce type de prélèvement est de montrer une éventuelle variation des paramètres entre le bord et le cœur des piliers et de les corrélérer avec le vieillissement du gypse.

Tableau 4.1 - Livry Gargan – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des blocs

(ρ_s : masse volumique des grains ; ρ_d : masse volumique sèche ; n_{Hg} : porosité au Mercure ; n_{tot} : porosité totale ; n_w : porosité accessible à l'eau ; W : teneur en eau naturelle pondérale ; Sr : degré de saturation ; K_N : perméabilité à l'azote ; V_p : vitesse des ondes ultrasonores P ; V_s : vitesse des ondes ultrasonores S ; E_{dyn} et v_{dyn} : module de Young et coefficient de Poisson dynamiques)

	échantillons	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_d (g.cm ⁻³)	teneur en gypse (%)	n_{Hg} (%)	n_{tot} (%)	n_w (%)	W (%)	Sr (%)	K_N (m ²)	V_p (m.s ⁻¹)	V_s (m.s ⁻¹)	E_{dyn} (GPa)	v_{dyn}
STATION 1 (actuel)	S1B2-1	2,36	95	5	6,8 6,4 5,9 5,9 5,9 5,9 6,4 5,5 5,9 6,4 5,5 5,9 6,4 5,5 5,9	46 49 52 52 52 49 57 52 49 57 49 52 49 57 49	1,4	-	-	2650 2700 3150 2950 3300 2950 3400 3100 2700 3400 2650 2800 2750 2950	1500 1550 1850 1750 1900 1750 1950 1800 1650 1950 1500 1600 1550 1800	13,4 14,2 20,0 17,8 21,3 17,8 22,5 19,0 15,4 22,5 13,4 15,2 14,4 18,4	0,26 0,25 0,24 0,23 0,25 0,23 0,25 0,25 0,20 0,25 0,26 0,26 0,27 0,20	
	S1B2-2													
	S1B2-3													
	S1B2-4													
	S1B2-5													
	S1B2-6													
	S1B2-7													
	S1B2-8													
	S1B2-9													
	S1B2-10													
	S1B2-11													
	S1B2-12													
	S1B2-13													
	S1B2-14													
STATION 2 (1950)	S2B2B-2	2,33	100	-	11,0 11,1 11,0 11,0 11,8 11,3 10,1 11,3 11,1 11,2 11,2 11,2 11,2 11,2 11,3 9,6 9,2 9,6 8,7 8,3 9,1 8,9 9,1 9,0 9,8	47 47 47 47 44 46 51 46 46 46 46 46 46 46 46 46 55 58 55 61 64 58 60 58 59 53	2,5	-	3500 3400 3400 3450 3250 3250 3300 3250 3300 3300 3350 3350 3250 3250 3450 3250 3250 3250 3300 3250 3300 3350 3250	1950 1950 1900 1950 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1950 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900 1900	22,9 22,5 21,7 22,7 21,1 21,1 21,3 21,1 21,1 21,3 21,5 21,5 21,1 21,1 22,7 21,1 21,1 21,1 21,3 21,3 21,3 21,1 21,1 21,3 21,1 21,1	0,27 0,25 0,27 0,27 0,24 0,24 0,25 0,24 0,25 0,25 0,26 0,26 0,27 0,24 0,24 0,27 0,24 0,24 0,24 0,25 0,25 0,25 0,26 0,26 0,27 0,27		
	S2B2B-3													
	S2B2B-4													
	S2B2B-5													
	S2B2B-6													
	S2B2B-7													
	S2B2B-8													
	S2B2B-9													
	S2B2B-10													
	S2B2B-11													
	S2B2B-12													
	S2B2B-13													
	S2B2B-14													
	S2B2B-15													
	S2B2B-16													
	S2B2B-17													
	S2B2B-18													
	S2B2B-19													
	S2B2B-20													
	S2B2B-21													
	S2B2B-22													
	S2B2B-23													
	S2B2B-24													
STATION 3 (1900)	S3B2T-1	2,33	100	12	11,6 12,9 10,7 12,4 12,4 12,0 11,2 11,6 11,2 11,2 12,0 11,2 11,2 11,2 12,0	12 11 14 11 11 3550 13 12 13 13 12 13 14 12	0,7	-	3600 3700 3750 3650 3550 2050 3700 3750 3700 3700 2100 3700 3750 3750 3650	2000 2050 2050 2000 2000 25,5 2050 2100 2100 2100 2100 26,5 2100 2100 2050	24,1 25,4 25,5 24,3 23,9 0,28 25,4 26,5 26,5 26,5 26,3 0,27 26,5 26,5 25,2	0,28 0,28 0,29 0,29 0,27 0,25 0,28 0,27 0,27 0,27 0,27 0,26 0,26 0,26 0,27		
	S3B2T-2													
	S3B2T-3													
	S3B2T-4													
	S3B2T-5													
	S3B2T-6													
	S3B2T-7													
	S3B2T-8													
	S3B2T-9													
	S3B2T-10													
	S3B2T-11													
	S3B2T-12													
	S3B2T-13													
	S3B2T-14													

Tableau 4.2 - Livry Gargan – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des sondages
(même légende que le tableau 4.1)

	échantillons	Z (m)	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_d (g.cm ⁻³)	teneur en gypse (%)	$n_{(Hg)}$ (%)	$n_{tot.}$ (%)	n_w (%)	W (%)	Sr (%)	K_N (m ²)	V_p (m.s ⁻¹)	V_s (m.s ⁻¹)	$E_{dyn.}$ (GPa)	$v_{dyn.}$
STATION 1 (actuel)	SC1-1	0,05	2,33	2,25	100	-	3,4	2,9	-	-	1,80E-16	4400	2300	32,3	0,31
	SC1-2	0,68	2,32	2,27			2,2	2,0			2,30E-17	4550	2300	32,7	0,33
	SC1-3	0,96	2,32	2,26			2,6	2,3			3,80E-17	4400	2250	31,2	0,32
	SC1-4	1,10	2,33	2,26			3,0	2,1			7,50E-17	4500	2300	32,6	0,32
	SC1-5	1,30	2,33	2,27			2,6	2,2			1,20E-17	4550	2300	32,7	0,33
	SC1-7	2,35	2,33	2,27			2,0	1,6			6,60E-17	4750	2400	35,7	0,33
	SC1-8	2,90	2,33	2,27			2,0	1,6			6,50E-17	4750	2400	35,7	0,33
	SC4-2	0,40	2,33	2,22		100	4,9	4,7	-	-	2,50E-16	3832	2091	26,3	0,29
STATION 2 (1950)	SC4-3	0,68	2,33	2,21			5,2	5,0			3,30E-16	3700	2050	25,0	0,28
	SC4-4	0,85	2,34	2,21			5,6	5,4			3,00E-16	3800	2100	26,3	0,28
	SC4-5	1,30	2,33	2,20			5,6	5,4			2,20E-16	3750	2100	26,1	0,27
	SC4-6	1,64	2,33	2,21			5,2	5,0			2,40E-16	3850	2100	26,5	0,29
	SC4-7	2,01	2,33	2,21			5,2	4,9			2,80E-16	3700	2100	25,9	0,26
	SC4-8	2,40	2,33	2,21			5,2	4,8			1,30E-16	4050	2150	28,1	0,30
	SC4-9	2,96	2,33	2,21			5,2	4,3			2,00E-16	4100	2200	29,3	0,30

Tableau 4.3 - Grozon – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.1 ; les échantillons en italiques n'ont pas été retenus)

	échantillons	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_d (g.cm ⁻³)	teneur en gypse (%)	$n_{(Hg)}$ (%)	$n_{tot.}$ (%)	n_w (%)	W (%)	Sr (%)	K_N (m ²)	V_p (m.s ⁻¹)	V_s (m.s ⁻¹)	$E_{dyn.}$ (GPa)	$v_{dyn.}$
STATION 4 (actuel)	S4P5-1	2,34	2,29	100	<1	2,1	16	-	<1	4350	2400	34,0	0,28	
	S4P5-2		2,29			2,1	16				4600	2300	31,7	0,34
	S4P5-3		2,30			1,7	20				4600	2350	34,0	0,32
	S4P5-4		2,28			2,1	16				4800	2450	36,0	0,33
	S4P5-5		2,28			2,1	16				4800	2450	36,0	0,33
	S4P5-6		2,31			1,3	27				4950	2350	33,9	0,36
	S4P5-7		2,29			2,1	16				4850	2250	32,2	0,36
	S4P5-8		2,25			3,8	9				4600	2400	33,7	0,31
	S4P5-9		2,30			1,7	20				4900	2450	37,3	0,33
	S4P5-10		2,30			1,7	20				4950	2500	37,8	0,33
	S4P5-11		2,30			1,7	20				4950	2450	37,3	0,33
	S4P5-12		2,30			1,7	20				4800	2450	35,9	0,33
	S4P5-14		2,28			5,0	7				4600	2350	35,5	0,32
STATION 3 (1970)	S4P1E1	2,90	15	-	<1	10	45	-	<1	échantillons non retenus				
	S4P1E2													
	S4P2E1													
	S4P2E2													
	S4P2E3													
	S4P3E2													
	S4P3E3													
	S4P4E2													
	S3P1E2-2	2,33	2,29	100	<1	1,7	20	-	<1	5000	2450	37,2	0,34	
	S3P1E2-2		2,29			1,7	20				5000	2500	37,9	0,34
	S3P2E1-1		2,31			0,9	40				5000	2450	37,8	0,34
	S3P2E1-2		2,31			0,9	40				5000	2500	37,9	0,34
	S3P2E1-4		2,30			1,3	27				5000	2500	38,2	0,34
	S3P2E1-6		2,31			0,9	40				5000	2500	38,1	0,34
	S3P2E2-1		2,30			1,3	27				5000	2500	38,0	0,34
	S3P4E1-1		2,31			0,9	40				4900	2450	37,3	0,33
STATION 1/2 (1920)	S3P4E2	2,32	100	<1	<1	54	54	-	<1	échantillons non retenus				
	S3P4E3													
	S3P5E2													
	S3P5E3													
	S1P1E3-3	2,34	95	<1	<1	0,4	54	-	<1	5000	2450	38,0	0,34	
	S1P2E1-1													
	S1P3E2-1													
	S1P3E2-2													
	S1P3E2-3													
	S1P3E2-4													
	S1P3E2-5													
	S1P4E1-1													
	S2P1E3-2													
	S2P1E3-4													
	S2P1E3-5													
	S2P1E3-6													
	S2P1E3-7													
	S2P1E3-11													
	S2P1E3-12													
	S2P1E3-13													
	S2P1E3-14													
	S2P1E3-15													
	S2P2E2-1													

Tableau 4.4 - Grozon – Paramètres physiques des échantillons de gypse provenant des sondages
(même légende que le tableau 4.1)

	échantillons	Z (m)	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_d (g.cm ⁻³)	teneur en gypse (%)	$\eta_{(H_2)}$ (%)	n _{tot.} (%)	n _w (%)	W (%)	Sr (%)	K _N (m ²)	V _p (m.s ⁻¹)	V _s (m.s ⁻¹)	E _{dyn.} (GPa)	v _{dyn.}
STATION 4 (actuel)	22-11	0,23	2,33	2,29	100	1.7 2.1 1.3 1.3 1.7 0.9 2.1 2.1 1.7 2.1	0.62 0.53 0.50 0.36 0.37 0.36 0.34 0.47 0.18 0.18	4.08E-18 6.25E-18 3.09E-18 3.26E-18 3.32E-18 2.15E-18 1.83E-18 1.95E-18 1.305E-18 6.53E-18	5150 5250 5200 5150 5200 5250 5150 5150 5150 5100	2500 2500 2500 2500 2450 2550 2500 2500 2500 2450	39,2 39,6 39,5 39,4 38,1 41,1 39,5 39,5 39,5 38,1	0,35 0,35 0,35 0,35 0,36 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35			
	22-12	0,49	2,34	2,29											
	22-13	0,79	2,34	2,31											
	22-14	1,09	2,34	2,31											
	22-15	1,39	2,34	2,30											
	22-16	1,69	2,35	2,33											
	22-17	1,99	2,35	2,30											
	22-18	2,29	2,35	2,30											
	22-19	2,59	2,35	2,31											
	22-110	2,89	2,35	2,30											
STATION 2 (1920)	12-11	0,12	2,32	2,30	100	0.86 1.72 0.43 0.86 1.29 1.29 1.28 0.85 1.29	0.27 0.24 0.19 0.12 0.20 0.18 0.16 0.17 0.17	6.80E-18 1.62E-17 6.64E-18 2.81E-18 3.42E-18 3.27E-18 8.56E-18 2.35E-18 2.30E-18	5300 5250 5300 5250 5250 5250 5250 5250 5250	2575 2550 2550 2550 2550 2550 2550 2550 2550	41,6 40,8 40,7 40,8 40,8 39,4 40,9 41,1 40,6	0,35 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35 0,35			
	12-12	0,32	2,33	2,29											
	12-13	0,62	2,32	2,31											
	12-14	0,92	2,33	2,31											
	12-15	1,22	2,33	2,30											
	12-16	1,52	2,33	2,30											
	12-17	1,82	2,34	2,31											
	12-18	2,12	2,35	2,33											
	12-19	2,42	2,32	2,29											

Tableau 4.5 - Moyennes et écarts-types des différents paramètres des tableaux 4.1 & 4.3 pour chaque station et pour les deux carrières (même légende que le tableau 4.1)

carrière	âge de l'exploitation	ρ_s (g.cm ⁻³)	ρ_d (g.cm ⁻³)		teneur en gypse (%)	$\eta_{(H_2)}$ (%)	n _{tot.} (%)	n _w (%)	W (%)	Sr (%)	K _N (m ²)	V _p (m.s ⁻¹)	V _s (m.s ⁻¹)	E _{dyn.} (GPa)	v _{dyn.}						
			moy.	écart-type																	
LIVRY GARGAN	2000	2,36	2,22	0,01	95	5	6,08	0,36	-	1,4	51	3	-	2961	250	1721	150	17,5	3,3	0,24	0,02
	1950	2,33	2,09	0,03	100	-	10,25	1,09	-	2,5	52	6	-	3313	50	1909	0	21,5	0,6	0,25	0,01
	1900	2,33	2,06	0,02	100	12	11,62	0,72	-	0,7	12	1	-	3682	50	2054	50	25,4	0,8	0,27	0,01
GROZON	2000	2,34	2,29	0,02	100	<1	2,25	1,02	-	<1	17,3	5	-	4750	200	2396	100	35,0	1,9	0,33	0,02
	1970	2,33	2,30	0,01	100	-	1,18	0,38	-	<1	31,9	9	-	4988	50	2481	50	37,8	0,3	0,34	0,00
	1920	2,33	2,30	0,03	100	<1	1,41	1,26	-	<1	31,3	21	-	4929	100	2476	50	37,5	1,2	0,33	0,0

4.3.1.3- Interprétation-Discussion – Paramètres physiques

Pour chacune des deux carrières, les valeurs moyennes de certains paramètres physiques sont tout d'abord comparées avec celles qui ont été trouvées dans la bibliographie.

La suite de l'interprétation-discussion des résultats peut se faire selon les deux modes de prélèvement :

- La première approche prend en compte les résultats déterminés à partir des blocs prélevés sur le bord des piliers dans des stations d'âges d'exploitation différents. Les paramètres physiques des échantillons de gypse de la carrière de Grozon peuvent être comparés entre eux en fonction de l'âge d'exploitation de la station d'échantillonnage. Cette comparaison n'est pas possible pour les échantillons provenant de la carrière de Livry Gargan, les hauteurs d'échantillonnage entre les différentes stations ne sont rigoureusement pas les mêmes.
- La seconde prend en compte les paramètres physiques déterminés à partir des sondages horizontaux réalisés dans des piliers d'âges d'exploitation différents. Cette deuxième approche permet de rendre compte d'une éventuelle variation des paramètres physiques en fonction de la distance au parement.

4.3.1.3.1- Comparaison avec les valeurs bibliographiques

Les paramètres physiques des éprouvettes prélevées au bord des piliers de la carrière de Livry Gargan sont différents de ceux de la carrière de Grozon. Ce résultat est comparable avec ceux qui ont été trouvés dans la littérature.

Pour chacun des deux types de gisement, la valeur moyenne de la masse volumique calculée à partir des données bibliographiques est comparable à celle du gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (Figure 4.8).

La même remarque est valable pour la porosité (Figure 4.9). Avec ces deux résultats, les deux carrières retenues pour identifier les paramètres physiques du gypse peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des gisements.

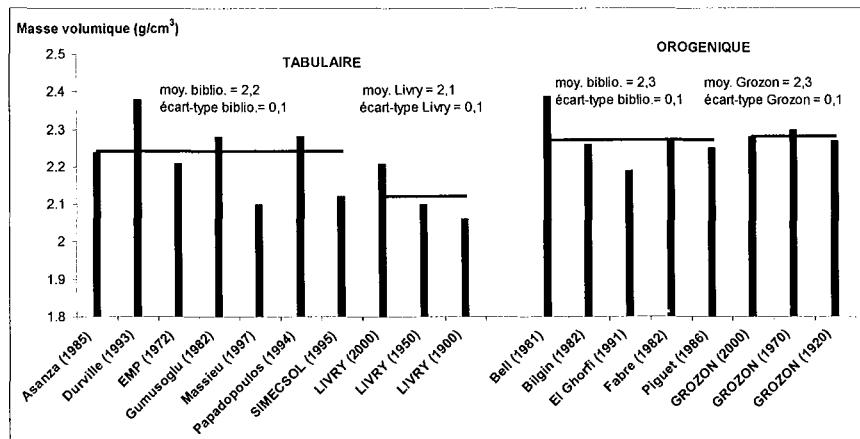


Figure 4.8 - Masses volumiques issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âge de la zone exploitée)

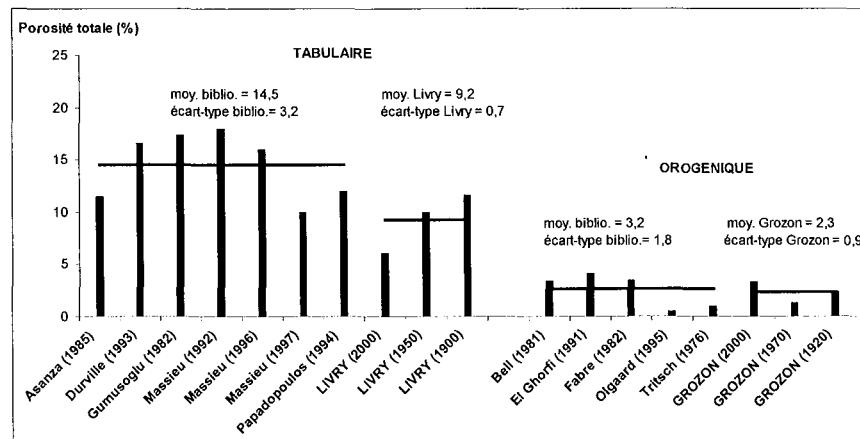


Figure 4.9 - Porosités totales issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âge de la zone exploitée)

4.3.1.3.2- Comparaison en fonction de l'âge d'exploitation

Les variations des paramètres physiques moyens des échantillons de la carrière de Livry Gargan en fonction de l'âge d'exploitation ne sont pas possibles pour des raisons déjà évoquées. Cependant, les résultats présentent une dispersion relativement importante selon les paramètres et l'âge considérés (Figure 4.10).

Des défauts structuraux sont probablement à l'origine de ces dispersions. Un litage granulométrique est plus ou moins prononcé. Des fissures peuvent être également plus ou moins fermées.

Les variations des paramètres physiques moyens des échantillons de la carrière de Grozon en fonction de l'âge d'exploitation ne sont pas significatives. Néanmoins, les résultats présentent une grande dispersion (Figure 4.11). Deux hypothèses, justifiées par

des observations à l'œil nu des différents échantillons après essais, peuvent être avancées :

- Les éprouvettes de gypse présentent des fissures. Leur cicatrisation qui semble être fonction du temps (les fissures des éprouvettes de gypse d'âge d'exploitation ancien paraissent mieux cicatrisées que celles des éprouvettes « récentes ») n'est pas homogène pour un ensemble d'éprouvettes provenant d'une même station.
- Des nodules d'anhydrite « noyés » dans la matrice peuvent modifier les caractéristiques physiques sans influencer la pureté de l'ensemble de l'éprouvette. La teneur en gypse est déterminée à partir d'un échantillon prélevé sur l'éprouvette non rectifiée. Le volume de cet échantillon est nettement plus faible que celui d'une éprouvette.

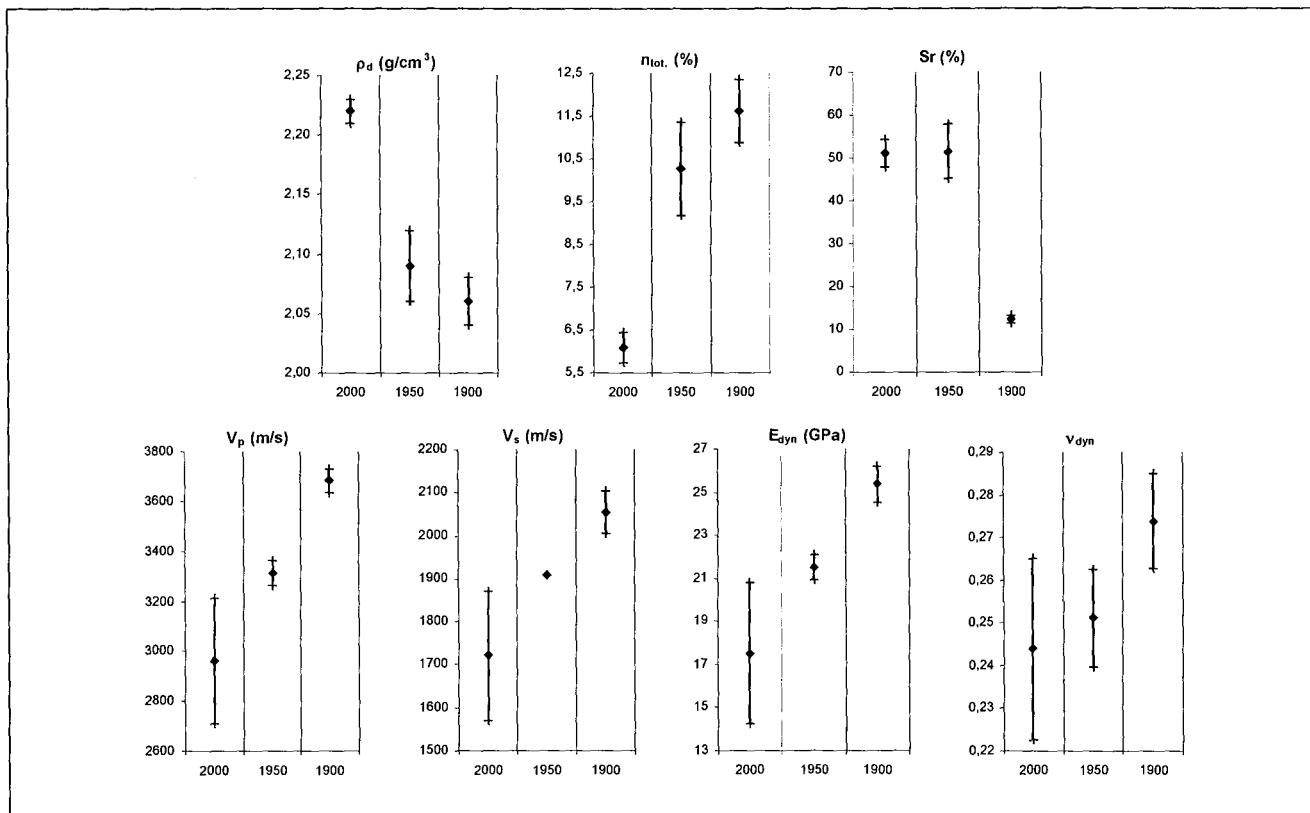


Figure 4.10 - Livry Gargan – Dispersion de différents paramètres physiques en fonction de l'âge d'exploitation (valeurs moyennes et écarts-types)

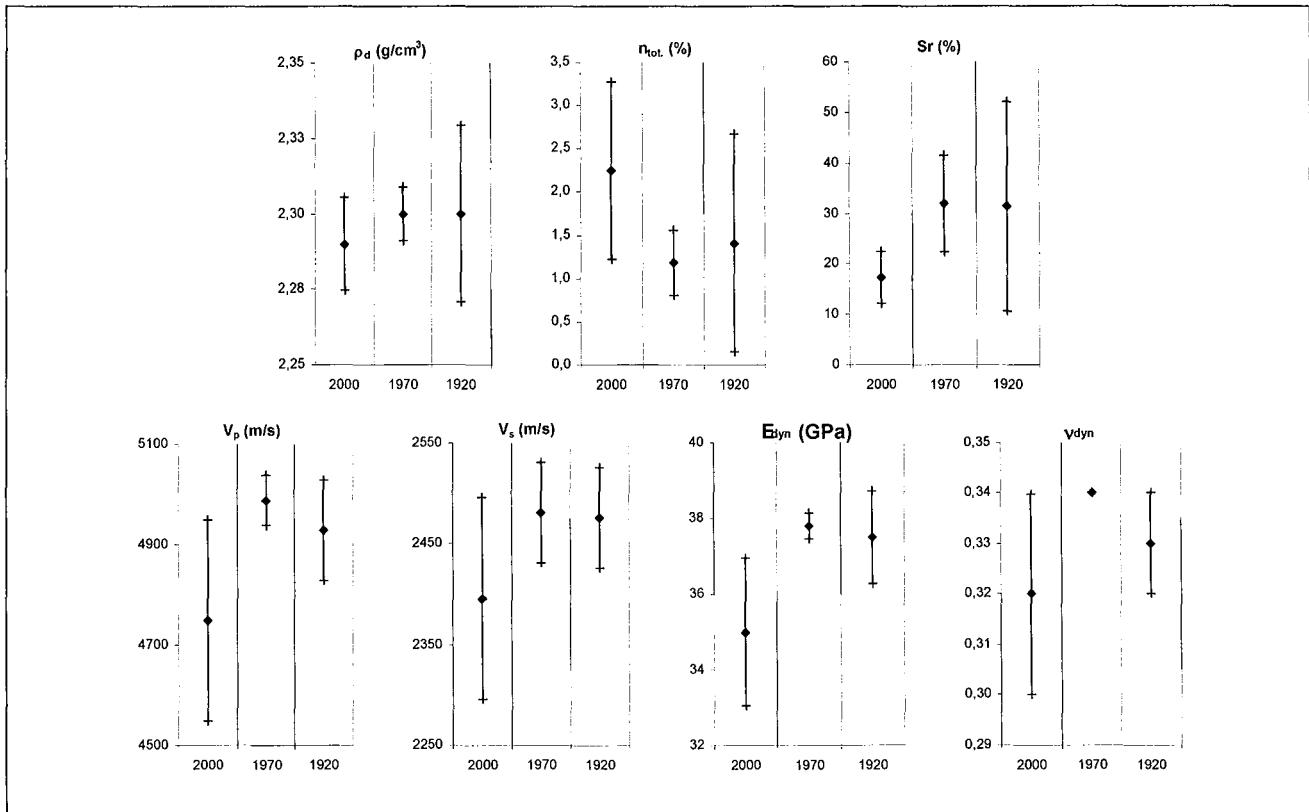


Figure 4.11 - Grozon – Dispersion de différents paramètres physiques en fonction de l'âge d'exploitation (valeurs moyennes et écarts-types)

4.3.1.3.3- Comparaison en fonction du vieillissement

L'étude des variations d'un certain nombre de paramètres physiques le long des sondages horizontaux jusqu'au cœur des piliers devrait permettre de préciser l'influence des dissolutions observées.

Les résultats de la caractérisation physique des gypses de la carrière de Livry Gargan et de Grozon ont déjà été présentés dans les tableaux 4.2 et 4.4. Ces derniers sont commentés avant de poursuivre par leur interprétation.

Le gypse de Livry Gargan

La comparaison des caractéristiques physiques du gypse de deux sondages provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents est difficile. Les sondages ont pu être réalisés à des niveaux stratigraphiques différents dans la Première Masse de gypse compte tenu des difficultés de repérage.

Les variations moyennes des paramètres physiques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation récent sont les suivantes (Figure 4.12) :

- La masse volumique, la porosité totale et la masse volumique des grains ne présentent pas de variations nettes.
- La porosité accessible à l'eau et la perméabilité à l'azote diminuent respectivement de 45% et de 60%.
- Les vitesses des ondes ultrasonores P et S augmentent de 7% et de 4%. Le module de Young et le coefficient de Poisson dynamiques augmentent de 10% et 6%.

Les variations moyennes des paramètres physiques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation ancien sont les suivantes (Figure 4.13) :

- La masse volumique, la porosité totale et la perméabilité à l'azote des éprouvettes ainsi que la masse volumique des grains sont quasi-constantes.
- La porosité accessible à l'eau diminue de 14%.
- Les vitesses des ondes ultrasonores P et S augmentent de 10% et de 7%. Le module de Young et le coefficient de Poisson dynamiques augmentent de 15% et 7%.

Les paramètres physiques diffèrent entre le bord et le cœur de ces deux piliers. Cependant ces différences sont plus marquées pour le pilier d'âge d'exploitation ancien.

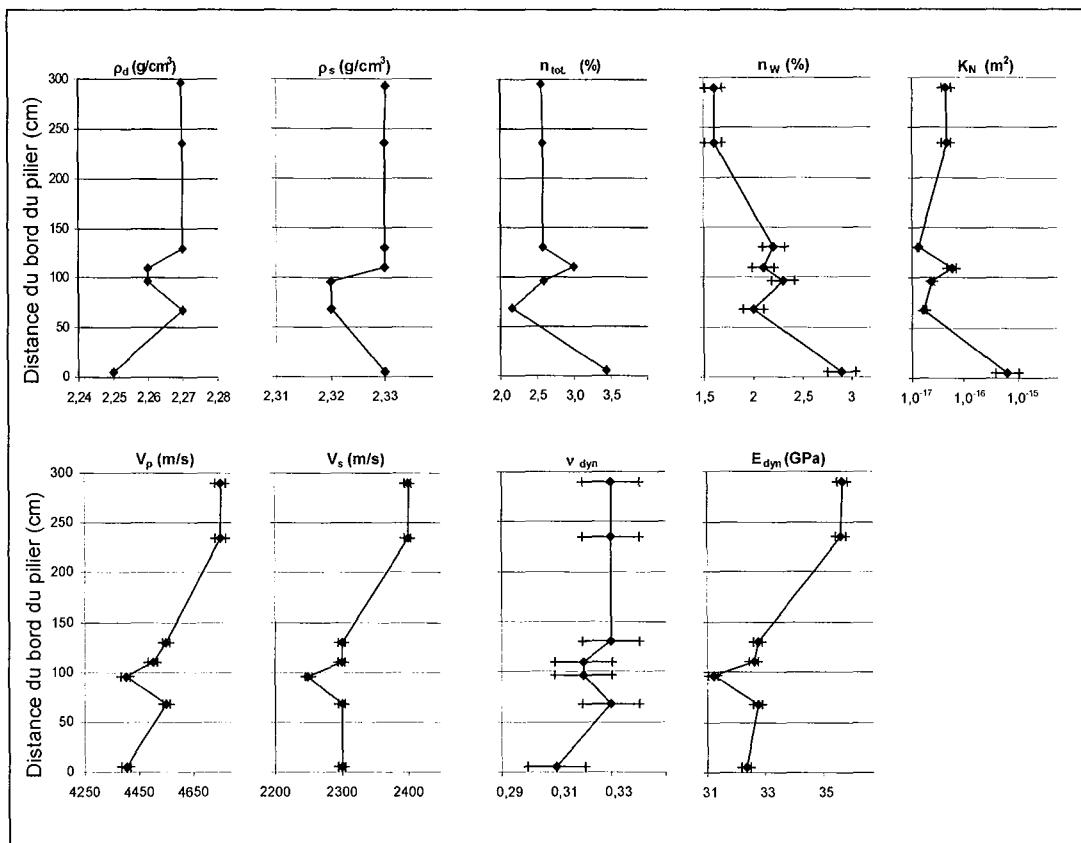


Figure 4.12 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage LG1 (les incertitudes de mesure sont précisées)

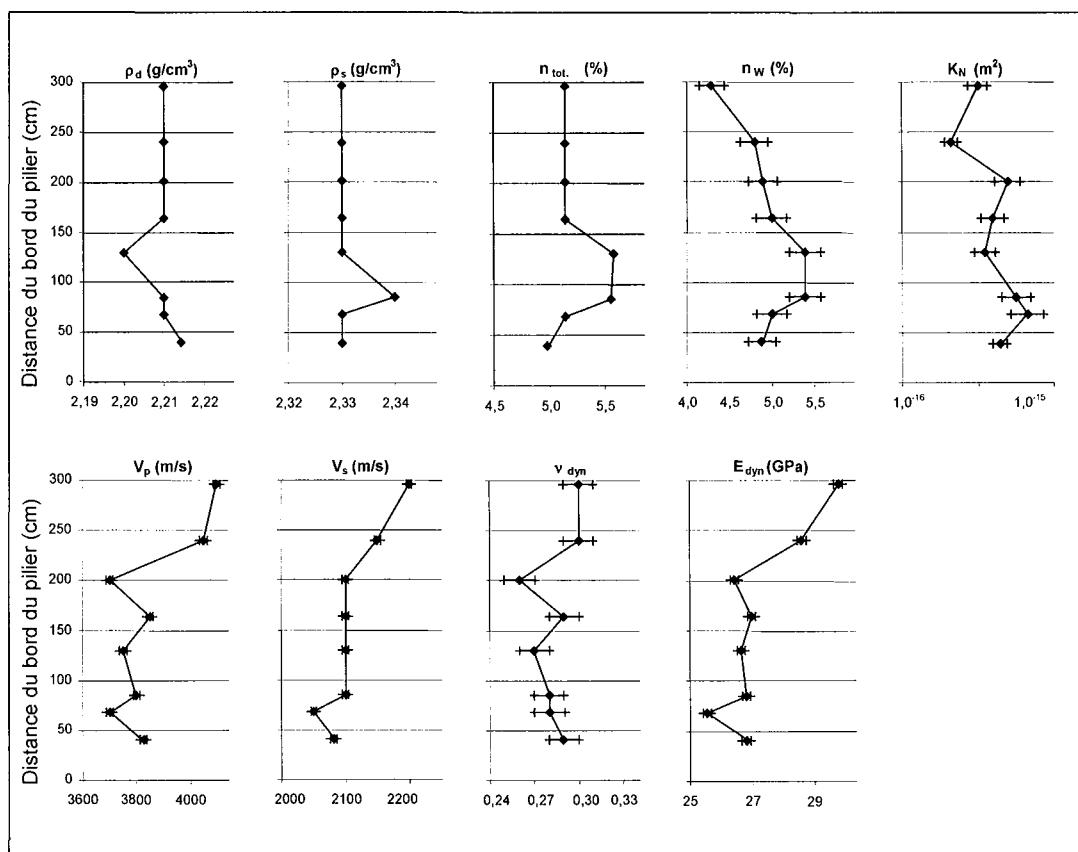


Figure 4.13 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres physiques et mécaniques déterminés le long du sondage LG4 (les incertitudes de mesure sont précisées)

Le gypse de la carrière de Grozon

La comparaison des caractéristiques physiques entre les deux sondages provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents est possible. Les sondages ont été réalisés à des niveaux stratigraphiques identiques dans le gypse 1.

Les variations moyennes des paramètres physiques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation récent sont les suivantes (Figure 4.14) :

- La masse volumique et la porosité totale des éprouvettes ne présentent pas de variations nettes.
- La masse volumique des grains augmente de 1,5%.
- La porosité accessible à l'eau et la perméabilité à l'azote diminuent de 70%.
- Les vitesses des ondes ultrasonores et donc les caractéristiques dynamiques sont quasi-constantes.

Les variations moyennes des paramètres physiques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation ancien sont les suivantes (Figure 4.15) :

- La masse volumique des grains augmente de 1%.
- La porosité accessible à l'eau et la perméabilité à l'azote diminuent de 40% et 50%.
- Les autres paramètres ne présentent pas de variations significatives.

Les variations de plusieurs paramètres (masse volumique, vitesses des ondes ultrasonores P et S, module de Young et coefficient de Poisson dynamiques) sont

difficilement explicables. La présence de plusieurs fissures plus ou moins bien cicatrisées sur les éprouvettes peut être une des causes. La pureté du gypse peut également expliquer ces variabilités de paramètres. La présence ou l'absence d'anhydrite sous la forme de veinules ou de petits nodules dans la matrice gypseuse de l'éprouvette peut modifier les paramètres physiques.

Les autres paramètres (porosité accessible à l'eau, perméabilité à l'azote) sont également différents entre les éprouvettes du bord et du cœur des deux piliers. Cependant les variations sont du même ordre de grandeur quel que soit l'âge d'exploitation.

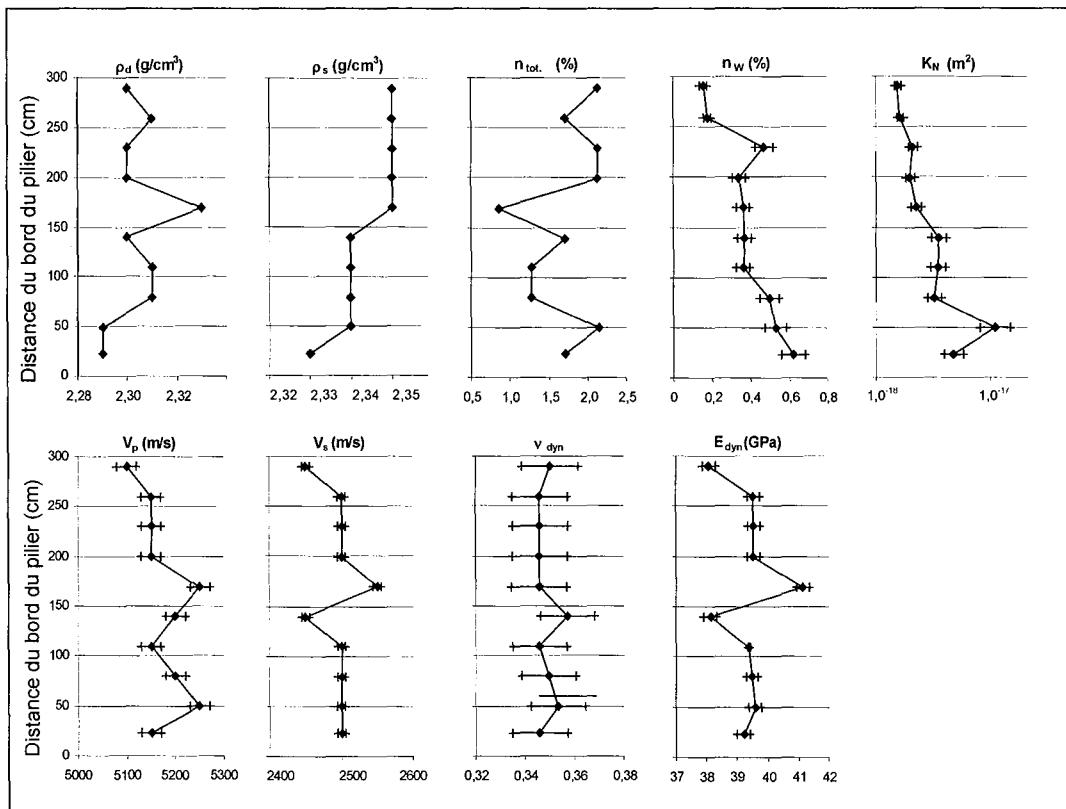


Figure 4.14 - Grozon – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage G1 (les incertitudes de mesure sont précisées)

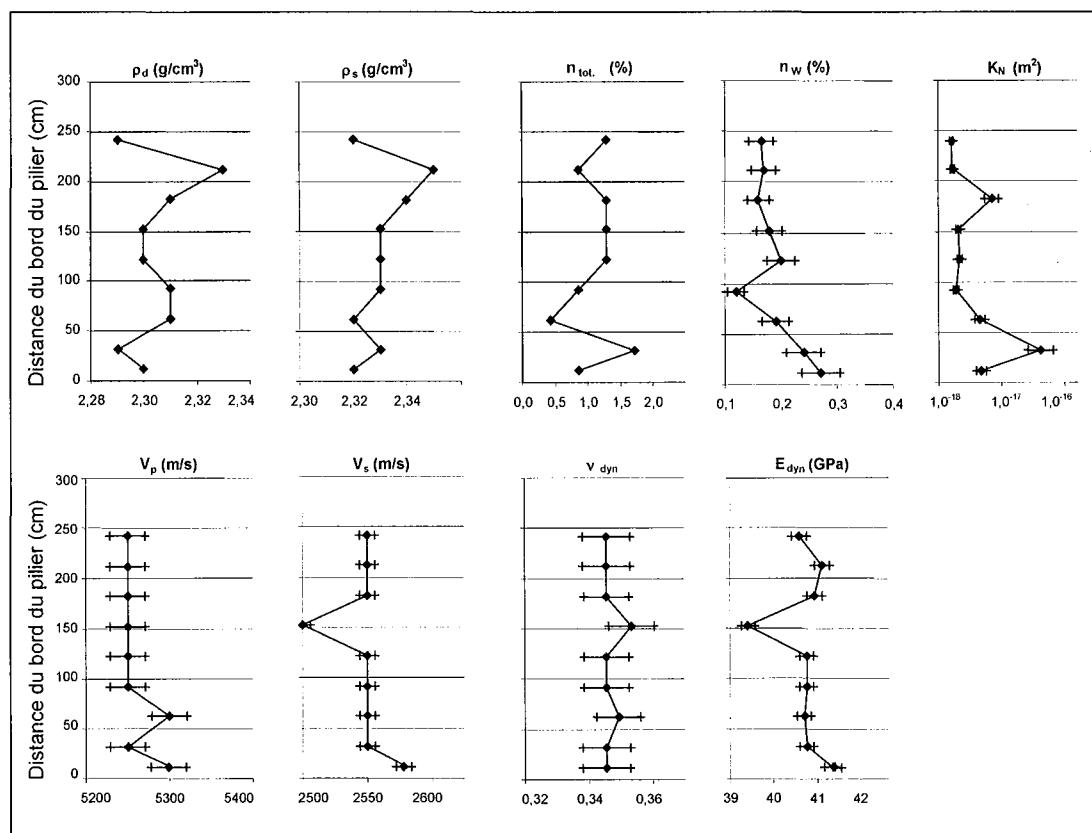


Figure 4.15 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres physiques déterminés le long du sondage G2 (les incertitudes de mesure sont précisées)

D'une manière générale, une variation plus ou moins importante des paramètres physiques a pu être mesurée entre le bord et le cœur des piliers d'âges d'exploitation différents. Pour le gypse de la carrière de Livry Gargan, ces variations sont plus marquées pour le pilier d'âge d'exploitation ancien. Pour le gypse de la carrière de Grozon, elles sont du même ordre de grandeur entre les deux piliers. L'évolution des paramètres existe même si elle n'est pas toujours très drastique, tant en fonction de la distance au parement qu'en fonction de l'âge d'exploitation du quartier.

Commentaires

Les conséquences de l'altération sur les paramètres physiques avaient déjà été mises en évidence sur des échantillons de différentes roches : charnockite (Ramana et Gogte, 1982), granite et marbre (Jeannette, 2000) et argiles (Canton et al. 2001). Par contre, il n'existe pas dans la littérature d'étude de variation de ces paramètres dans les conditions du vieillissement (action anthropique).

Les observations de dissolutions du gypse et l'évolution de certains paramètres physiques devraient être étroitement liées. En effet, l'intensité des traces de dissolution et la porosité accessible à l'eau diminuent du bord vers le cœur des piliers. L'eau (sous forme de vapeur et/ou liquide) dissout progressivement les cristaux de gypse et pénètre vers le cœur des piliers. La dissolution a pour conséquence directe une augmentation de la porosité accessible à l'eau (saturée en sulfate de calcium). Ceci se traduit également par la variation moyenne de la perméabilité à l'azote, qui diminue du bord vers le cœur des piliers.

Les vitesses des ondes ultrasonores P et S augmentent très nettement du bord vers le cœur des piliers de la carrière de Livry Gargan. Très directement liés, le coefficient de Poisson dynamique (fonction de la vitesse des ondes ultrasonores P et S) et le module de

Young dynamique (fonction de la vitesse des ondes ultrasonores et de la masse volumique) augmentent également. Ceci signifie que les vides de type fissures et pores sont quantitativement plus importants au bord des piliers. D'après les observations au MEB, il s'agirait plutôt de vides de type cavités de dissolution.

A partir des hypothèses précédentes, la résistance du gypse doit augmenter vers le cœur des piliers, car le bord de ces piliers est plus endommagé que le cœur : il est constitué de matériau plus poreux. Les résultats des essais de compression uniaxiale et la variation moyenne du module de Young pourront le confirmer.

Les variations moyennes des paramètres physiques entre le bord et le cœur du pilier « ancien » de la carrière de Livry Gargan sont plus importantes que celles du pilier « récent ». Le bord du pilier ancien doit être fortement dégradé par rapport au cœur. Les observations au MEB semblent confirmer ce fait. Elles ont permis de mettre en évidence une forte densité de traces de dissolution au bord du pilier par rapport au cœur qui ne présente que quelques traces. A l'inverse, le pilier d'âge d'exploitation récent présente une diminution plus rapide de l'intensité des traces de dissolution vers le cœur. Cependant, les variations moyennes des paramètres semblent être du même ordre de grandeur entre les deux piliers de la carrière de Grozon. La pureté du gypse et les discontinuités plus ou moins cicatrisées déjà évoquées peuvent masquer une variation moyenne des paramètres. De plus, l'intensité des traces de dissolution diminue très rapidement vers le cœur des piliers de la carrière de Grozon par rapport aux piliers de la carrière de Livry Gargan.

D'après les différentes observations au MEB, quel que soit l'âge d'exploitation, la densité de traces de dissolution est plus importante pour le gypse de la carrière de Livry Gargan que pour le gypse de la carrière de Grozon. Ces observations peuvent être expliquées par des différences texturales et structurales entre les piliers de gypses : le gypse de Livry Gargan est plus poreux, les piliers présentent une fracturation plus importante que ceux de la carrière de Grozon. La circulation de l'eau est donc facilitée. Cette eau ne peut être que celle sous forme de vapeur contenue dans l'air (aérage minier). Au-dessus des marnes supragypseuses de la carrière de Livry Gargan, il existe une nappe libre. Des infiltrations d'eau pourraient être envisagées au niveau de zones où les marnes sont fracturées. Cependant, si les dissolutions étaient dues à la nappe, elles seraient plus uniformes et non dépendantes de la distance au parement du pilier.

4.3.2- Caractérisation mécanique

4.3.2.1- Préparation des échantillons et dispositif expérimental

Après l'usinage des éprouvettes et leur passage à l'étuve à 50 °C, elles doivent être instrumentées pour pouvoir mesurer les déformations axiales et latérales lors des essais mécaniques. Des jauge d'extensométrie sont collées : elles sont placées deux à deux et diamétralement opposées, à la moitié de la hauteur sur l'éprouvette. Avant tout essai mécanique instantané, les échantillons doivent être secs.

Une presse de capacité 1000 kN a été utilisée pour réaliser les différents essais mécaniques. Son asservissement permettent d'effectuer des chemins de contrainte d'une manière précise, sa rigidité et son piston double effet dont les deux chambres sont reliées par une électrovanne permet la réalisation de phases de relaxation si nécessaire.

Le pilotage de la presse s'effectue soit à une vitesse de déplacement constante de 48 µm/mn dans le cas des essais de compression, soit avec une charge constante de 100 N/s dans le cas des essais de traction indirecte.

La pression de confinement lors des essais de compression triaxiale et la contrainte isotrope lors des essais de compression isotrope sont générées par un générateur de pression « TITAN » piloté avec le logiciel « SESTAR 3.2 ». Il est constitué d'un piston et d'une chambre de compression reliée à un capillaire permettant un chemin de chargement et de déchargement linéaire et un maintien de la pression.

4.3.2.2- Paramètres mesurés ou calculés

A partir des différents essais mécaniques, plusieurs paramètres sont mesurés ou bien calculés directement ou indirectement. Les déformations axiales et latérales sont mesurées grâce aux jauge d'extensométrie. A partir de ces mesures, les courbes contrainte-déformation permettent de déterminer un certain nombre de paramètres comme le module de Young.

Tous les paramètres mesurés ou calculés sont les suivants :

- Module de Young : E

Il est déterminé suivant la norme NF P 94-425. Il représente la pente d'une courbe de déchargement des déformations axiales en fonction de la contrainte d'un essai de compression uniaxiale ou triaxiale et s'exprime en MPa. Un module de déformabilité transversale ou latérale peut être également calculé à partir d'une courbe de déchargement des déformations latérales en fonction de la contrainte.

$$E = \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4.1)$$

- Coefficient de Poisson : v

Il représente le rapport d'un module axial sur le module latéral correspondant. Il est déterminé suivant la norme NF P 94-425.

$$\nu = -\frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} \quad (4.2)$$

- Résistance à la compression ou bien à la traction : R

Elle représente la contrainte déviatorique maximale nécessaire pour obtenir la rupture d'une éprouvette lors d'un essai de compression. Elle s'exprime en MPa. Dans le cas d'un essai de traction indirecte, elle représente la résistance maximale de l'éprouvette.

- Seuil de dilatance : D

Il correspond lors d'un essai de compression à la contrainte déviatorique ayant générée le maximum de déformations volumiques ε_{vmax} . Il s'exprime, par conséquent, en MPa.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad \text{et} \quad D \Rightarrow \varepsilon_{vmax} \quad (4.3)$$

- Limite d'élasticité : Le

Il correspond, lors d'un essai de compression, à la contrainte déviatorique pour laquelle le seuil de linéarité des déformations axiales et latérales a été atteint. Il s'exprime donc en MPa.

La valeur de ce paramètre est uniquement indicative : il est difficile de délimiter précisément le seuil de linéarité pour le matériau gypse.

4.3.2.3- Résultats de la caractérisation mécanique

Les différents essais mécaniques sont présentés dans l'annexe 4.2. Ils sont généralement établis à partir d'une norme AFNOR.

Les valeurs des paramètres mécaniques des échantillons de gypse prélevés à partir des blocs détachés à la barre à mine sur le bord des piliers dans la carrière de Livry Gargan sont présentées dans les tableaux 4.6 à 4.8. elles sont présentées en fonction de l'âge d'exploitation. Celles de la carrière de Grozon sont présentées dans les tableaux 4.10 à 4.12.

Les paramètres mécaniques moyens des échantillons de gypse provenant des blocs détachés du bord des piliers de la carrière de Livry Gargan et de Grozon peuvent être calculés (Tableau 4.14).

Les valeurs des paramètres mécaniques des échantillons de gypse prélevés le long des sondages horizontaux réalisés jusqu'au cœur des piliers de la carrière de Livry Gargan sont présentées dans le tableau 4.9. Celles des sondages de la carrière de Grozon sont présentées dans le tableau 4.13. Les échantillons provenant des sondages réalisés dans les deux carrières ont été prélevés à différentes profondeurs vers le cœur des piliers. Le but de ce type de prélèvement est de montrer une éventuelle variation des paramètres entre le bord et le cœur des piliers.

Tableau 4.6 - Livry Gargan – Age d'exploitation actuel (2000)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs

(P_c : pression de confinement ; E : module de Young ; Δ : variation des modules axiaux ou transversaux entre deux cycles de chargement-déchargement-rechargement ; E_T : module de déformation transversale ; %/R : niveau du cycle en % par rapport à la rupture ; v : coefficient de Poisson ; R : résistance à la compression ou à la traction ; D : seuil de dilatance ; Le : seuil d'élasticité)

STATION 1 (2000)												
	type d'essai	P_c (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E_T (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)
S1B2-1	compression uniaxiale	0	1	10.5	-	55.4	-	33	0.19	17	8.3	1.5
			2	10.5	0	50.3	-9	48	0.21			
			3	11.9	13	47.9	-14	65	0.25			
			4	12.7	21	41.3	-25	80	0.31			
S1B2-2	compression uniaxiale	0	1	10.6	-	60.8	-	31	0.17	17.7	8.6	1.2
			2	11.1	5	53.7	-12	49	0.21			
			3	12.0	13	49.8	-18	62	0.24			
			4	12.9	22	40.3	-34	77	0.32			
S1B2-4	compression triaxiale	1	1	19.4	-	99.8	-	21	0.19	27.0	17.3	2.3
			2	19.2	-1	78.7	-21	31	0.24			
			3	18.4	-5	71.6	-28	44	0.26			
			4	18.4	-5	66.6	-33	53	0.28			
S1B2-6	compression triaxiale	1	1	18.7	-	82.1	-	25	0.23	26.6	16.5	1.4
			2	17.4	-7	70.0	-15	38	0.25			
			3	17.4	-7	64.9	-21	49	0.27			
			4	17.2	-8	59.7	-27	66	0.29			
S1B2-3	compression triaxiale	3	1	20.8	-	108.0	-	17	0.19	32.7	21.0	3.6
			2	19.9	-4	95.7	-11	31	0.21			
			3	18.8	-10	83.0	-23	45	0.23			
			4	18.3	-12	70.0	-35	62	0.26			
S1B2-7	compression triaxiale	3	1	25.0	-	106.7	-	23	0.23	32.1	21.8	3.3
			2	20.8	-17	90.3	-15	36	0.23			
			3	20.8	-17	80.3	-25	52	0.26			
			4	20.8	-17	71.5	-33	68	0.29			
S1B2-5	compression triaxiale	5	1	24.7	-	133.2	-	15	0.19	39.6	28.4	1.8
			2	24.1	-2	104.4	-22	22	0.23			
			3	21.3	-14	91.2	-32	33	0.23			
			4	20.7	-16	84.3	-37	45	0.25			
S1B2-8	compression triaxiale	5	1	23.4	-	105.7	-	24	0.22	35.7	26.8	1.8
			2	22.1	-6	92.3	-13	41	0.24			
			3	21.0	-10	79.1	-25	56	0.27			
			4	20.1	-14	62.5	-41	77	0.32			
S1B2-10	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	1.3	-	-	-
S1B2-12	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-	-
S1B2-13	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-	-

Tableau 4.7 - Livry Gargan – Age d'exploitation intermédiaire (1950)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.6)

STATION 2 (1950)													
	type d'essai	Pc (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)	
S2B2B-1	compression uniaxiale	0	1	16.0	-	69.8	-	41	0.23	13.1	11.2	1.6	
			2	15.9	-1	67.5	-3	61	0.24				
			3	15.8	-1	57.0	-18	81	0.28				
			4	-	-	-	-	-	-				
S2B2B-4	compression uniaxiale	0	1	19.7	-	73.1	-	34	0.27	16.6	16.4	2.9	
			2	19.5	-1	71.9	-2	49	0.27				
			3	19.0	-4	69.6	-5	66	0.27				
			4	18.1	-8	68.7	-6	82	0.26				
S2B2B-18	compression uniaxiale	0	1	15.6	-	75.4	-	29	0.21	19.7	16.0	2.2	
			2	15.6	0	74.2	-2	43	0.21				
			3	15.6	0	71.9	-5	54	0.22				
			4	15.3	-2	66.9	-11	68	0.23				
S2B2B-20	compression triaxiale	1	1	20.4	-	84.6	-	24	0.24	24.9	18.1	0.2	
			2	19.3	-5	77.5	-8	39	0.25				
			3	18.5	-9	69.4	-18	55	0.27				
			4	18.2	-11	63.4	-25	72	0.29				
S2B2B-5	compression triaxiale	1	1	23.0	-	80.5	-	27	0.29	22.5	16.7	2.3	
			2	21.6	-6	74.0	-8	42	0.29				
			3	20.9	-9	71.1	-12	61	0.29				
			4	19.7	-14	63.5	-21	80	0.31				
S2B2B-6	compression triaxiale	3	1	20.8	-	82.0	-	29	0.25	24.9	22.3	2.8	
			2	19.0	-9	71.3	-13	43	0.27				
			3	17.8	-14	62.5	-24	64	0.28				
			4	15.5	-25	44.2	-46	81	0.35				
S2B2B-21	compression triaxiale	3	1	24.4	-	94.5	-	26	0.26	29.9	16.9	2.5	
			2	21.7	-11	86.3	-9	37	0.25				
			3	20.7	-15	77.8	-18	57	0.27				
			4	20.0	-18	71.1	-25	70	0.28				
S2B2B-19	compression triaxiale	5	1	27.6	-	102.7	-	22	0.27	33.1	27.0	2.4	
			2	24.0	-13	84.8	-17	49	0.28				
			3	23.2	-16	77.4	-25	54	0.30				
			4	20.6	-25	59.7	-42	85	0.35				
S2B2B-3	compression triaxiale	5	1	25.0	-	89.5	-	20	0.28	30.7	25.5	1.3	
			2	22.4	-10	85.0	-5	35	0.26				
			3	20.4	-18	77.5	-13	53	0.26				
			4	19.4	-22	71.4	-20	74	0.27				
S2B2B-15	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.9	-	-	
S2B2B-16	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	2.3	-	-	
S2B2B-17	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.4	-	-	

Tableau 4.8 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.6)

STATION 3 (1900)													
	type d'essai	Pc (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)	
S3B2T-5	compression uniaxiale	0	1	18.0	-	71.7	-	36	0.25	16.1	8.5	5.3	
			2	18.3	2	69.1	-4	49	0.26				
			3	18.5	3	66.3	-8	67	0.28				
			4	17.9	-1	66.1	-8	82	0.27				
S3B2T-6	compression uniaxiale	0	1	19.7	-	85.1	-	35	0.23	16.5	14.1	4.2	
			2	20.0	2	80.6	-5	51	0.25				
			3	19.9	1	78.4	-8	63	0.25				
			4	19.9	1	75.3	-12	81	0.26				
S3B2T-7	compression triaxiale	1	1	26.7	-	91.2	-	29	0.29	22.1	20.8	7.0	
			2	24.1	-10	87.3	-4	49	0.28				
			3	23.2	-13	83.2	-9	65	0.28				
			4	22.3	-16	76.6	-16	81	0.29				
S3B2T-10	compression triaxiale	1	1	25.6	-	98.6	-	29	0.26	23.8	23.3	6.6	
			2	25.0	-2	92.6	-6	46	0.27				
			3	24.8	-3	90.0	-9	61	0.28				
			4	24.6	-4	86.3	-12	75	0.29				
S3B2T-8	compression triaxiale	3	1	29.1	-	94.7	-	27	0.31	27.3	26.5	5.2	
			2	25.5	-12	85.3	-10	44	0.30				
			3	23.3	-20	77.4	-18	60	0.30				
			4	21.7	-25	75.8	-20	74	0.29				
S3B2T-11	compression triaxiale	3	1	22.8	-	88.0	-	28	0.26	29.3	25.8	8.2	
			2	21.9	-4	84.9	-4	43	0.26				
			3	21.7	-5	78.1	-11	66	0.28				
			4	20.4	-11	64.0	-27	90	0.32				
S3B2T-9	compression triaxiale	5	1	27.5	-	100.9	-	27	0.27	30.5	31.2	7.1	
			2	23.0	-16	88.5	-12	44	0.26				
			3	21.1	-23	87.9	-13	64	0.24				
			4	20.7	-25	74.9	-26	81	0.28				
S3B2T-12	compression triaxiale	5	1	27.2	-	96.4	-	27	0.28	31.6	31.3	5.2	
			2	25.2	-7	91.3	-5	44	0.28				
			3	23.2	-15	85.2	-12	62	0.27				
			4	22.3	-18	74.7	-23	78	0.30				
S3B2T-1	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	-	-	
S3B2T-2	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	-	-	
S3B2T-3	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.6	-	-	
S3B2T-4	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.9	-	-	

Tableau 4.9 - Livry Gargan – Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des sondages
(type d'essai : compression uniaxiale ; même légende que le tableau 4.6 ; Z : profondeur d'échantillonnage)

		Z (m)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)
STATION 1 (2000)	SC1-1	0.05	1	28.6	-	92.7	-	19	0.31			
			2	28.3	-1	106.2	-3	49	0.27	24.7	21.6	3.1
			3	27.3	-5	96.1	4	74	0.28			
	SC1-2	0.68	1	42.4	-	100.0	-	20	0.42			
			2	35.2	-17	103.5	4	42	0.34	25.1	18.7	7.7
			3	27.5	-35	81.7	-18	72	0.34			
	SC1-3	1.00	1	33.8	-	108.4	-	19	0.31			
			2	29.8	-12	98.4	-9	43	0.30	25.3	3.7	0.4
			3	29.7	-12	82.2	-24	73	0.36			
STATION 4 (1950)	SC1-4	1.20	1	20.0	-	83.0	-	20	0.24			
			2	22.8	14	100.6	21	35	0.23	24.1	20.4	7.2
			3	25.2	26	74.5	-10	57	0.34			
	SC1-5	1.50	1	32.7	-	130.0	-	22	0.25			
			2	33.5	2	119.7	-8	49	0.28	22.9	14.2	1.9
			3	33.7	3	115.2	-11	87	0.29			
	SC1-7	2.00	1	36.3	-	113.9	-	18	0.32			
			2	34.0	-6	110.1	-3	53	0.31	25.2	24.5	2.7
			3	33.2	-9	102.8	-10	80	0.32			
	SC1-8	2.60	1	33.9	-	130.5	-	17	0.26			
			2	32.6	-4	115.9	-11	50	0.28	25.4	24.3	1.7
			3	34.5	2	113.5	-13	78	0.30			
	SC1-9	3.00	1	-	-	-	-	-	-	25.6	-	-
STATION 4 (1950)	SC4-2	0.40	1	20.0	-	95.2	-	25	0.21			
			2	19.0	-5	94.1	-1	47	0.20	18.3	15.0	3.2
			3	18.9	-6	91.9	-3	75	0.21			
	SC4-3	0.68	1	11.1	-	37.1	-	17	0.30			
			2	13.5	22	38.7	4	39	0.35	18.5	7.1	0.5
			3	14.0	26	38.1	3	50	0.37			
	SC4-4	0.85	1	26.8	-	87.4	-	26	0.31			
			2	23.8	-11	79.4	-9	43	0.30	19.2	10.9	0.7
			3	23.4	-13	82.4	-6	71	0.28			
	SC4-6	1.64	1	18.7	-	94.8	-	25	0.20			
			2	19.6	5	144.6	53	45	0.14	18.3	13.4	0.6
			3	20.5	10	79.7	-16	75	0.26			
	SC4-8	2.4	1	26.9	-	85.1	-	25	0.32			
			2	26.1	-3	87.4	3	43	0.30	19.4	16.1	2.9
			3	25.9	-4	82.5	-3	71	0.31			
	SC4-9	2.96	1	28.4	-	107.6	-	22	0.26		21.9	20.5
			2	27.2	-4	103.0	-4	42	0.26			6.4
			3	26.6	-6	96.3	-11	68	0.28			

Tableau 4.10 - Grozon – Age d'exploitation actuel (2000)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.6)

STATION 4 (2000)												
	type d'essai	Pc (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)
S4P5-3	compression uniaxiale	0	1	36.0	-	105.5	-	28	0.34			
			2	33.1	-8	102.6	-3	44	0.32	38.4	36.9	17.8
			3	32.5	-10	100.2	-5	64	0.32			
			4	31.2	-13	96.4	-9	84	0.32			
S4P5-2	compression uniaxiale	0	1	32.1	-	103.0	-	37	0.31			
			2	30.9	-4	103.0	0	62	0.30	27.7	26.0	11.7
			3	30.5	-5	99.2	-4	90	0.31			
S4P5-14	compression uniaxiale	0	1	42.7	-	131.5	-	23	0.32			
			2	42.3	-1	131.4	0	41	0.32	44.6	contractant	21.5
			3	41.9	-2	131.3	0	61	0.32			
			4	41.3	-3	131.2	0	80	0.31			
S4P5-1	compression uniaxiale	0	1	29.5	-	102.7	-	37	0.29			
			2	29.5	0	95.6	-7	60	0.31	27.4	contractant	11.2
			3	28.9	-2	91.8	-11	81	0.31			
			4	28.1	-5	89.9	-12	99	0.31			
S4P5-6	compression triaxiale	1	1	42.2	-	123.1	-	24	0.34			
			2	42.2	0	114.6	-7	36	0.37	49.7	28.8	19.2
			3	41.5	-2	109.1	-11	54	0.38			
			4	40.5	-4	101.9	-17	72	0.40			
S4P5-4	compression triaxiale	3	1	42.1	-	136.3	-	24	0.31			
			2	39.8	-5	120.7	-11	41	0.33	49.6	contractant	19.8
			3	38.6	-8	110.3	-19	63	0.35			
			4	35.1	-17	99.8	-27	85	0.35			
S4P5-5	compression triaxiale	5	1	44.1	-	144.6	-	18	0.30			
			2	40.8	-7	138.3	-4	34	0.30	64.6	60.0	23.3
			3	37.4	-15	123.3	-15	61	0.30			
			4	35.6	-19	110.8	-23	86	0.32			
S4P5-7	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	4.9	-	-

Tableau 4.11 - Grozon – Age d'exploitation intermédiaire (1970)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.6)

STATION 3 (1970)													
	type d'essai	Pc (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)	
S3P2E1-6	compression uniaxiale	0	1	40.8	-	115.1	-	30	0.35	38.1	22	16.2	
			2	39.6	-3	109.4	-5	53	0.36				
			3	38.8	-5	105.9	-8	76	0.37				
			4	38.3	-6	103.1	-10	94	0.37				
S3P2E1-4	compression uniaxiale	0	1	38.5	-	105.4	-	30	0.37	39.5	contractant	13.8	
			2	36.7	-5	102.3	-3	52	0.36				
			3	36.7	-5	101.6	-4	75	0.36				
			4	36.5	-5	101.5	-4	86	0.36				
S3P2E1-1	compression triaxiale	1	1	40.3	-	135.6	-	21	0.30	51.6	27	20.4	
			2	38.5	-4	127.2	-6	39	0.30				
			3	38.5	-4	122.4	-10	60	0.31				
			4	38.3	-5	116.2	-14	78	0.33				
S3P2E1-3	compression triaxiale	3	1	41.9	-	124.7	-	25	0.34	47.0	contractant	34.4	
			2	40.2	-4	117.3	-6	44	0.34				
			3	38.5	-8	114.7	-8	69	0.34				
			4	37.7	-10	112.8	-10	88	0.33				
S3P2E1-2	compression triaxiale	5	1	49.2	-	142.5	-	14	0.35	73.0	70.3	20.5	
			2	43.9	-11	130.6	-8	30	0.34				
			3	41.3	-16	123.7	-13	44	0.33				
			4	40.5	-18	121.2	-15	58	0.33				
S3P2E1-5	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	5.2	-	-	

Tableau 4.12 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920)
Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des blocs
(même légende que le tableau 4.6)

STATION 1/2 (1920)													
	type d'essai	Pc (MPa)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _r (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)	
S2P2E2-1	compression uniaxiale	0	1	37.9	-	101.4	-	29	0.37	37.8	36.5	12.7	
			2	37.0	-2	97.5	-4	54	0.38				
			3	35.7	-6	94.2	-7	75	0.38				
			4	34.6	-9	91.7	-10	92	0.38				
S2P1E3-6	compression uniaxiale	0	1	35.8	-	106.0	-	29	0.34	42.0	contractant	11.2	
			2	36.4	2	105.4	-1	50	0.35				
			3	36.0	1	103.5	-2	71	0.35				
			4	35.6	-1	100.5	-5	85	0.35				
S2P1E3-5	compression uniaxiale	0	1	36.0	-	111.7	-	27	0.32	43.5	contractant	7.3	
			2	36.3	1	112.0	0	48	0.32				
			3	36.3	1	107.2	-4	68	0.34				
			4	35.5	-1	106.1	-5	80	0.33				
S1P3E2-4	compression uniaxiale	0	1	37.4	-	104.0	-	32	0.36	43.7	contractant	12.6	
			2	35.9	-4	103.0	-1	57	0.35				
			3	35.2	-6	101.8	-2	81	0.35				
			4	34.2	-9	101.6	-2	89	0.34				
S1P1E3-3	compression uniaxiale	0	1	38.2	-	111.1	-	32	0.34	42.9	40.7	10.5	
			2	38.3	0	113.9	3	47	0.34				
			3	38.3	0	113.3	2	65	0.34				
			4	38.2	0	111.3	0	96	0.34				
S1P1E1-2	compression uniaxiale	0	1	41.7	-	145.7	-	27	0.29	40.1	32.5	13.0	
			2	42.7	2	135.0	-7	49	0.32				
			3	41.6	0	126.6	-13	75	0.33				
			4	40.0	-4	114.5	-21	98	0.35				
S2P1E3-2	compression triaxiale	1	1	42.0	-	136.0	-	28	0.31	41.0	contractant	16.4	
			2	43.0	2	132.5	-3	54	0.32				
			3	42.0	0	126.5	-7	79	0.33				
			4	40.0	-5	107.9	-21	99	0.37				
S1P3E2-1	compression triaxiale	1	1	44.3	-	112.7	-	21	0.39	56.9	56.7	13.6	
			2	44.4	0	107.2	-5	43	0.41				
			3	43.5	-2	103.3	-8	61	0.42				
			4	42.2	-5	99.3	-12	77	0.42				
S2P1E3-7	compression triaxiale	3	1	43.6	-	127.7	-	22	0.34	53.8	36.9	11.0	
			2	40.1	-11	118.7	-7	38	0.34				
			3	39.4	-13	106.9	-16	58	0.37				
			4	37.9	-16	101.9	-20	76	0.37				
S1P3E2-3	compression triaxiale	3	1	47.0	-	137.0	-	28	0.34	54.6	36.9	15.2	
			2	41.7	-11	117.8	-14	49	0.35				
			3	39.9	-15	111.8	-18	74	0.36				
			4	39.5	-16	105.9	-23	96	0.37				
S2P1E3-4	compression triaxiale	5	1	45.2	-	133.6	-	23	0.34	57.0	50.3	18.4	
			2	42.9	-5	130.5	-2	44	0.33				
			3	39.6	-12	120.0	-10	66	0.33				
			4	36.6	-19	109.0	-18	88	0.34				
S2P1E3-1	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	3.5	-	-	
S1P1E1-1	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	3.9	-	-	
S1P1E3-2	traction ind.	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	-	-	

Tableau 4.13 - Grozon –Paramètres mécaniques des échantillons de gypse provenant des sondages
(type d'essai : compression uniaxiale ; même légende que le tableau 4.6 ; Z : profondeur d'échantillonnage)

		Z (m)	N° cycle	E (GPa)	Δ (%)	E _T (GPa)	Δ (%)	%/R	v	R (MPa)	D (MPa)	Le (MPa)
STATION 4 (2000)	22-11	0.23	1	37.3	-	124.9	-	18	0.30	32	contractant	-
			2	37.4	0	123.6	-1	33	0.30			
			3	36.9	-1	120.7	-3	72	0.31			
	22-12	0.49	1	36.5	-	111.3	-	24	0.33	39.1	34.0	7.0
			2	35.7	-2	109.6	-2	54	0.33			
			3	34.2	-6	97.6	-12	81	0.35			
	22-13	0.79	1	37.0	-	112.9	-	13	0.33	38.0	37.2	6.3
			2	37.4	1	116.1	3	28	0.32			
			3	37.0	0	116.3	3	61	0.32			
	22-16	1.69	1	37.1	-	116.6	-	30	0.32	30.0	contractant	-
			2	38.0	2	117.7	1	52	0.32			
			3	35.3	-5	115.4	-1	86	0.31			
	22-19	2.59	-	-	-	-	-	-	-	39.9	-	-
	22-110	2.89	1	37.6	-	115.4	-	24	0.33	45.0	40.2	8.1
			2	37.5	0	116.2	1	39	0.32			
			3	36.0	-4	114.3	-1	58	0.31			
STATION 1 (1920)	12-11	0.12	1	36.2	-	98.5	-	24	0.37	30.9	30.0	4.5
			2	34.5	-5	100.4	2	60	0.34			
			3	33.3	-8	90.2	-8	87	0.37			
	12-12	0.32	-	-	-	-	-	-	-	20.9	-	-
	12-13	0.62	1	37.4	-	115.7	-	33	0.32	24.6	23.3	5.0
			2	36.5	-2	113.5	-2	71	0.32			
			3	32.6	-13	92.2	-20	94	0.35			
	12-14	0.92	1	35.8	-	107.8	-	18	0.33	33.1	31.4	9.0
			2	37.7	5	104.9	-3	34	0.36			
			3	35.6	-1	103.6	-4	55	0.34			
	12-15	1.22	-	-	-	-	-	-	-	34.9	-	-
	12-17	1.82	1	36.3	-	108.9	-	17	0.33	33.5	29.2	3.2
			2	35.8	-1	105.1	-3	34	0.34			
			3	36.5	1	105.5	-3	55	0.35			
	12-18	2.12	1	38.8	-	123.7	-	23	0.31	45.0	40.0	8.5
			2	38.1	-2	117.7	-5	40	0.32			
			3	37.7	-3	108.7	-12	60	0.35			
	12-19	2.42	-	-	-	-	-	-	-	17.3	-	-

Tableau 4.14 - Moyennes et écarts-types de différents paramètres mécaniques
des tableaux 4.6 à 4.8 et 4.10 à 4.12

carrière	âge de l'exploitation	R (MPa)		E (GPa)		v		D (MPa)		Le (MPa)	
		moy.	écart-type	moy.	écart-type	moy.	écart-type	moy.	écart-type	moy.	écart-type
LIVRY GARGAN	2000	17.3	0.5	10.55	0.07	0.18	0.01	8.4	0.2	1.3	0.2
	1950	16.5	3.3	17.10	2.26	0.23	0.03	14.5	2.9	2.2	0.6
	1900	16.3	0.3	18.85	1.20	0.24	0.01	11.3	3.9	4.7	0.8
GROZON	2000	34.5	8.4	35.00	5.70	0.31	0.02	31.4	7.7	15.5	5.0
	1970	38.8	1.0	39.60	1.62	0.36	0.01	22.0	-	15.0	1.7
	1920	41.6	2.3	37.83	2.17	0.33	0.03	36.5	4.1	11.2	2.1

4.3.2.4- Interprétation-Discussion – Paramètres mécaniques

Pour chacune des deux carrières, les valeurs moyennes de certains paramètres mécaniques sont tout d'abord comparées avec celles qui ont été trouvées dans la bibliographie.

La suite de l'interprétation-discussion des résultats peut se faire selon les deux modes de prélèvement :

- La première approche prend en compte les résultats déterminés à partir des blocs prélevés sur le bord des piliers dans des stations d'âges d'exploitation différents. Après une comparaison des paramètres mécaniques qui n'est possible que pour les échantillons de la carrière de Grozon, le comportement mécanique est détaillé.

Pour le gypse de la carrière de Livry Gargan, les paramètres et le comportement mécanique sont uniquement présentés sans pouvoir être comparés en fonction de l'âge d'exploitation.

- La seconde prend en compte les paramètres mécaniques déterminés à partir des sondages horizontaux réalisés dans des piliers d'âges d'exploitation différents. Cette deuxième partie permet de rendre compte d'une éventuelle variation des paramètres mécaniques entre le bord et le cœur de deux piliers dans chacune des deux carrières.

4.3.2.4.1- Comparaison avec les valeurs bibliographiques

Les paramètres mécaniques des éprouvettes prélevées au bord des piliers de la carrière de Livry Gargan sont différents de ceux de la carrière de Grozon. Ce résultat est comparable avec ceux qui ont été trouvés dans la littérature.

Pour chacun des deux types de gisement, les valeurs moyennes de la résistance en traction indirecte et en compression uniaxiale sont en accord avec les valeurs moyennes calculées à partir des données bibliographiques (Figures 4.16 et 4.17).

La même remarque est valable pour le module de déformabilité (Figure 4.18). Avec ces résultats, les deux carrières retenues pour identifier les paramètres physiques du gypse peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des gisements.

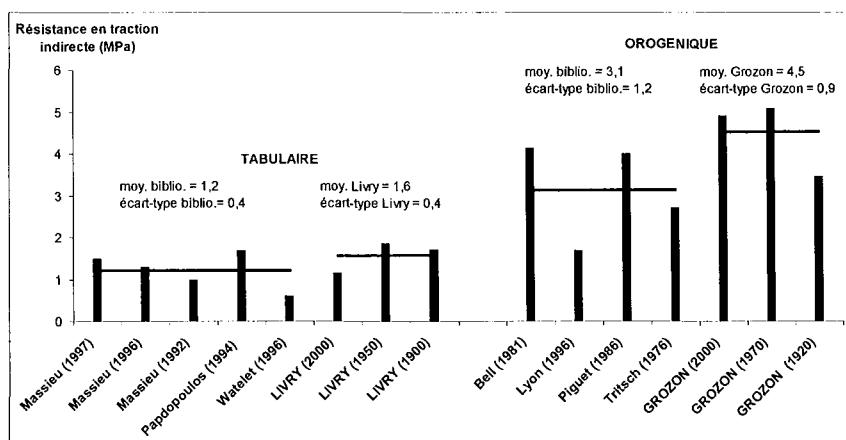


Figure 4.16 - Résistances en traction indirecte issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âges de la zone exploitée)

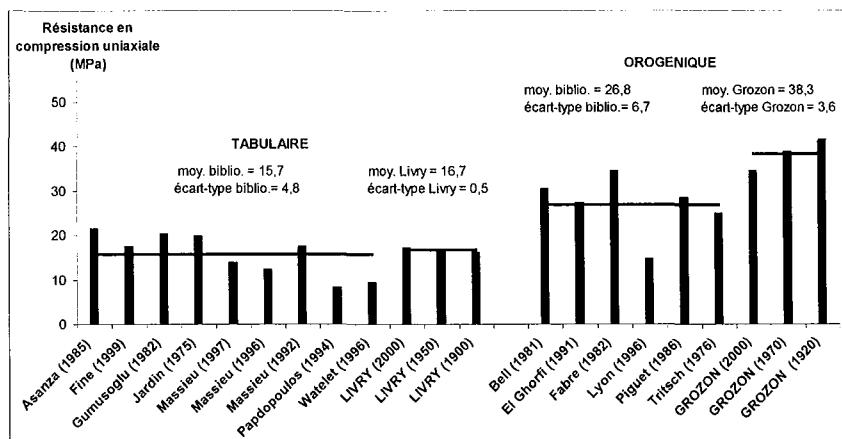


Figure 4.17 - Résistances en compression uniaxiale issues de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âges de la zone exploitée)

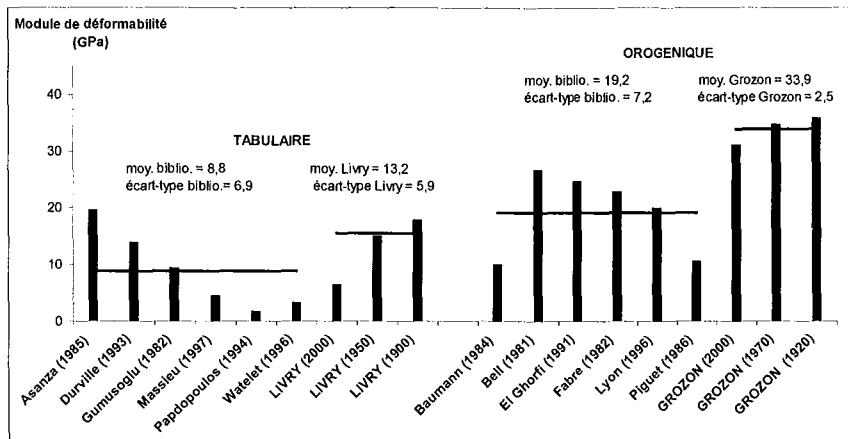


Figure 4.18 - Modules de déformabilité issus de la littérature et valeurs déterminées pour le gypse des carrières de Livry Gargan et Grozon (2000, 1970, 1950, 1920 & 1900 : âges de la zone exploitée)

4.3.2.4.2- Comparaison en fonction de l'âge d'exploitation

Le gypse de Livry Gargan

La dispersion d'un certain nombre de paramètres mécaniques moyens en fonction de l'âge d'exploitation est relativement importante (Figure 4.19).

Les hypothèses avancées dans l'interprétation-discussion des résultats de la caractérisation physique sont toujours valables. Celles-ci peuvent expliquer la dispersion des variations des paramètres mécaniques moyens.

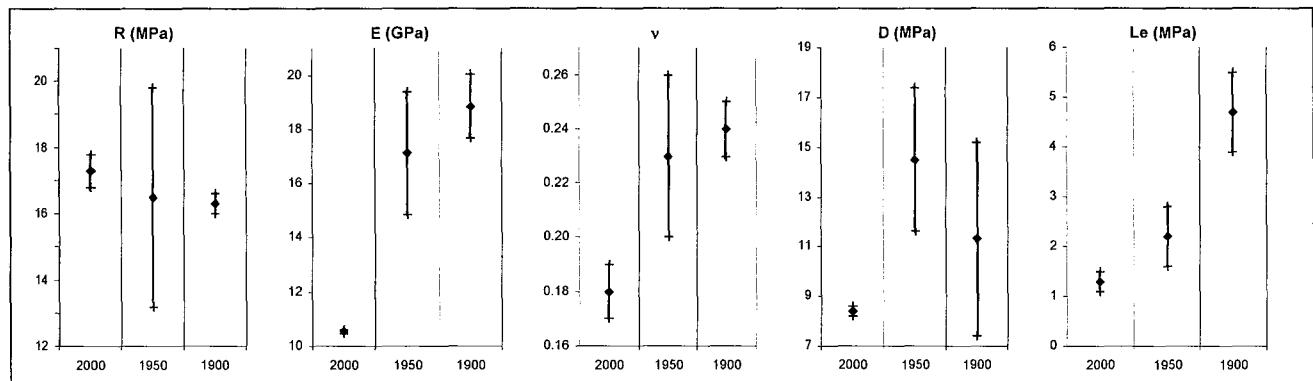


Figure 4.19 - Dispersion de différents paramètres mécaniques en fonction de l'âge d'exploitation (valeurs moyennes et écarts-types)

Pour les échantillons d'âge d'exploitation récent, le comportement est élasto-plastique avec une phase plastique très importante (Figure 4.20). La rupture quasi-ductile en compression uniaxiale devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement (Figure 4.22).

Pour les échantillons d'âge d'exploitation ancien, le comportement est également élasto-plastique mais la phase plastique est très réduite (Figure 4.21). La rupture est également quasi-ductile en compression uniaxiale pour devenir ductile avec l'augmentation de la pression de confinement.

L'ensemble des courbes contrainte-déformation des essais de compression uniaxiale et triaxiale sont dans l'annexe 4.3.

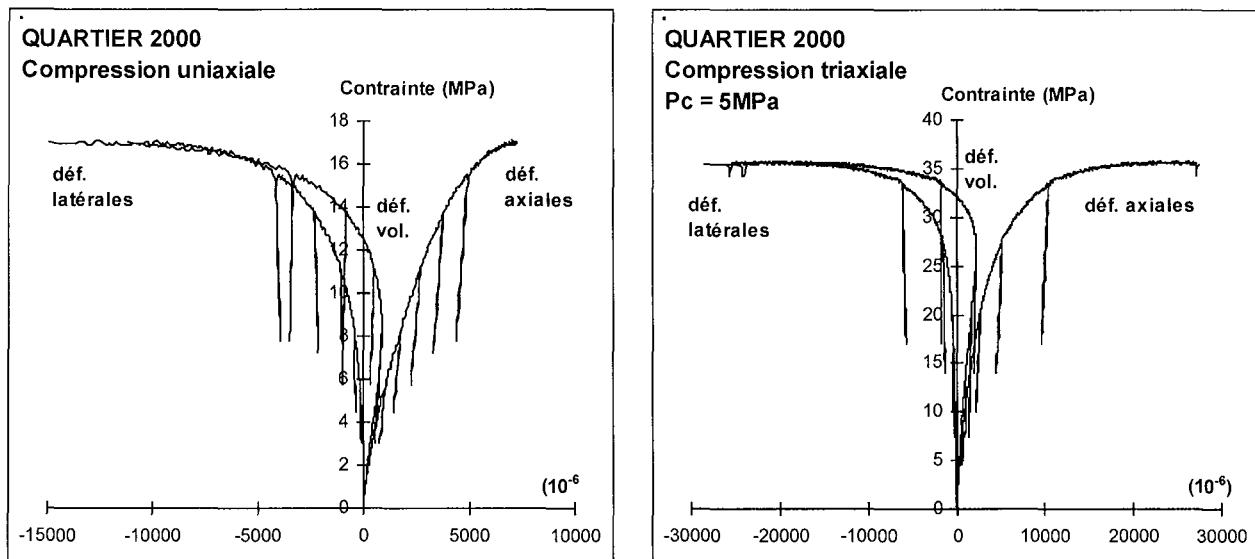


Figure 4.20 - Livry Gargan – Age d'exploitation actuel (2000)
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et
d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa
(les échelles des axes des abscisses et des ordonnées sont différentes)

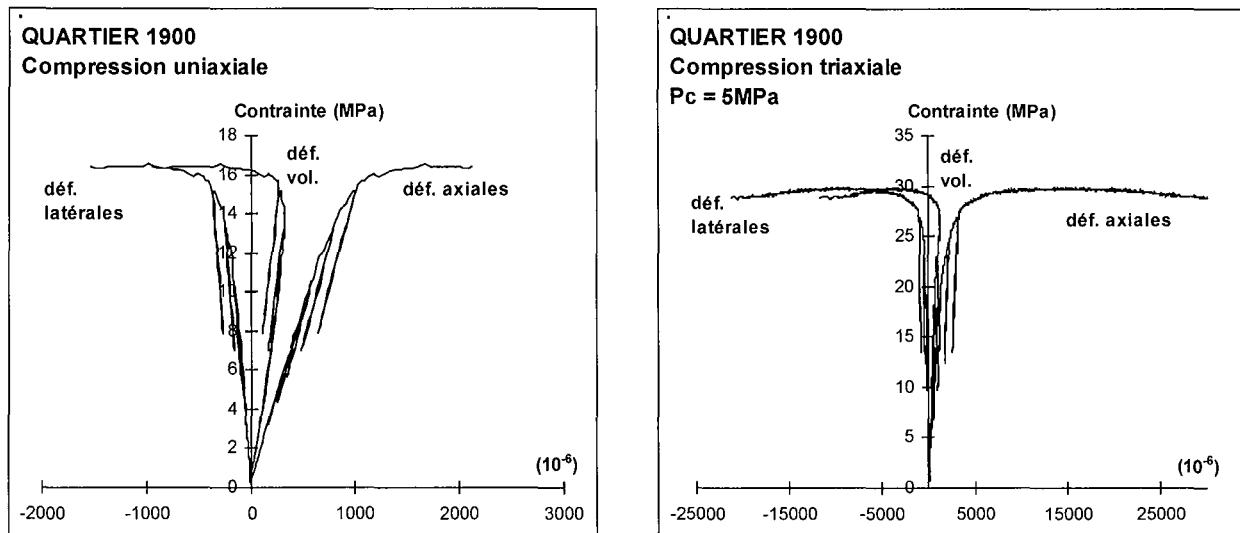


Figure 4.21 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900)
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et
d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa
(les échelles des axes des abscisses et des ordonnées sont différentes)

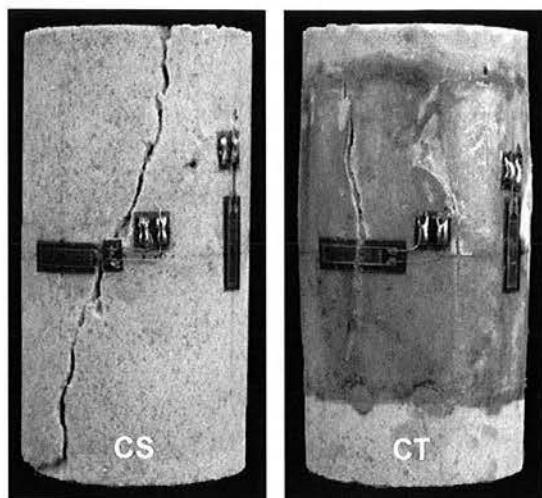


Figure 4.22 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Rupture quasi-ductile dans le cas d'une compression uniaxiale (CS) et rupture ductile dans le cas d'une compression triaxiale (CT) avec une pression de confinement de 5 MPa

Le calcul des déformations plastiques déviatoriques confirme les propos précédents. La quantité des déformations plastiques déviatoriques, calculée à partir des essais réalisés avec des échantillons « récents », est sensiblement supérieure à celle des échantillons « anciens » (Figure 4.23).

L'évolution des modules de déformation en fonction du déviateur peut nous informer quant à la présence d'un endommagement. En calculant les rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ (où $i = 1$; E est le module de Young ; E_T est le module de déformation transversale) en fonction du niveau de contrainte normé par rapport à la rupture (Figures 4.24 et 4.25), différentes observations sont à noter :

- Pour chaque échantillon d'âge d'exploitation récent, le rapport $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ est globalement inférieur au rapport $E_{(i+1)}/E_{(i)}$. L'endommagement semble par conséquent induire une anisotropie dans la réponse du matériau. A l'inverse, pour chaque échantillon d'âge d'exploitation ancien, les deux rapports sont équivalents, l'endommagement induit dans ce cas une isotropie dans la réponse du matériau. L'anisotropie évoquée pourrait être due au litage granulométrique des échantillons « récents ». Ce litage est moins marqué sur les échantillons dits « anciens ».
- Les rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ en fonction de la pression de confinement permettent de différencier les échantillons : la diminution des rapports lors d'un essai de compression uniaxiale est moins importante que celle d'un essai de compression triaxiale. L'endommagement de la matrice augmente bien avec l'augmentation de la pression de confinement.

Les résistances au pic mais également le seuil de dilatance et la limite élastique s'alignent raisonnablement bien sur une droite dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$). Quel que soit l'âge d'exploitation, ces différents critères se détachent très clairement les uns des autres (Figure 4.26). Ce résultat illustre un comportement clairement élasto-plastique où les deux phases sont nettement distinctes. Il est également intéressant d'observer les variabilités de l'angle de frottement et de la cohésion pour les différents critères retenus. L'angle de frottement augmente d'une manière importante entre la limite élastique et la rupture tandis que la cohésion reste quasi-constante. Ces variations sont valables quel que soit l'âge d'exploitation (Figure 4.27).

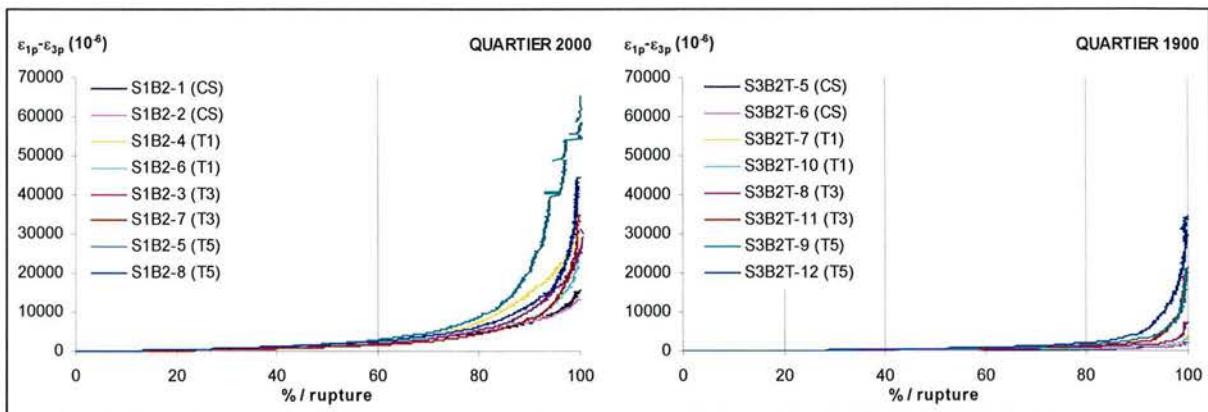


Figure 4.23 - Livry Gargan – Déformations plastiques déviatoriques en fonction du niveau de contrainte normé par rapport à la rupture (CS : compression uniaxiale ; T1 : compression triaxiale avec une pression de confinement (P_c) égale à 1 MPa ; T3 : compression triaxiale avec $P_c = 3$ MPa ; T5 : compression triaxiale avec $P_c = 5$ MPa)

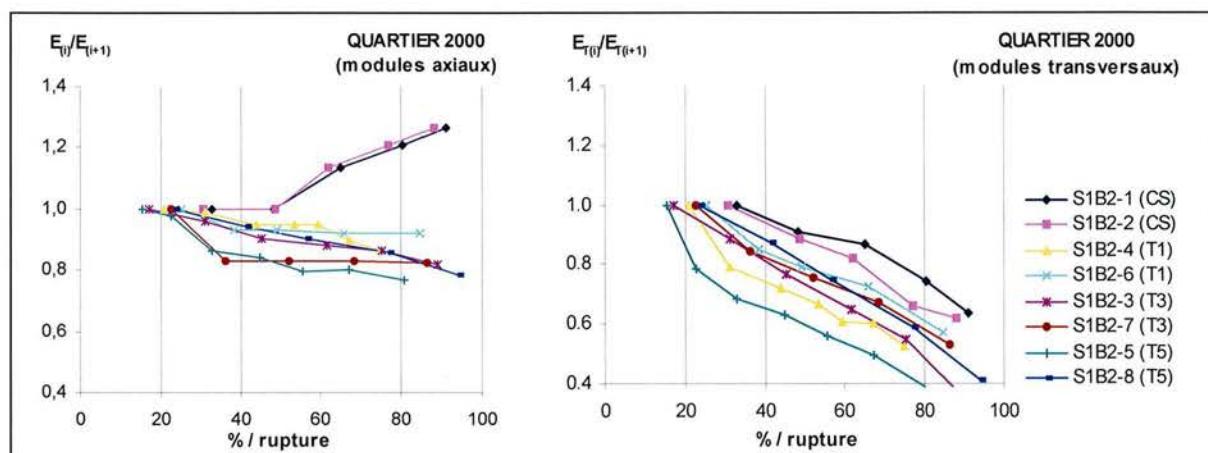


Figure 4.24 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent (2000) – Evolution des rapports $E_{(l+1)}/E_{(l)}$ et $E_{T(l+1)}/E_{T(l)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale (même légende que la figure 4.13 ; aucune hypothèse n'a pu être avancée au sujet de la variation des rapports $E_{(l+1)}/E_{(l)}$ des compressions uniaxiales)

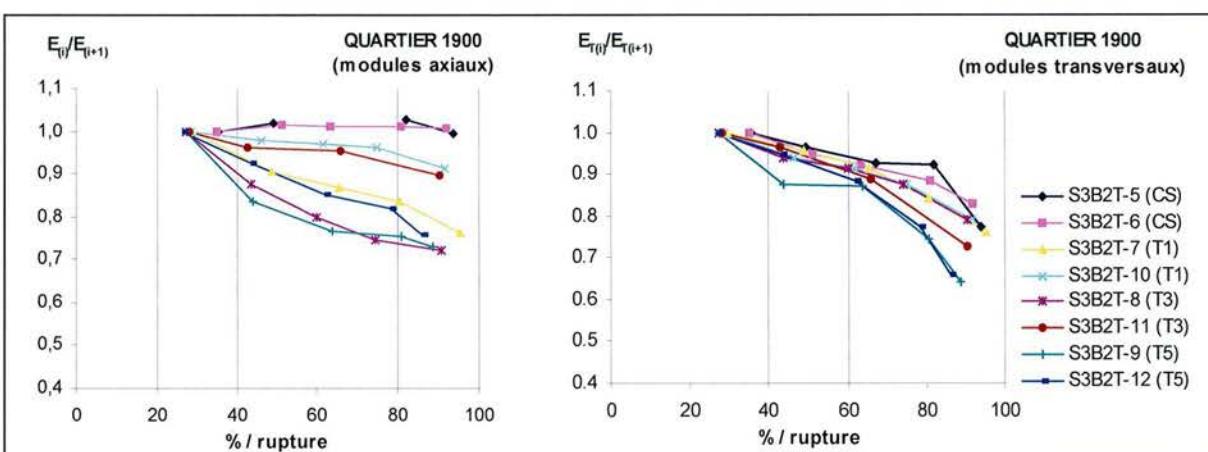


Figure 4.25 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien (1900) – Evolution des rapports $E_{(l+1)}/E_{(l)}$ et $E_{T(l+1)}/E_{T(l)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale (même légende que la figure 4.13)

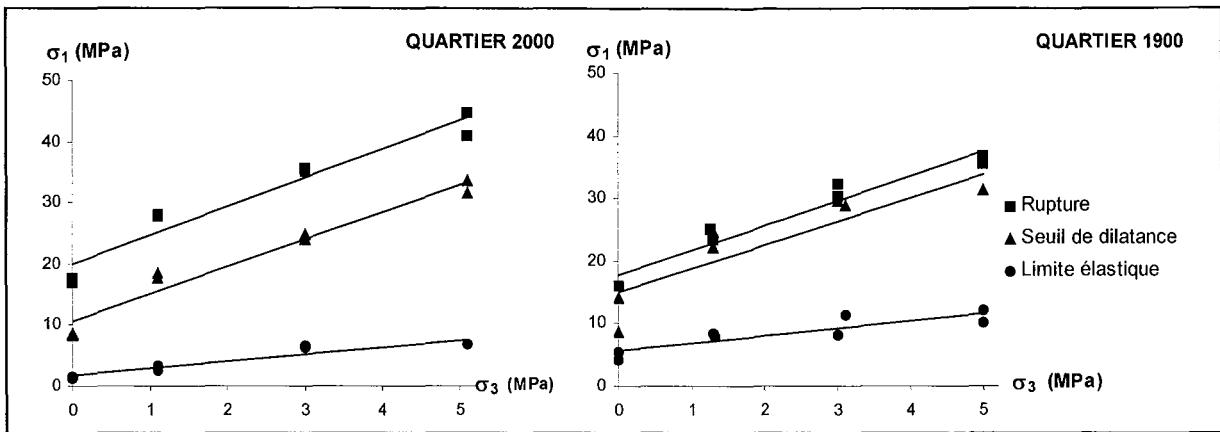


Figure 4.26 - Livry Gargan – Représentation des ruptures, seuils de dilatance et limite élastique dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$)

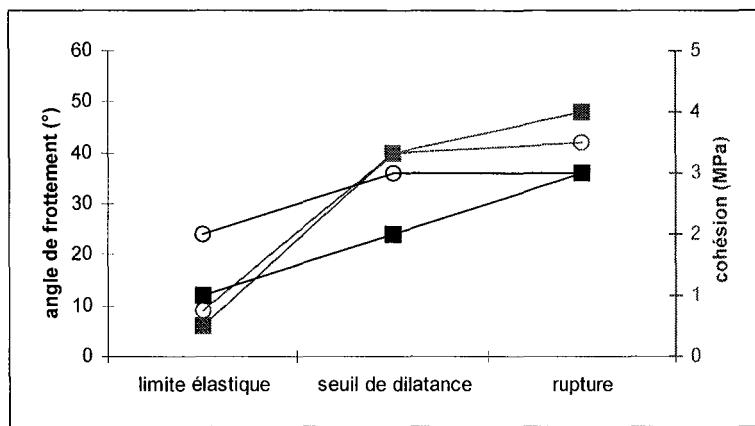


Figure 4.27 - Livry Gargan – Variation de l'angle de frottement et de la cohésion (calculés dans le plan des contraintes $\sigma_3 - \sigma_1$) entre la limite élastique et la rupture (carrés : quartier récent (2000) ; rond : quartier ancien (1900))

Le gypse de Grozon

Les variations d'un certain nombre de paramètres mécaniques moyens en fonction de l'âge d'exploitation ne sont pas significatives. Une dispersion relativement importante est à noter (Figure 4.28).

Les hypothèses avancées dans l'interprétation-discussion des résultats de la caractérisation physique sont toujours valables. Celles-ci peuvent expliquer la dispersion des variations des paramètres mécaniques moyens.

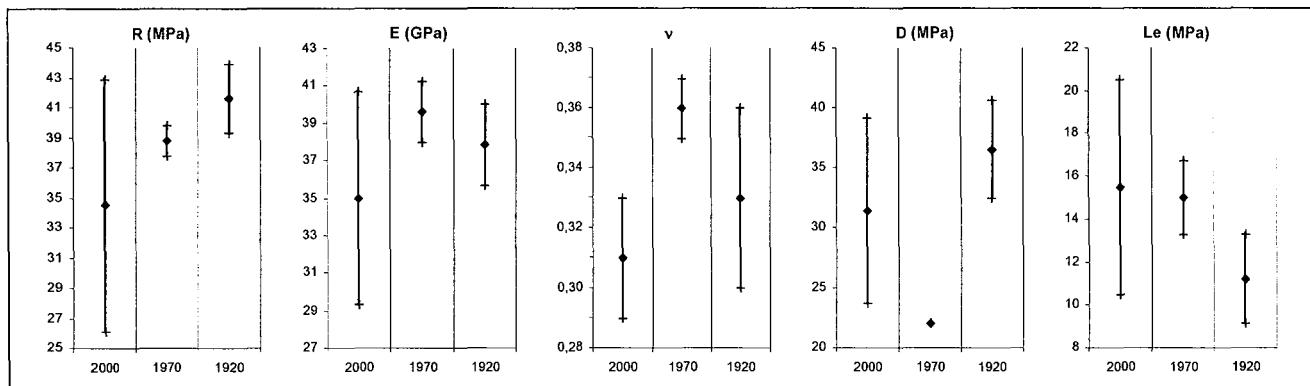


Figure 4.28 - Grozon – Dispersion de différents paramètres mécaniques en fonction de l'âge d'exploitation (valeurs moyennes et écarts-types)

Quel que soit l'âge d'exploitation des échantillons, le comportement mécanique instantané reste élasto-plastique. Les déformations plastiques avant le pic sont assez faibles et le seuil de dilatance est proche du pic. (Figures 4.29 et 4.30). La rupture, quasi-ductile lors d'un essai de compression uniaxiale, devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement (Figure 4.31).

L'ensemble des courbes contrainte-déformation des essais de compression uniaxiale et triaxiale sont annexe 4.4.

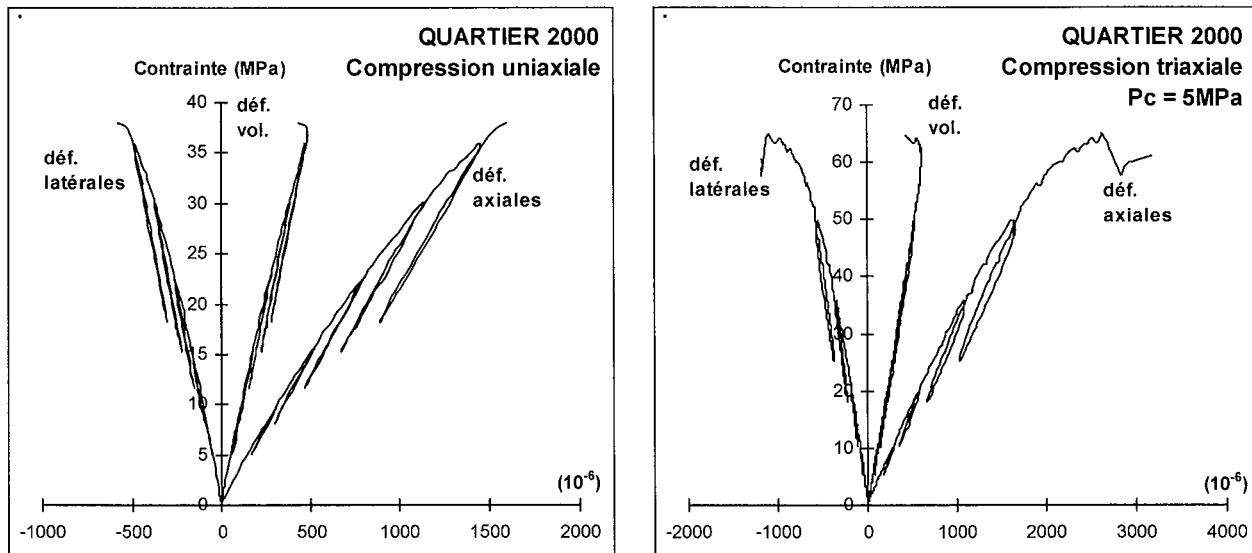


Figure 4.29 – Grozon – Age d'exploitation actuel (2000)
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et
d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa
(les échelles des axes des abscisses et des ordonnées sont différentes)

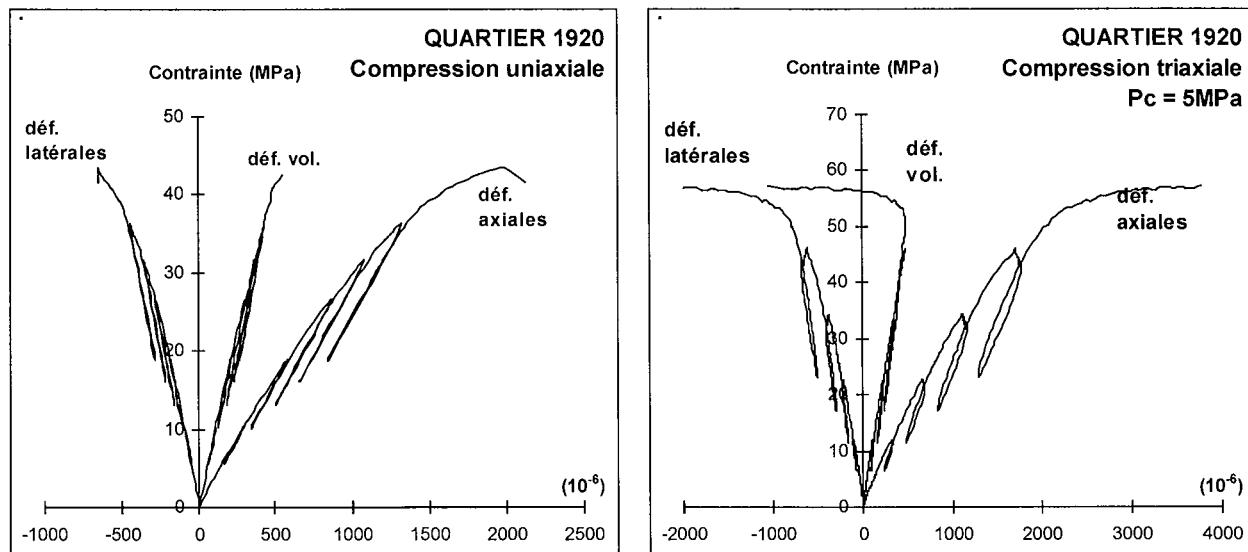


Figure 4.30 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920)
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et
d'un essai de compression triaxiale avec une pression de confinement de 5 MPa
(les échelles des axes des abscisses et des ordonnées sont différentes)

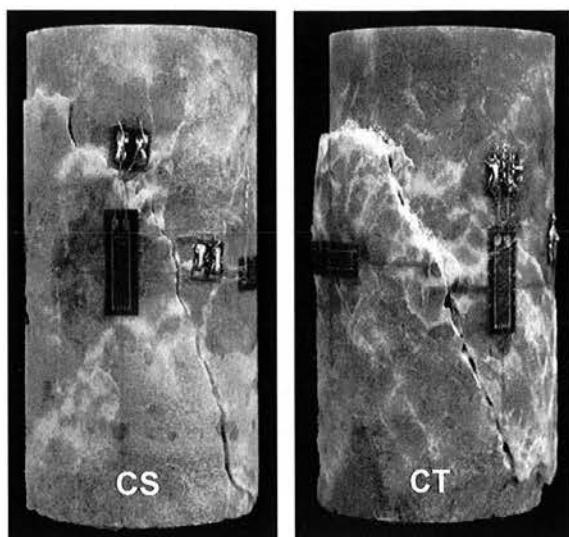


Figure 4.31 - Grozon – Rupture quasi-ductile dans le cas d'une compression uniaxiale (CS) et rupture ductile dans le cas d'une compression triaxiale (CT) avec une pression de confinement de 5 MPa

Le calcul des déformations plastiques déviatoriques confirme les propos précédents. La quantité des déformations plastiques déviatoriques, calculée à partir des essais réalisés avec des échantillons « récents » et « anciens », est sensiblement la même (Figure 4.32).

L'évolution des modules de déformation en fonction du déviateur peut nous informer quant à la présence d'un endommagement. En calculant les rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$, différentes observations sont à noter (Figures 4.33 et 4.34) :

- Les rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ semblent d'une manière générale diminuer dans des proportions équivalentes et quelle que soit la pression de confinement. L'endommagement semble induire une isotropie dans la réponse du matériau. D'un point de vue structural, la matrice ne présente pas de litage ni de différence granulométrique.
- Les rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ en fonction de la pression de confinement ne permettent pas de différencier les échantillons : la diminution des rapports lors d'un essai de compression uniaxiale n'est pas toujours plus faible que celle d'un essai de compression triaxiale. L'endommagement de la matrice n'augmente pas toujours avec l'augmentation de la pression de confinement. Des hétérogénéités dans la matrice peuvent amplifier ou atténuer la déformabilité et la résistance de l'échantillon. Ces hétérogénéités ne sont pas forcément détectables lors de la caractérisation physique de l'échantillon.

Les résistances au pic mais également le seuil de dilatance et la limite élastique s'alignent raisonnablement bien sur une droite dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$). Ces différents critères diminuent avec le vieillissement du gypse (Figure 4.35). La dilatance n'est pas toujours très bien identifiée : le matériau a un comportement d'abord contractant et dans certains cas, il devient dilatant peu avant la rupture. Ces résultats illustrent un comportement plutôt élastique du matériau. Il est intéressant d'observer les variabilités de l'angle de frottement et de la cohésion pour les différents critères retenus. Dans le cas du gypse sain (quartier d'âge d'exploitation récent), l'angle de frottement et la cohésion augmentent d'une manière importante entre la limite élastique et la rupture. Dans le cas du gypse vieilli (quartier d'âge d'exploitation ancien), l'angle de frottement et la cohésion semblent également augmenter (Figure 4.36).

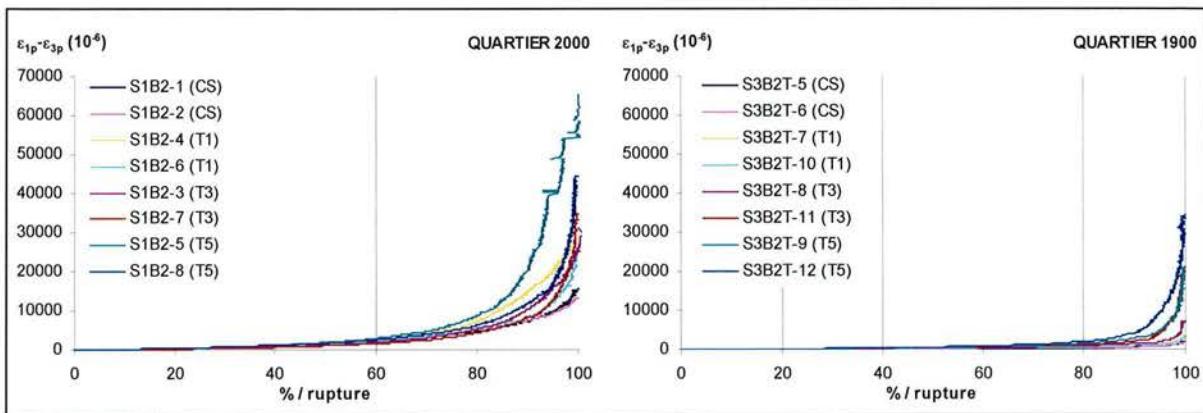


Figure 4.32 - Grozon – Déformations plastiques déviatoriques en fonction du niveau de contrainte normé par rapport à la rupture (CS : compression uniaxiale ; T1 : compression triaxiale avec une pression de confinement (P_c) égale à 1 MPa ; T3 : compression triaxiale avec $P_c = 3$ MPa ; T5 : compression triaxiale avec $P_c = 5$ MPa)

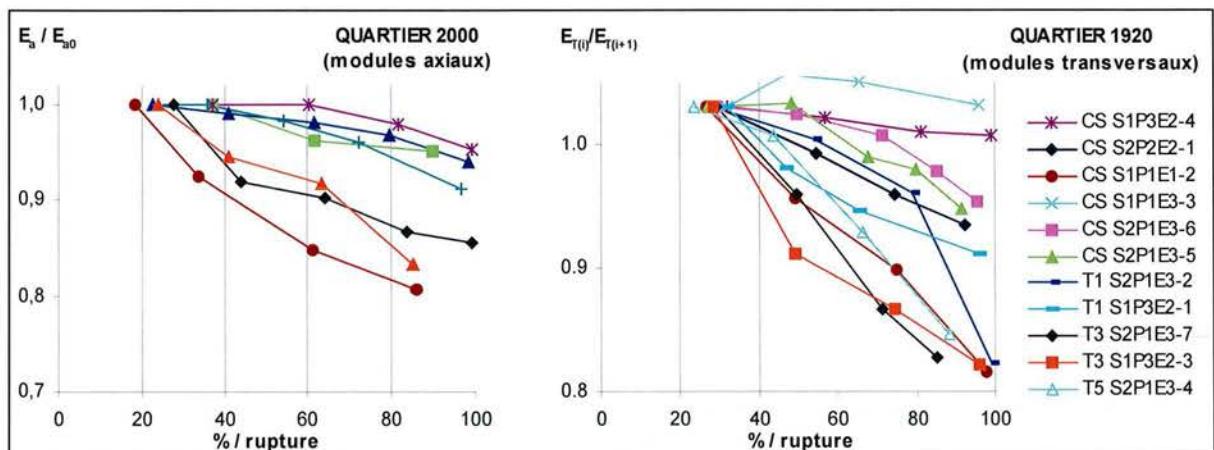


Figure 4.33 - Grozon – Age d'exploitation récent (2000) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale (même légende que la figure 4.21)

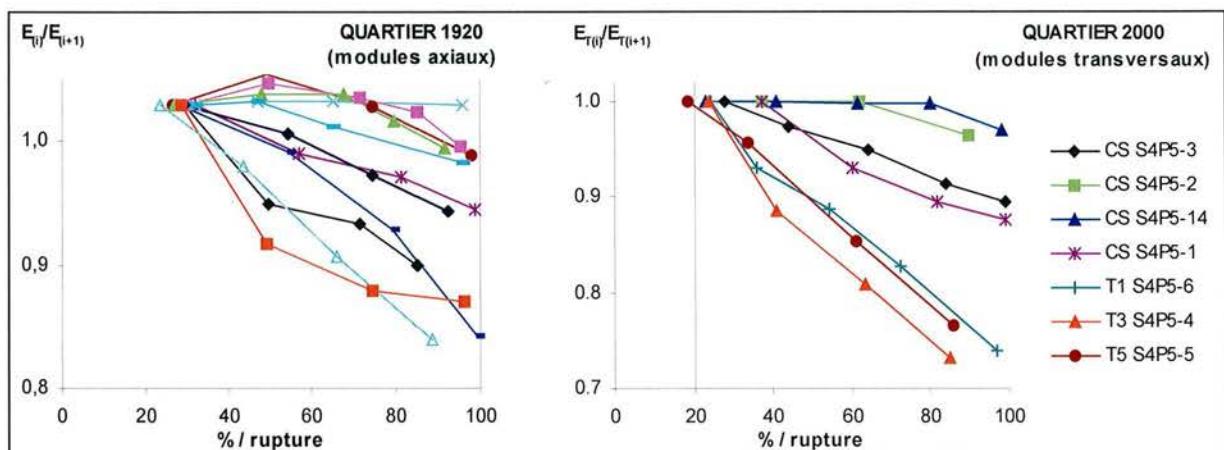


Figure 4.34 - Grozon – Age d'exploitation ancien (1920) – Evolution des rapports $E_{(i+1)}/E_{(i)}$ et $E_{T(i+1)}/E_{T(i)}$ au cours des essais de compression uniaxiale et triaxiale (même légende que la figure 4.21)

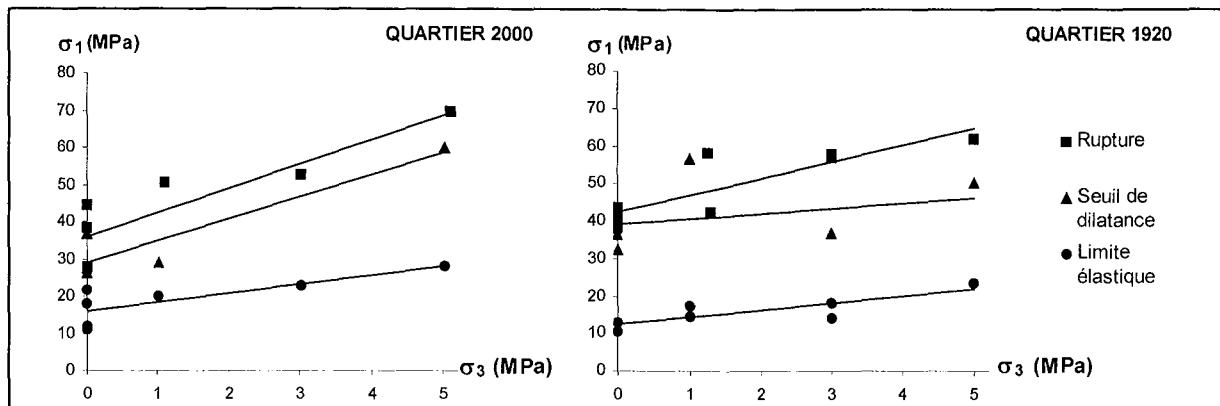


Figure 4.35 - Grozon – Représentation des ruptures, seuils de dilatance et limite élastique dans le plan des contraintes ($\sigma_3 - \sigma_1$)

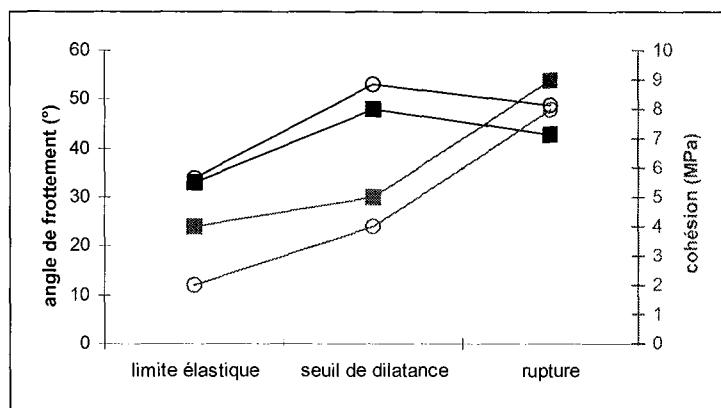


Figure 4.36 - Grozon – Variation de l'angle de frottement et de la cohésion (calculés dans le plan des contraintes $\sigma_3 - \sigma_1$) entre la limite élastique et la rupture (carrés : quartier récent (2000) ; rond : quartier ancien (1920))

4.3.2.4.3- Comparaison en fonction du vieillissement

L'étude des variations d'un certain nombre de paramètres mécaniques le long des sondages horizontaux jusqu'au cœur des piliers devrait permettre de préciser l'influence des dissolutions observées.

Les résultats de la caractérisation mécanique des gypses de la carrière de Livry Gargan et de Grozon ont déjà été présentés dans les tableaux 4.9 et 4.13. Ces derniers sont commentés avant de poursuivre par leur interprétation.

Le gypse de Livry Gargan

La comparaison des caractéristiques mécaniques du gypse de deux sondages provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents est difficile pour des raisons déjà évoquées.

Les variations moyennes des paramètres mécaniques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation récent sont les suivantes (Figure 4.37) :

- La résistance en compression uniaxiale augmente de 3,5%.
- Le module de Young augmente de 15%.

Les variations moyennes des paramètres mécaniques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation ancien sont les suivantes (Figure 4.38) :

- La résistance en compression uniaxiale augmente de 16%.
- Le module de Young augmente de 17%.

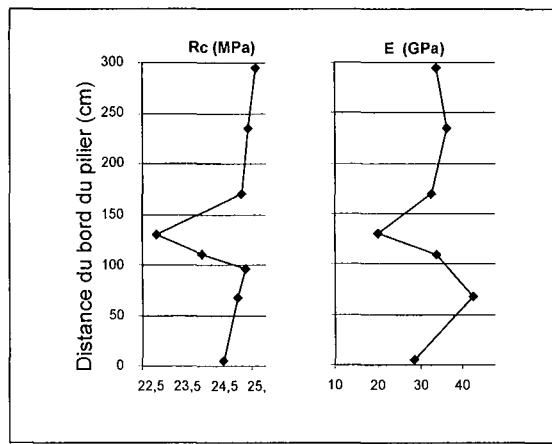


Figure 4.37 - Livry Gargan – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage LG1 (les incertitudes de mesure sont précisées)

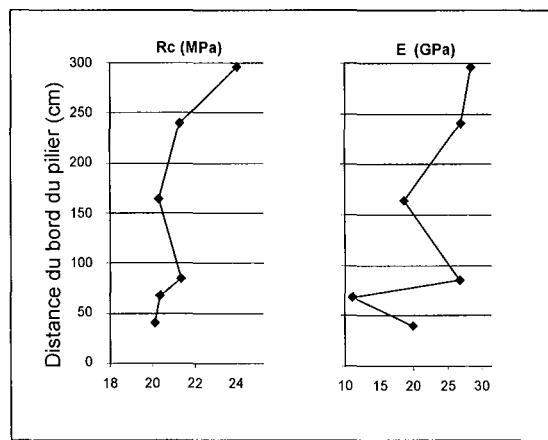


Figure 4.38 - Livry Gargan – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage LG4 (les incertitudes de mesure sont précisées)

Le gypse de la carrière de Grozon

La comparaison des caractéristiques mécaniques entre les deux sondages provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents est possible. Les sondages ont été réalisés à des niveaux stratigraphiques identiques dans le gypse 1.

Les variations moyennes des paramètres mécaniques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation récent sont les suivantes (Figure 4.39) :

- La résistance en compression uniaxiale augmente de 30%.
- Le module de Young augmente de 2,5%.

Les variations moyennes des paramètres mécaniques déterminés entre le bord et le cœur du pilier d'âge d'exploitation ancien sont les suivantes (Figure 4.40) :

- La résistance en compression uniaxiale augmente de 30%.
- Le module de Young augmente de 7%.

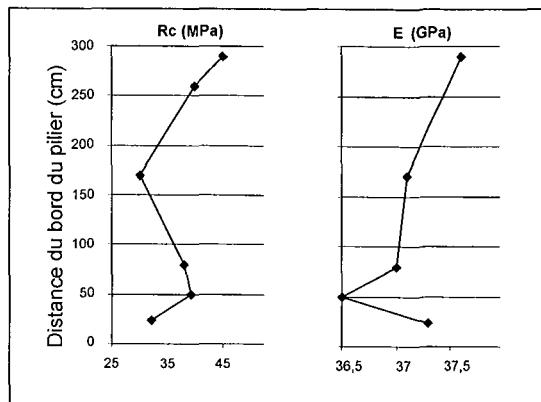


Figure 4.39 - Grozon – Age d'exploitation récent – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage G1 (les incertitudes de mesure sont précisées)

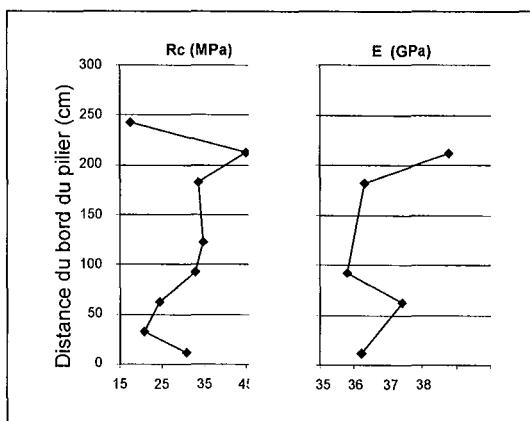


Figure 4.40 - Grozon – Age d'exploitation ancien – Variations des paramètres mécaniques déterminés le long du sondage G2 (les incertitudes de mesure sont précisées)

D'après les hypothèses énoncées dans l'interprétation-discussion des résultats de la caractérisation physiques, la résistance du gypse doit augmenter vers le cœur des piliers. La périphérie est en effet plus endommagée que le cœur et elle est constituée d'un matériau plus poreux. Les résultats des essais de compression uniaxiale et la variation moyenne du module de Young semblent le confirmer.

Afin de vérifier l'importance de l'hygrométrie à l'origine du vieillissement, un certain nombre d'éprouvettes ont été partiellement saturées et leur résistance en compression uniaxiale a été déterminée. L'ensemble de ces essais est présenté dans le paragraphe suivant.

4.3.3- Influence de l'hygrométrie sur la résistance du gypse

4.3.3.1- Saturation partielle des échantillons

L'hygrométrie est un paramètre externe pris en compte dans le processus de vieillissement du gypse. Ce point a déjà été abordé dans ce chapitre. Il est maintenant indispensable de montrer si l'hygrométrie a une influence immédiate sur la résistance à la compression uniaxiale ou bien encore le module de Young. Pour ce type d'étude, des échantillons vierges de tout essai ont été partiellement saturés. Le terme « influence immédiate » sous-entend que l'altération des cristaux par dissolution reste très faible. Cette réaction est donc exclue pour l'interprétation des résultats.

La saturation partielle des éprouvettes de gypse est obtenue grâce à l'utilisation de solutions salines saturées. Les normes NF X 15-119 et NF EN ISO 483 ont servi de support technique pour les mesures d'hygrométrie en fonction de la température ainsi que pour les précautions d'emploi des solutions salines saturées. Les échantillons sont placés dans une atmosphère avec une hygrométrie constante. Les conditions d'hygrométrie choisies, à une température constante de 20°C, sont les suivantes : 30 % correspondant à un état presque sec, 90 % correspondant à un état saturé dans les quartiers récents en été et 60 % pour avoir une valeur intermédiaire. La solution saline saturée provoquant une hygrométrie de 30% est composée de cristaux de sel de chlorure de calcium hexahydraté ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ; avec ce sel, l'hygrométrie attendue est normalement de 36,5%. L'hygrométrie de 60% est obtenue avec une solution saline saturée avec le sel de nitrite de sodium (NaNO_2) ; ce sel donne normalement une hygrométrie de 66%. Concernant la solution saline à 90%, le sel est du sulfate de zinc heptahydraté ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ; avec ce sel, l'hygrométrie attendue est de 90%.

La saturation partielle a pour conséquence directe une augmentation de la masse des échantillons de gypse. Quand l'augmentation de la masse n'est plus mesurable avec la balance utilisée (précision de +/- 0,025g), les éprouvettes sont instrumentées avec des jauge d'extensométrie ; l'essai de compression uniaxiale peut alors être réalisé. La durée moyenne de saturation mesurable de l'ensemble des échantillons est comprise entre 10 et 30 jours.

4.3.3.2- Résultats et commentaires

Ces essais ont été réalisés avec des échantillons de gypse provenant des deux carrières. La résistance moyenne en compression uniaxiale, le module de Young et le coefficient de Poisson moyens sont calculés à partir de deux ou trois échantillons pour chacune des hygrométries et pour chacun des âges. Quelques paramètres physiques moyens sont également calculés : la prise d'eau maximale de chaque échantillon qui reste théorique, la porosité accessible à l'eau, la teneur en eau pondérale et le degré de saturation.

Les différents résultats sont présentés dans le tableau 4.15. Malgré leur dispersion, un certain nombre de commentaires peut être fait :

- La prise de masse d'eau expérimentale est du même ordre de grandeur que celle qui a été calculée. La prise de masse d'eau de l'échantillon « récent » de la carrière de Livry Gargan après une saturation de 90% est supérieure à la prise de masse d'eau théorique. Sa porosité accessible à l'eau a probablement été sous-estimée ou bien il s'agit d'une erreur de pesée.
- La porosité moyenne accessible à l'eau est comparable à celle qui a été calculée sur d'autres échantillons (Tableaux 4.2 et 4.4).
- La teneur moyenne en eau pondérale et le degré de saturation moyen sont faibles, ces valeurs sont confirmées, pour le gypse de la carrière de Grozon, par les résultats d'un essai d'isotherme d'adsorption/désorption. Cet essai a été réalisé par un laboratoire indépendant suivant le procédé GAETAN-LEM Nancy sur un échantillon de gypse « ancien » (Figure 4.41). La teneur moyenne en eau pondérale et le degré de saturation moyen des échantillons « anciens » sont plus importants que ceux des échantillons récents. Ce résultat va dans le même sens que l'augmentation de la porosité moyenne accessible à l'eau.
- Une tendance à la diminution de la résistance avec l'augmentation de l'hygrométrie est à noter. La diminution maximale de résistance en compression uniaxiale entre des échantillons de gypse de Livry Gargan partiellement saturés provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents est de l'ordre de 30% pour le cas le plus

défavorable (quartier ancien, hygrométrie = 90%). Pour les échantillons de la carrière de Grozon, la diminution de la résistance, dans le cas le plus défavorable, ne dépasse pas 25%.

- Le module de Young semble diminuer avec l'augmentation de la saturation uniquement pour les échantillons « anciens » et les variations du coefficient de Poisson ne présentent pas de tendance particulière.

Tableau 4.15 - Paramètres physiques et mécaniques relatifs à la saturation d'échantillons de gypse

(m_e : masse d'eau prise par l'échantillon pendant la phase de saturation ; m_t : masse d'eau maximale que devrait prendre l'échantillon ; n_w : porosité accessible à l'eau ; W : teneur en eau naturelle pondérale ; Sr : degré de saturation ; R : résistance en compression uniaxiale ; E : module de Young ; v : coefficient de Poisson)

		HYGROMETRIE						HYGROMETRIE			
		30%	60%	90%				30%	60%	90%	
LIVRY GARGAN	QUARTIER RECENT (2000)	m_e (g)	0,04 +/-0,02	0,17 +/-0,02	0,52 +/-0,05	GROZON	m_e (g)	0,01 +/-0,02	0,03 +/-0,02	0,12 +/-0,02	
		m_t (g)	0,16 +/-0,02	0,33 +/-0,04	0,55 +/-0,08		m_t (g)	0,01 +/-0,01	0,02 +/-0,01	0,03 +/-0,01	
		n_w (%)	2 +/-0,3				n_w (%)	0,1 +/-0,03			
		W (%)	-	0,4 +/-0,05	0,7 +/-0,05		W (%)	-	0,02 +/-0,01	0,1 +/-0,05	
		Sr (%)	-	15 +/-2	20 +/-4		Sr (%)	-	5 +/-2	20 +/-3	
		R (MPa)	17 +/-0,5	16,5 +/-0,2	15,7 +/-0,8		R (MPa)	41 +/-0,8	43,5 +/-1,6	42,5 +/-1,2	
		E (GPa)	11,2 +/-0,4	14,4 +/-0,4	16,3 +/-0,5		E (GPa)	38,8 +/-4,9	38,1 +/-2,5	40,8 +/-0,1	
LIVRY GARGAN	QUARTIER ANCIEN (1900)	v	0,15 +/-0,01	0,15 +/-0,01	0,20 +/-0,01		v	0,32 +/-0,01	0,31 +/-0,01	0,33 +/-0,03	
		m_e (g)	0,12 +/-0,02	0,78 +/-0,07	1,16 +/-0,15		m_e (g)	0,02 +/-0,02	0,02 +/-0,02	0,08 +/-0,02	
		m_t (g)	0,41 +/-0,08	0,82 +/-0,16	1,37 +/-0,27		m_t (g)	0,04 +/-0,01	0,08 +/-0,02	0,14 +/-0,02	
		n_w (%)	5 +/-1				n_w (%)	0,5 +/-0,1			
		W (%)	-	1 +/-0,1	2,5 +/-0,2		W (%)	-	0,04 +/-0,02	0,15 +/-0,05	
		Sr (%)	-	20 +/-1	50 +/-2		Sr (%)	-	10 +/-4	25 +/-6	
		R (MPa)	16,1 +/-1	13,5 +/-0,2	11,9 +/-0,6		R (MPa)	38 +/-1,5	35 +/-2	32,2 +/-2,5	
LIVRY GARGAN	QUARTIER ANCIEN (1900)	E (GPa)	19,2 +/-0,1	20,2 +/-0,3	17,9 +/-0,2		E (GPa)	40,8 +/-4,1	37,3 +/-1,8	36,7 +/-0,8	
		v	0,27 +/-0,02	0,27 +/-0,01	0,26 +/-0,02		v	0,34 +/-0,04	0,33 +/-0,05	0,34 +/-0,01	

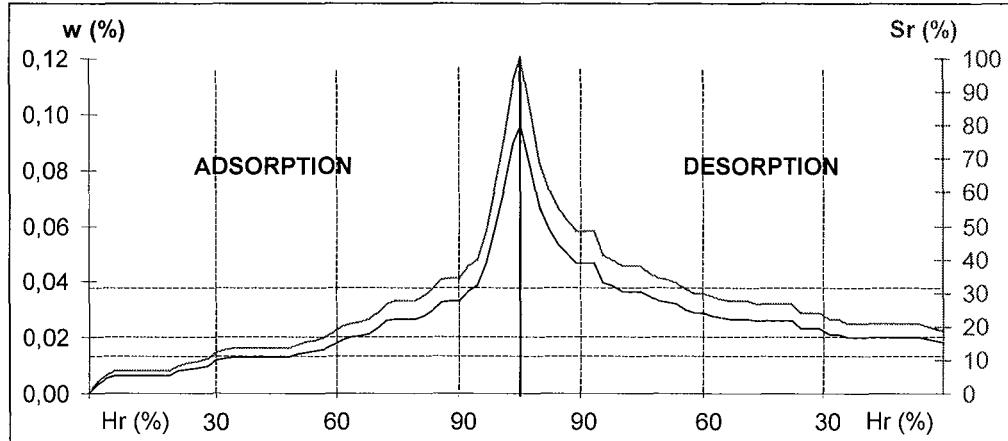


Figure 4.41 - Teneur en eau et degré de saturation en fonction de l'hygrométrie (déterminés à partir d'un essai d'isotherme d'adsorption/désorption)

4.4- CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était double : tout d'abord, l'étude du vieillissement, puis la caractérisation physico-mécanique des deux gypses.

La première partie a donc permis d'identifier la nature et la ou les causes du vieillissement, mais surtout son intensité en fonction de la profondeur d'observation dans les piliers. La dissolution observée a très certainement comme principale origine l'action de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère minière. De plus, son intensité décroît vers le cœur des piliers.

La deuxième partie a permis de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques des deux gypses.

Premièrement, les variations des paramètres physiques du gypse de Livry Gargan sont probablement dues aux différences structurales observées sur les échantillons provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents. Pour le gypse de Grozon, les différences structurales des différents échantillons provoquent certainement une dispersion des résultats. Pour le gypse des deux carrières souterraines, le facteur - âge d'exploitation - a des conséquences sur la résistance à la compression uniaxiale et triaxiale : elle diminue avec l'ancienneté de l'exploitation.

Deuxièmement, le comportement mécanique instantané du gypse de la carrière de Livry Gargan n'a pu être étudié en fonction de l'âge d'exploitation. Cependant, quelques caractères généraux peuvent être précisés pour un âge d'exploitation donné :

- échantillons d'âge d'exploitation récent : le comportement est plutôt plastique avec une rupture quasi-ductile qui devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement ;
- échantillons d'âge d'exploitation ancien : le comportement est élasto-plastique avec une rupture également quasi-ductile et devenant ductile avec l'augmentation de la pression de confinement.

Pour le gypse de Grozon, quel que soit l'âge d'exploitation des échantillons, le comportement mécanique instantané du gypse sec reste élasto-plastique avec une rupture quasi-ductile qui devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement.

L'influence du vieillissement sur les caractéristiques physico-mécaniques a également été montrée. Son intensité a pour conséquence des variations significatives des paramètres physiques et mécaniques.

L'influence d'une hygrométrie imposée, et donc de la saturation partielle, sur la résistance en compression uniaxiale a également été montrée. La plus faible résistance a été déterminée avec un échantillon d'âge d'exploitation ancien et avec une forte hygrométrie. Elle est d'autant plus importante que la porosité accessible à l'eau est élevée. Dans tous les cas, cette porosité est relativement faible - voire très faible - pour le gypse de la carrière de Grozon et l'influence immédiate de l'hygrométrie reste limitée. Malgré tout, la diminution de la résistance en compression uniaxiale est comprise entre 20 et 30% pour le cas le plus défavorable (quartier d'âge d'exploitation ancien et hygrométrie de 90%).

Finalement ces résultats préfigurent la suite des travaux, c'est-à-dire le comportement mécanique différé du gypse. Il sera étudié en fonction de l'hygrométrie mais aussi en fonction de l'âge d'exploitation.

CHAPITRE 5

COMPORTEMENT DIFFERE

5.1- INTRODUCTION

Dans un cadre général, le comportement différé est intrinsèque aux propriétés des matériaux. Il dépend de facteurs internes comme la composition chimique et minéralogique des constituants et de la texture et structure de la matrice. Cependant, il est fortement influencé par des conditions externes (température, contrainte, humidité, ...).

Il peut être étudié *in situ* grâce à un dispositif de mesures approprié. Dans des carrières souterraines ou des mines exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés, le dispositif de mesures peut être composé de convergencemètres. Ils sont généralement fixés entre des piédroits de plusieurs piliers ou bien entre le mûr et le toit des galeries (Saito, et al., 1986 ; Wilson et Ashwin, 1972 ; Chen et al., 1993 ; Campos De Orella, 1996). Dans des ouvrages souterrains revêtus, cet appareillage est placé entre les parois (Kaiser et Morgenstern, 1981 ; Rozière et Roques, 1982 ; Manfroy et al., 1985 ; Gurung et Iwao, 1998 ; Kontogianni et Stiros, 2002). La grandeur physique mesurée est alors un déplacement. Des extensomètres à ancrage simple ou multiple complètent généralement ce dispositif. Des déformations peuvent être alors calculées en plus des mesures de déplacement. Des paramètres externes, comme la température ou bien l'hygrométrie, sont parfois mesurés afin de pouvoir corrélérer leurs variations avec celles des convergences et des expansions (Kazan et Ghoreychi, 1997).

Au laboratoire, les essais de fluage permettent d'étudier le comportement différé d'une roche. Ils permettent d'observer et d'étudier la réponse, en fonction du temps et sous chargement constant, d'échantillons soumis à un environnement particulier où plusieurs paramètres peuvent être contrôlés (contrainte, température, hygrométrie, ...).

Finalement, deux échelles de longueur sont prises en compte dans l'étude du comportement différé d'une roche : le pilier, d'une dimension plurimétrique et l'éprouvette, pluricentimétrique. A travers les déplacements et les déformations vont apparaître deux échelles de temps nettement distinctes. Celle des déplacements ou des déformations du pilier est la décennie alors que celle des déformations de l'éprouvette pendant un essai de fluage est de quelques mois au maximum.

Le comportement différé des piliers de gypse de la carrière de Grozon a pu être étudié car nous disposons de mesures de convergence horizontale de plusieurs galeries et d'expansion de deux piliers pendant la période octobre 1977-décembre 1997. Le schéma d'instrumentation a été établi à l'époque par l'exploitant. Historiquement, ces mesures avaient pour but de rassurer l'exploitant sur la stabilité des différents quartiers. Par la suite, d'autres points de mesures ont été installés au centre géographique de la zone des vieux travaux.

Après une présentation des appareils de mesures et leur positionnement dans la carrière, les déplacements différés mesurés dus au fluage des piliers seront présentés. Ensuite, les vitesses de déplacement et le calcul des déformations et de leur vitesse permettra d'identifier les zones de piliers qui se déforment.

Dans le chapitre précédent, le rôle de l'hygrométrie a été mis en avant. Ces conséquences physico-mécaniques ont pu être montrées. L'enregistrement quotidien de l'hygrométrie, accompagné d'une reprise mensuelle des mesures de convergence, a été entrepris afin de connaître son influence sur le comportement différé du gypse. Le parallèle entre les précipitations et l'hygrométrie dans la carrière sera présenté en plus de cette éventuelle corrélation.

Des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée ont été réalisés au laboratoire avec des éprouvettes de gypse des carrières de Grozon et de Livry Gargan. Le comportement différé d'un tel matériau a fait l'objet d'études antérieures au laboratoire (Griggs, 1939, 1940 ; Griggs et Handin, 1960 ; Morlier, 1964 ; Massieu, 1996). Cependant, tous ces essais ont été réalisés dans des conditions dites standard, c'est-à-dire sans mesure des déformations différencées transversales et avec une précision de l'ordre de 1.10^{-4} . Le contrôle, le maintien et le suivi de l'hygrométrie n'avaient pas été entrepris même si les conséquences d'une variation importante de ce paramètre avaient déjà été évoquées.

Les variables, hygrométrie et âge d'exploitation, nécessitent de multiplier les essais. Leurs influences sur le comportement différé peuvent être alors étudiées.

A la suite de cette partie sont présentés les dispositifs expérimentaux permettant la réalisation des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée. Le bâti de fluage, l'établissement, le contrôle et le maintien de l'hygrométrie et de la température sont ainsi décrits. L'instrumentation des éprouvettes et l'acquisition des mesures sont également détaillés. Le protocole expérimental est ensuite clairement expliqué afin de faciliter la reconduite et une systématisation des essais. Enfin, les conditions expérimentales, les résultats et l'interprétation-discussion concluent ce chapitre.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier le comportement différé du gypse. La première partie est consacrée au comportement différé des piliers de gypse dans la carrière. La seconde partie traite du comportement différé d'éprouvettes de gypse étudié au laboratoire.

5.2- MESURES IN SITU : DEPLACEMENT ET DEFORMATION

5.2.1- Dispositif des mesures

Deux types d'instruments de mesure ont été installés par l'exploitant dans différents quartiers de l'exploitation. Des convergencemètres permettaient de mesurer les rapprochements entre les piédroits de deux piliers voisins grâce à un fil invar fixé sur l'un des deux piliers et à une tête de lecture fixée sur l'autre pilier. La précision de cette mesure était de $\pm 10 \mu\text{m}$. Des extensomètres à fils invar, à trois points de mesure, étaient ancrés à différentes profondeurs dans le pilier. La précision de cette mesure était de $\pm 10 \mu\text{m}$.

A l'heure actuelle, de nouveaux ancrages ont été scellés sur les piédroits de plusieurs piliers déjà instrumentés. L'ancienne instrumentation datait de 1977 et elle ne fonctionnait plus correctement. Des piliers d'âge d'exploitation récent ont également été instrumentés. La précision des nouvelles mesures de convergence est également de $\pm 10 \mu\text{m}$.

Des mesures d'hygrométrie et de température ont été réalisées dans deux secteurs différents de l'exploitation. Le premier hygromètre est placé à proximité des travaux actuels, l'aérage y est forcé. A l'inverse, le second hygromètre est situé dans un quartier d'âge d'exploitation ancien où l'aérage est extrêmement réduit.. La gamme de mesures de l'hygrométrie est 0 à 100% avec une précision de $\pm 2\%$ dans la gamme 0-90% et $\pm 3\%$ dans la gamme 90-100%. La précision de la mesure de la température est de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

L'ensemble des différentes stations de mesure, actuelles et passées, est localisé sur la figure 5.1. Il est important de noter que les quartiers aérés sont différents pendant la vie de la carrière.

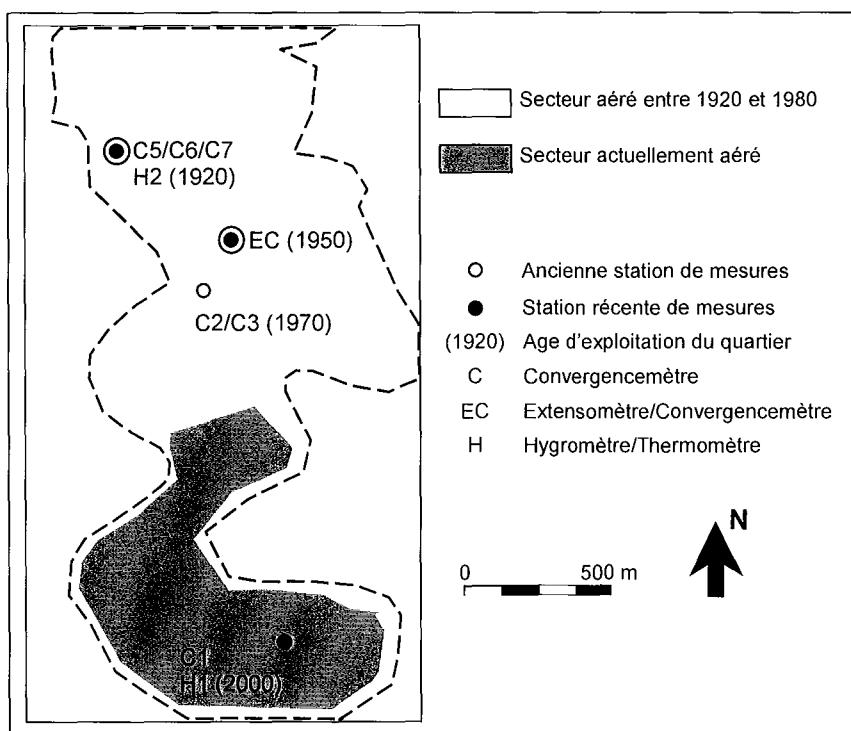


Figure 5.1 - Localisation des stations de mesures
(Toutes les stations sont situées au niveau du banc de gypse 1)

La station EC est instrumentée avec 2 extensomètres et 4 convergencemètres. Le détail du dispositif est présenté sur la figure 5.2. Les mesures de convergence fournissent le déplacement relatif de deux points sur des piédroits opposés mais ne permettent pas,

à elles seules, d'identifier l'origine du déplacement. C'est pourquoi, ces mesures ont été complétées par des mesures d'extensométrie au sein de deux piliers. De plus, la disponibilité de données doubles, convergencemétrie et extensométrie, a permis de constater la cohérence des mesures.

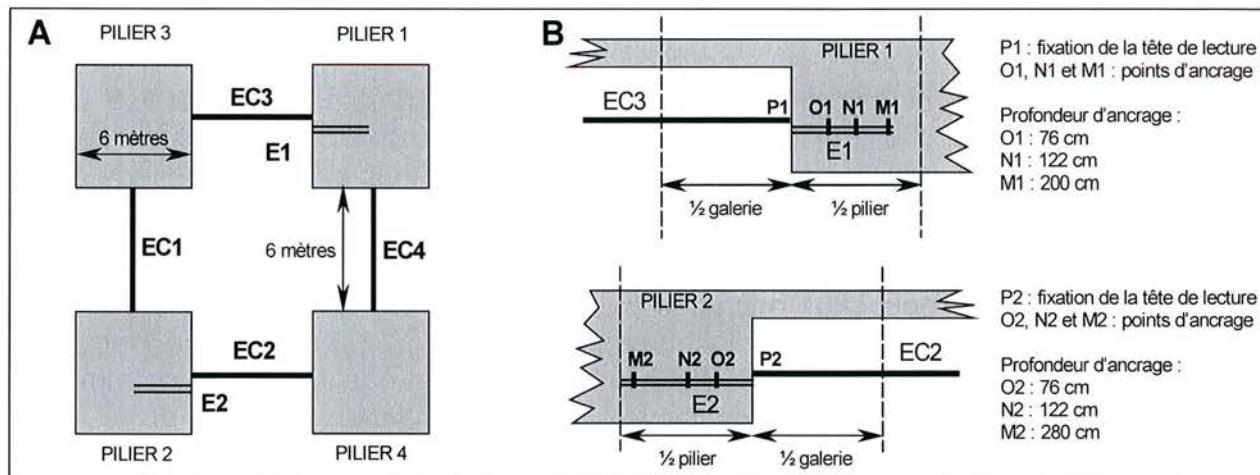


Figure 5.2 - Dispositif de mesures entre 4 piliers de la station EC
(A : vue en plan ; B : vue en coupe ; ECi : convergencemètre ; Ej : extensomètre)

5.2.2- Résultats

5.2.2.1- Mesures de convergence et d'expansion

5.2.2.1.1- Principe et mesures

Pour chacune des stations de mesure, les courbes de convergence des galeries et les courbes d'expansion des piliers ont été tracées (Figures 5.3 et 5.4). Les vitesses moyennes de fermeture des galeries ou d'expansion des piliers ont été calculées à l'aide d'une régression linéaire des courbes fermeture-temps ou expansion-temps (Tableaux 5.1 et 5.2).

Les déformations entre le bord des piliers et les différents points d'ancrage ont été calculées pour les deux piliers de la station de mesures EC. Les vitesses moyennes de déformation entre bord des piliers-points d'ancrage et entre les différents points d'ancrage (Tableau 5.3) ont également été déterminées à partir d'une régression linéaire des courbes déformation-temps.

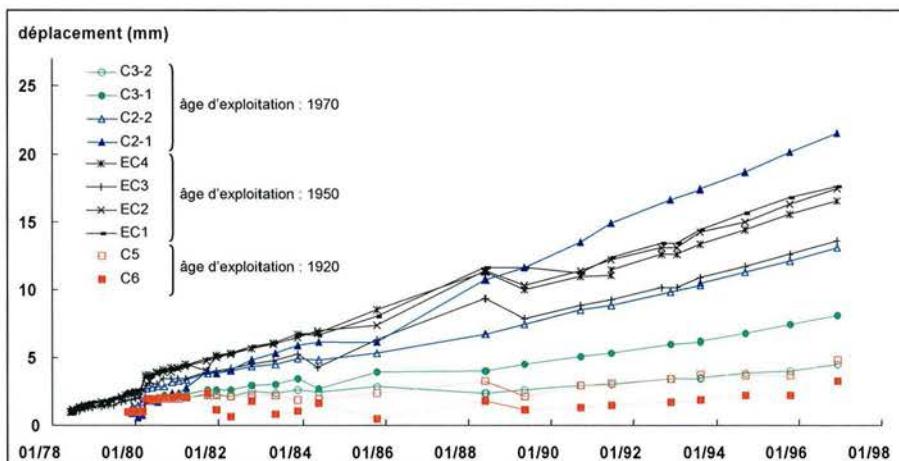


Figure 5.3 - Convergence horizontale de différentes galeries

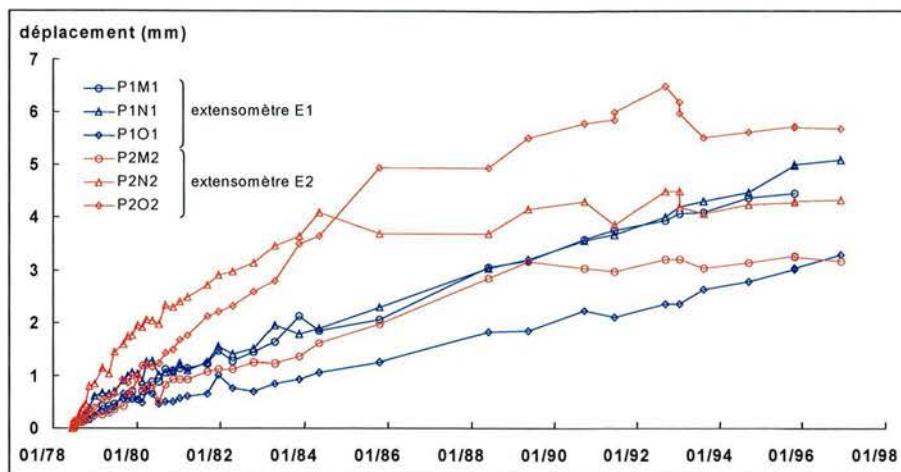


Figure 5.4 - Expansion des deux piliers de la station EC

Tableau 5.1 - Vitesses moyennes de fermeture de différentes galeries

	Stations de mesures									
	C5	C6	EC1	EC2	EC3	EC4	C2-1	C2-2	C3-1	C3-2
Age d'exploitation	1920		1950				1970			
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97									
Vitesse moyenne de convergence (mm/an)	0,10	0,01	0,90	0,90	0,70	0,80	1,20	0,60	0,30	0,10

Tableau 5.2 - Vitesses moyennes d'expansion des deux piliers de la station de mesures EC

	Pilier 1			Pilier 2		
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97			du 01/85 au 01/97		
	P1O1	P1N1	P1M1	P2O2	P2N2	P2M2
Vitesse moyenne d'expansion entre bord de pilier-points d'ancre (mm/an)	0,10	0,20	0,20	0,07	0,07	0,07
	P1O1	O1N1	N1M1	P2O2	O2N2	N2M2
Vitesse moyenne d'expansion entre points d'ancre (mm/an)	0,10	0,10	<0,01	0,07	<0,01	<0,01

Tableau 5.3 - Vitesses moyennes de déformation des deux piliers de la station de mesures EC

	Pilier 1			Pilier 2		
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 01/80 au 01/97			du 01/85 au 01/97		
	P1O1	P1N1	P1M1	P2O2	P2N2	P2M2
Vitesse moyenne de déformation ($10^{-12} \cdot s^{-1}$) entre bord de pilier-points d'ancre	2,3	2,3	0,11	1,15	0,4	0,3
	P1O1	O1N1	N1M1	P2O2	O2N2	N2M2
Vitesse moyenne de déformation ($10^{-12} \cdot s^{-1}$) entre points d'ancre	2,3	2,3	≈0	1,15	≈0	0,2

5.2.2.1.2- Interprétation-Discussion

La disponibilité de données doubles concernant l'expansion des piliers et la convergence des galeries de la station EC (Figure 5.2) a permis de constater la cohérence des mesures. En effet, la demi-convergence (EC3/2) est équivalente à l'expansion E1 du demi-pilier. De même, la demi-convergence (EC2/2) correspond à l'expansion E2 du demi-pilier (Tableau 5.4).

Tableau 5.4 - Correspondance entre la convergence d'une demi-galerie et l'expansion d'un demi-pilier de la station de mesures EC

Demi-convergence EC3/2	Expansion E1
7,5 mm	7 mm
Demi-convergence EC2/2	Expansion E2
6 mm	5,5 mm

Le faible écart entre la convergence d'une demi-galerie et l'expansion d'un demi-pilier est probablement dû à la différence entre la longueur de la demi-galerie et la longueur P-M du fil invar des deux extensomètres. Les demi-galeries mesurent 3 mètres et les longueurs P-M des piliers 1 et 2 mesurent respectivement 2 mètres et 2,8 mètres.

D'une manière générale, les vitesses moyennes de fermeture des galeries semblent diminuer dans le temps. Les vitesses moyennes calculées dans un quartier d'âge d'exploitation 1970 sont plus rapides que celles qui ont été calculés dans un quartier d'âge d'exploitation plus ancien. Cette comparaison n'est valide que si les vitesses initiales étaient les mêmes. Cependant, l'expansion du pilier 2 (Figure 5.4) permet de montrer une diminution du déplacement dans le temps.

Enfin, Les mesures de convergence de la station EC sont réalisées entre quatre piliers immédiatement proches les uns des autres, les vitesses moyennes sont comparables entre elles.

D'après le calcul des déformations entre bord de pilier-points d'ancre et entre les points d'ancre, c'est en peau de pilier que les déformations sont les plus importantes. Un endommagement concentrique des piliers, peut être dû en partie à l'humidité de l'air, pourrait expliquer les différences de vitesses moyennes de déformation entre la peau et le cœur. De plus, l'effet de la contrainte ne peut être négligé.

Cette hypothèse semble être confirmée par l'évolution de l'intensité des traces de dissolution énoncée dans le chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ». Elle est également renforcée par la variation plus ou moins importante des paramètres physico-mécaniques mesurés entre le bord et le cœur des piliers.

Une analyse des mesures à l'échelle de l'année montre des discontinuités de la convergence des galeries ou bien de l'expansion des piliers. L'observation de ces changements de rythme n'est possible que pour les premières années de mesures. En effet, le nombre de mesures annuelles devient insuffisant par la suite. Un agrandissement de la figure 5.3 ou bien de la figure 5.4 sur les deux premières années permet de mettre en évidence ces changements de rythme de convergence et d'expansion (Figures 5.5 et 5.6).

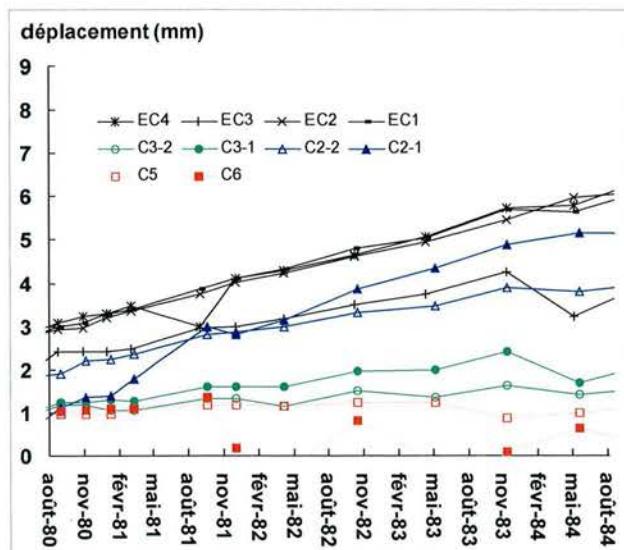


Figure 5.5 - Convergence horizontale de différentes galeries lors des premières années de mesures

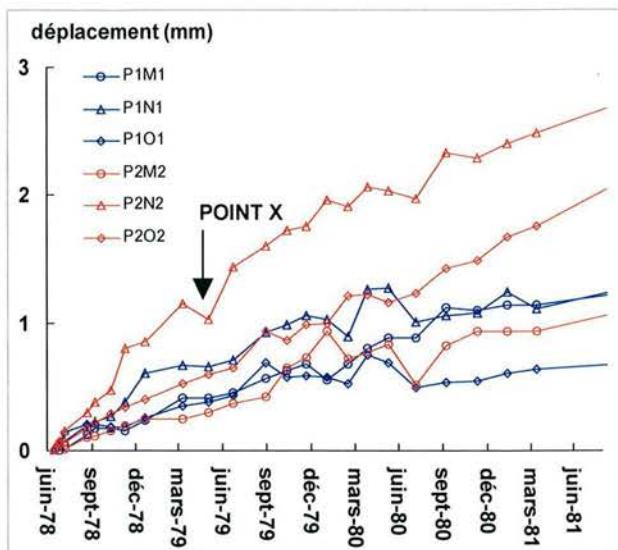


Figure 5.6 - Expansion de deux piliers de la station EC lors des premières années de mesures

Dans un cadre général, plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces discontinuités :

- 1. L'imprécision de la mesure ;
- 2. Un circuit de circulation des engins d'extraction modifié ;
- 3. Un changement de zone d'exploitation ;
- 4. Une modification du circuit d'aérage ;
- 5. Un battement de nappe situé au-dessus de l'exploitation ;
- 6. Une saisonnalité d'un paramètre physique externe.

L'imprécision de la mesure ne peut pas être négligée. Des points de mesure isolés sont probablement dûs à une telle erreur (Figure 5.6, point de mesure X).

Le circuit de circulation modifié, le changement de zone d'exploitation et du circuit d'aérage pourraient être écartés. A un instant t , leurs conséquences ne seraient pas mesurables sur l'ensemble des différentes stations.

Le battement de nappe pourrait provoquer une variation du poids des terrains. Ce battement est peu probable étant donné le contexte hydrogéologique. Le recouvrement maximum de l'exploitation est de 50 mètres et aucune nappe n'a pu être relevée. Cependant, cette hypothèse est liée à une saisonnalité des précipitations. Lors de pluies importantes et persistantes, le poids des terrains se saturant peut augmenter. La charge sur les piliers croît pendant les périodes pluvieuses et elle diminue pendant les périodes sèches.

L'humidification et le séchage du massif peuvent être dus, également, aux variations de l'hygrométrie à l'extérieur de la carrière. A cause de l'aérage, les variations d'hygrométrie

externe entraînent des variations à l'intérieur de la carrière. Là encore, cette hypothèse est liée à la saisonnalité d'un paramètre physique, l'hygrométrie.

Finalement, un traitement statistique par analyse saisonnière des mesures de convergence et d'expansion semble justifié pour tenter de comprendre leurs changements de rythme.

5.2.2.2- Traitement statistique des mesures de convergence et d'expansion : analyse saisonnière

5.2.2.2.1- Principe

L'analyse saisonnière, d'une manière générale, consiste à faire une description fine des variations qui composent une série dite chronologique. Les paramètres mesurés sont dépendants du temps. Le résultat de cette description permet de faire ressortir les variations cycliques ou non cycliques qui sont plus ou moins masquées par la tendance (Spiegel, 1972 ; Berman et Bézard, 1973 ; Box et al., 1994 ; Hipel et McLeod, 1994). Le principe de l'étude des séries chronologiques peut se résumer de la manière suivante (Spiegel, 1972 ; Berman et Bézard, 1973) :

- Tout d'abord, il faut estimer la tendance. Plusieurs méthodes existent : celle des moindres carrés, de la moyenne mobile, du pourcentage de la moyenne ou bien encore du rapport à la tendance.
- Après cette première étape, il faut calculer les indices saisonniers. Plusieurs méthodes sont envisageables pour ce calcul comme celle des chaînes relatives, celle du rapport à la moyenne mobile ou bien encore celle du pourcentage de la moyenne et celle du rapport à la tendance.

Dans un cadre général, deux méthodes de calcul des indices saisonniers sont retenues :

- La méthode du pourcentage de la moyenne : les données correspondant à chaque mesure s'expriment en pourcentage de la moyenne. On calcule alors avec la moyenne, les pourcentages de chaque mois pour des années différentes. Les 12 pourcentages ainsi obtenus donnent les indices saisonniers.
- La méthode du rapport à la tendance : les données de chaque mois s'expriment en pourcentage des valeurs mensuelles de la tendance. L'indice recherché s'obtient à partir d'une moyenne des pourcentages des mois correspondants

Concrètement, la méthode du pourcentage de la moyenne ne tient pas compte de la tendance. Si cette tendance est trop forte, elle ressortira sur la courbe de variations des indices saisonniers.

5.2.2.2.2- Calculs et commentaires

L'analyse saisonnière est réalisée sur les mesures de convergence et d'expansion. La méthode du rapport à la tendance a été retenue pour calculer les indices saisonniers. En effet, les courbes de convergences et d'expansion (Figures 5.3 et 5.4) présentent une tendance marquée. Le détail des calculs est présenté en annexe 5.1.

Les indices saisonniers de convergence et d'expansion sont présentés respectivement sur les figures 5.7 et 5.8. D'une manière générale, l'interprétation des variations d'indice sur une année type est la suivante :

- Quand l'indice est supérieur à 1 : augmentation de la vitesse de convergence ou d'expansion.
- Quand l'indice est inférieur à 1 : diminution de la vitesse de convergence ou d'expansion.

Pour pouvoir comparer ces différents indices, leur somme doit être égale à 12. Une correction d'indice est donc systématique.

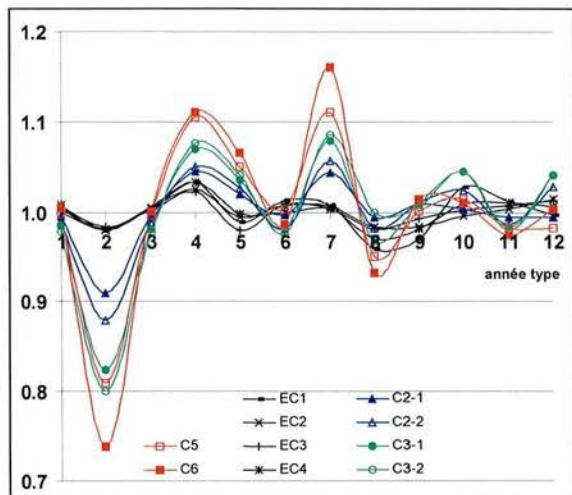


Figure 5.7 - Variation des indices saisonniers des convergences horizontales de différentes galeries

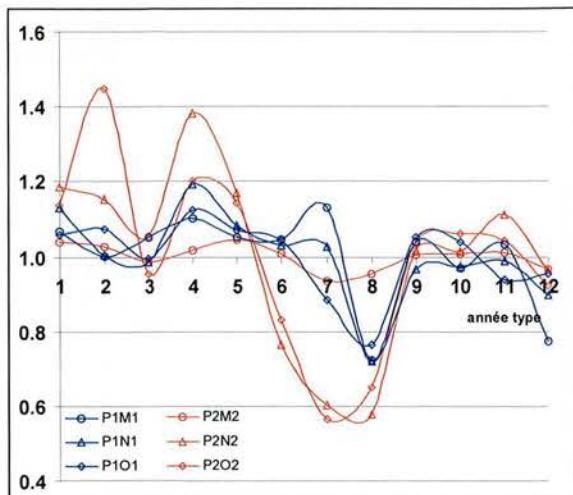


Figure 5.8 - Variation des indices saisonniers d'expansion des deux piliers de la station EC

Le calcul des indices saisonniers prend en compte toutes les mesures prises pendant la période octobre 1977-décembre 1997. Il est indispensable de se rappeler que la fréquence des mesures est mensuelle ou trimestrielle pendant les premières années puis elle devient annuelle pendant les dix ou quinze ans restant. Les commentaires des variations saisonnières et leurs interprétations doivent tenir compte de ce manque d'informations.

Les différentes stations montrent des variations concordantes des indices saisonniers de convergence. Seule leur amplitude est différente. Une forte amplitude est synonyme d'un changement important de vitesse de convergence et à l'inverse une faible amplitude correspond à un changement faible de vitesse de convergence.

Les variations des indices saisonniers d'expansion des piliers sont dans l'ensemble comparables même s'il existe, pour un pilier donné, quelques nuances entre les différentes profondeurs d'ancre. Elles sont probablement dues à l'état de fracturation des piliers.

Néanmoins, les variations des indices saisonniers de convergence sont dans l'ensemble cohérentes avec les variations des indices d'expansion des piliers. Quand la vitesse de convergence d'une galerie augmente, la vitesse d'expansion du pilier correspondante augmente également.

Une analyse saisonnière des mesures de convergence et d'expansion semble être justifiée. Les accélérations de la convergence des galeries ont lieu à la fin de l'hiver jusqu'au début du printemps, au début de l'été et en automne. Les variations des indices saisonniers d'expansion ne montrent aucune différence entre les deux piliers. Les accélérations de l'élargissement des deux piliers ont lieu pendant l'hiver jusqu'au début de l'été et pendant la première moitié de l'automne. D'une manière générale, au cœur du pilier, les variations des indices sont très faibles alors qu'elles sont beaucoup plus importantes en peau.

Compte tenu des résultats précédents et notamment le caractère hygro-sensible du matériau (action de la vapeur d'eau sur les cristaux de gypse et influence du vieillissement sur les paramètres physico-mécaniques), l'influence d'un paramètre externe comme l'hygrométrie sur le comportement différé des piliers peut être avancée.

5.2.3- Influence de l'hygrométrie sur le comportement différé des piliers de gypse

Les observations et hypothèses émises lors de l'étude du vieillissement du gypse nous amènent à penser que les changements de rythme de convergence et d'expansion seraient dûs à des variations de l'hygrométrie dans la carrière. Ces dernières seraient elles-mêmes influencées par les précipitations.

Pour pouvoir vérifier cette hypothèse, il faut tout d'abord vérifier que l'hygrométrie dans la carrière est bien corrélée aux précipitations. Pour cela, deux hygromètres ont été placés dans deux quartiers différents où l'aérage n'est pas le même. Ces mesures quotidiennes seront comparées aux relevés de précipitations de Météo France.

Par la suite, il faut également mettre en évidence le rapport entre accélération / ralentissement des convergences / expansions et les variations de l'hygrométrie. Afin de montrer ce lien, de nouvelles mesures de convergence ont été entreprises.

5.2.3.1- Mesures de l'hygrométrie et des précipitations

Deux ensembles hygromètres/thermomètres ont été placés dans deux quartiers différents (Figure 5.1). Le premier ensemble H1 est situé dans un quartier en cours d'exploitation où l'aérage est forcé. A l'inverse, le second ensemble H2 est placé dans un quartier anciennement exploité où l'aérage est naturel : il est extrêmement réduit car le quartier est abandonné. L'ensemble des mesures d'hygrométrie est présenté sur la figure 5.9.

La température mesurée dans les deux quartiers ne présente pas de variations significatives. Elle est constante tout au long de l'année : $12,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$.

Ces mesures d'hygrométrie sont complétées par le relevé journalier des précipitations de la station de Météo France d'Arbois situé à 6 kilomètres de l'exploitation (Figure 5.9). La corrélation des paramètres permettra de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse émise précédemment : les précipitations ont une influence sur l'hygrométrie dans la carrière.

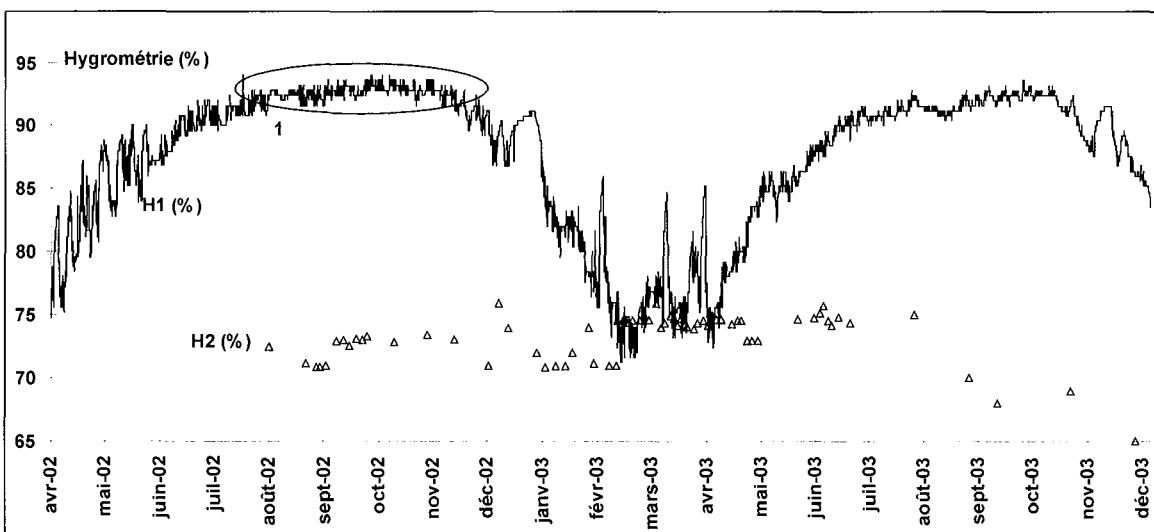


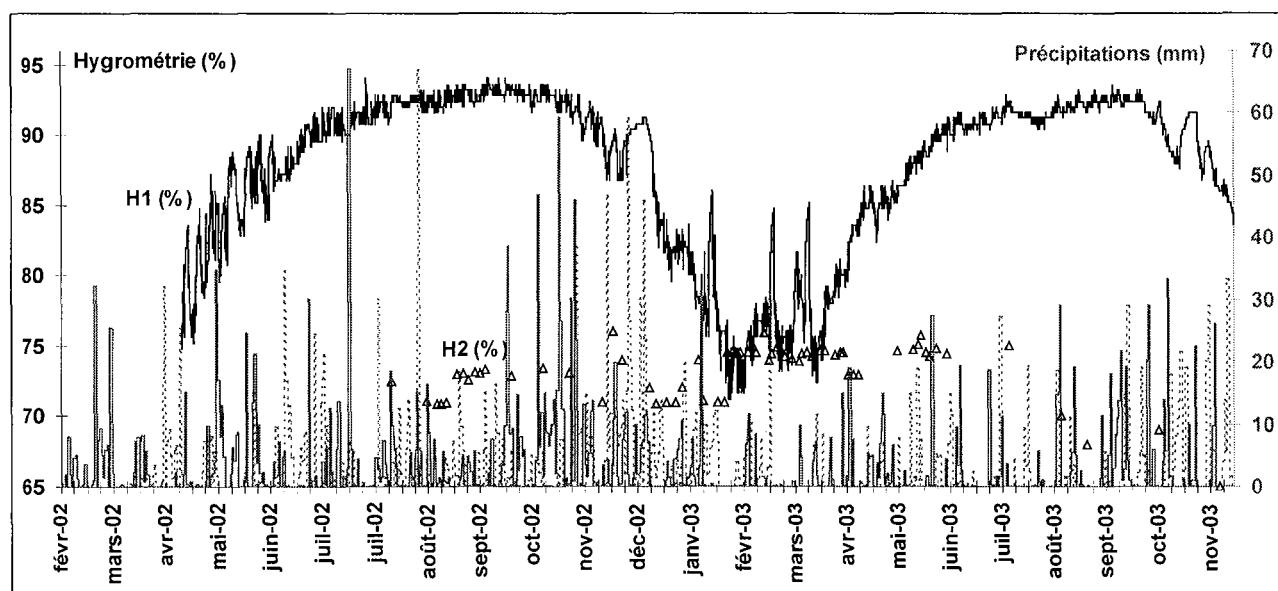
Figure 5.9 - Hygrométrie dans deux quartiers où l'aérage est différent
(H1 : Hygromètre placé dans un secteur aéré ; H2 : Hygromètre situé dans un secteur sans aérage)

La variation annuelle de l'hygrométrie dans le quartier aéré est la suivante :

- Les valeurs les plus élevées (proches de 95%) sont mesurées en été et en automne (repère 1 sur la figure 5.9). En été, elles sont dues aux températures extérieures élevées qui génèrent une très forte évapotranspiration de la végétation. Les pluies orageuses pendant cette période accentuent le phénomène d'évaporation. Malheureusement, les limites de mesures des hygromètres sont atteintes et ces événements ne peuvent être enregistrés.
- Les hygrométries les plus faibles (environ 70%) sont mesurées pendant les mois secs qui correspondent aux mois d'hiver et de printemps. Pendant cette période, des augmentations brutales et ponctuelles de l'hygrométrie sont enregistrées (repère 2).
- Entre ces deux périodes, les phases transitoires montrent des augmentations brutales et ponctuelles de l'hygrométrie probablement dues à des épisodes pluvieux remarquables (repère 3).

L'hygrométrie dans le quartier sans aérage forcé est relativement constante autour de 73%. Des pics d'hygrométrie sont mesurés durant toute l'année (repère 4).

Les précipitations (en millimètres) ont été reportées sur la figure 5.10 afin de montrer une éventuelle corrélation avec les valeurs de l'hygrométrie.



*Figure 5.10 - Hygrométrie dans deux quartiers corrélée avec les précipitations
(traits pointillés : les précipitations ont été décalées de 1,5 mois, les pics correspondent à ceux de l'hygrométrie)*

Il apparaît aisément que les pics de précipitations provoquent des pics d'hygrométrie avec un décalage de 1,5 mois. Cette corrélation n'est visible que pendant les périodes de transition et pendant les périodes où l'hygrométrie moyenne est la plus faible.

En conclusion, malgré le peu de recul, l'aérage forcé semble provoquer une variation saisonnière de l'hygrométrie dans la carrière. Cette tendance paraît être perturbée par des événements pluvieux particuliers. La valeur moyenne de l'hygrométrie semble également supérieure à celle mesurée dans un quartier sans aérage forcé. Par conséquent, ces mesures montrent la faiblesse des apports hydriques naturels.

5.2.3.2- Corrélation entre l'hygrométrie et le comportement différé des piliers de gypse

De nouvelles mesures de convergence ont été entreprises (Figure 5.11) afin de constater que les vitesses de convergence présentent toujours des changements de rythme là où l'aérage est maintenu. A l'inverse, dans les quartiers sans aérage forcé, les accélérations/ralentissements de la vitesse de convergence doivent être faibles. Le dispositif et les conditions actuelles d'aérage sont les suivantes :

- Dans une zone où l'aérage est forcé (quartier en cours d'exploitation), deux nouvelles stations ont été instrumentées avec des convergencemètres (C1-1 et C1-2). L'hygrométrie dans ce quartier varie entre 70% et 95%.
- Dans une zone où l'aérage est actuellement naturel donc faible, les mesures de convergence EC2, EC3, EC4, C6 ont été reprises avec une fréquence mensuelle. De nouveaux ancrages étaient nécessaires, ils ont été placés à côté des anciens. Une nouvelle station a été instrumentée à proximité des anciennes avec un convergencemètre C7. L'hygrométrie dans ce quartier varie peu (entre 70% et 75%).

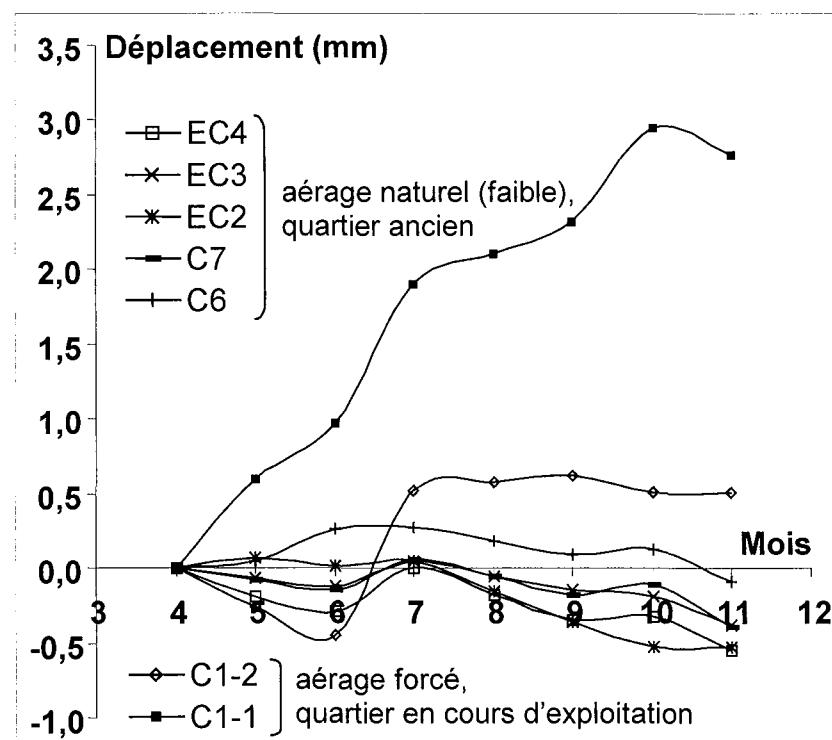


Figure 5.11 - Mesures de convergence dans deux quartiers où l'aérage est différent

Les résultats de ces nouvelles mesures de convergence suscitent un certain nombre de commentaires :

- Les convergences des galeries situées dans un quartier avec un aérage forcé sont plus importantes que celles situées dans un quartier avec un aérage naturel.
- Les convergences des deux galeries situées dans un quartier avec un aérage forcé sont nettement différentes. La convergence C1-1 est très importante et elle peut s'expliquer par un soufflage du mur très important (environ 1 mètre en 4 mois). A l'inverse, la convergence C1-2 est plus modérée, aucun soufflage de mur apparent n'est à relever. Cependant, un changement de rythme est à noter.

- Les convergences des cinq galeries, situées dans un quartier où l'aérage est naturel donc faible, sont homogènes et faibles. Malgré le peu de convergence, un changement de rythme peut être distingué.

Les accélérations/ralentissements des convergences de galeries déjà évoquées semblent toujours se reproduire. Deux paramètres semblent influencer ces changements de rythme :

- L'âge d'exploitation : dans le quartier d'âge d'exploitation ancien, les convergences sont faibles. La phase de fluage s'apparenterait à un fluage dit secondaire. A l'inverse, dans le quartier en cours d'exploitation, les convergences sont plus importantes et la phase de fluage serait qualifiée de primaire (Figure 5.11).
- L'aérage : les changements de rythme de convergence paraissent plus importants là où l'aérage est forcé. Cette constatation pourrait s'expliquer par des variations d'hygrométrie dues à l'aérage. Elles sont faibles dans des quartiers où l'aérage est naturel et plus importantes dans les quartiers où l'aérage est forcé (Figures 5.12 et 5.13).

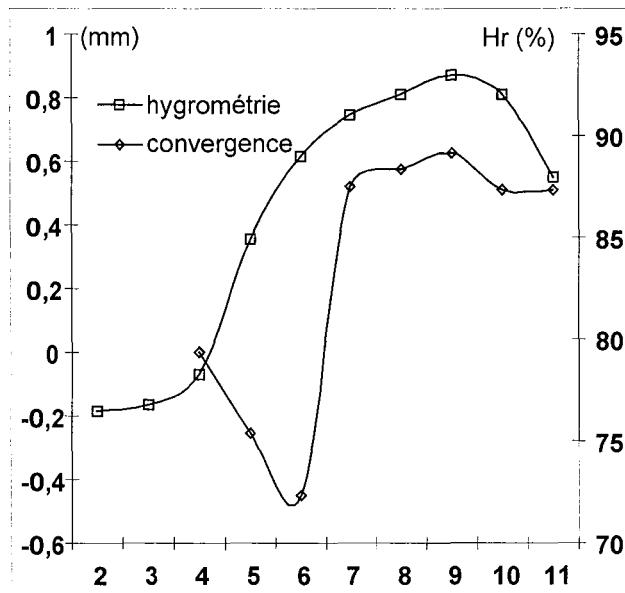


Figure 5.12 - Quartier avec aérage forcé
Corrélation entre la convergence d'une galerie et l'hygrométrie

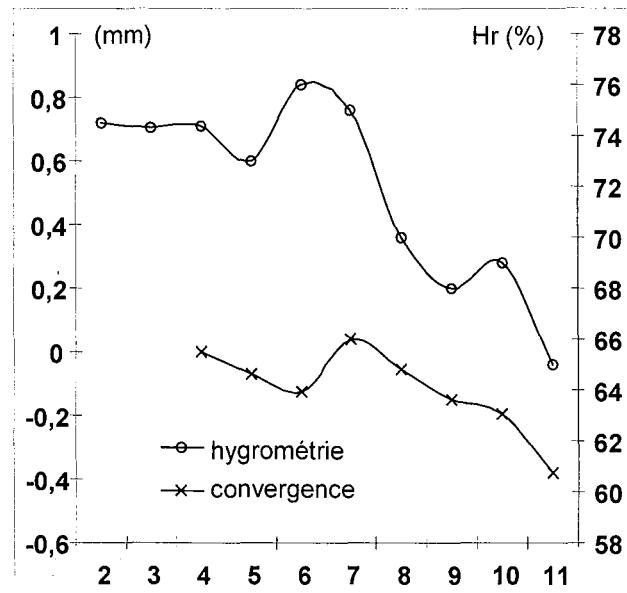


Figure 5.13 - Quartier avec aérage naturel (faible)
Corrélation entre la convergence d'une galerie et l'hygrométrie

La corrélation entre précipitation et hygrométrie a été montrée grâce à des événements pluvieux remarquables. Cependant, la corrélation entre l'hygrométrie et le comportement différé des piliers de gypse reste à confirmer. Le nombre de nouvelles mesures est insuffisant pour pouvoir affirmer que les variations de l'hygrométrie entraînent des accélérations/ralentissement de la convergence des galeries et donc de l'expansion des piliers.

En plus de cette étude, des essais de fluage ont été réalisés au laboratoire. Ils permettent également d'étudier le comportement différé du gypse mais à une autre échelle de longueur et de temps.

5.3- ESSAIS DE LABORATOIRE : ESSAIS DE FLUAGE SOUS HYGROMETRIE CONTROLEE

Le comportement différé du gypse est étudié au laboratoire. Des essais de fluage sont ainsi réalisés. Les paramètres influençant la réponse d'échantillons de gypse en fonction du temps, le chargement et l'hygrométrie, sont contrôlés. Les résultats attendus devront permettre de montrer les rôles de l'hygrométrie et de la contrainte sur le comportement différé du gypse. Des essais de « gonflement » et de fluage triaxiaux permettront de préciser le rôle de l'hygrométrie et de la contrainte déviatorique.

5.3.1- Dispositif et protocole expérimentaux

5.3.1.1- Dispositif expérimental

Le bâti de fluage :

L'équipement nécessaire pour ce type d'essais est un bâti de fluage composé de trois principaux éléments : l'embase, le corps et le chapeau (Figure 5.14). Cet équipement est complété par un générateur et un régulateur de pression afin d'assurer une contrainte sur l'éprouvette. Enfin, une centrale d'acquisition complète l'ensemble.

- L'embase :

Elle correspond au socle du bâti de fluage. Une cale avec une rotule vient se positionner en son centre. Sa surface supérieure est rainurée permettant ainsi des échanges gazeux entre l'atmosphère et l'éprouvette.

Autour de la cale, l'embase est perforée de huit trous d'un diamètre de 2 cm. Ces perforations permettent un échange d'air entre le corps du bâti et le récipient situé sous l'embase. Deux ventilateurs peuvent être fixés sur deux des huit trous afin d'effectuer un brassage mécanique de l'air. Deux trous supplémentaires débouchant sur le côté de l'embase permettent le passage de différentes connections.

- Le corps :

Il s'agit d'un tube de plexiglas. Il est le lien étanche entre l'embase et le chapeau. Il isole l'éprouvette de l'air ambiant. Un cordon de silicone assure l'étanchéité avec l'embase.

- Le chapeau :

Il se place sur le corps. Un cordon de silicone assure l'étanchéité avec le corps. Un piston avec une rotule vient se positionner en son centre. L'étanchéité entre le piston et le reste du chapeau est assurée par des joints toriques.

Le chapeau est perforé de deux trous permettant le passage des sondes de température et d'hygrométrie.

Trois contre-tirants supportent la charge du chapeau sur l'embase. Six tirants permettent un serrage des trois éléments et leur maintien lors de la mise en charge de l'éprouvette située entre l'embase et le chapeau.

Le générateur et le régulateur de pression :

Une pompe de type GILSON (Figure 5.14) avec un module manométrique intégré d'une capacité maximale de 60 MPa permet d'exercer une contrainte uniaxiale sur l'éprouvette par l'intermédiaire d'un régulateur et du piston intégré dans le chapeau du bâti de fluage. La précision du générateur de pression est de $\pm 0,05$ MPa.

Le régulateur de pression (Figure 5.14) permet de contrôler plus finement la contrainte exercée sur l'éprouvette. Sa capacité maximale est de 15 MPa et sa précision est de $\pm 0,005$ MPa.

La centrale d'acquisition :

La centrale d'acquisition avec un pont d'extensométrie (Figure 5.14) permet de visualiser et d'enregistrer les déformations des éprouvettes par l'intermédiaire des jauge d'extensométrie. L'hygrométrie et la température de l'air dans le corps du bâti de fluage ainsi que la contrainte exercée sur l'éprouvette sont également enregistrées par l'intermédiaire de la centrale d'acquisition.

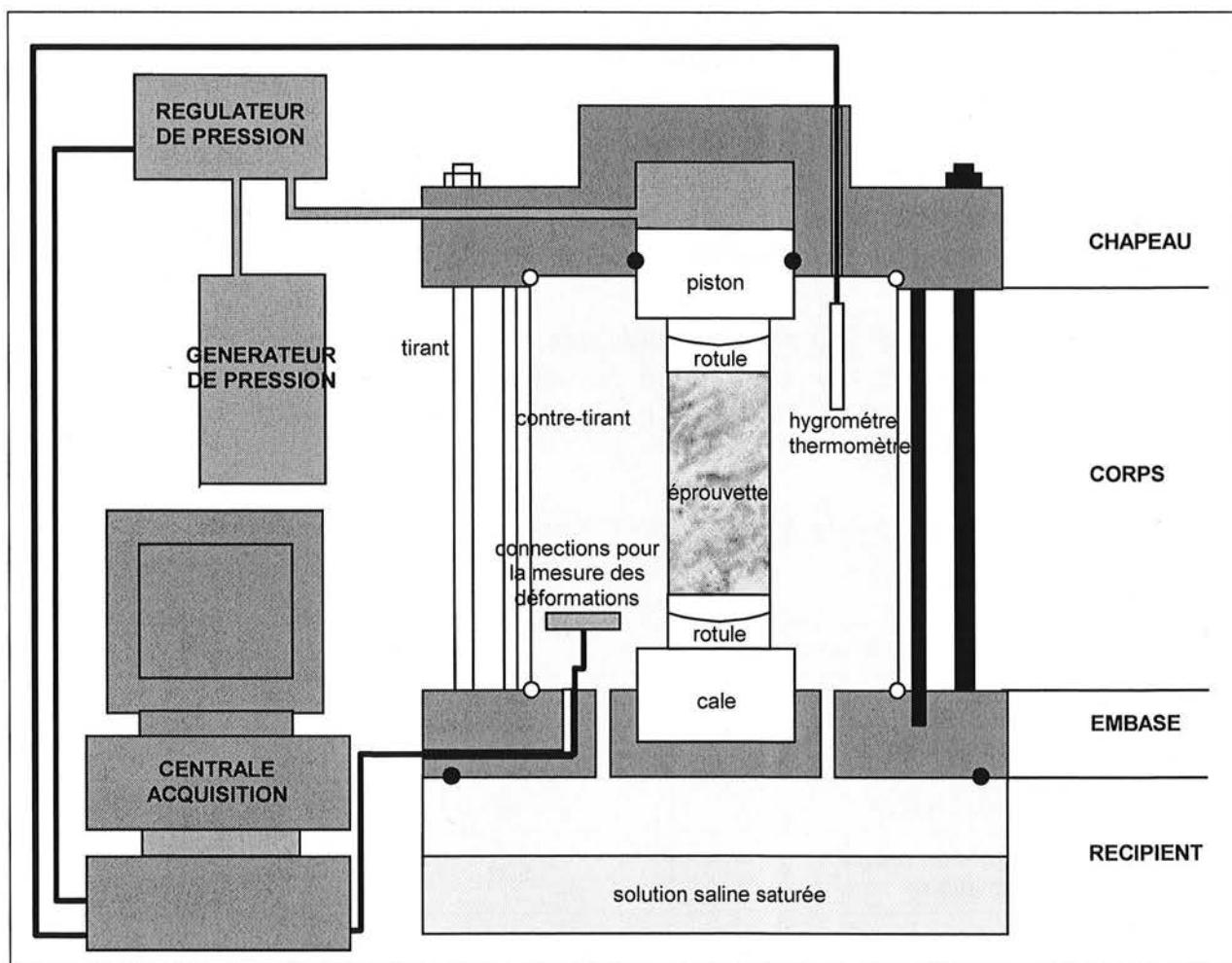


Figure 5.14 - Schéma d'un bâti de fluage et des éléments annexes

Etablissement, contrôle et maintien de l'hygrométrie et de la température

L'hygrométrie autour de l'éprouvette est contrôlée et constante pendant toute la durée de l'essai. Pour générer cette hygrométrie, un récipient dans lequel se trouve une solution saline saturée vient se positionner sous l'embase du bâti.

Les volumes du récipient (inférieur à 15 dm³) et du corps de la cellule (entre 15 et 200 dm³) ont été choisis en fonction de la norme NF EN ISO 483 et par rapport aux dimensions des éprouvettes qui font 38 mm de diamètre et un élancement de 2. La hauteur du récipient peut atteindre 1,5 fois la plus petite dimension de la surface libre.

Enfin, la hauteur intérieure du volume utilisable doit être au plus de 1,5 fois la plus petite dimension de la surface libre de la solution.

La valeur de l'hygrométrie est fixée par la nature de la solution saline pour une température de 20°C. Tout le dispositif est placé dans une salle climatisée afin de pouvoir maintenir la température constante et la plus proche possible de 20°C avec une précision de $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

Le contrôle de l'hygrométrie se fait grâce à un hygromètre situé dans le corps du bâti utilisant la technique de la mesure du point de rosée. La gamme de mesures de l'hygrométrie est 0 à 100% avec une précision de $\pm 2\%$ dans la gamme 0-90% et $\pm 3\%$ dans la gamme 90-100%.

Un thermomètre est également situé dans le corps du bâti. La précision de cette mesure est de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ dans la gamme -20/+80°C. Les normes NF X 15-119 et NF EN ISO 483 ont servi de support technique pour les mesures d'hygrométrie en fonction de la température et les précautions d'emploi des solutions salines saturées.

Les conditions d'hygrométrie choisies sont les suivantes : 30%, 60%, 75%, 90% et 95% à une température 20°C. Les solutions salines utilisées sont les mêmes que celles qui ont été employées pour déterminer la résistance en compression uniaxiale d'échantillons partiellement saturés (cf. « Chapitre Vieillissement et caractérisation physico-mécanique »).

Pour rappel, le tableau 5.5 regroupe les différents sels et l'hygrométrie correspondante. L'hygrométrie mesurée avec un hygromètre ne correspond pas toujours à celle qui est attendue. Les différences sont dues aux imprécisions de l'appareil de mesure et aux variations de la température.

Tableau 5.5 - Nature des sels utilisés et hygrométrie mesurée et attendue

Nature des sels	Solubilité (à 20°C, g/100g eau pure)	Hr mesurée (%)	Hr attendue (%)
CuSO ₄ , 6H ₂ O	Sulfate de cuivre hexahydraté	31,7	95
ZnSO ₄ , 7H ₂ O	Sulfate de zinc heptahydraté	96	89
NaNO ₃	Nitrate de sodium	87,4	73
NaNO ₂	Nitrite de sodium	82	62
CaCl ₂ , 6H ₂ O	Chlorure de calcium hexahydraté	536	31

Instrumentation des éprouvettes

Les éprouvettes de gypses des carrières de Livry Gargan et de Grozon sont instrumentées de deux manières différentes : soit avec des jauge d'extensométrie soit avec des capteurs de déplacements LVDT. Cette instrumentation permet d'enregistrer les déformations instantanées et différées des éprouvettes pendant l'essai de fluge.

- Méthode 1 : utilisation des jauge d'extensométrie :

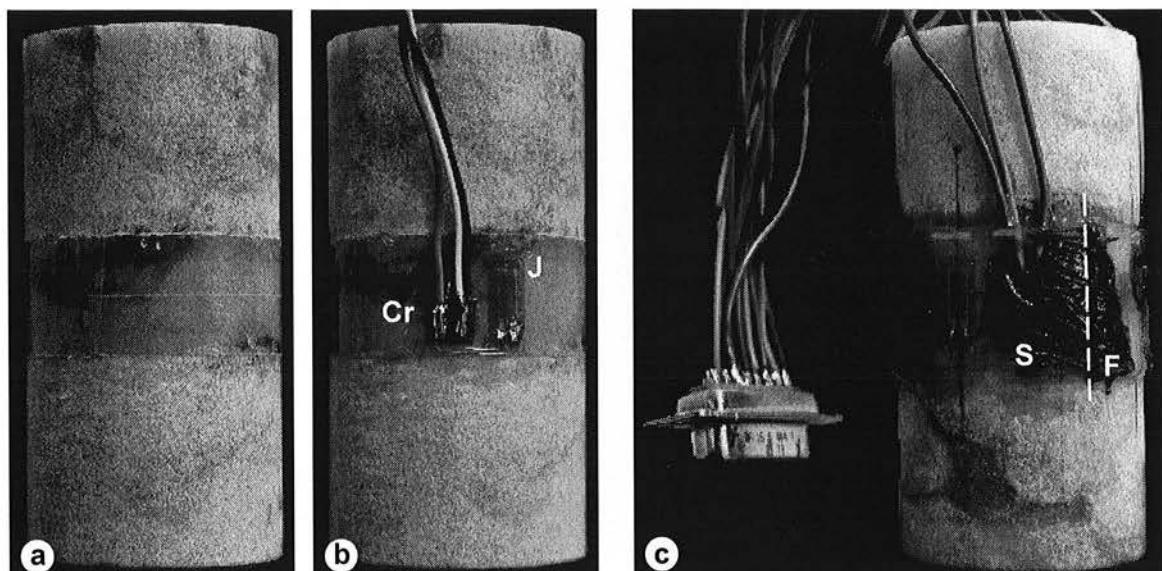
Sur les éprouvettes sont collées des jauge d'extensométrie et des cosses-relais : elles sont placées deux à deux et diamétralement opposées, à la moitié de la hauteur sur l'éprouvette, pour mesurer les déformations axiales et les déformations latérales. La précision de la mesure des déformations est de l'ordre de $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$.

Des précautions sont à prendre pour le collage des jauge et des cosses-relais. Tout d'abord, une sous-couche de résine est appliquée sur la zone de collage (Figure 5.15a). Cette résine pénètre superficiellement dans le réseau poreux du matériau et sa surface est parfaitement lisse. L'ensemble jauge et cosse-relais adhère sur toute sa surface. Sans cette sous-couche, le contact n'est pas parfait et le risque d'un décollement pendant l'essai est important (Figure 5.15b).

Par la suite, un anneau de résine de 1mm d'épaisseur englobe les jauge, les cosses-relais et les soudures des fils. Cet anneau protège l'instrumentation pendant la durée de l'essai de fluage (Figure 5.15c). Dans les fortes hygrométries, les soudures s'oxydent rapidement provoquant ainsi des courts-circuits. Les cosses-relais et l'anneau supérieur de résine limitent ces phénomènes de traction due au fil. Cela évite également une dérive importante des mesures. Une couche de silicone recouvre l'ensemble de l'instrumentation. L'anneau de résine est donc totalement hermétique.

Toutes ces étapes pour l'instrumentation d'une éprouvette demandent une préparation rigoureuse mais également du temps. Après avoir appliqué la sous-couche de résine, il faut attendre 3 heures pour obtenir un séchage correct. Le collage des jauge et les soudures des fils demandent encore 2 heures. Enfin le séchage de l'anneau de résine nécessite environ 12 heures.

Afin de vérifier si l'anneau de résine a une influence sur la résistance et sur la déformabilité de l'échantillon, deux essais-tests ont été réalisés. Le premier concerne la résistance en compression uniaxiale (Annexe 5.2) et le second, la déformabilité en compression uniaxiale (Annexe 5.2). Suite à ces essais tests, pour limiter l'influence de l'anneau de résine, quatre coupures verticales diamétralement opposées deux à deux ont été effectuées.



*Figure 5.15 - Instrumentation d'une éprouvette avec des jauge d'extensométrie
 a : sous-couche de résine au niveau de l'emplacement des futures jauge et cosses-relais ; b : collage des jauge (J) et des cosses-relais (Cr) et soudures des fils ; c : jauge et cosses-relais noyées dans un anneau de résine interrompu (F). L'ensemble est recouvert de silicone (S)*

- Méthode 2 : utilisation des capteurs de déplacements LVDT :

Dans le cas du gypse de la carrière de Livry Gargan, sa grande déformabilité, mesurée pendant les essais de compression uniaxiale et triaxiale (cf. Chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique »), pose un problème de métrologie. D'une manière générale, la déformabilité de l'ensemble - jauge, cosses-relais et résine - est limitée. Cet ensemble n'adhère plus au reste de l'éprouvette et l'essai doit être arrêté. De plus, une forte hygrométrie et une porosité plus importante accentuent le phénomène. Une deuxième métrologie a donc été utilisée pour les éprouvettes de gypse de la carrière de Livry Gargan.

Quatre capteurs de déplacements LVDT opposés deux à deux permettent de mesurer les déplacements transversaux de l'éprouvette. Ces capteurs sont maintenus en place à mi-hauteur de l'éprouvette grâce à quatre vérins qui viennent s'appuyer sur l'éprouvette. L'ensemble capteurs-vérins forme un collier (Figure 5.16). Sur ce même collier, deux capteurs de déplacements LVDT viennent se positionner verticalement. Ils permettent de mesurer les déplacements axiaux de l'éprouvette (Figure 5.16). Ils sont maintenus par deux supports qui entourent les cales supérieure et inférieure du bâti de fluage. La précision de la mesure des déplacements est de l'ordre du micromètre. En terme de déformation avec une éprouvette de 38 mm de diamètre, la précision de la mesure est de $\pm 1.10^{-6}$.

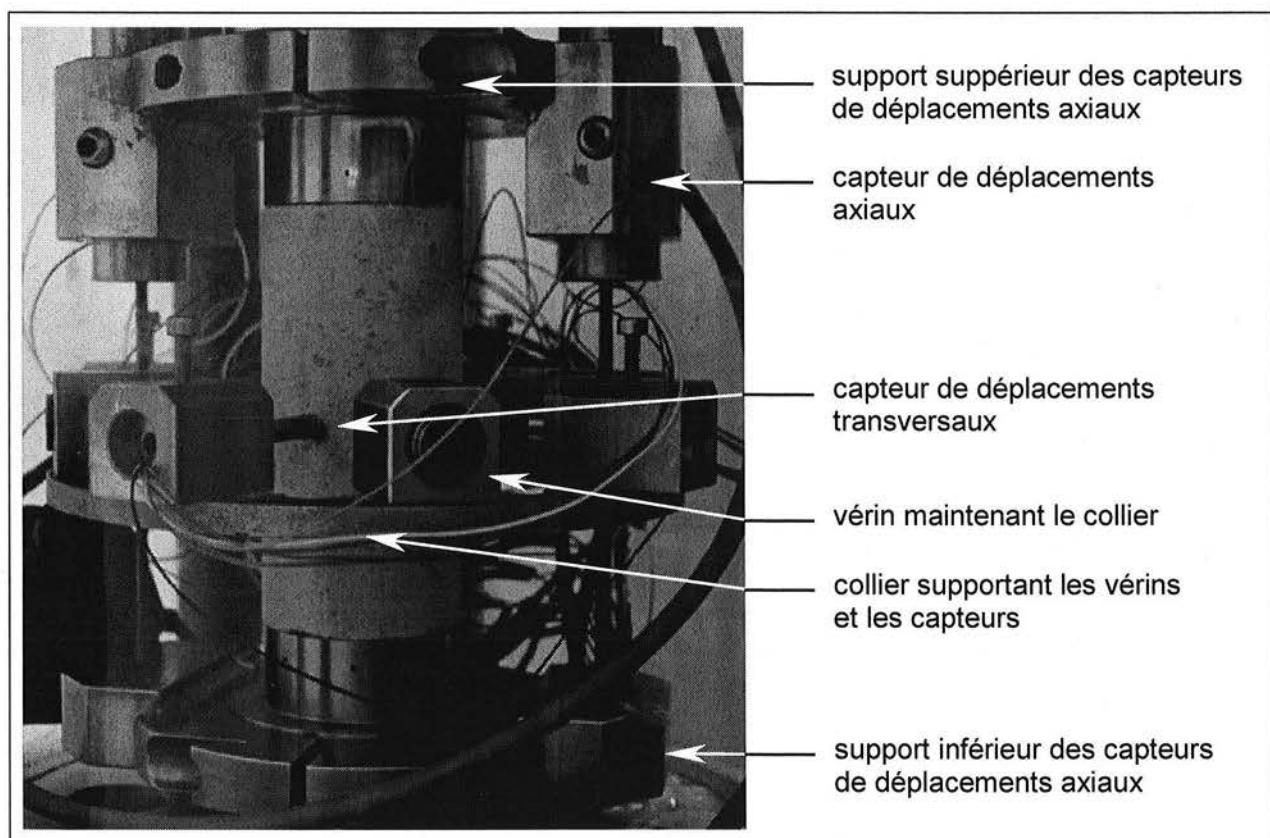


Figure 5.16 - Instrumentation d'une éprouvette avec des capteurs de déplacements LVDT

La réalisation d'un essai de fluage sous hygrométrie contrôlée demande un montage rigoureux des différents éléments. L'instrumentation des éprouvettes demande une attention particulière quelle que soit la méthode d'instrumentation utilisée. La méthode utilisant des jauge d'extensométrie a été mise au point après un certain nombre d'échecs. Cependant, pour chacune des deux méthodes, plusieurs avantages et inconvénients sont énumérés dans le tableau 5.6.

*Tableau 5.6 - Utilisation des jauge d'extensométrie et des capteurs de déplacements LVDT
Avantages et Inconvénients*

JAUGE D'EXTENSOMETRIE + RESINE		CAPTEUR DE DEPLACEMENTS LVDT	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
	Difficile et long à mettre en place	Facile et rapide à mettre en place	
	Fragile	Peu fragile	
Dispositif très peu encombrant			Dispositif encombrant
	Déformations maximales limitées (à cause de la résine)	Déplacement important ($\pm 2,5$ mm)	
			Etalonnage obligatoire
Probabilité de réactions d'oxydo-réduction très faible (soudures noyées dans la résine)			Réactions d'oxydo-réduction possible (en fonction du matériau et de l'hygrométrie)

Finalement, chaque type d'instrumentation est approprié pour des matériaux différents. Les jauge avec la résine seront préférablement utilisées avec un matériau peu déformable. Les capteurs seront utilisés avec un matériau non ferreux pour éviter les réactions d'oxydo-réduction et très déformable.

Lors des essais, les grandeurs physiques mesurées en continu sont :

- la température avec une précision de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ dans la gamme $-20/+80^\circ\text{C}$;
- l'hygrométrie avec une précision de $\pm 2\%$ dans la gamme $0-90\%$ et $\pm 3\%$ dans la gamme $90-100\%$;
- la contrainte exercée sur l'éprouvette avec une précision de $\pm 0,005 \text{ MPa}$;
- les déformations ou déplacements axiaux et transversaux. Avec des jauge d'extensométrie, la précision de la mesure des déformations est de $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. En utilisant des capteurs de déplacements LVDT, la précision de la mesure de déformation est de $\pm 1 \cdot 10^{-6}$.

5.3.1.2- Protocole expérimental

Toutes les étapes du protocole expérimental permettant la réalisation d'essais de fluage sous hygrométrie contrôlée sont détaillées. Elles sont réparties en plusieurs étapes dont l'ordre d'exécution est incontournable. Certaines de ces étapes ont déjà été abordées dans les paragraphes précédents. Cependant elles sont rappelées afin de ne pas compliquer le déroulement du protocole.

1^{ère} étape : Détermination de paramètres physico-mécaniques

Certains paramètres (masses sèches et saturées avec le suivi de la prise de masse d'eau) permettent de déterminer un temps de saturation partielle des éprouvettes en fonction du degré d'hygrométrie et de la porosité accessible à l'eau.

La résistance en compression uniaxiale d'échantillons témoins permet de choisir la ou les contraintes qui seront appliquées lors de l'essai de fluage.

D'autres paramètres (vitesses des ondes ultrasonores de compression et de cisaillement, module de Young et coefficient de Poisson dynamiques,...) doivent être déterminés avant les essais de fluage. Ils seront à nouveau déterminés après les essais de fluage. Les deux groupes de paramètres seront alors comparés.

Les procédures expérimentales de cette caractérisation ont été détaillées dans les annexes du chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ».

2^{ème} étape : Observation microscopique

Des échantillons prélevés à proximité des éprouvettes sont observés au microscope électronique à balayage. Cette observation permet une description et une caractérisation cristallographique du matériau. Des figures particulières (débit lamellaire, golfe de dissolution, ...) peuvent être retenues.

Les échantillons observés ont été prélevés à proximité des éprouvettes retenues pour les essais de fluage. Après les essais, une telle observation est renouvelée sur toute la surface du plan médian d'orientation axiale et transversale des éprouvettes. Les résultats peuvent être comparés.

Cette observation microscopique a été développée avec détail dans la première partie du chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ».

3^{ème} étape : Instrumentation des éprouvettes

Les éprouvettes retenues sont instrumentées après leur caractérisation physico-mécanique et leur saturation. Le choix de l'instrumentation est décidé en fonction du comportement mécanique instantané des échantillons témoins.

Quand la méthode des jauge avec la résine est choisie, des tests de déformabilité et de résistance en compression uniaxiale doivent être réalisés. Ils permettent de vérifier si l'anneau de résine a une influence négligeable sur le comportement du matériau.

L'ensemble de cette étape a été largement détaillé dans le paragraphe précédent.

4^{ème} étape : Essai de fluage sous hygrométrie contrôlée

L'éprouvette est mise en place dans le corps du bâti de fluage. Les connections permettant de mesurer les déformations ou les déplacements de l'éprouvette sont établies. Les différents éléments du dispositif sont alors assemblés. Le ventilateur est

actionné, l'équilibre entre l'air du récipient et du corps du bâti est atteint après quelques heures de brassage.

Le contact entre le piston du chapeau et l'éprouvette est vérifié. La contrainte uniaxiale est progressivement amenée à sa valeur maximale avec une vitesse de 1 MPa/min. Un déchargement est effectué à la même vitesse jusqu'à 50% de la contrainte maximale. Il est suivi d'un rechargement toujours à la même vitesse. La contrainte est alors maintenue constante pendant toute la durée de l'essai. Avant d'arrêter l'essai de fluage, un cycle de déchargement-rechargement est refait. Ces déchargements permettent de calculer le module de Young statique avant et après l'essai de fluage.

Pendant le chargement ou bien le déchargement, les déformations ou les déplacements sont enregistrés toutes les 10 secondes. Pendant les paliers où la contrainte et l'hygrométrie sont constantes, l'enregistrement se fait toutes les 15 minutes.

Quand l'hygrométrie et la contrainte restent constantes pendant toute la durée de l'essai, il est qualifié de monopalier. Si la contrainte ou bien l'hygrométrie varient pendant l'essai, il est alors qualifié de multipalier. Dans la suite de ce chapitre, les conditions expérimentales de chaque essai seront précisées.

5^{ème} étape : L'après essai de fluage

Dès l'ouverture du bâti de fluage, l'éprouvette est immédiatement pesée. Elle est ensuite placée à l'étuve à 50°C. Elle peut être également laissée dans un environnement avec une hygrométrie comparable à celle de l'essai de fluage.

Les vitesses des ondes ultrasonores de compression et de cisaillement sont déterminées. Le module et le coefficient de Poisson dynamiques sont alors calculés.

L'ensemble des nouveaux paramètres peut être comparé avec celui qui a été déterminé avant les essais.

Afin d'essayer de vérifier l'existence d'un mécanisme d'endommagement par microfissuration du matériau pendant l'essai de fluage, des essais de compression isotrope peuvent être réalisés après les essais de fluage. Des observations au microscope électronique peuvent également compléter ces essais.

Finalement ce protocole expérimental a été établi pour des essais de fluage avec une contrainte uniaxiale sous hygrométrie contrôlée avec un matériau particulier, le gypse. Il peut être modifié suivant le matériau. Mais les 5 étapes sont indispensables car elles sont complémentaires. La comparaison d'un certain nombre de paramètres physico-mécaniques avant et après l'essai est essentielle.

La durée moyenne d'un essai de fluage est comprise entre 1 et 3 mois. Pour pouvoir multiplier le nombre d'essais de fluage, plusieurs bâts peuvent être montés en série.

Des essais de fluage dits triaxiaux peuvent être envisagés. Le corps du bâti doit être étanche et rigide permettant ainsi de supporter la pression de confinement exercée autour de l'éprouvette. Le protocole expérimental reste identique, l'étape de saturation est remplacée par une phase d'étuvage à 50°C.

Après la description du dispositif et du protocole expérimental type, les conditions de tous les essais réalisés avec les deux gypses sont détaillées avec précision.

5.3.2- Programme expérimental

Plusieurs essais de fluage sous hygrométrie contrôlée ont été réalisés avec des conditions expérimentales différentes. Plusieurs variables interviennent : l'hygrométrie, l'âge d'exploitation et la contrainte. A l'inverse, la température est considérée comme constante : les essais sont réalisés dans une salle climatisée.

Une première série d'essais « simples » a été réalisés afin de montrer le rôle de chaque paramètre et d'observer le comportement différé des deux gypses. Les conditions expérimentales de ces essais qualifiés de monopalier sont détaillées dans le tableau 5.7.

*Tableau 5.7 - Conditions expérimentales des essais de fluage monopalier
(+) disfonctionnement des jauge ; (#) résistance en compression uniaxiale estimée pour un même état de saturation*

	N° d'essai	Année d'exploitation	Hygrométrie (%)	Contrainte (MPa)	% Rc ^(#) estimé	Durée (jours)	Instrumentation	Résultat
LIVRY GARGAN	1	2000	30	4	≈ 25%	51	Jauge seule	Exploité
	2	2000	60	4	≈ 25%	(+)	Jauge seule	Pas exploité
	3	2000	90	4	≈ 25%	(+)	Jauge seule	Pas exploité
	4	1950	30	4	≈ 27%	51	Jauge seule	Exploité
	5	1950	60	4	≈ 27%	(+)	Jauge seule	Pas exploité
	6	1950	90	4	≈ 27%	(+)	Jauge seule	Pas exploité
	7	1900	30	4	≈ 30%	52 (+)	Jauge seule	Exploité
	8	1900	60	4	≈ 30%	39 (+)	Jauge seule	Exploité
	9	1900	90	4	≈ 30%	(+)	Jauge seule	Pas exploité
	10	2000	90	4	≈ 25%	(+)	Jauge + Cosse	Pas exploité
	11	1950	90	4	≈ 27%	29	Jauge + Cosse	Exploité
	12	1900	90	4	≈ 30%	(+)	Jauge + Cosse	Pas exploité
GROZON	13	2000	30	10	≈ 24%	200	Jauge seule	Exploité
	14	2000	60 puis 90	10	≈ 24%	100 + 20	Jauge seule	Exploité
	15	2000	90	10	≈ 24%	62	Jauge seule	Exploité
	16	1970	30	10	≈ 24%	200	Jauge seule	Exploité
	17	1970	60	10	≈ 24%	120	Jauge seule	Exploité
	18	1970	90	10	≈ 24%	62	Jauge seule	Exploité
	19	1920	30	10	≈ 24%	200	Jauge seule	Exploité
	20	1920	60	10	≈ 27%	120	Jauge seule	Exploité
	21	1920	90	10	≈ 27%	62	Jauge seule	Exploité

Les raisons expliquant la possibilité d'exploiter ou de ne pas exploiter les résultats sont les suivantes :

- Les premiers essais de fluage ont été réalisés avec des éprouvettes de gypse de la carrière de Grozon. L'instrumentation n'était composée que de jauge d'extensométrie noyées dans la résine mais sans cosse-relais. Le taux de réussite a été de 100%.
- Une autre série d'essais a été réalisée avec des éprouvettes de gypse de la carrière de Livry Gargan. L'instrumentation composée de jauge noyées dans la résine mais sans cosse-relais s'est avérée inefficace après 1 ou 2 jours d'essais. Le taux de réussite a été de 30%. Les jauge ne répondaient plus, elles s'étaient décollées ou bien les soudures étaient défectueuses. De nouveaux essais ont été réalisés en ajoutant à l'instrumentation de base une cosse-relais. Aucune amélioration n'a été observée : le taux de réussite a été de 30%. L'ensemble anneau de résine plus jauge et cosse se décollait de l'éprouvette. Les déformations du matériau étaient trop importantes.

Ces premiers essais de fluage monopalier ont tout de même donné un certain nombre de résultats interprétables. Ils seront présentés par la suite dans ce chapitre. Une deuxième série d'essais a été nécessaire pour pouvoir confirmer ou infirmer les premières hypothèses avancées. Les conditions expérimentales de ces essais qualifiés de multipalier sont détaillées dans le tableau 5.8.

Tableau 5.8 - Conditions expérimentales des essais de fluage multipalier
 (+) rupture de l'éprouvette ; (^(*)) résistance en compression uniaxiale estimée pour un même état de saturation ;
 (*) décollement de l'ensemble jauge + résine ; ^M résultat de l'essai exploité mais échantillon cassé

	N° d'essai	Année d'exploitation	Hygrométrie (%)	Contrainte (MPa)	% R _c ^(*) estimé	Durée (jours)	Instrumentation	Résultat
LIVRY GARGAN	I	2000	75 75	1,5 2,5	≈ 9%	9 9 (+)	Capteur	Exploité ^M
	II	2000	95 95	1,5 2,5	≈ 9%	9 3,5 (+)	Capteur	Exploité ^M
	III	1900	75	1,5	≈ 12%	6 (+)	Capteur	Pas exploité
	IV	1900	95	1,5	≈ 12%	4 (+)	Capteur	Pas exploité
	V	1950	75 75	1,5 2,5	≈ 6%	8 6 (+)	Capteur	Exploité ^M
	VI	1950	95 95	1,5 2,5	≈ 6%	8 2 (+)	Capteur	Exploité ^M
	V'	1900	75	2,7	≈ 22%	3 (+)	Capteur	Pas exploité
	VI''	1900	95	2,7	≈ 22%	1 (+)	Capteur	Pas exploité
	A	1950	non contrôlée	essai de fluage triaxial			jauge	Exploité
GROZON	VII	2000	30	6,9	≈ 17%	10 (*)	Jauge + Cosse	Pas exploité
	VIII	2000	60	6,9	≈ 17%	12 (*)	Jauge + Cosse	Pas exploité
	IX	2000	90 90 90 60 30 30 30	6,9 8,6 10,2 12 12 0 12	≈ 16%	12 10 15 15 25 4 7	Jauge + Cosse	Exploité
	X	1920	30 30 30 90 90 90	4,6 7,6 10,2 7,6 7,6 7,6	≈ 12%	27 11 12 20 25 7 4		
	XI	1920	60 60 60 60 90 90 90	4,6 7,6 10,2 7,6 7,6 0 7,6	≈ 13%	20 10 12 19 30 7 4	Jauge + Cosse	Exploité
	XII	1920	90 90 90 90 90 90	4,6 7,6 10,2 7,6 0 7,6	≈ 14%	12 10 12 45 7 4		
	XII'	1920	75 75 75 75 75 75	4,5 7,5 10 0 4,5 7,5 10	≈ 14%	10 14 17 21 9 11 20	Jauge + Cosse	Exploité
	XIII'	1920	95 95 95 95 95 95	4,5 7,5 10 0 4,5 7,5 10	≈ 14%	10 14 17 15 9 11 20		
	B	1920	non contrôlée	essai de fluage triaxial			Jauge	Exploité
	C	1920	non contrôlée	essai de fluage triaxial			jauge	Exploité

Pour augmenter le taux de réussite, le mode d'instrumentation a été modifié pour certains essais. C'est la méthode des capteurs de déplacements LVDT qui a été utilisée avec le gypse de Livry Gargan. Le taux de réussite pour les essais avec le gypse de Livry Gargan a été supérieur à 50%.

Pour les essais avec le gypse de Grozon, le taux de réussite a été de 75%.

Cette deuxième série a finalement apporté des informations complémentaires. Ces dernières étaient indispensables pour pouvoir comprendre les mécanismes de déformations différées. Ils sont indispensables pour pouvoir déterminer une loi de comportement permettant une modélisation du comportement des deux gypses. Ce dernier point sera abordé dans le chapitre « Modélisation ».

Tous ces essais ont permis de déterminer un protocole expérimental qui assure un taux de réussite moyen de 70%. Certaines étapes ou procédures peuvent être modifiées ou adaptées pour réaliser des essais avec des matériaux différents du gypse.

Dans la suite de ce chapitre, les différents essais de fluage sous hygrométrie contrôlée sont présentés. Des commentaires et des remarques accompagnent les représentations graphiques déformation-temps. Les paramètres physiques, les observations microscopiques et les essais mécaniques post-fluage sont également présentés.

5.3.3- Résultats

Les résultats des essais de fluage monopalier avec le gypse de Grozon sont présentés en premier. Le taux de réussite avec ce gypse est le plus important. Les essais de fluage multipalier avec du gypse de Grozon sont ensuite présentés. Ils apportent ainsi des informations supplémentaires. Le deuxième ensemble de résultats concerne le gypse de Livry Gargan.

A la suite de ces résultats, les paramètres physiques déterminés après les essais de fluage sont complétés avec des observations microscopiques et des essais mécaniques post-fluage.

Les déformations différées mesurées pendant les essais de fluage triaxiaux sont présentés à la fin de ce paragraphe. Ils permettent de mettre en évidence l'influence de la contrainte moyenne et déviatorique sur les déformations différées.

5.3.3.1- Les essais de fluage sous hygrométrie contrôlée

5.3.3.1.1- Le gypse de la carrière de Grozon

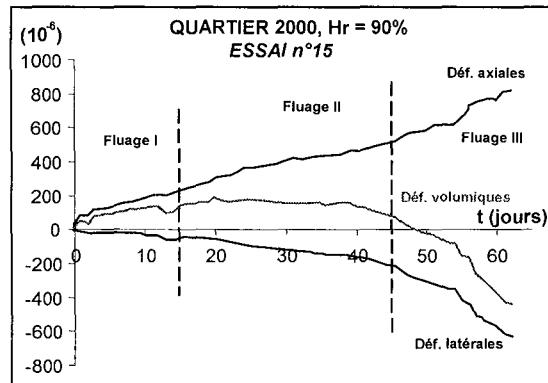
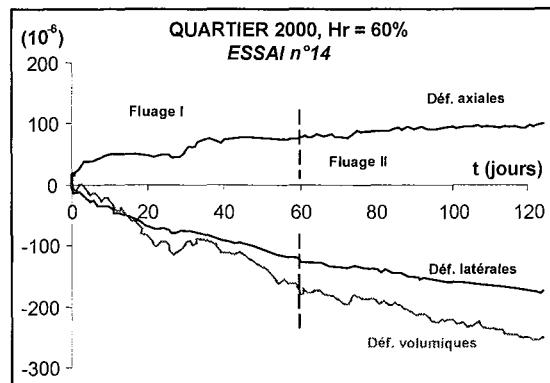
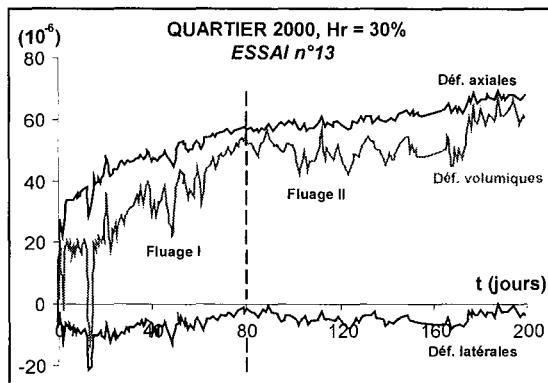
Les essais de fluage monopalier :

Les conditions expérimentales de chaque essai sont dans le tableau 5.7. Pour chaque âge d'exploitation, les déformations axiales, transversales et volumiques différées des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée sont présentées.

Les déformations volumiques différées en fonction du temps mais également en fonction de la distorsion différée sont également présentées.

Parallèlement, les vitesses moyennes de déformation différée enregistrées pendant la phase de fluage secondaire sont dans un tableau. Elles ont été calculées à partir de la pente de la droite de régression des courbes déformation-temps. La régression est nécessaire car les déformations enregistrées pendant le fluage secondaire fluctuent. Ces fluctuations sont dues aux faibles variations de la contrainte, de la température et de l'hygrométrie. Pour le cas le plus défavorable ($H_r = 30\%$, âge d'exploitation 2000), l'amplitude de la fluctuation représente 30% de la déformation totale.

AGE D'EXPLOITATION 2000



*Figure 5.17 - Grozon – Age d'exploitation 2000
Courbes déformation-temps des essais de fluage monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%) (les différentes phases de fluage sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes ; les déformations en fonction du temps pour l'essai n°14 après le changement d'hygrométrie ne sont pas représentées)*

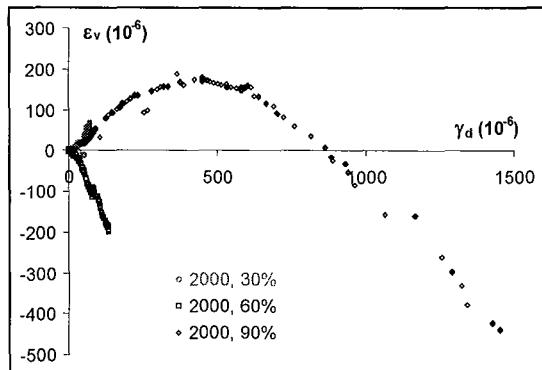
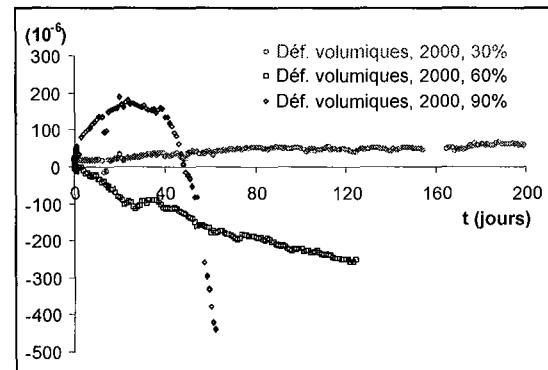


Figure 5.18 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Evolution des déformations volumiques différencées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries

Tableau 5.9 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire

	$H_r = 30\%$	$H_r = 60\%$	$H_r = 90\%$
période retenue pour le calcul des vitesses	du 80 ^{ème} au 200 ^{ème} jour	du 60 ^{ème} au 120 ^{ème} jour	du 15 ^{ème} à 45 ^{ème} jour
vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	0,1	0,3	10,4
vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	<0,1	0,9	5,8

AGE D'EXPLOITATION 1970

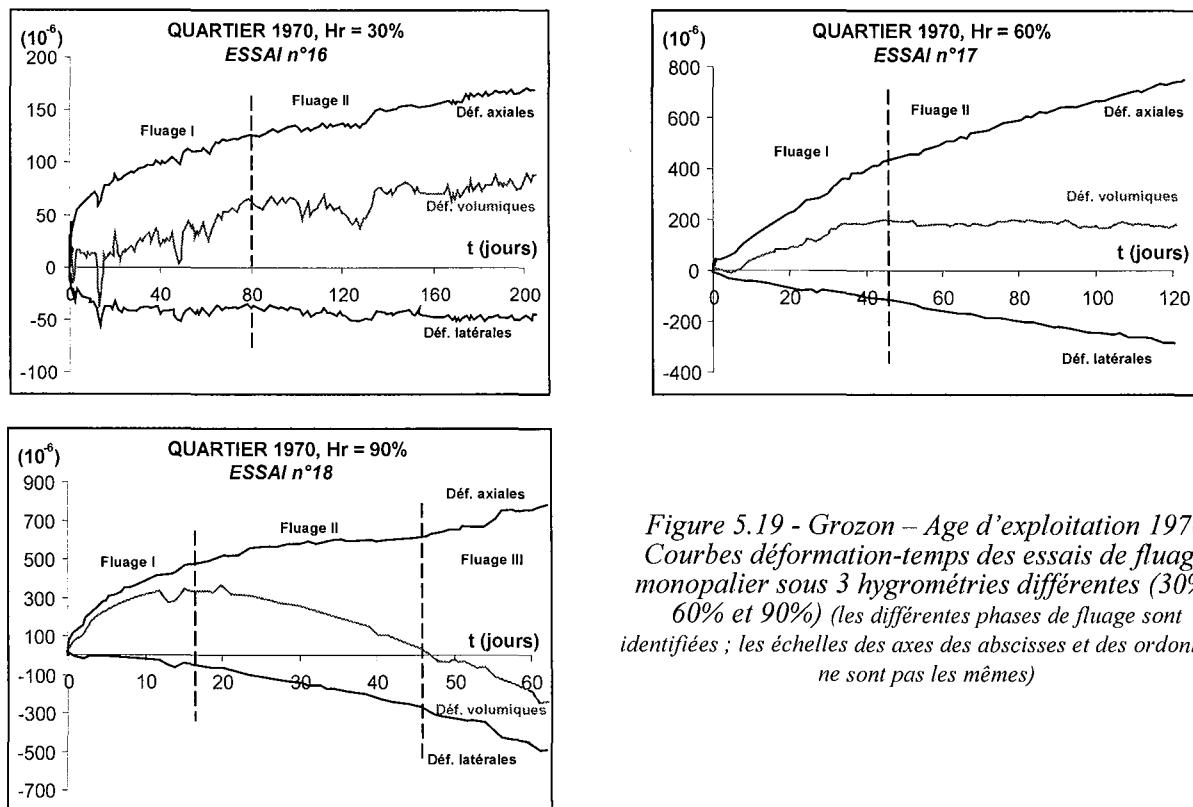


Figure 5.19 - Grozon – Age d'exploitation 1970
Courbes déformation-temps des essais de flUAGE monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%) (les différentes phases de flUAGE sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

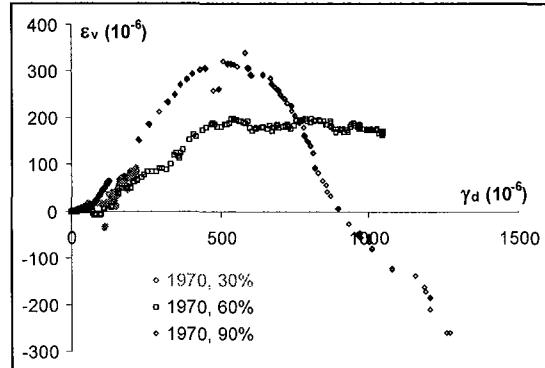
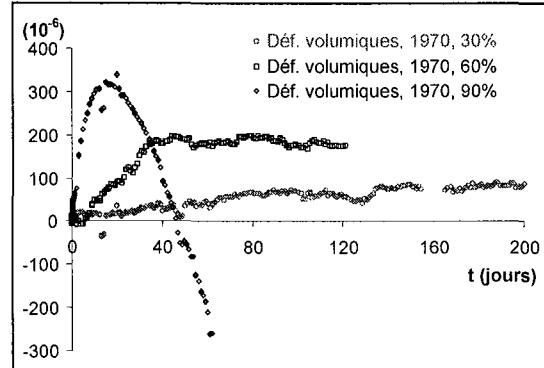


Figure 5.20 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries différentes

Tableau 5.10 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de flUAGE secondaire

	Hr = 30%	Hr = 60%	Hr = 90%
période retenue pour le calcul des vitesses	du 80 ^{ème} au 200 ^{ème} jour	du 42 ^{ème} au 120 ^{ème} jour	du 16 ^{ème} au 46 ^{ème} jour
vitesse axiale ($10^{11} \cdot s^{-1}$)	0,4	4,6	5,8
vitesse latérale ($10^{11} \cdot s^{-1}$)	0,1	2,3	8,1

AGE D'EXPLOITATION 1920

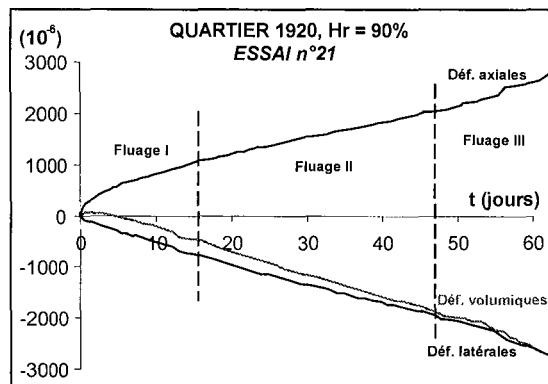
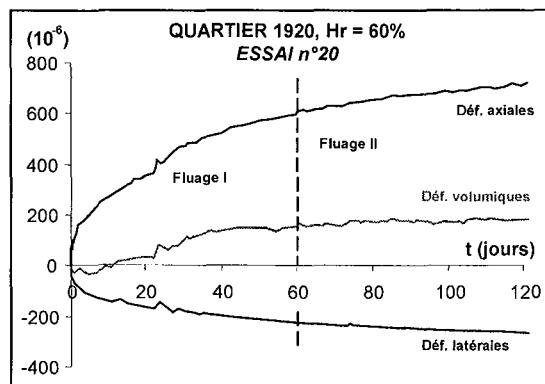
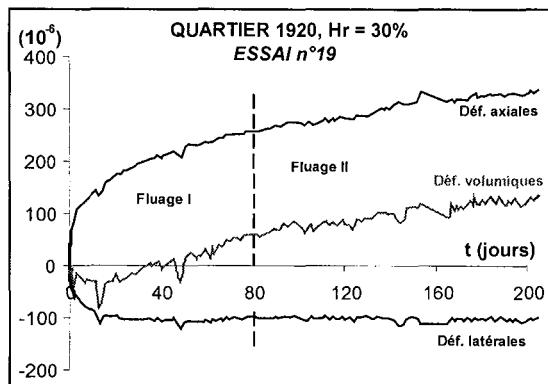


Figure 5.21 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Courbes déformation-temps des essais de fluage monopalier sous 3 hygrométries différentes (30%, 60% et 90%) (les différentes phases de fluage sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

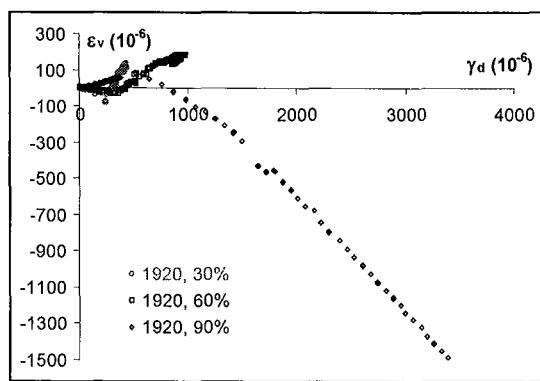
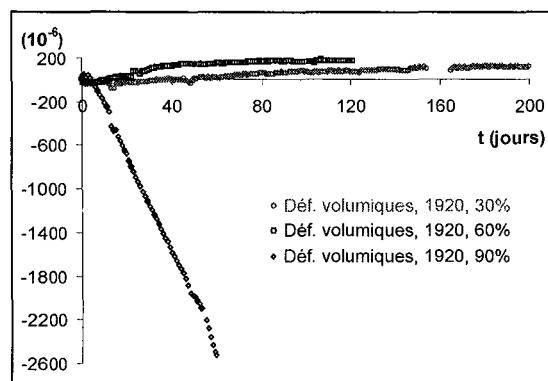


Figure 5.22 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Evolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée avec trois hygrométries différentes

Tableau 5.11 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire

	$Hr = 30\%$	$Hr = 60\%$	$Hr = 90\%$
période retenue pour le calcul des vitesses	du 80 ^{ème} au 200 jour	du 60 ^{ème} au 120 ^{ème} jour	du 15 ^{ème} au 46 ^{ème} jour
vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	0,7	2,3	35,9
vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	<0,1	1,1	42,8

Les résultats de ces premiers essais de fluage suscitent un certain nombre de commentaires et d'hypothèses :

- Pour les essais sous une hygrométrie de 90%, une phase de fluage s'apparentant au fluage primaire dure environ 15 jours. A partir du 45^{ème} jour environ, la phase tertiaire commence. L'identification de ces différentes phases de fluage avec leurs caractéristiques est expliquée en annexe 5.3.

Les déformations volumiques différées sont initialement contractantes pour devenir dilatantes. La manifestation de la dilatance volumique est fonction de l'âge (Tableau 5.12). Le seuil de dilatance est d'autant plus vite atteint que l'âge d'exploitation de l'échantillon est ancien.

- La durée de la phase du fluage primaire est plus longue sous une faible hygrométrie : elle est de 60 jours et de 80 jours environ pour les essais sous des hygrométries respectives de 60% et 30%. Pour ces hygrométries, quand les essais ont été arrêtés, un fluage secondaire était observé depuis plusieurs semaines. Les déformations volumiques différées des échantillons sous une hygrométrie de 60% sont initialement contractantes. Cependant, après 6 semaines environ, la vitesse moyenne des déformations volumiques différées est constante, à l'exception de l'essai n°14 pour lequel les déformations volumiques différées sont dilatantes dès le début du fluage. Pour les échantillons sous une hygrométrie de 30%, les déformations volumiques différées restent contractantes pendant toute la durée de l'essai (Tableau 5.12).
- Avec une hygrométrie constante, les déformations axiales et latérales au moment du passage fluage primaire-fluage secondaire sont fonction de l'âge d'exploitation de l'échantillon. Ces déformations sont d'autant plus élevées que le quartier de provenance a été exploité à une période ancienne. Pour un âge constant, les déformations axiales et latérales au moment du passage fluage primaire-fluage secondaire sont fonction de l'hygrométrie. A ce passage, les déformations sont plus importantes sous les fortes hygrométries.
- Sous une hygrométrie donnée, les vitesses moyennes des déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire sont fonction de l'âge d'exploitation de la zone de prélèvement : plus l'âge d'exploitation de la zone des prélèvements est ancien, plus la vitesse est élevée. Pour un âge donné, les vitesses sont fonction de l'hygrométrie : plus l'hygrométrie est importante, plus la vitesse est élevée.
- La présence des déformations volumiques dilatantes, aussi bien sur les courbes des essais instantanés que sur celles du fluage, indique probablement un endommagement de la roche par une propagation critique et/ou subcritique de microfissures, assistée par des réactions chimiques et accélérée par l'eau.

Tableau 5.12 - Seuil de dilatance pour les 3 essais de fluage avec une hygrométrie de 90%
(? : seuil de dilatance pas encore atteint ; C : comportement contractant)

	Quartier 2000	Quartier 1970	Quartier 1920
Hr = 90%	25 ^{ème} jour	15 ^{ème} jour	5 ^{ème} jour
Hr = 60%	1 ^{er} jour	?	?
Hr = 30%	C	C	C

D'autres résultats d'essais de fluage qualifiés de multipalier sont présentés. Ils permettent de confirmer les influences de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation

Les essais de fluage multipalier :

Deux âges d'exploitation ont été retenus : 2000 et 1920. Les résultats et les conditions expérimentales de chaque essai sont présentés.

Les cinq essais réalisés avec des échantillons d'âge d'exploitation ancien se sont parfaitement déroulés.

AGE D'EXPLOITATION 2000

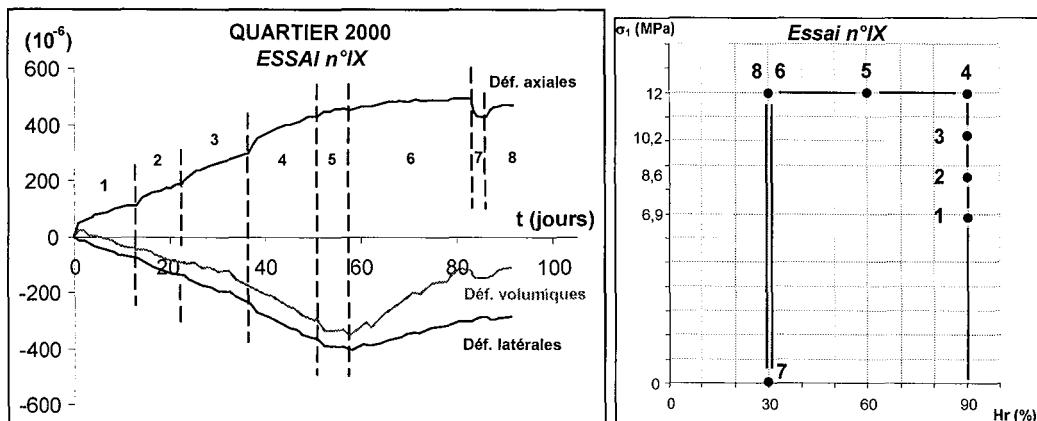


Figure 5.23 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie initiale de 90% (les différentes contraintes uniaxiales et hygrométries sont rappelées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

AGE D'EXPLOITATION 1920

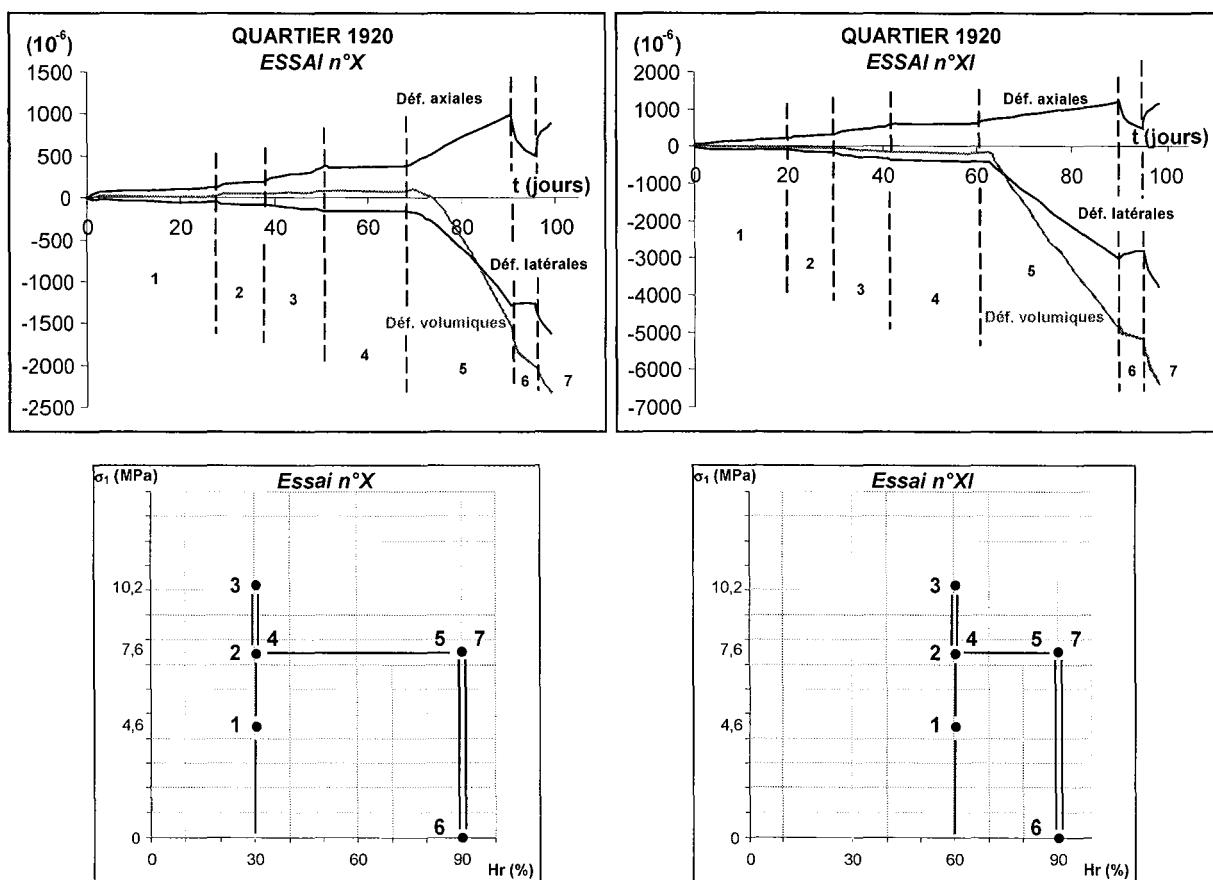


Figure 5.24 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries initiales de 30% et 60% (les différentes contraintes uniaxiales et hygrométries sont précisées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

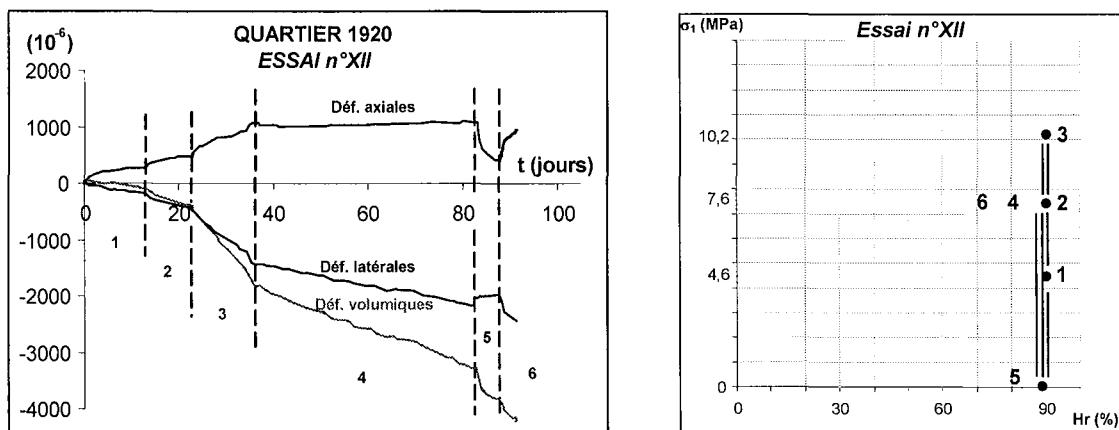


Figure 5.25 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps d'un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie de 90% (les différentes contraintes uniaxiales sont précisées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

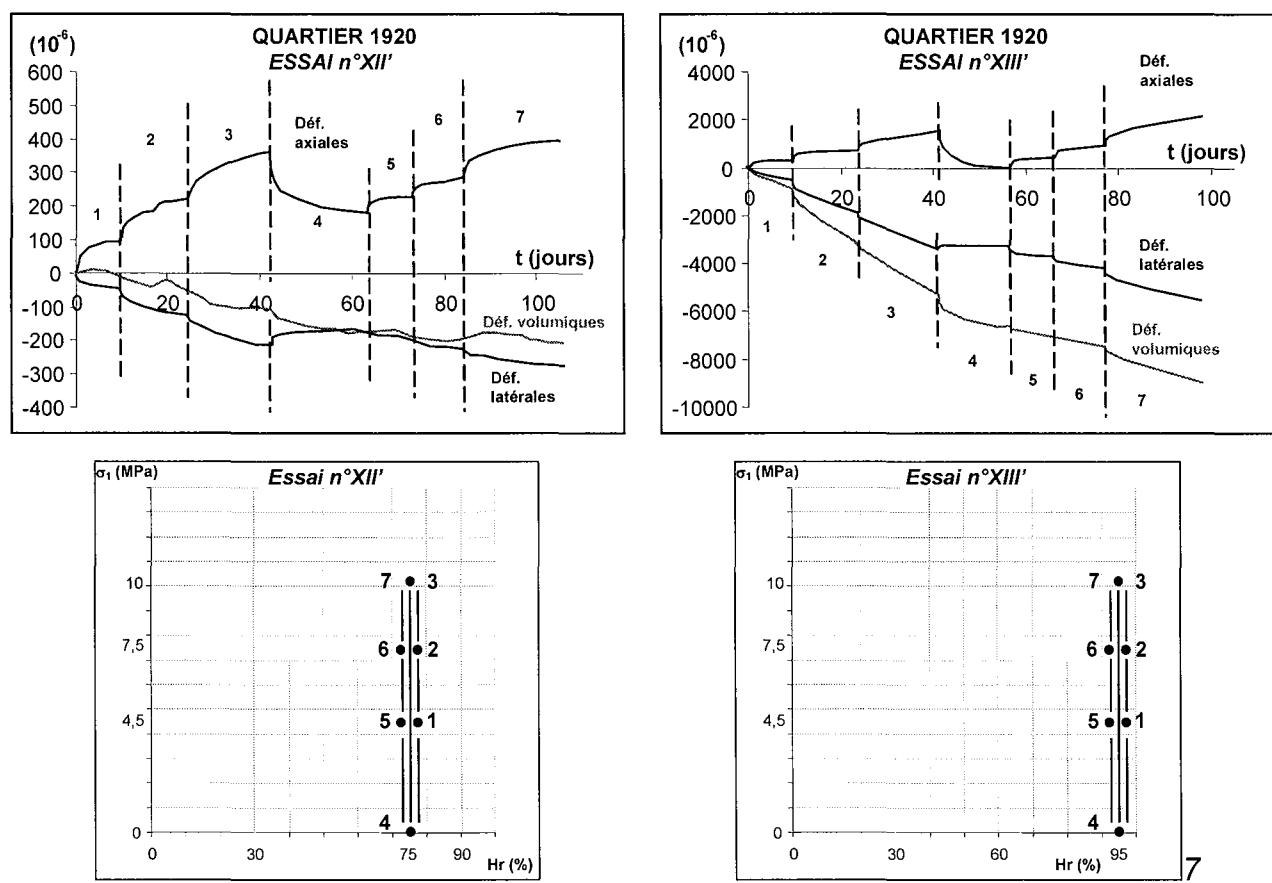


Figure 5.26 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95% (les différentes contraintes uniaxiales et hygrométries sont précisées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

L'essai n°XII' (réalisé sous une hygrométrie de 75%) permet de montrer que les déformations différences enregistrées pendant les paliers 5 à 7 ne sont pas significativement supérieures à celles enregistrées pendant les trois premiers paliers.

L'essai n°XIII' (réalisé sous une hygrométrie de 95%) met en évidence des déformations différences qui sont plus importantes pendant la deuxième série de paliers de contrainte (par rapport à la première série).

Ces résultats confirment les hypothèses émises après les essais de fluage monopalier :

- L'hygrométrie a une forte influence sur le comportement différé du gypse : les déformations axiales et latérales différées des 4 premiers paliers des échantillons d'âge d'exploitation ancien sont fonction de l'hygrométrie. Plus l'hygrométrie est importante, plus l'échantillon se déforme. L'évolution des déformations volumiques différées le confirme : sous une hygrométrie de 30%, elles restent contractantes pendant les 4 premiers paliers. A l'inverse, sous une forte hygrométrie (90%), elles deviennent très rapidement dilatantes.
- L'âge d'exploitation a également une influence sur le comportement différé du gypse. L'échantillon d'âge d'exploitation récent présente des déformations axiales et latérales différées moins importantes que celui d'un âge ancien.
- Les déformations volumiques dilatantes différées ont probablement deux origines : la première peut être attribuée à un mécanisme de déformation par dislocation. La seconde origine prendrait en compte des glissements de chaînes atomiques.
- Avec une contrainte nulle, les déformations latérales différées ne diminuent pratiquement pas. A l'inverse, les déformations axiales différées diminuent beaucoup plus pour devenir constante au bout d'un certain temps : elles vont dans le sens contraire des déformations obtenues pendant un fluage classique. Des déformations anélastiques différées existent pendant cette phase de recouvrance. Dans la littérature, ce fluage est qualifié de fluage inverse (Hunsche et Hampel, 1999).

5.3.3.1.2- Le gypse de la carrière de Livry Gargan

Les essais de fluage monopalier :

Les courbes déformation-temps des cinq essais de fluage sous une hygrométrie contrôlée sont présentés sur les figures 5.27 à 5.29. Les résultats des essais « non exploitables » ne sont pas présentés. L'évolution des déformations volumiques différées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différée sous une hygrométrie de 30% est également représentée (Figure 5.30). Parallèlement, les vitesses moyennes de déformation calculées pendant la phase de fluage secondaire sont présentées dans le tableau 5.13. Elles ont été calculées avec la même méthode que celle qui a été utilisée pour le gypse de Grozon. L'amplitude des fluctuations des déformations différées, pour le cas le plus défavorable ($H_r = 30\%$, âge d'exploitation 2000), représente 30% de la déformation totale.

AGE D'EXPLOITATION 2000

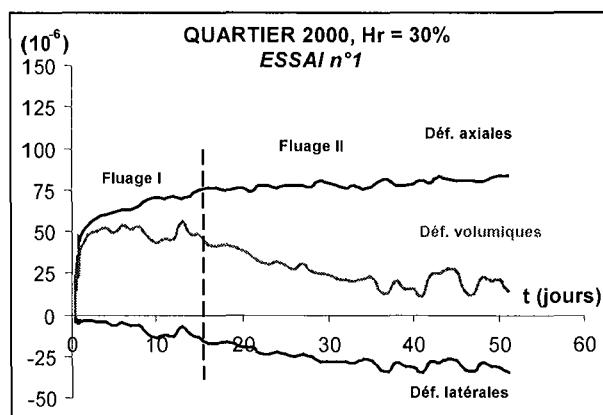


Figure 5.27 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 Courbes déformation-temps de l'essai de fluage monopalier sous une hygrométrie de 30% (les différentes phases de fluage sont identifiées)

AGE D'EXPLOITATION 1950

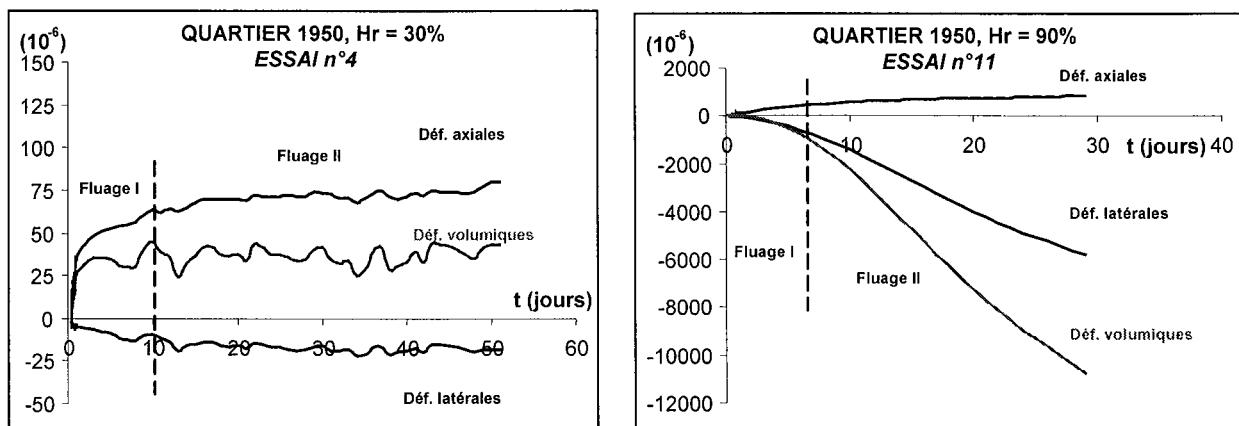


Figure 5.28 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage monopalier sous des hygrométries de 30% et 90% (les différentes phases de fluage sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

AGE D'EXPLOITATION 1900

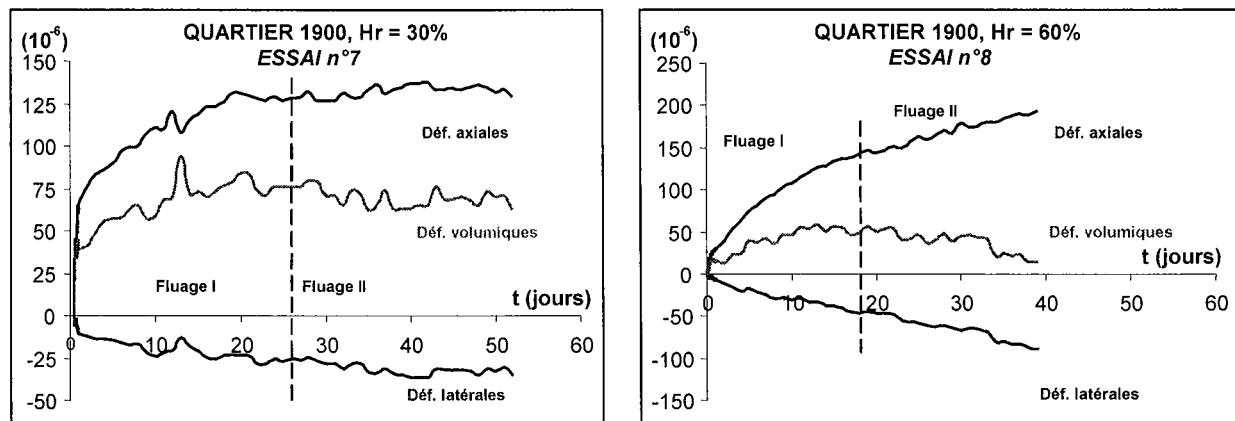


Figure 5.29 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1900 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage monopalier sous des hygrométries de 30% et 60% (les différentes phases de fluage sont identifiées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

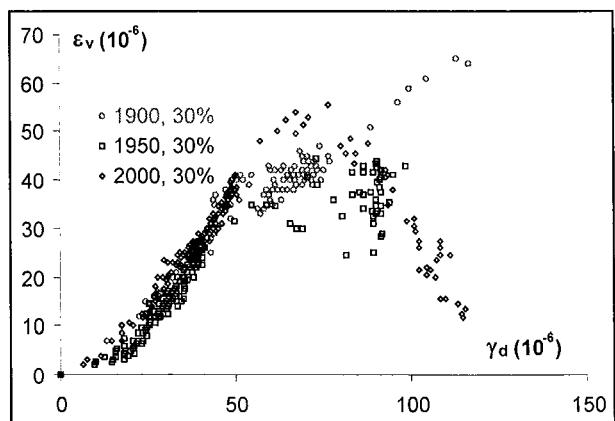
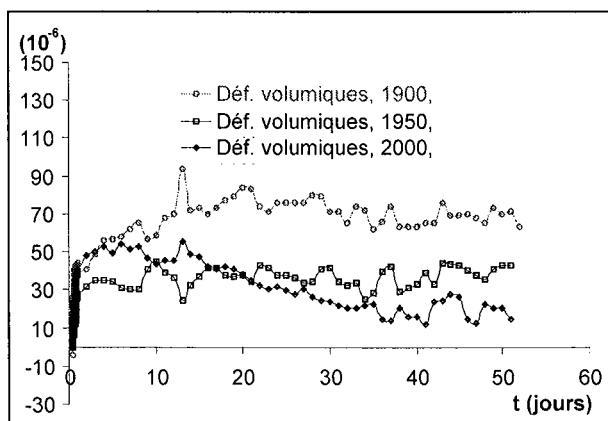


Figure 5.30 - Livry Gargan – Evolution des déformations volumiques différencées en fonction du temps et en fonction de la distorsion différencée sous une hygrométrie de 30%

Tableau 5.13 - Livry Gargan – Vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire

	Quartier 2000		Quartier 1950		Quartier 1900	
Période retenue pour le calcul des vitesses	du 15 ^{ème} au 50 ^{ème} jour		du 10 ^{ème} au 30 ^{ème} jour		du 20 ^{ème} au 40 ^{ème} jour	
Hygrométrie (%)	Vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	Vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	Vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	Vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	Vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	Vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)
90	-	-	13,4	253	-	-
60	-	-	-	-	2,9	2,3
30	0,2	0,4	0,2	<0,1	0,2	0,3

Les quelques résultats de ces premiers essais de fluage avec du gypse de Livry Gargan n'apportent pas d'éléments nouveaux. L'hygrométrie et l'âge d'exploitation semblent influencer le comportement différé de ce gypse :

- Tous les essais ont été arrêtés lors de la phase de fluage secondaire. La phase de fluage primaire de tous les essais a duré entre 10 et 20 jours. Elle est plutôt de 10 jours pour l'hygrométrie la plus élevée et de 20 jours pour la plus faible.
- Les déformations volumiques différées sont contractantes dans tous les cas. L'essai n°11 est une exception : les déformations volumiques différées deviennent très rapidement dilatantes. Le seuil de dilatance est atteint au bout de 2 jours. La manifestation d'un début de dilatance volumique est observable (essai n°8). Le seuil de dilatance est atteint au bout de 17 jours. Comme pour le gypse de Grozon, le seuil de dilatance semble d'autant plus vite atteint que l'âge d'exploitation est ancien. Une hygrométrie élevée accentue ce phénomène.
- Sous une hygrométrie donnée, les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales différées pendant la phase de fluage secondaire semblent être fonction de l'âge d'exploitation de la zone de prélèvement : plus l'âge d'exploitation de la zone des prélèvements est ancien, plus la vitesse semble élevée. Pour un âge donné, les vitesses semblent également être fonction de l'hygrométrie : plus l'hygrométrie est importante, plus la vitesse semble élevée.
- Les vitesses moyennes de déformation pendant la phase de fluage semblent plus rapides que celles qui ont été calculées avec le gypse de Grozon. Ce résultat n'est pas surprenant : les déformations instantanées du gypse de Grozon (cf. chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ») sont plus faibles que celles du gypse de Livry Gargan.

Les influences de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation sont confirmées et vérifiées avec la réalisation d'essais de fluage qualifiés de multipalier. La démarche est la même que celle qui a été appliquée avec le gypse de Grozon.

Les essais de fluage multipalier :

Les deux âges d'exploitation retenus sont les suivants : 2000 et 1950. Les essais ont été doublés pour chaque âge.

Les résultats et les conditions expérimentales de chaque essai réussi sont présentés sur les figures 5.31 et 5.32.

Les vitesses moyennes de déformation axiale et latérale pendant les phases de fluage secondaire sont dans le tableau 5.14. Elles sont calculées à partir de la pente de la droite de régression des courbes déformation-temps.

AGE D'EXPLOITATION 2000

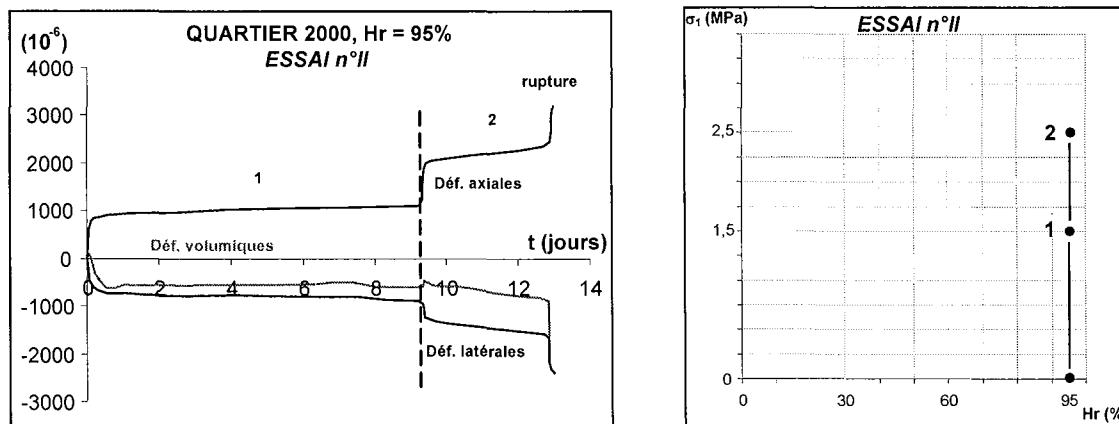
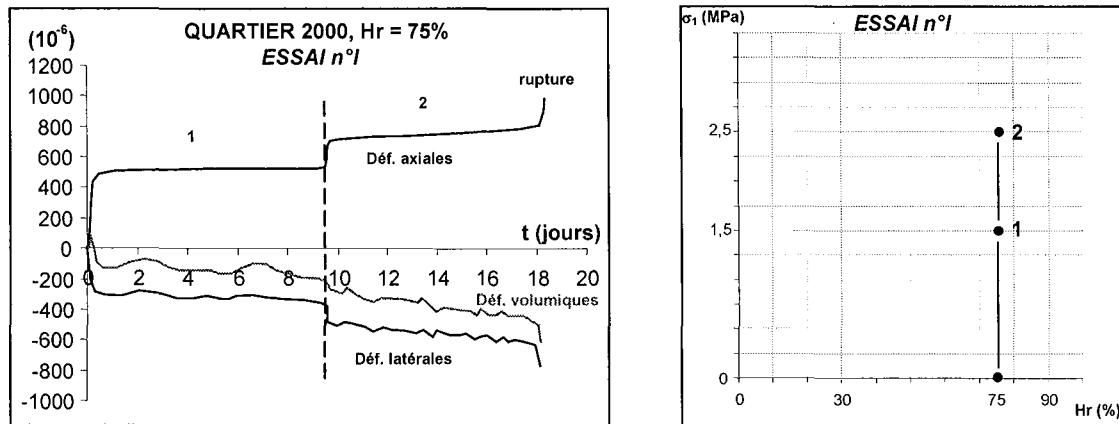


Figure 5.31 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95% (les différentes contraintes uniaxes et hygrométries sont précisées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

AGE D'EXPLOITATION 1950

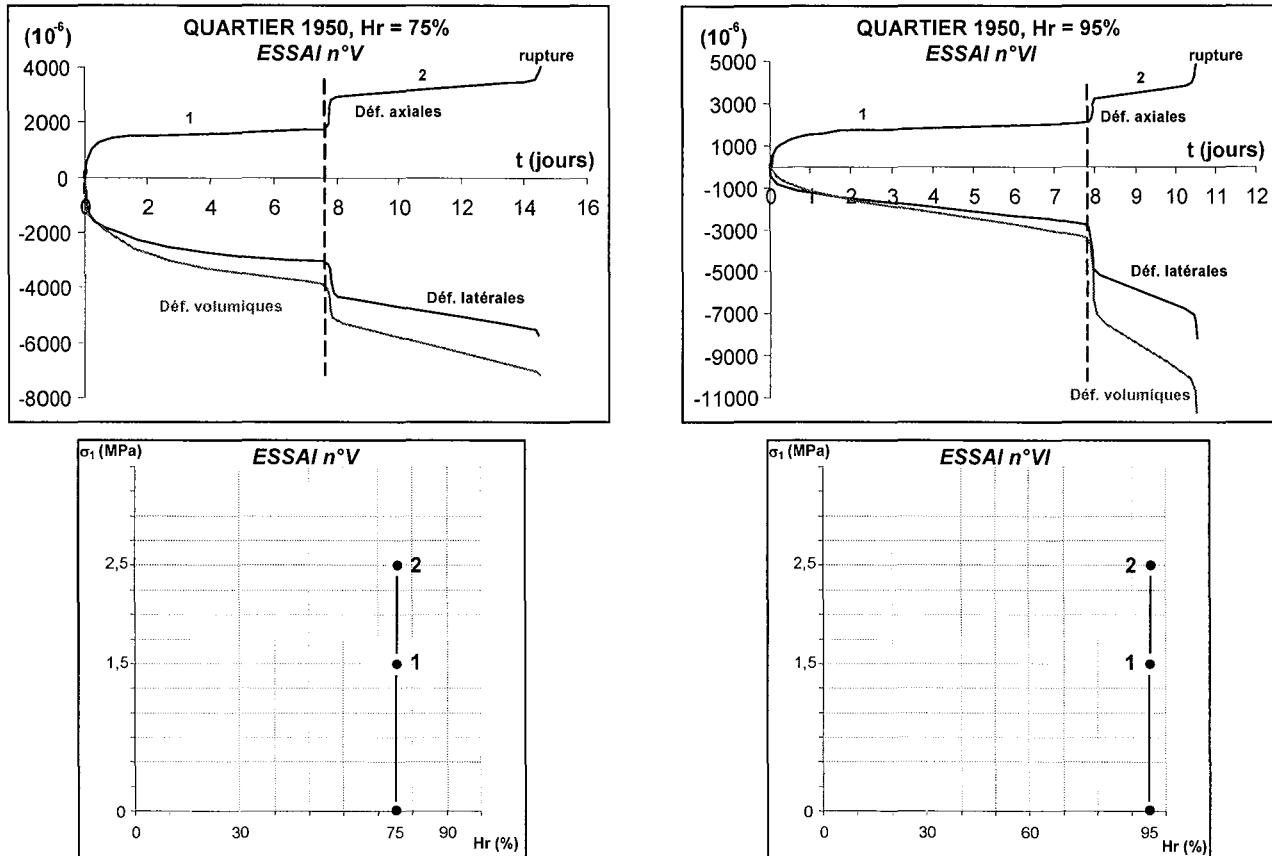


Figure 5.32- Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes déformation-temps de deux essais de fluage multipalier sous des hygrométries de 75% et 95% (les différentes contraintes uniaxiales et hygrométries sont précisées ; les échelles des axes des abscisses et des ordonnées ne sont pas les mêmes)

Tableau 5.14 - Livry Gargan – Vitesses moyennes de déformation axiale et latérale pendant la phase de fluage secondaire

Période retenue pour le calcul des vitesses	Quartier 2000				Quartier 1950			
	du 2 ^{ème} au 8 ^{ème} jour		du 2 ^{ème} au 6 ^{ème} jour		du 2 ^{ème} au 7 ^{ème} jour			
Hygrométrie (%)	75		95		75		95	
Contrainte (MPa)	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5	1,5	2,5
Vitesse axiale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	1,7	14	25	90	43	105	67	300
Vitesse latérale ($10^{-11} \cdot s^{-1}$)	5,7	20	16	101	122	221	220	814

De nombreux problèmes liés tout d'abord à la métrologie puis à la résistance estimée en compression uniaxiale ont limité le nombre d'essais. Tous les essais de fluage multipalier se sont terminés par la rupture des éprouvettes. Le suivi des vitesses instantanées de déformations axiales et latérales différées n'a pas permis de prévoir la rupture. L'accélération des déformations était trop brutale.

La rupture précoce des éprouvettes n'a pas permis de multiplier les paliers de contraintes et les paliers d'hygrométrie. Cependant, les quelques résultats permettent un certain nombre de commentaires. Les déformations volumiques différées sont, dès le départ de l'essai, dilatantes. L'hygrométrie et l'âge d'exploitation ont une influence sur le comportement différé de ce gypse. Les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales augmentent avec l'hygrométrie et l'âge d'exploitation (Tableau 5.14).

5.3.3.2- Observations microscopiques post-fluage

L'objectif de ces observations est de mettre en évidence une influence de l'hygrométrie sur la structure cristalline des cristaux de gypse. En effet, une forte hygrométrie est supposée comme corrosive au contraire d'une faible hygrométrie. Ce point a déjà été abordé dans la première partie du chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ». L'hygrométrie avait été prise en compte dans le processus de vieillissement du gypse *in situ*.

Après les essais de fluage, des éprouvettes provenant de quartiers d'âge d'exploitation ancien (1920) de Grozon ont été observées au microscope électronique à balayage.

Pour mémoire, les échantillons témoins de Grozon ont été prélevés à proximité des éprouvettes utilisées pour réaliser les essais de fluage. Leur caractérisation microscopique avait été déterminée dans le chapitre précédent. Ces échantillons présentent une densité de traces de dissolution relativement importante par rapport à des échantillons d'âge d'exploitation récent.

Les observations sont systématiquement effectuées du bord vers le cœur de l'éprouvette sur un plan longitudinal et transversal. Ce plan d'observation passe par l'axe longitudinal de l'éprouvette (Figure 5.33).

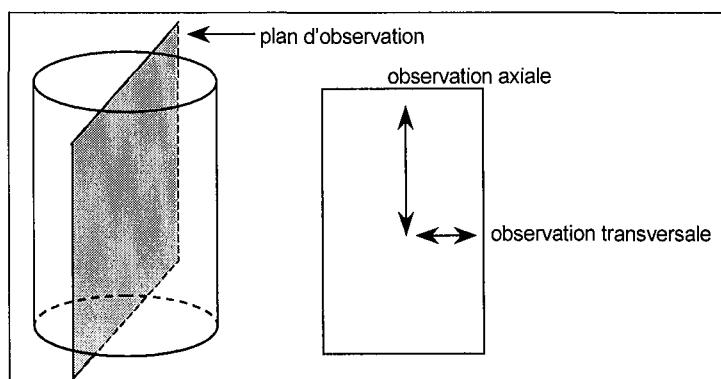


Figure 5.33 - Axes d'observation des éprouvettes au microscope électronique à balayage

L'observation au MEB d'une éprouvette ayant subi un essai de fluage sous une hygrométrie de 30% (essai n°19) nous a permis de relever différentes particularités :

- La taille des cristaux a diminué d'un facteur 10, elle devient inférieure à 25 µm.
- Il n'existe pas de frange de dissolution mais quelques traces de dissolution disséminées dans l'ensemble de l'éprouvette. Ces traces devaient être présentes avant l'essai de fluage.

Les observations d'une éprouvette ayant subi un essai de fluage sous une hygrométrie contrôlée de 60% (essai n°20) nous apportent les informations suivantes :

- La taille des cristaux a diminué d'un facteur 10, elle devient inférieure à 25 µm.
- Une frange de dissolution concentrique, c'est-à-dire une frange où les cristaux sont émoussés, peut être observée. Son épaisseur est de l'ordre du millimètre.
- Vers le cœur de l'éprouvette, quelques traces de dissolution d'une faible ampleur sont observées.

Pour une hygrométrie de 90%, l'observation d'une éprouvette après l'essai de fluage (essai n°21) a permis de relever différentes particularités :

- La taille des cristaux a diminué d'un facteur 10, elle devient inférieure à 25 µm.
- L'éprouvette présente une importante densité de traces de dissolution : elles sont nettement plus nombreuses par rapport aux observations faites sur des échantillons témoins.

Le tableau 5.15 permet de comparer les caractéristiques de la structure du gypse de Grozon avant et après l'essai de fluage.

Tableau 5.15 - Comparaison de la structure du gypse entre des échantillons témoins et des échantillons après fluage sous hygrométrie

	AVANT ESSAI échantillon témoin	APRES ESSAI
Taille moyenne des cristaux	200-300 µm	<25 µm
Orientation des cristaux	pluriaxiale	pluriaxiale
Forme des cristaux	baguettes/plaquettes corrodées et quelques-unes automorphes	baguettes/plaquettes corrodées
Aspect des surfaces cristallines	traces de dissolution	dissolution très marquée (uniquement pour Hr = 90%)

Malgré l'existence de traces de dissolution avant les essais de fluage, nous pouvons constater que l'hygrométrie entraîne une dissolution partielle de certains cristaux et que cette nouvelle dissolution varie dans le même sens que l'hygrométrie. Un autre résultat est à noter : la taille des cristaux après essais de fluage semble fortement diminuer.

5.3.3.3- Paramètres physico-mécaniques post-fluage

La prise de masse d'eau, les vitesses des ondes ultrasonores de compression P (V_p) et de cisaillement S (V_s) ont été mesurées après les essais de fluage. Ces mesures ont permis de calculer le module de Young (E_{dyn}) et le coefficient de Poisson dynamiques (ν_{dyn}). Un cycle de chargement-déchargement-rechargement est réalisé au début et à la fin de l'essai de fluage, un module de Young statique (E) et un coefficient de Poisson (ν) peuvent être déterminés. D'autres paramètres ont été également déterminés dans certains cas : il s'agit du module de déformabilité axiale tangent (E_{tg}) et du coefficient de Poisson correspondant (ν_{tg}).

Afin de vérifier l'existence d'un mécanisme d'endommagement par microfissuration du matériau pendant l'essai de fluage, des essais de compression isotrope ont été réalisés après les essais de fluage. La porosité de fissure (n_f) et le module de compressibilité (K) sont ainsi déterminés.

Cette hypothèse a été émise car des déformations volumiques dilatantes différées ont été enregistrées lors plusieurs essais de fluage.

Tous ces paramètres pour les deux gypses sont regroupés dans les tableaux 5.16 et 5.17. Les figures 5.34 à 5.39 illustrent les déformations mesurées pendant un essai de compression isotrope. Les autres courbes contrainte-déformation sont en annexe 5.4.

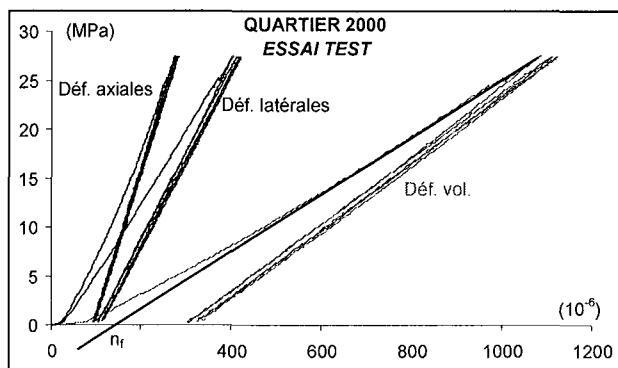
Tableau 5.16 - Livry Gargan – Paramètres physico-mécaniques avant et après les essais de fluege
 (m_f : prise de masse d'eau ; V_p et V_s : vitesse des ondes ultrasonores de compression et de cisaillement ; E_{dyn} et ν_{dyn} : module de Young et coefficient de Poisson dynamiques ; E_{tg} et ν_{tg} : module de déformabilité axiale tangent et coefficient de Poisson tangent ; E et ν : module de Young statique et coefficient de Poisson ; n_f : porosité de fissure ; K : module de compressibilité ; M : éprouvette cassée)

Essai n°	LIVRY GARGAN								
	1 monopair	4 monopair	11 monopair	7 monopair	8 monopair	I multipair M	II multipair M	V multipair M	VI multipair M
Hygrométrie	30%	30%	90%	30%	60%	75%	95%	75%	95%
Age d'exploitation	2000	1950	1950	1900	1900	2000	2000	1950	1950
m_f (g)	avant 219,95	212,1	199,85	188,65	200,43	203,31	203,79	207,23	212,75
après	219,85	212,13	200,2	188,5	200,67	-	-	-	-
évolution (%)	-0,0	0,0	0,1	-0,1	0,1	-	-	-	-
V_p (m.s⁻¹)	avant 3625	3200	3425	3425	3600	3525	3700	3750	3900
après	3600	3140	3150	3375	3500	-	-	-	-
évolution (%)	-0,7	-1,9	-8,0	-1,4	-2,8	-	-	-	-
V_s (m.s⁻¹)	avant 2075	1875	1950	1975	2025	1975	1975	2050	2075
après	2060	1850	1815	1925	1925	-	-	-	-
évolution (%)	-0,7	-1,3	-6,9	-2,5	-4,9	-	-	-	-
E_{dyn} (GPa)	avant 24,1	18	19,8	20,1	21,3	21,8	22,1	22,2	22,8
après	23,8	17,5	17,1	19,8	19,7	-	-	-	-
évolution (%)	-1,2	-2,8	-13,6	-1,5	-7,5	-	-	-	-
ν_{dyn}	avant 0,26	0,24	0,26	0,25	0,28	0,27	0,30	0,29	0,30
après	0,25	0,23	0,25	0,25	0,28	-	-	-	-
évolution (%)	-3,8	-4,2	-3,8	0	0	-	-	-	-
E_{tg} (GPa)	avant -	-	-	-	-	-	-	-	-
après	-	-	-	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ν_{tg}	avant -	-	-	-	-	-	-	-	-
après	-	-	-	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E (GPa)	avant 28,2	20,8	18,1	15,2	26,4	16,8	15,6	17,9	14,8
après	23,7	16,9	10,3	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	-15,9	-18,7	-43,1	-	-	-	-	-	-
ν	avant 0,24	0,24	0,20	0,16	0,23	0,25	0,23	0,21	0,24
après	0,22	0,22	0,15	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	-8,3	-8,3	-25	-	-	-	-	-	-
n_f (10^{-4})	témoin 0,4	0,5	0,5	-	-	-	-	-	-
après	1,2	1	2,5	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	200	100	400	-	-	-	-	-	-
K (MPa)	témoin -	12,3	12,3	-	-	-	-	-	-
après	-	11,7	9,1	-	-	-	-	-	-
évolution (%)	-	-4,8	-16,1	-	-	-	-	-	-

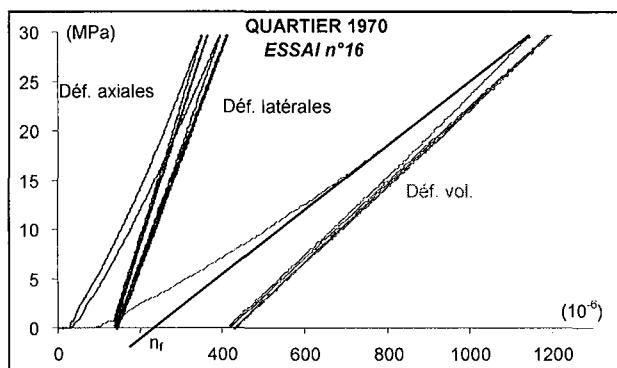
Tableau 5.17 - Grozon – Paramètres physico-mécaniques avant et après les essais de fluage

(même légende que le tableau 5.11 ; (#) Disfonctionnement des jauge lors du déchargement ; (*) comparaison non justifiée : l'hygrométrie finale est différente de l'hygrométrie initiale ; ^A : essai avec deux hygrométries, 60% pendant 100 jours puis 90% pendant 20 jours)

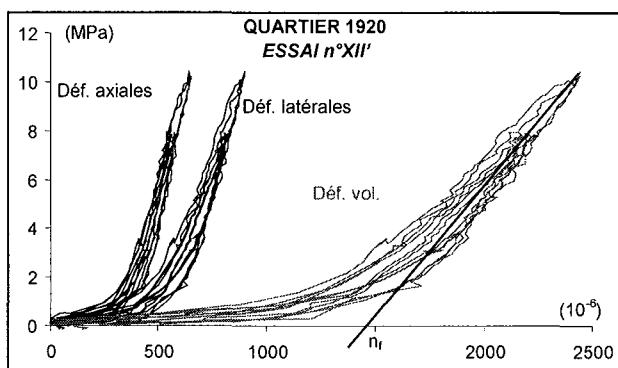
Essai n°	GROZON														
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	IX	X	XI	XII	XII'	XIII'
Type d'essai	monopalier	monopalier ^A	monopalier	multipalier	multipalier	multipalier	multipalier	multipalier	multipalier						
Hygrométrie	30%	60/90%	90%	30%	60%	90%	30%	60%	90%	-	-	-	90%	75%	95%
Age d'exploitation	2000	2000	2000	1970	1970	1970	1920	1920	1920	2000	1920	1920	1920	1920	1920
$m_f(g)$	224,65	223,78	203,92	221,68	226,09	205,94	223,06	222,38	206,25	(*)	(*)	(*)	216,23	215,51	230,13
avant	224,42	224,08	205,05	221,63	226,44	206,07	223,01	222,49	206,38	(*)	(*)	(*)	216,39	215,54	230,32
après													0,1	0,0	0,1
évolution (%)	-0,1	0,1	0,5	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	-	-	-	0,1	0,0	0,1
$V_p (m.s^{-1})$	5110	5000	4875	5000	4975	5000	5050	5000	5025	5100	5150	5100	5100	5100	5100
avant	5040	5000	4850	5000	4875	4975	5000	5000	4850	4750	4800	4900	4950	-	-
après													-2,9	-	-
évolution (%)	-1,4	0	-0,5	0,0	-2,0	-0,5	-1,0	-1,0	-3,5	-6,7	-5,9	-4,8	-2,9	-	-
$V_s (m.s^{-1})$	2600	2525	2475	2525	2500	2525	2525	2525	2525	2500	2500	2525	2525	2475	2500
avant	2550	2475	2425	2500	2450	2450	2525	2500	2425	2300	2300	2300	2300	-	-
après													-8,9	-	-
évolution (%)	-1,9	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	-3,0	0,0	-1,0	-4,0	-8,0	-8,0	-8,9	-8,9	-	-
$E_{dyn} (GPa)$	42,1	38,6	37,5	38,9	38,5	38,6	39,2	39	39,4	38,4	38,6	39,2	39,3	37,7	38,7
avant	40,6	37,9	36,3	38,3	37,2	37,3	38,8	38,4	36,4	33,4	32,9	33,2	33,8	-	-
après													-14,0	-	-
évolution (%)	-3,6	-1,8	-3,2	-1,5	-3,4	-3,4	-1,0	-1,5	-7,6	-13,0	-14,8	-15,3	-14,0	-	-
v_{dyn}	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34
avant	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	-	-
après													-5,9	5,9	-
évolution (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	5,9	5,9	-	-
$E_{tg} (GPa)$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48,4	37,5	34,3	38,8	44,5	43,9
avant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34,9	12,5	11,1	24	41,3	-
après										-27,9	-66,7	-67,6	-38,1	-7,2	-
évolution (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v_{tg}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,33	0,32	0,4	0,43	0,38
avant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0,25	0,28	0,4	0,41	-
après										-25,0	-24,2	-12,5	0,0	-4,7	-
évolution (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$E (GPa)$	43,7	(#)	45,3	40,9	41,6	45,4	40,8	47	33,6	38,1	37,7	39,5	34,7	43,8	39,4
avant	42,5	(#)	26,2	39,4	31,4	25,9	37,2	36,4	18,8	35	21,9	18	11,9	39,4	-
après			-42,2	-3,7	-24,5	-42,9	-8,8	-22,5	-44,0	-8,1	-41,9	-54,4	-65,7	-10,0	-
évolution (%)	-2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v	0,28	(#)	0,32	0,36	0,39	0,32	0,43	0,44	0,36	0,33	0,34	0,37	0,3	0,39	0,31
avant	0,28	(#)	0,32	0,35	0,39	0,32	0,39	0,42	0,36	0,3	0,34	0,32	0,27	0,35	-
après			0,0	-	0,0	-2,8	0,0	0,0	-9,3	-4,5	0,0	-9,1	0,0	-10,0	-10,3
évolution (%)	0,0	-	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-13,5	-10,0	-10,3	-
$n_f (10^{-4})$	1,5	1,5	1,5	-	-	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
témoin	1,5	3,2	-	2,2	1,5	-	-	-	-	1	2	2	1,5	15	-
après	-	X 2	-	-	-	-	-	-	-	X 0,3	X 1,3	X 1,3	-	X 10	-
évolution (%)	-15,3	-20,1	-	-	-	-	-	-	-	-3,9	-3,6	-1,0	-5,9	-50	-
$K (MPa)$	38,3	38,3	38,3	-	-	-	30,4	30,4	30,4	38,3	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
témoin	32,2	30,6	-	33,4	37,8	-	-	-	-	36,8	29,3	30,1	28,6	15,1	-
après										-3,9	-3,6	-1,0	-5,9	-50	-
évolution (%)	-15,3	-20,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



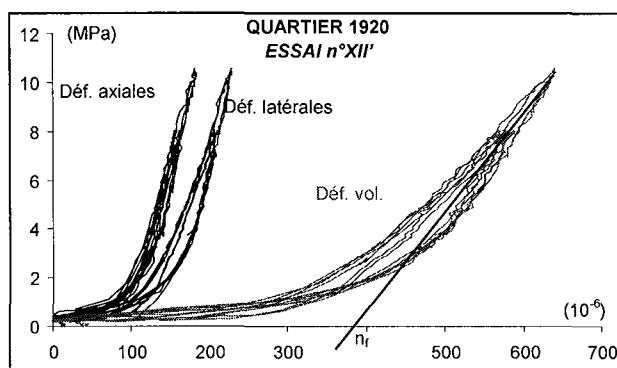
*Figure 5.34 - Grozon – Age 2000
Essai de compression isotrope avec un échantillon témoin - Courbes contrainte-déformation*



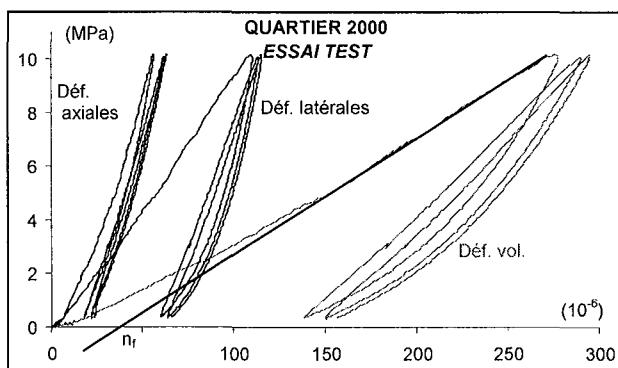
*Figure 5.35 - Grozon – Age 1970
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°16 - Courbes contrainte-déformation*



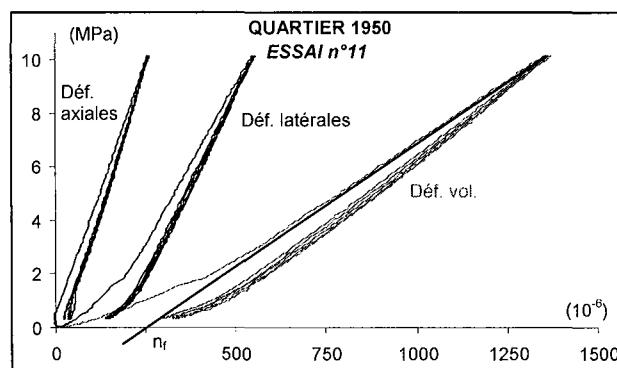
*Figure 5.36 - Grozon – Age 1920
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°XII' - Courbes contrainte-déformation
(Délai entre arrêt de l'essai de fluage et de l'essai de compression isotrope = 2 jours)*



*Figure 5.37 - Grozon – Age 1920
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°XII' - Courbes contrainte-déformation
(Délai entre le premier essai de compression isotrope et ce deuxième essai = 1 mois avec une hygrométrie de 40%)*



*Figure 5.38 - Livry Gargan – Age 2000
Essai de compression isotrope avec un échantillon témoin - Courbes contrainte-déformation*



*Figure 5.39 - Livry Gargan – Age 1950
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'essai n°11 - Courbes contrainte-déformation*

L'ensemble de tous ces résultats suscitent un certain nombre de commentaires :

- Les vitesses des ondes ultrasonores ont diminué après les essais de fluage. L'amplitude de cette diminution, tout en restant modérée, est fonction de l'hygrométrie et de l'âge de l'exploitation. Concernant le gypse de Livry Gargan, la diminution maximale des vitesses des ondes ultrasonores est d'environ 8% (essai n°11). Pour le gypse de Grozon, cette diminution maximale est de 4% (essai n°21).

Les modules de Young dynamiques ont également diminué. Cette diminution est de l'ordre de 15% pour le gypse de Livry Gargan (essai n°11) et d'environ 8% pour le gypse de Grozon (essai n°21). Elle est aussi fonction de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation.

- La diminution maximale des modules de Young statiques est importante : 45% pour le gypse de Livry Gargan et jusqu'à 66% pour le gypse de Grozon. Elle est fonction de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation.
- Pour le gypse de Livry Gargan, la porosité de fissure de référence mesurée sur un échantillon témoin d'âges d'exploitation récent et ancien est d'environ $0,5 \cdot 10^{-4}$. Les éprouvettes après l'essai de fluage ont une porosité deux à cinq fois supérieure à la porosité de fissure de référence (essais n°1, 4 et 11).

Pour le gypse de Grozon, la porosité de fissure de référence mesurée sur un échantillon témoin d'âges d'exploitation récent et ancien est de $1,5 \cdot 10^{-4}$. L'éprouvette d'âge récent ayant subi un essai de fluage sous deux hygrométries, 60% puis 90%, (essai n°14) a une porosité de fissure deux fois supérieure à la porosité de référence. La porosité de fissure de l'éprouvette ayant subi un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie de 75% (essai n°XII') est dix fois supérieure à celle de référence. Après un délai de 1 mois avec une hygrométrie proche de 40%, la nouvelle porosité de fissure est à peine 4 fois supérieure à celle de référence. Les autres porosités de fissure mesurées après les essais de fluage sont sensiblement identiques à la porosité de fissure de référence.

- Le module de compressibilité des échantillons témoins diminue suivant l'âge d'exploitation. Dans le cas du gypse de Livry Gargan, ce module après essai de fluage a diminué. Cette diminution semble être fonction de l'hygrométrie. Pour le gypse de Grozon, dans tous les cas le module de compressibilité des échantillons ayant subi des essais de fluage est inférieur au module de compressibilité de l'échantillon témoin.

Toutes ces constatations iraient dans le sens d'un endommagement des échantillons. Cet endommagement serait également fonction de l'hygrométrie et de l'âge d'exploitation mais aussi de l'origine et donc de la nature du gypse. Les diminutions maximales des paramètres physico-mécaniques obtenues avec le gypse de Livry Gargan sont plus importantes que celles qui ont été obtenues avec le gypse de Grozon. Les différences de structures cristallines doivent jouer un rôle majeur.

5.3.3.4- Des essais de fluage triaxiaux : influence de la contrainte

Les conditions expérimentales de ces essais sont précisées en même temps que la présentation des déformations différées (Figures 5.40 à 5.42). Elles permettent de montrer l'influence de la contrainte moyenne et déviatorique sur les déformations différées.

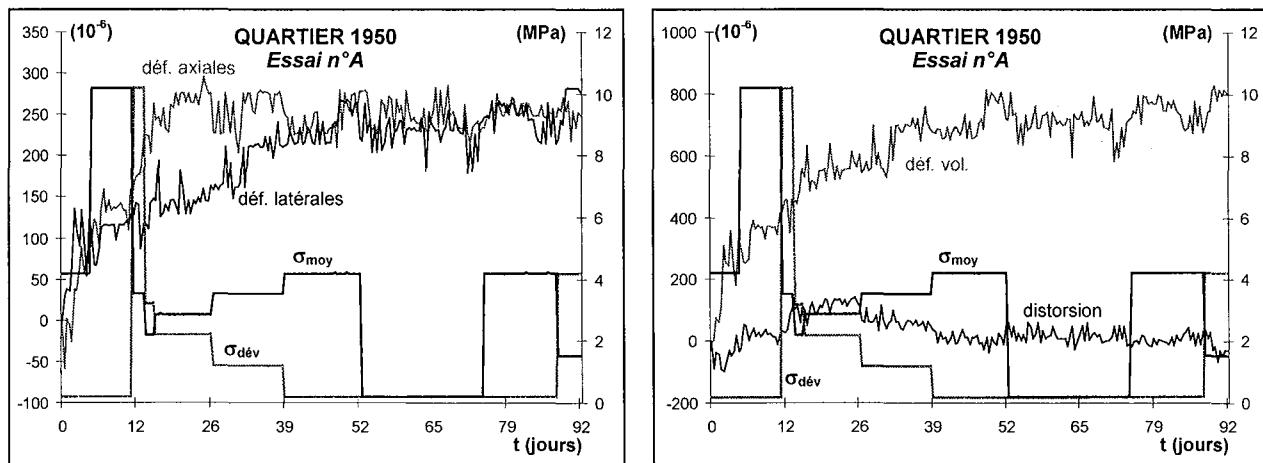


Figure 5.40 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique

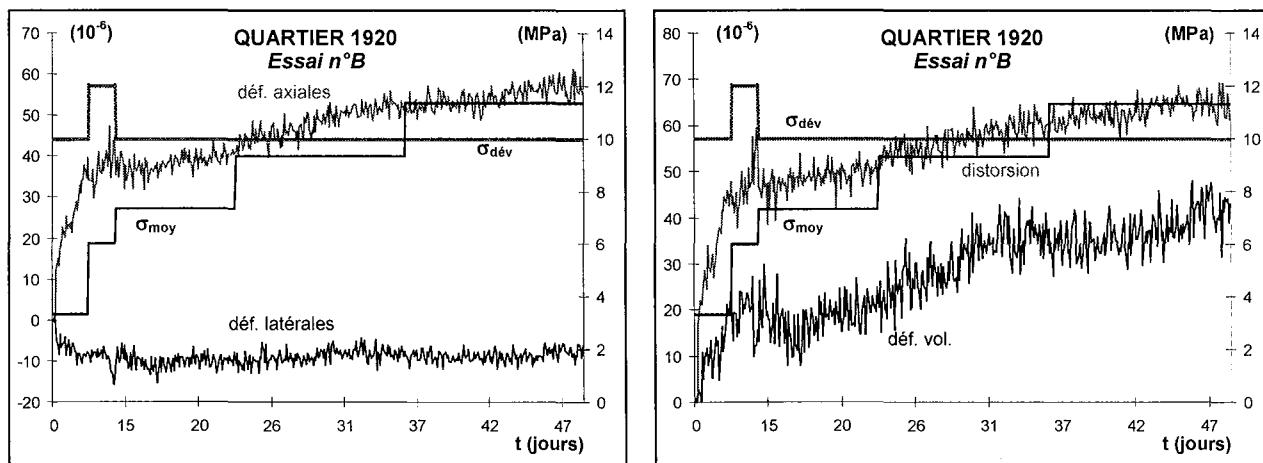


Figure 5.41 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique

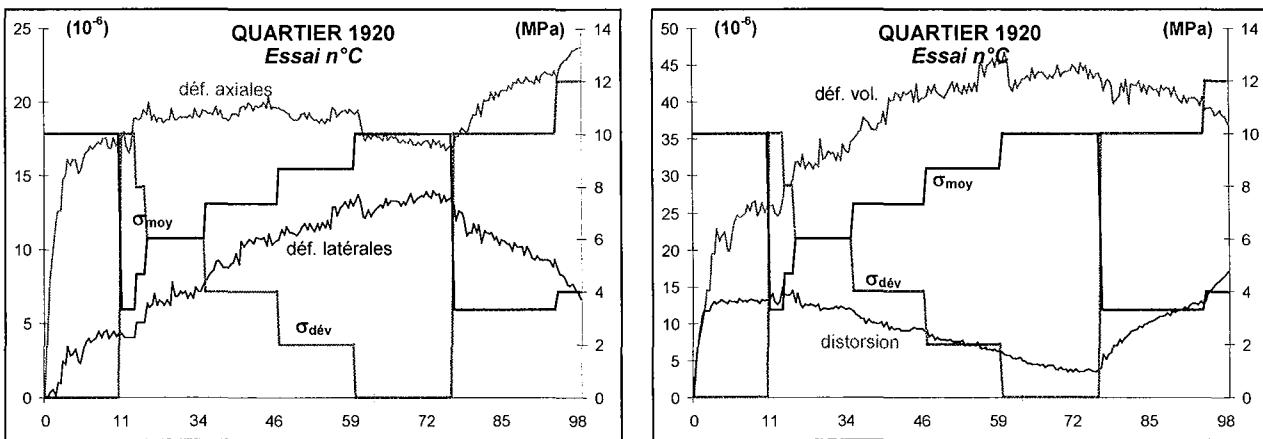


Figure 5.42 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Essai de fluage triaxial – Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique

Les essais de fluage triaxiaux ont permis de mettre en évidence que les déformations différées du gypse sont contrôlées uniquement par la contrainte déviatorique. La contrainte moyenne n'influence pas les vitesses des déformations différées. Il est également important de remarquer que l'hygrométrie n'a pas été contrôlée pendant la durée des essais. Les échantillons ont été mis à l'étuve à 50°C pendant 5 jours avant le début des essais.

5.3.3.5- Des essais de « gonflement » : influence de l'hygrométrie

Le comportement différé des échantillons est étudié en fonction de l'hygrométrie mais sans chargement.

Ces essais ont été réalisés avec éprouvettes instrumentées avec des jauge. Elles sont restées pendant 1 mois à l'étuve à 50°C. Elles ont été disposées dans une enceinte étanche avec une hygrométrie imposée. Les déformations axiales et transversales sont enregistrées en continu toutes les 15 minutes.

Un échantillon de gypse de la carrière de Grozon, d'âge d'exploitation ancien (1920) et un de la carrière de Livry Gargan d'âge d'exploitation 1950 ont été mis dans une atmosphère sous une hygrométrie de 30% puis de 75%. Les déformations axiales et transversales en fonction du temps sont présentées sur les figures 5.43 et 5.44.

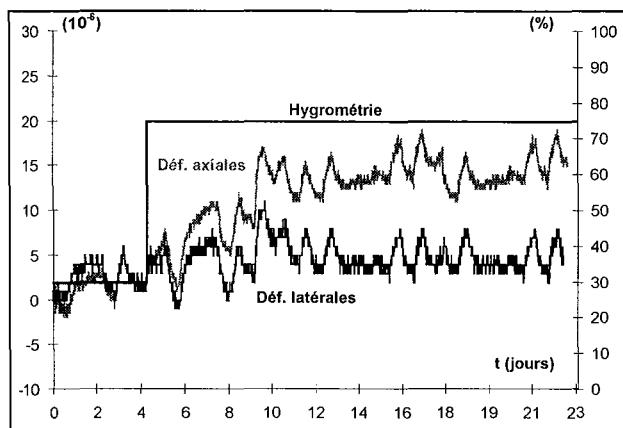


Figure 5.43 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Courbes déformation-temps en fonction de
l'hygrométrie (contrainte nulle)

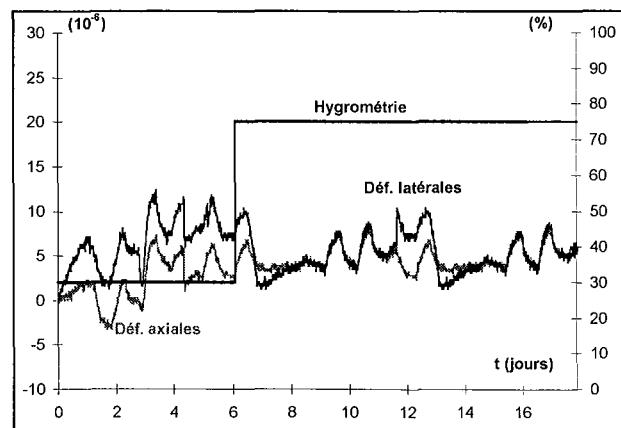


Figure 5.44 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950
Courbes déformation-temps en fonction de
l'hygrométrie (contrainte nulle)

Tout d'abord, les oscillations mesurées correspondent aux variations journalières de la température dans la salle climatisée.

Par la suite, les déformations ne varient pas d'une manière significative après le changement de l'hygrométrie. Ce changement ne semble pas influencer le comportement différé des deux gypses.

Avec ce résultat, nous pouvons admettre que c'est le couplage contrainte déviatorique-hygrométrie qui contrôle le comportement différé des deux gypses. Il faut rester prudent car un palier avec une hygrométrie de 95% n'a pas encore été réalisé.

5.3.3.6- Conclusion

Les différents résultats des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée avec le gypse de Grozon peuvent être comparés et surtout discutés. A l'inverse, les essais avec le gypse de Livry Gargan sont un échec « relatif ». Les résultats sont peu nombreux mais ils semblent aller dans le même sens que ceux obtenus avec le gypse de Grozon.

Avec tous ces résultats, les deux facteurs influençant d'une manière plus ou moins importante le comportement différé des deux gypses sont les suivants :

- L'hygrométrie : elle provoque une « accélération » du processus d'endommagement. Ce processus est d'autant plus important que l'hygrométrie est élevée.
- L'âge d'exploitation : il favorise également le processus d'endommagement.

5.3.4- Interprétation-Discussion

L'interprétation-discussion des différents résultats (essais de fluage monopalier et multipalier sous hygrométrie contrôlée, observations microscopiques post-fluage et caractérisation physico-mécaniques post-fluage) peut se faire selon deux approches :

- pour un âge constant, le paramètre hygrométrie influe sur les résultats des essais ;
- pour une hygrométrie constante, le paramètre âge d'exploitation influe sur les résultats.

5.3.4.1- Influence de l'hygrométrie

Quel que soit l'âge d'exploitation considéré, la vitesse de fluage secondaire augmente avec l'hygrométrie.

Le changement d'hygrométrie (essais multipaliers) permet de montrer que la vitesse de déformation de fluage est fonction de la valeur de l'hygrométrie. En effet, après une augmentation de l'hygrométrie, la vitesse s'accélère brutalement. A l'inverse, après une diminution de l'hygrométrie, la vitesse diminue.

Les hypothèses permettant d'expliquer les variations des vitesses de fluage en fonction de l'hygrométrie sont basées sur des travaux antérieurs. D'après Finot et al. (1997), une faible hygrométrie entre 10 et 30% provoque une migration des molécules d'eau vers la périphérie des cristaux. En effet, une des deux molécules d'eau constitutive du gypse a une énergie de liaison plus faible que l'autre (Mandal et Mandal, 2002), elle est alors considérée comme un anion. La conséquence de cette migration est la formation de lacunes cristallines, site d'éventuelles dislocations (Sipple et al. 2001). Ces lacunes sont susceptibles d'être le lieu de néoprécipitations nanoscopiques d'anhydrite. Ce processus favorise par conséquent une « auto-réparation » de l'endommagement. Proche de 100% d'hygrométrie, une migration de molécules d'eau se fait dans le sens inverse de la précédente. Cette circulation a pour conséquence une dissolution qui peut entraîner la formation de microfissures sur la face (010) et sur les extrémités de la face. Ces différentes observations ont été faites sur la surface d'un cristal de gypse naturel grâce à un microscope à force atomique.

Dans notre cas, une faible hygrométrie ne favorise pas l'endommagement et à l'inverse, une forte hygrométrie accentue le processus d'endommagement. Cette hypothèse est confortée par l'évolution de la dilatance en fonction du temps.

Une augmentation de la microfissuration a été mesurée sur une éprouvette de Grozon ayant subi un essai de fluage avec un changement d'hygrométrie sans relâchement de la contrainte (essai n°14). Néanmoins, la porosité de fissure mesurée après les essais de fluage multipalier reste inchangée à la porosité de fissure des échantillons témoins. D'autres augmentations de la microfissuration ont été mesurées sur des éprouvettes de Livry Gargan. La porosité de fissure est au minimum deux fois plus grande que celle des échantillons témoins.

Pour les deux gypses, ces variations peuvent être expliquées soit par une différence de la porosité initiale des échantillons, soit par une action combinée de la contrainte appliquée pendant l'essai de fluage et de l'hygrométrie. La dispersion des mesures de la porosité de fissure sur les échantillons d'un même âge étant nettement plus faible que cette variation, notre choix va vers la deuxième hypothèse (action combinée de la contrainte appliquée et de l'hygrométrie pendant l'essai de fluage).

Ces mesures de porosité de fissure ne sont pas surprenantes aux vus des hypothèses faites précédemment. En effet, les essais de compression isotrope ont été réalisés au minimum 15 jours après la fin des essais de fluage. Une réorganisation microstructurale des cristaux n'est pas à exclure. Une partie des microfissures peut se cicatriser entre la fin

de l'essai de fluage et le début de l'essai de compression isotrope. Les essais IX à XII illustrent cette hypothèse. Les déformations volumiques dilatantes mesurées lors de ces essais sont relativement importantes et la porosité de fissure (après essai) est restée faible. Le résultat de l'essai de compression isotrope après l'essai de fluage n°XII' semble confirmer cette hypothèse. En effet, l'essai de compression isotrope a été réalisé deux jours après l'arrêt de l'essai de fluage. La porosité de fissure déterminée est 10 fois supérieure aux autres déterminées 15 jours après l'arrêt des essais de fluage (Figure 5.37). Cet essai a été recommandé 1 mois après le premier. Pendant cette période, l'éprouvette avait été laissée dans une atmosphère où l'hygrométrie était proche de 40%. La nouvelle porosité de fissure est 4 fois inférieure à celle mesurée juste après l'arrêt de l'essai de fluage (Figure 5.38). Ce résultat semble donc confirmer l'hypothèse d'une cicatrisation des cristaux de gypse due à un réarrangement microstructural, mécanisme généré par une faible hygrométrie.

Pour le gypse de Grozon, les conséquences de l'hygrométrie sur la vitesse de fluage sont, semble-t-il, d'autant plus importantes que la roche est endommagée. En effet, l'hygrométrie de 30%, avec le niveau de contrainte des essais de fluage, n'induit pratiquement pas d'endommagement. A 60% puis 90% d'hygrométrie, l'endommagement devient sensible. Le changement d'hygrométrie a des conséquences à la fois sur les défauts initiaux et sur ceux de l'endommagement, conduisant ainsi à une augmentation de la vitesse de fluage.

Pour le gypse de Livry Gargan, les conséquences de l'hygrométrie sur la vitesse de fluage et donc sur le degré d'endommagement sont clairement mesurables. Plus l'hygrométrie est élevée, plus la porosité de fissure est importante. Cependant même pour une faible hygrométrie, un endommagement est mesurable.

Il est donc clair que l'action de l'hygrométrie est fonction des structures cristallines des deux gypes (microcristalline pour Grozon et saccharoïde pour Livry Gargan).

La microfissuration qui a pu être mesurée, peut avoir deux origines : la première est qualifiée d'intergranulaire et la seconde d'intragranulaire. Elles ont déjà fait dans le passé l'objet de nombreux travaux (Trepied et al., 1980 ; Joesten 1983 ; Fliervert et White, 1995 ; Llyod et al., 1997).

Pour le premier cas, les joints entre grains peuvent s'agrandir par une dissolution des surfaces cristallines et également par glissement des grains les uns sur les autres.

Une frange de dissolution est l'illustration de la première hypothèse. Le cas extrême comme une attaque de l'ensemble de l'éprouvette illustre également ce processus. Or ces deux observations ont été faites sur deux échantillons (essais n°20 et 21). Ce type d'observation a déjà été décrit sur d'autres matériaux comme l'anhydrite (Dell'Angelo et Olgaard, 1995 ; Heilbronner et Bruhn, 1998) ou bien sur du quartz (Freeman et Ferguson, 1986) suite à des essais de fluage. La deuxième hypothèse est, quant à elle, confortée par des travaux antérieurs. Les forces de contact, entre les surfaces cristallines parallèles à la direction [001] des cristaux de gypse, sont les plus faibles (Finot et al., 2001). Sous l'effet d'une contrainte, c'est donc une direction privilégiée pour une augmentation de l'espace intergranulaire.

Le deuxième cas (origine intragranulaire de la microfissuration) peut également être envisagé. En effet, un débit lamellaire plus important est tout à fait envisageable. Son importance pourrait même aller jusqu'à la diminution de la taille moyenne des cristaux. Cette hypothèse rejette les commentaires faits ultérieurement par rapport aux travaux de Finot et al. (1997) et de Sipple et al.(2001). Une hygrométrie proche de 100% engendre une microfissuration sur la surface cristalline (010) et sur ces extrémités dans la direction

[100]. Cette microfissuration peut entraîner le scindement d'un cristal en plusieurs autres cristaux plus petits suivant le clivage principal (010) et les deux clivages secondaires (100) et (011). Les observations faites au MEB montrent une nette diminution de la taille des cristaux. Il semble donc que la microfissuration soit intergranulaire et aussi intragranulaire.

Les traces de dissolution observées sur les cristaux de gypse après les essais de fluage sont probablement dues à l'action de la vapeur d'eau. Elles existaient certainement avant les essais de fluage. Cependant l'action de la vapeur d'eau (sous de fortes hygrométries) a pu amplifier leur taille. Par conséquent, il n'est pas surprenant d'observer des pores mesurant quelques micromètres.

En plus de la vapeur d'eau, une contrainte est exercée sur les éprouvettes. La combinaison des deux, appelée dissolution sous contrainte, est un mécanisme largement étudié. In situ, il est généralement admis qu'un tel mécanisme a pour conséquence une néoprécipitation de matière dans les zones de plus faible contrainte et une dissolution dans les zones de plus forte contrainte. Gratier et al. (1999) ont montré que des grains de quartz impressionnés étaient le siège d'un mécanisme de dissolution/contrainte. Ils ont également mis en évidence des excroissances de silice sur leur périphérie. D'autres manifestations d'un tel mécanisme comme les stylolites, microlithons et microfibres ont été observées (Gratier, 1984, 1993 ; Gratier et Gamond, 1990 ; Ricken, 1986 ; Renard et al., 2000). Dans notre cas, seules des traces de dissolution ont été observées.

Cependant, dans des cas très précis, un tel mécanisme n'entraîne pas forcément de précipitation. Gratier (1993) a réalisé deux expériences avec un monocristal d'halite. Un piston poinçonne le cristal et l'ensemble est placé dans une cellule avec une saumure qui est plus ou moins saturée. Avec une solution sous-saturée, la trace de dissolution sous le piston est plus importante que celle existante avec une solution saturée. Le rapport entre les deux rayons de la trace de dissolution est de 10. Aucune trace de précipitation n'a été observée même avec une solution saturée. Le même type d'expérience a été réalisé par Martin et al. (1999), aucune cristallisation n'a été observée.

D'une manière générale, pour observer des néoprécipitations, il faut que la solution soit sursaturée dès le début de l'expérience et que celle-ci dure plusieurs mois (Sherwood et Ristic, 2001). Il est également indispensable de faire des observations à une échelle inférieure au micromètre.

Dans notre cas, les observations au MEB des cristaux de gypse n'ont pas révélé d'excroissance. La dissolution n'a probablement pas été suffisamment importante pour obtenir une sursaturation et donc une néoprécipitation de gypse. De plus, l'échelle d'observation a été trop grande pour observer d'éventuelles néoprécipitations.

Le terme de dissolution, quand nous parlons des traces observées sur les surfaces des cristaux de gypse, serait donc principalement dû à une migration moléculaire de l'eau au cœur de la structure. Le moteur de ce déplacement est la valeur de l'hygrométrie. Ces sites peuvent, dans un deuxième temps, être « attaqués » et s'agrandir par dissolution s'ils sont restés suffisamment longtemps dans une forte hygrométrie.

5.3.4.2- Influence de l'âge de l'exploitation

Quelle que soit l'hygrométrie considérée, la vitesse de fluage secondaire augmente avec l'ancienneté de l'exploitation. Cette augmentation est beaucoup plus marquée pour une hygrométrie de 90%.

Les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire ont été calculées lors d'un essai de fluage monopalier sous une hygrométrie égale à 90% avec le gypse de Grozon. La vitesse moyenne de déformation axiale d'un

échantillon « ancien » est 3,5 fois plus rapide que celle d'un échantillon « récent ». Pour la vitesse moyenne de déformation latérale pendant cette même phase, le rapport est de 7. Avec une hygrométrie constante de 60%, les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales d'un échantillon « ancien » sont respectivement 7,5 fois et 1,5 fois plus rapide que celles d'un échantillon « récent ».

Enfin, pour une hygrométrie constante de 30%, la vitesse moyenne de déformation axiale d'un échantillon « ancien » est 7 fois plus rapide que celle d'un échantillon « récent ». Cependant, la vitesse moyenne de déformation latérale est restée constante.

Cette augmentation de vitesse est également observable pendant la phase 3 des essais de fluage multipalier avec du gypse de Grozon (essais n°IX et XII). Les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales d'un échantillon « ancien » sont respectivement 4,5 fois et 10 fois plus rapide que celles d'un échantillon « récent ».

Pour le gypse de Livry Gargan, les quelques résultats disponibles sont difficilement comparables. Les seuls résultats exploitables concernent les essais monopalier (essais n°1, 4 et 7) sous une hygrométrie de 30% : les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales pendant la phase de fluage secondaire sont sensiblement les mêmes.

Pour les essais multipaliers (essais n°I, II V et VI), les vitesses moyennes de déformations axiales et latérales d'un échantillon « ancien » sont également plus élevées que celle d'un échantillon plus récent. Le rapport est de 20 à 25 fois sous une hygrométrie de 75% et de 4 à 15 fois sous une hygrométrie de 95%.

Les hypothèses permettant d'expliquer les variations de vitesses de fluage en fonction de l'âge d'exploitation sont les suivantes :

- Peu de différences texturales et structurales peuvent expliquer totalement les variations de vitesse de fluage. En effet, des échantillons vierges de tous essais présentent quelques cristaux avec un débit lamellaire. Une diminution de la taille des cristaux a été observée pour quelques échantillons provenant des quartiers d'âge d'exploitation ancien.
- L'intensité des traces de dissolution entre des échantillons « récents » et « anciens » prélevés en peau de pilier n'est pas différente. Le vieillissement, au sens strict, ne peut expliquer ces variations de vitesses de fluage.
- Les variations des paramètres physico-mécaniques (cf. chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique ») du gypse provenant de quartiers d'âges d'exploitation différents pourraient expliquer en partie les variations de vitesse de fluage. En effet, une diminution de la résistance en compression simple existe entre des échantillons partiellement saturés provenant d'un quartier d'âge d'exploitation récent et d'un quartier d'âge d'exploitation ancien. Cette diminution de résistance est d'autant plus importante que l'hygrométrie est élevée.

5.4- CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était d'étudier le comportement différé des deux gypses. Ces travaux ont été rendus possibles grâce à une instrumentation spécifique dans la carrière de Grozon et à des essais mécaniques innovants réalisés au laboratoire.

La première partie a été consacrée à l'analyse des mesures de convergence et d'expansion de piliers dans plusieurs quartiers de la carrière de Grozon.

Cette étude a permis de montrer que les vitesses sont concordantes entre elles, qu'elles semblent diminuer avec l'âge de la zone exploitée et que le bord des piliers se déforme plus rapidement que le cœur.

Le calcul d'indice saisonnier de convergence semble montrer que quelle que soit la station considérée, les accélérations et les ralentissements de convergence se produisent à la même époque de l'année. Il faut rester prudent car ce calcul est basé sur un relevé mensuel des mesures de convergence présentant un grand nombre de données manquantes. Toutefois, la reprise de ces mesures semble confirmer ces changements de rythmes de convergence.

Finalement, l'étude du comportement différé des piliers de gypse a permis d'avancer une hypothèse importante : les accélérations et les ralentissements de convergence sont probablement dus aux variations de l'hygrométrie (plus ou moins importantes en fonction de l'aérage) dans la carrière de Grozon. Ces variations sont une conséquence des variations des précipitations et des températures à l'extérieur. Cette hypothèse est lourde de conséquence car elle a dû être vérifier au laboratoire.

La réalisation d'essais de fluage sous hygrométrie contrôlée, ont donc permis d'étudier le comportement différé de deux gypses différents : Livry Gargan et Grozon. Le bon déroulement de ces essais dans des conditions extrêmes (forte hygrométrie et matériau très sensible à celle-ci) n'est pas encore total : le dispositif expérimental et le protocole expérimental peuvent probablement être encore améliorés.

Malgré ces difficultés, le comportement différé a pu être déterminé. Il est fortement influencé par l'hygrométrie et par l'âge d'exploitation des quartiers. L'action de l'humidité de l'air sur les cristaux de gypse des piliers ou bien des échantillons ayant subi un essai de fluage sous hygrométrie contrôlée entraîne leur dégradation. Elle se manifeste par une modification structurale et une « corrosion » des surfaces cristallines.

Pour résumer, le comportement différé est influencé par le couplage hydro-chimico-mécanique mais aussi par la structure cristalline du gypse. Les essais de fluage sous hygrométrie contrôlée réalisés au laboratoire ont permis de confirmer les premières hypothèses développées à partir des mesures de convergences et d'expansion des piliers de la carrière de Grozon.

Enfin, les mécanismes supposés être à l'origine des déformations différées sont :

- Réaction « géochimique » : l'hygrométrie a une influence importante. Quand elle est élevée, des microfissures apparaissent à cause d'une dissolution et d'une migration moléculaire de l'eau. Quand elle est faible, des nanoprecipitations d'anhydrite favorisent l'auto-réparation d'un endommagement.
- Mécanisme mécanique : la structure des cristaux de gypse permet un glissement des chaînes atomiques suivant un axe privilégié [001].

Ces mécanismes dissolution/migration et dislocation ainsi que le comportement dilatant différé du gypse doivent impérativement être pris en compte dans la formulation de la loi de comportement.

CHAPITRE 6

MODELISATION

6.1- INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but de modéliser le comportement instantané mais surtout le comportement différé des deux gypses. En effet, la modélisation du comportement à court terme n'a pas de véritable importance pour plusieurs raisons :

- Aucun phénomène de désordre n'a été relevé à court terme dans les différents quartiers des carrières.
- Les déformations instantanées sont généralement peu importantes, leur prédiction n'a donc pas d'intérêt majeur.
- Le dimensionnement actuel de l'exploitation permet une rentabilité optimale du gisement sans occasionner une instabilité à court et à moyen terme.

L'influence de l'hygrométrie et d'une manière plus générale le couplage hydro-chimico-mécanique ne peut pas être pris en compte dans le comportement instantané. Les réactions hydro-chimiques avec le gypse mais surtout leurs conséquences sur les piliers de gypse se font ressentir après plusieurs décennies.

Nous avons vu à partir des essais précédents dans le chapitre « Vieillissement et caractérisation physico-mécanique » que le comportement à court terme est plutôt élastique avec une phase plastique relativement réduite.

Une loi de comportement instantané simple peut être appliquée selon l'approche du critère de Mohr-Coulomb. Ce choix sera rapidement justifié. L'ordre de grandeur des contraintes dans les piliers sera présenté et comparé avec celui déterminé par l'INERIS et celui appliqué lors des essais de fluage.

La caractérisation du comportement différé et les mécanismes de déformation mis en jeu ont été présentés dans le chapitre précédent. Le rôle important de l'hygrométrie a été montré, un fluage primaire et un fluage secondaire ont pu être identifiés, de ce fait les lois de Lemaître et de Norton seront utilisées. Après la justification du choix de ces lois, les mécanismes de déformation et leur importance seront rappelés. Les objectifs du modèle, l'écriture de la loi de comportement différé précéderont le calcul des paramètres et les simulations des essais de fluage.

6.2- MODELISATION DU COMPORTEMENT INSTANTANE

6.2.1- Rappels

Le comportement instantané et quelques caractéristiques mécaniques du gypse sont rappelés. Ils sont indépendants de l'âge d'exploitation et du vieillissement des échantillons. Les différentes remarques qui suivent permettent de justifier une modélisation de ce comportement suivant le critère de Mohr-Coulomb :

- Les déformations plastiques avant le pic sont assez faibles.
- La dilatance n'est pas toujours très bien identifiée : le matériau a un comportement d'abord contractant et dans certains cas peu avant la rupture, il devient dilatant.
- Le seuil de dilatance est proche du pic.
- La rupture, quasi-ductile lors d'un essai de compression uniaxiale, devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement.
- Le comportement mécanique instantané reste élasto-plastique.

Differentes courbes contrainte-déformation issues d'essais de compression uniaxiale et triaxiale illustrent ces précédents propos (Figures 6.1 et 6.2).

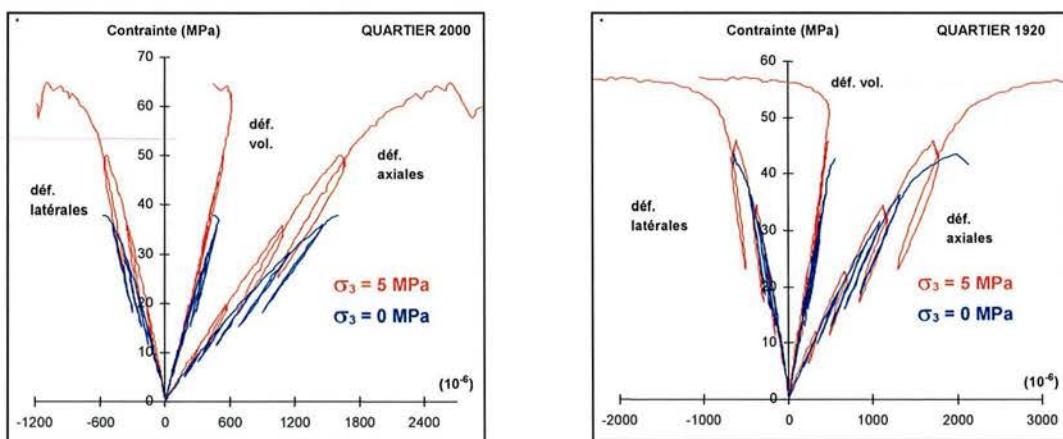


Figure 6.1 - Grozon – Ages d'exploitation 2000 et 1920
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et triaxiale

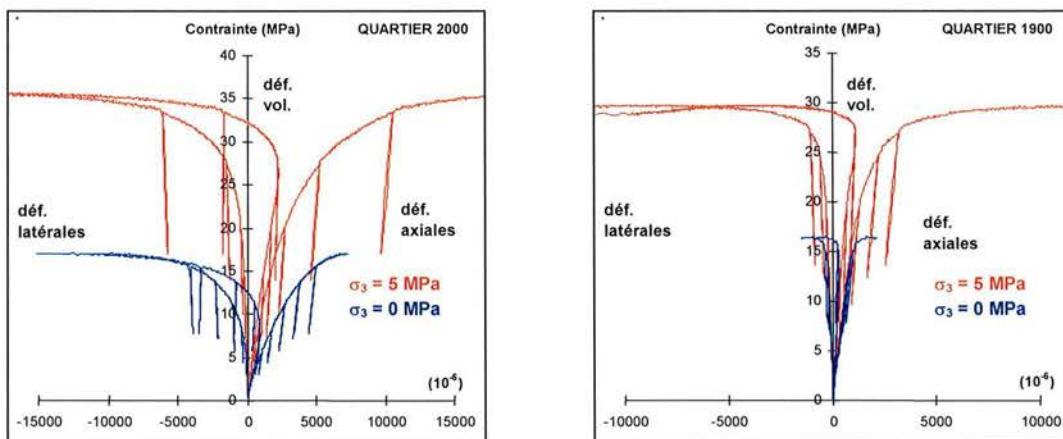


Figure 6.2 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 2000 et 1900
Exemple de courbes contrainte-déformation d'un essai de compression uniaxiale et triaxiale

6.2.2- La modélisation

Objectif et choix du modèle :

L'objectif est de modéliser d'une manière simple le comportement mécanique instantané des gypses de Grozon et de Livry Gargan.

Dans le plan $(p'-q')$ où $p' = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ et $q' = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$, le critère de Mohr-Coulomb s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \sin\varphi + c \cdot \cos\varphi = 0 \quad (6.1)$$

avec

φ : angle de frottement ($^{\circ}$)

c : cohésion (MPa)

A partir des essais de compression uniaxiale et triaxiale, les résistances au pic mais également le seuil de dilatance et la limite élastique s'alignent raisonnablement bien sur une droite dans le plan des contraintes $(p'-q')$ (Figures 6.3 et 6.4). La modélisation sous comportement élastique ou élasto-plastique suivant le critère de Mohr-Coulomb semble donc justifiée.

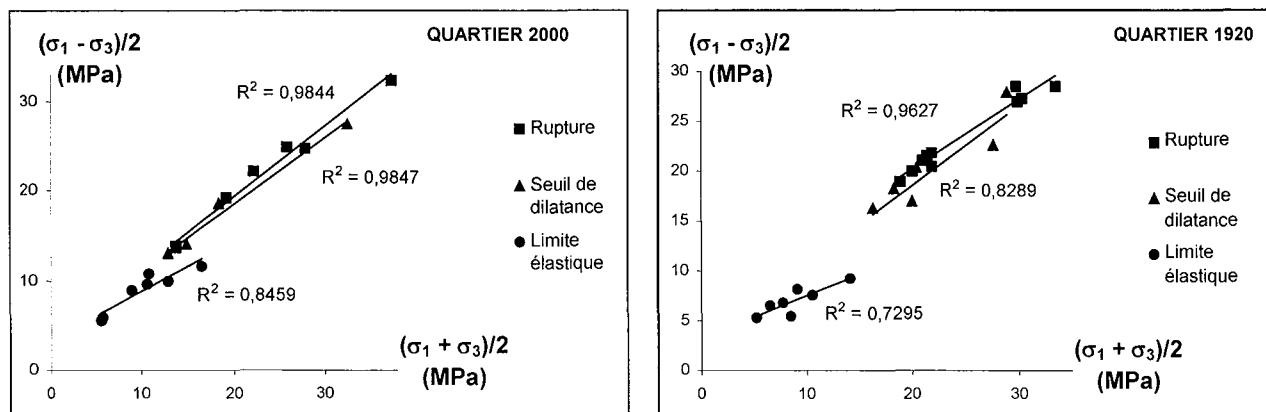


Figure 6.3 - Grozon – Ages d'exploitation 2000 et 1920
Rupture, seuil de dilatance et limite élastique dans le plan $(p'-q')$

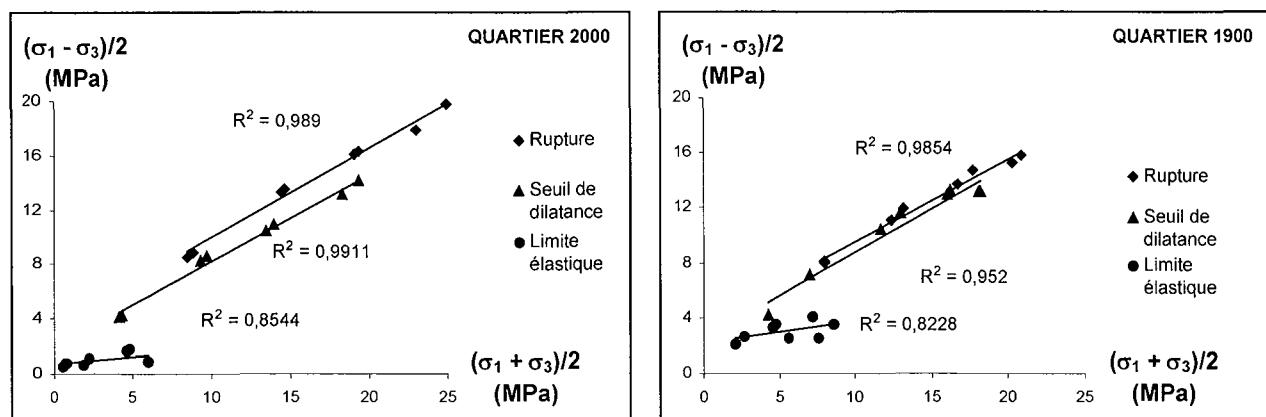


Figure 6.4 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 2000 et 1900
Rupture, seuil de dilatance et limite élastique dans le plan $(p'-q')$

Les paramètres angle de frottement et cohésion ont été déterminés. La comparaison en fonction de l'âge d'exploitation ne peut être faite que pour le gypse de Grozon. En effet, les prélèvements ont été effectués au même niveau stratigraphique dans les différentes stations. A l'inverse, les prélèvements de gypse de Livry Gargan n'ont pas été faits à la même hauteur. Des différences lithologiques peuvent générer des variations qui n'ont donc plus rien à voir avec le vieillissement.

Pour Grozon, l'angle de frottement augmente avec le vieillissement du gypse. La cohésion ne présente pas de variation importante entre les différents âges d'exploitation (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 - Variations de l'angle de frottement et de la cohésion en fonction de l'âge d'exploitation (critère de rupture de Mohr-Coulomb)

	GROZON			LIVRY GARGAN		
Age d'exploitation	1920	1970	2000	1900	1950	2000
Angle de frottement [($\sigma_1 + \sigma_3$)/2 ; ($\sigma_1 - \sigma_3$)/2] (φ , °)	49	45,5	43	40	41	47
Cohésion [($\sigma_1 + \sigma_3$)/2 ; ($\sigma_1 - \sigma_3$)/2] (c, MPa)	8	8	9	3	4	3

Il est également intéressant d'observer les variabilités de l'angle de frottement et de la cohésion pour les différents critères retenus (Figures 6.5 et 6.6).

Dans le cas du gypse de Grozon provenant d'un quartier d'âge d'exploitation récent, l'angle de frottement et la cohésion augmentent d'une manière importante entre la limite élastique et la rupture. Pour un quartier d'âge d'exploitation ancien, l'angle de frottement et la cohésion semblent également augmenter.

Avec le gypse de Livry Gargan et quel que soit l'âge d'exploitation, l'angle de frottement et la cohésion augmentent entre la limite élastique et la rupture.

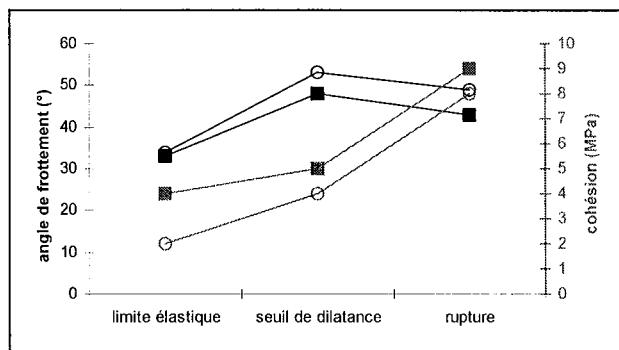


Figure 6.5 - Grozon – Variations de l'angle de frottement et de la cohésion entre la limite élastique et la rupture
(carrés : quartier récent 2000 ; ronds : quartier ancien 1920)

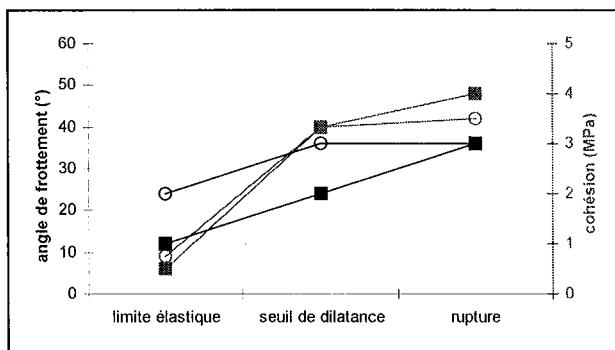


Figure 6.6 - Livry Gargan – Variations de l'angle de frottement et de la cohésion entre la limite élastique et la rupture
(carrés : quartier récent 2000 ; ronds : quartier ancien 1900)

L'angle de la dilatance limite correspond à la pente des parties linéaires des courbes déformations volumiques plastiques en fonction de la distorsion plastique (Figures 6.7 et 6.8). Seuls les essais de compression uniaxiale et triaxiale présentant des déformations volumiques dilatantes ont été retenus.

Pour le gypse de Grozon, les valeurs de l'angle de la dilatance limite pour chaque âge d'exploitation sont dispersées. Nous pourrons retenir la valeur de 1,40 comme valeur moyenne.

Pour le gypse de Livry Gargan, les valeurs de l'angle de la dilatance limite pour chaque âge d'exploitation sont peu dispersées. Nous pourrons retenir la valeur de 0,75 comme valeur moyenne.

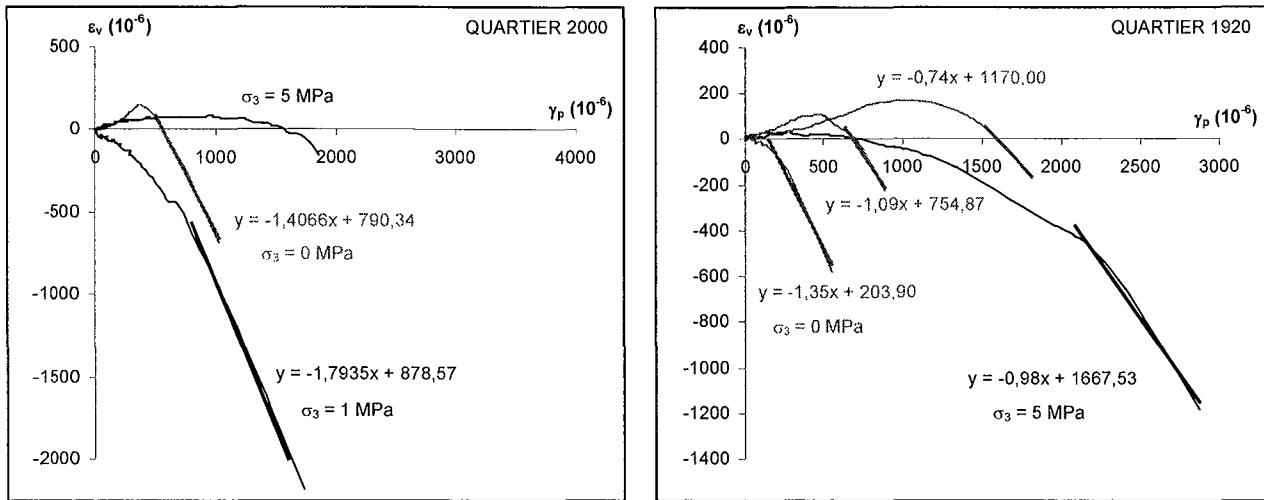


Figure 6.7 - Grozon– Ages d'exploitation 2000 et 1920
Déformations volumiques plastiques en fonction de la distorsion plastique

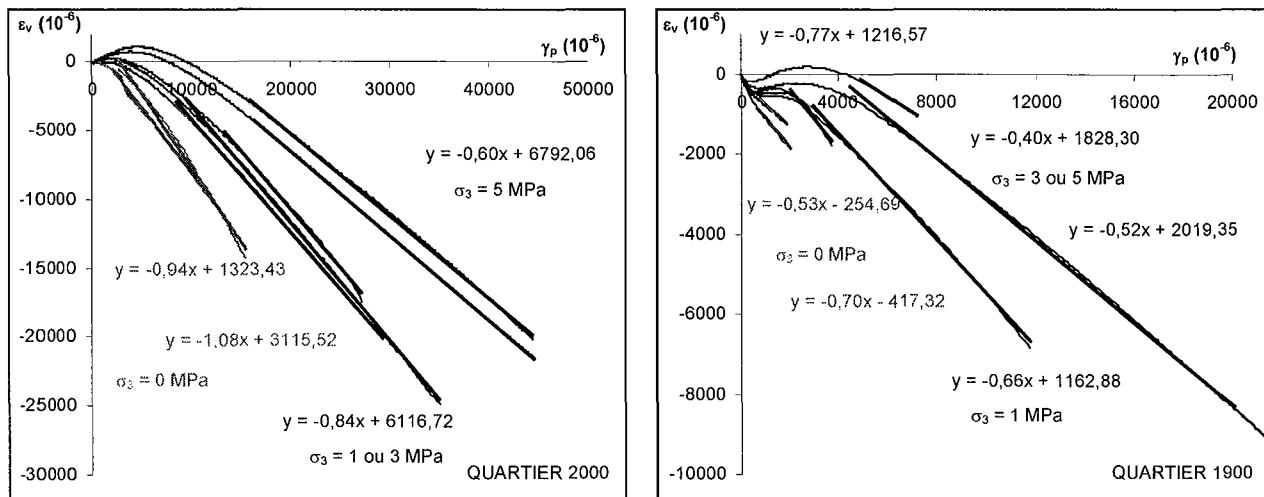


Figure 6.8 - Livry Gargan– Ages d'exploitation 2000 et 1900
Déformations volumiques plastiques en fonction de la distorsion plastique

La géométrie et les conditions aux limites :

La modélisation du comportement instantané a permis d'estimer les contraintes dans un pilier avec une configuration d'exploitation généraliste largement inspirée du schéma d'exploitation de la carrière de Grozon (Le Bihan, 2003). Elle n'a pas pour ambition de représenter un quartier précis de l'exploitation car la géométrie de cette dernière a été modifiée durant les décennies.

La configuration choisie (Figure 6.9) est un modèle bidimensionnel sous l'hypothèse des déformations planes, justifié par la longueur des piliers plus importante par rapport à leur largeur. Cette configuration correspond à l'exploitation de deux niveaux de gypse :

- le niveau supérieur (Gypse 1) présentant un demi-pilier et une demi-chambre de 3 mètres de large ;
- le niveau inférieur (Gypse 3) avec un demi-pilier de 3,5 mètres et une demi-chambre de 2,5 mètres.

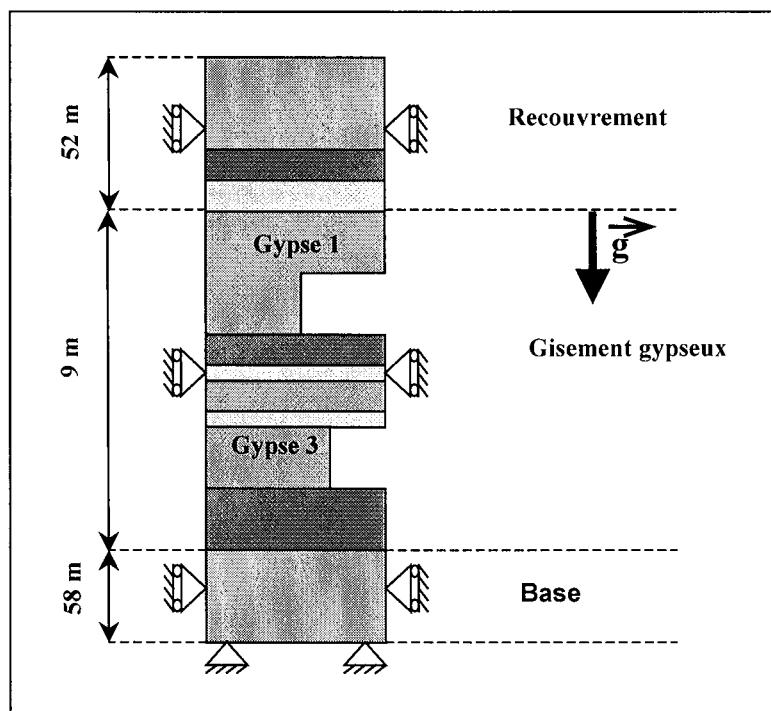


Figure 6.9 - Géométrie et conditions limites du modèle général utilisé pour les simulations

Les conditions limites imposées « à droite » et « à gauche » du modèle correspondent à des axes de symétrie et donc à des déplacements horizontaux imposés nuls. Afin de minorer l'effet des conditions limites (autres que les conditions limites de symétrie) sur la répartition des contraintes dans la zone exploitée, la base du modèle a été fixée à une profondeur de 60 m sous la galerie de couche 3. Le recouvrement est également représenté, jusqu'à la surface, 52 m au-dessus de la galerie de couche 1. Les déplacements ont été bloqués en limite inférieure du modèle, ils ont été laissés libres en limite supérieure.

Initialisation de l'état de contrainte :

Le chargement en tout point est dû uniquement au poids des terrains surincombants. La contrainte verticale initiale vaut :

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h \quad (6.2)$$

avec

ρ : masse volumique

g : accélération de la pesanteur

h : profondeur

La contrainte horizontale initiale est égale à $\sigma_h = k \cdot \sigma_v$ avec k pris égal à 0,7 conformément aux modélisations réalisées par Tritsch et Dejean (1976) et Raffoux (1978), ce qui correspondrait à un cas défavorable.

Lors de la phase d'excavation, le taux de défruitement 2D passe de 0 % à $\tau_{2D} = 50\%$ en couche 1 et $\tau_{2D} = 42\%$ en couche 3. En réalité, les piliers n'étant pas infinis dans la direction perpendiculaire au plan de modélisation, le taux de défruitement 3D doit rendre compte de la géométrie. Le taux de défruitement 3D en couche 1 est alors de $\tau_{3D} = 62,5\%$ et en couche 3 de $\tau_{3D} = 54\%$ (Figure 6.10).

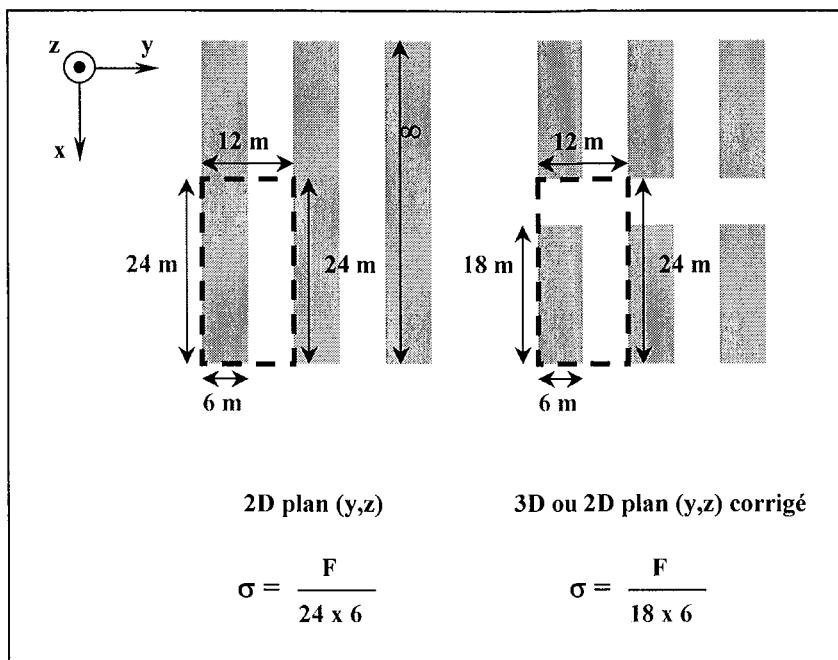


Figure 6.10 - Géométries de la couche 1 et contraintes initiales à envisager selon la dimension et le plan de modélisation choisis

Paramètres retenus :

Pour les modélisations sous comportement élastique ou élastoplastique, suivant le critère de Mohr-Coulomb, les valeurs retenues pour les différents paramètres sont présentées dans le tableau 6.2. Ces valeurs sont une compilation de mesures ou de calculs effectués dans le cadre de cette thèse, de mesures réalisées par Tritsch et Dejean (1976) commandées au CERCHAR (Centre d'Etudes et Recherches des CHARbonnages de France) par les Plâtrières Modernes de Grozon et d'estimations discutables.

Tableau 6.2 - Paramètres retenus dans le cadre des modélisations suivant le critère de Mohr-Coulomb
 (E, module de Young ; v, coefficient de Poisson ; ρ_d , masse volumique sèche ; R_c , résistance en compression uniaxiale ; R_t , résistance en traction indirecte ; c, cohésion ; φ , angle de frottement interne ; K, module de compressibilité ; G, module de cisaillement) ; ^(T) : paramètres déterminés dans le cadre de cette thèse ; ^(D) : Tritsch et Dejean (1976) ; ^(E) : estimation discutable

	E (MPa)	v	ρ_d (g.cm ⁻³)	R_c (MPa)	R_t (MPa)	c (MPa)	φ (°)	K (MPa)	G (MPa)
DOLOMIE	60 000 ^(T)	0,32 ^(T)	2,40 ^(T)	60 ^(T)	7 ^(T)	12 ^(T)	44 ^(T)	55 500 ^(T)	22 700 ^(T)
GYPSE	37 000 ^(T)	0,34 ^(T)	2,30 ^(T)	40 ^(T)	5 ^(T)	8 ^(T)	44 ^(T)	38 500 ^(T)	13 800 ^(T)
MARNE	7 000 ^(T)	0,40 ^(T)	2,60 ^(T)	5 ^(D)	0,5 ^(D)	0,8 ^(T)	55 ^(T)	11 600 ^(T)	2 500 ^(T)
RECOUVREMENT	7 000 ^(E)	0,15 ^(E)	2,50 ^(E)	30 ^(E)	2,5 ^(E)	5 ^(T)	49 ^(T)	3 300 ^(T)	3 000 ^(T)

Les modules de compressibilité et de cisaillement ont été calculés d'après les formules suivantes :

$$K = \frac{E}{3.(1-2v)} \quad (6.3)$$

$$G = \frac{E}{2.(1+v)} \quad (6.4)$$

avec

E (MPa) : module de Young

v : coefficient de Poisson

Estimation des contraintes verticales et horizontales :

Seules les estimations des contraintes verticales et horizontales au niveau de la couche Gypse 1 ont été calculées. En effet, c'est le gypse de ce niveau qui est étudié.

Des calculs ont été réalisés sous THYME++ avec le modèle élastique. Les localisations des profils de contraintes dans un pilier situé dans la couche de gypse 1 sont matérialisées sur la figure 6.11. Le profil B1 passe par le milieu du pilier et à sa base, dans le prolongement de l'intercalaire. Le profil M1 passe également au cœur du pilier mais à 1 mètre de hauteur. Le profil P1 se situe en peau de pilier (du mur au toit de la galerie). Les profils des contraintes sont sur les figures 6.12 et 6.13.

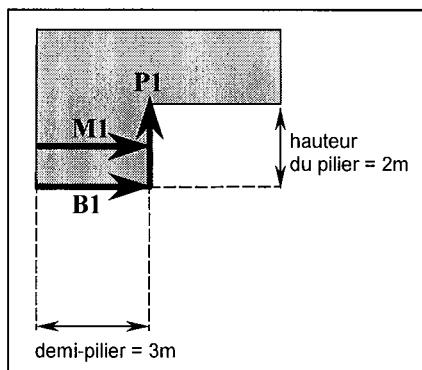


Figure 6.11 - Localisation des trois profils sur lesquels ont été calculées les contraintes verticales et horizontales

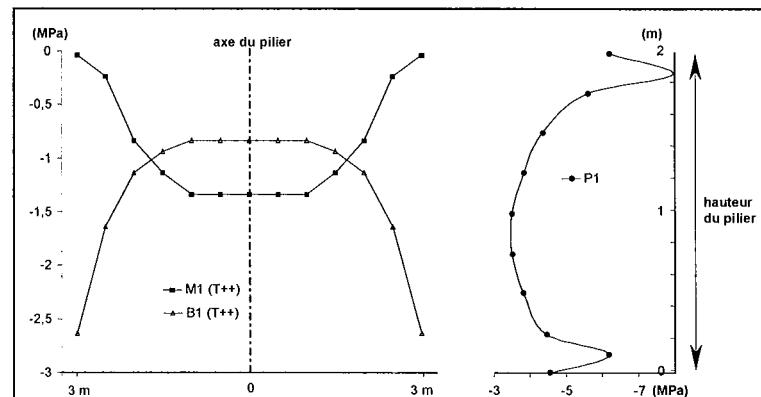


Figure 6.12 - Evolution de la contrainte verticale dans un pilier le long des trois profils B1, M1 et P1

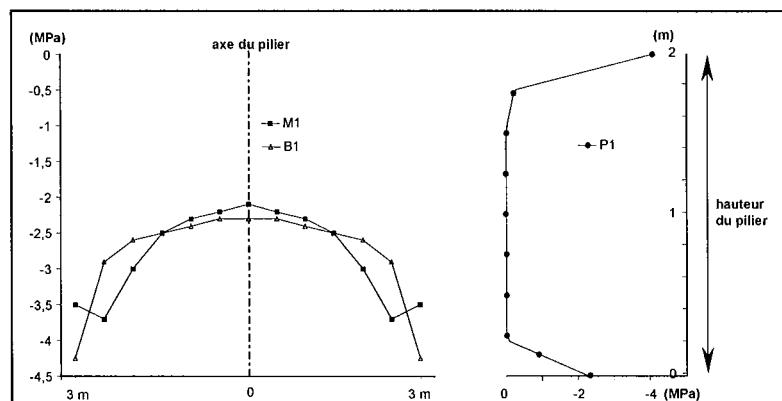


Figure 6.13 - Evolution de la contrainte horizontale dans un pilier le long des trois profils B1, M1 et P1

Cette estimation des contraintes dans un pilier-type correspond à celle qui avait été calculée par l'INERIS (Trébucq, 2002). En effet, la contrainte verticale était comprise entre - 3 et - 6 MPa alors que la contrainte horizontale était comprise entre - 0,9 et – 0,1 MPa. Les différents ordres de grandeur de ces contraintes sont cohérents avec ceux qui ont été appliqués pendant les essais de fluage avec le gypse de Grozon.

Dans la suite de ce chapitre, la modélisation du comportement différé est développée et plus particulièrement les fluages primaires et secondaires influencés par l'hygrométrie.

6.3- MODELISATION DU COMPORTEMENT DIFFERE

Cette deuxième partie est consacrée à la modélisation du comportement différé du gypse de la carrière de Grozon. Seuls les essais avec des échantillons d'âge d'exploitation 1920 seront pris en compte. En effet, aucun essai multipalier n'a été effectué avec des échantillons d'âge 1970. Un seul essai multipalier avec un échantillon d'âge 2000 a été réalisé. La modélisation du comportement différé de ce dernier est en annexe 6.1. La modélisation du comportement différé déterminé à partir de quatre échantillons de gypse provenant de Livry Gargan est présentée en annexe 6.2.

Afin de retrouver facilement les conditions expérimentales de tous les essais, leur identification est identique à celle qui est utilisée dans le chapitre « Comportement différé ».

Ce paragraphe s'articule autour de deux points :

- Le premier point décrit les théories de l'écrouissage par la déformation ou encore Stain-Hardening et par le temps appelées aussi Time-Hardening. A partir des mécanismes de déformation différée (chapitre « Comportement différé ») qui sont rappelés, le modèle adopté pour le comportement différé du gypse est présenté.
- Le second s'attache au développement du modèle, aux calculs des différents paramètres et à la simulation de quelques essais.

6.3.1- Modèles de fluage

Les déformations différées ou bien de fluage dans notre cas, sont décrites soit par la théorie Strain-Hardening (la vitesse de fluage dépend de la déformation de fluage), soit par la théorie Time-Hardening (la vitesse de fluage dépend explicitement du temps). Les lois de fluage basées sur le temps simulent moins bien les résultats expérimentaux. « Le temps n'influence pas les causes de contrainte ou de déformation et ne peut donc pas constituer une variable thermodynamique indépendante ; on doit ainsi éviter la dépendance explicite du temps dans les lois de fluage » Haupt, 1991.

La théorie du Strain-Hardening simule correctement les résultats expérimentaux : ils sont mathématiquement préférables dans le sens où la variable temps n'apparaît pas explicitement dans la fonction vitesse de déformation (Rabotnov, 1969). D'un point de vue micromécanique, avec cette théorie l'état du matériau n'est décrit que par sa structure interne ; ce qui veut dire que le matériau ne se « rappelle » que de sa structure interne et non pas du temps ou des contraintes. L'histoire de la déformation étant conservée dans cette structure interne, la déformation viscoplastique peut constituer une approximation raisonnable bien qu'elle ne soit pas simplement reliée à la structure (Chan, 1992 ; Moustachi, 1995).

Plusieurs lois de fluage plus ou moins élaborées ont ainsi vu le jour. Nous pouvons citer par exemple :

- La Loi de Vyalov, couramment appliquée aux sols gelés ;
- La Loi de Rabotnov, basée sur le Strain-Hardening et pour laquelle la déformation de fluage ne constitue pas la seule mesure de l'écrouissage ; d'autres mécanismes peuvent y intervenir ;
- La Loi d'Eckard, écrite à partir d'essais sur les sols gelés ;

Nous pouvons également retenir la Loi de Lemaître qui exprime le fluage à partir de la théorie du Strain-Hardening et qui est basée sur des essais de fluage, d'écrouissage et de relaxation (Lemaître et Chaboche , 1985) :

$$\dot{\gamma}_{vp} = \left(\frac{q}{K} \right)^N \cdot \gamma_{vp}^{-\frac{N}{M}} \quad (6.5)$$

avec

γ_{vp} : distorsion viscoplastique

N : exposant de viscosité

M : exposant d'écrouissage

K : coefficient de résistance

q : déviateur de contraintes

La phase de fluage secondaire ou bien stationnaire peut être représentée par la loi d'évolution pour l'exposant N qui varie entre N_0 pour une faible contrainte et l'infini pour une contrainte infinie. Cette augmentation de N correspond bien aux observations expérimentales.

La loi dite de Norton-Hoff (1929) est plus classiquement utilisée pour simuler les résultats expérimentaux :

$$\dot{\gamma}_{vp} = B(T) \cdot q^\alpha \quad (6.6)$$

avec

B(T) : fonction dépendante de la température

q : déviateur des contraintes

α : constante ayant la possibilité de varier suivant le mécanisme de déformation supposé

Les phénomènes de viscosité qui interviennent dans les cristaux et aux joints de ces derniers peuvent être plus ou moins influencés par la température. Cette influence est fonction tout d'abord de la valeur propre de la température mais aussi du matériau considéré. Le terme B(T) de l'équation (6.6) s'écrit de la manière suivante :

$$B = B_0 e^{-\frac{\Delta G_0}{RT}} \quad (6.7)$$

avec

B_0 : facteur préexponentiel

ΔG_0 : énergie d'activation ($J \cdot mol^{-1}$)

R : constante universelle des gaz parfaits ($8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)

T : température absolue (K)

Dusseault et Fordham (1993) ainsi que Cristescu et Hunsche (1997) ont recensé les plages de variation du paramètre α de la loi de Norton-Hoff (équation 6.6) en fonction des mécanismes de déformation supposés mis en jeu (Tableau 6.3).

Tableau 6.3 - Relation entre les mécanismes potentiels de fluage et le paramètre α de la loi de Norton-Hoff (d'après Boidy, 2002) ; () Dusseault et Forham, 1993 ; (#) Cristescu et Hunsche, 1997*

MECANISME	DESCRIPTION	VALEUR DE α
dislocation	Défaut plan ou linéique déformant la structure cristalline	3 à 6 (*) 5 à 9 (#)
diffusion	Migration de lacunes ou d'atomes libres sous chargement thermique	1 à 2 (*), (#)
glissement	Déformation au contact des grains (cisaillement)	2,3 à 4,7 (*), (#)

Enfin, avec une contrainte suffisamment élevée, une phase de fluage accéléré appelée fluage tertiaire peut apparaître. Cette dernière étape est caractérisée par une augmentation rapide de la vitesse du fluage conduisant, à plus ou moins long terme, à la ruine du matériau. Cette phase de fluage a été très peu étudiée et il n'existe pas de loi explicite.

A partir des résultats présentés dans le chapitre précédent « Comportement différé », le modèle qui sera adopté dans le paragraphe suivant devra tenir compte de plusieurs mécanismes de déformation différée et de caractères particuliers. Deux grands mécanismes de déformation ont été proposés afin de comprendre le comportement différé du gypse : le premier obéit à des réactions dissolution/migration et le second prend en compte les phénomènes micromécaniques.

- Mécanisme hydrique ou action de l'hygrométrie : elle a une influence importante sur le comportement différé. Avec des valeurs élevées, des microfissures et des lacunes apparaissent. A l'inverse, avec des valeurs faibles, des nanoprecipitations d'anhydrite peuvent favoriser l'auto-réparation d'un éventuel endommagement.
- Mécanisme mécanique ou dislocation : la structure particulière des cristaux de gypse (chapitre « Données bibliographiques sur le gypse ») permet un glissement des chaînes atomiques suivant un axe privilégié [001].

En plus de ces mécanismes dissolution/migration et dislocation, le comportement dilatant du gypse ne doit pas être écarté dans la formulation de la loi de comportement.

La suite de ce chapitre est consacrée au développement du modèle de comportement différé du gypse. Cette modélisation s'appuie sur deux lois déjà énoncées ; la loi de Lemaitre et celle de Norton-Hoff.

- Le modèle de Lemaitre peut efficacement être utilisé pour la modélisation du fluage primaire. Cependant, il est insuffisant pour décrire le fluage secondaire. En effet, les prédictions à long terme de ce modèle sous-estiment les déformations puisque la vitesse des déformations tend vers zéro. En utilisant ce modèle, la modélisation de la vie des ouvrages souterrains conduira généralement à une sous-estimation des déformations différées.
- Le modèle de Norton ne considère que le fluage secondaire en supposant que l'impact du fluage primaire est limité.

Par conséquent, les deux modèles sont complémentaires et il est donc intéressant de pouvoir les utiliser simultanément.

Du point de vue de la loi de comportement, le modèle de Norton ne dépend pas de variables internes, tandis que le modèle de Lemaitre prédit un écrouissage positif qui se porte uniquement sur le facteur multiplicateur. Les deux modèles peuvent s'écrire sous la forme :

$$\dot{\gamma} = B(\gamma) \cdot q^\alpha \quad (6.8)$$

Dans le cas du modèle de Norton, B est une constante. Cependant l'écriture sous cette forme masque une différence importante : la puissance α est différente pour les deux modèles.

Il est donc clair que toute tentative d'unification de l'écriture des deux modèles ne peut pas se limiter à une écriture de la fonction $B(\gamma)$. La manière dont se fait le passage d'une puissance à une autre devra être décrite.

6.3.2- Comportement différé du gypse

6.3.2.1- Développement du modèle

Unification des lois de Lemaitre et de Norton : modélisation du fluage primaire et secondaire :

Notre approche consiste à définir les domaines de la validité de chacun des deux modèles. Si nous partons du fluage secondaire (plus simple à modéliser), nous pouvons écrire la vitesse des déformations différencées de la manière suivante :

$$\dot{\gamma} = B \cdot q^m \cdot f(q, \gamma) \quad (6.9)$$

L'objectif est de trouver une expression de la fonction $f(q, \gamma)$ de façon à ce qu'on puisse passer d'un modèle à l'autre. L'existence d'une valeur critique de la distorsion γ_c , pour laquelle le fluage secondaire a lieu peut être postulée. En deçà de cette valeur critique, le matériau se trouve dans la phase d'un fluage primaire. La définition de la fonction $f(q, \gamma)$ devient alors :

$$f(q, \gamma) = \begin{cases} k \cdot q^{\frac{n-m}{b}} \cdot \gamma^{-\frac{b}{n-m}} & \text{si } \gamma < \gamma_c \\ 1 & \text{si } \gamma \geq \gamma_c \end{cases} \quad (6.10)$$

La distorsion critique ne peut pas être arbitraire et la vitesse de la distorsion doit être continue pendant le passage fluage primaire-fluage secondaire. Ces deux exigences permettent d'accepter l'expression de la distorsion critique suivante :

$$\gamma_c(q) = k^{\frac{1}{b}} \cdot q^{\frac{n-m}{b}} \quad (6.11)$$

Dans toutes les expressions (6.9 à 6.11) :

- n est la puissance de la contrainte dans la loi de Lemaitre ;
- m est la puissance de la contrainte dans la loi de Norton.

Dans l'expression (6.11), comme le paramètre b est un scalaire positif, la valeur critique de la distorsion augmente avec la contrainte uniquement si la puissance de la contrainte

de Lemaitre (n) est plus grande que celle de Norton (m). Dans le cas contraire, la valeur critique de la distorsion diminue.

Finalement les équations 6.9 à 6.11 permettent de décrire l'évolution de la distorsion différée (en fonction du temps) en unifiant l'écriture du modèle de Lemaitre et de Norton.

Déformations volumiques et dilatance :

Les équations 6.8 à 6.10 ne sont pas suffisantes pour décrire les déformations différées observées sur les gypses étudiés pendant les essais de laboratoire.

Ces modèles, hérités de travaux sur les métaux, considèrent que le fluage se fait à déformation volumique nulle. Nous avons déjà souligné dans le chapitre précédent « Comportement différé du gypse » une évolution de la dilatance en fonction des déformations différées.

Il est important de noter que, dans la plage des contraintes testées, les déformations volumiques sont contractantes pour des faibles distorsions et deviennent dilatantes lorsque la distorsion augmente.

Les figures 6.14 et 6.15 montrent l'évolution des déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée pendant un essai de fluage avec plusieurs paliers de contrainte et à hygrométrie constante (essai de fluage n°XII). Nous constatons une évolution initiale de l'angle de la dilatance qui est fonction de la déformation (Figure 6.15). Par la suite, l'angle de la dilatance ne varie pratiquement pas malgré le changement de contrainte et l'augmentation des déformations (Figure 6.14).

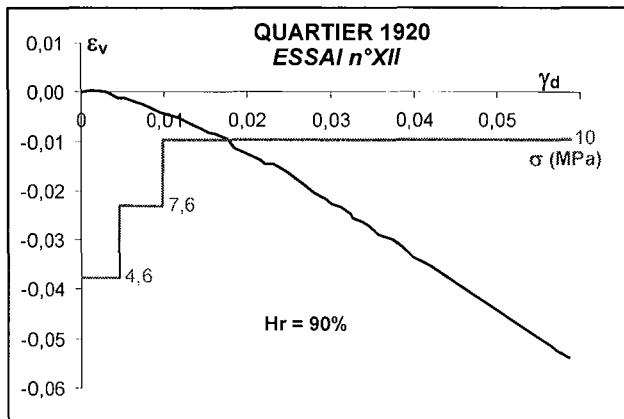


Figure 6.14 - Essai n°XII – Déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée

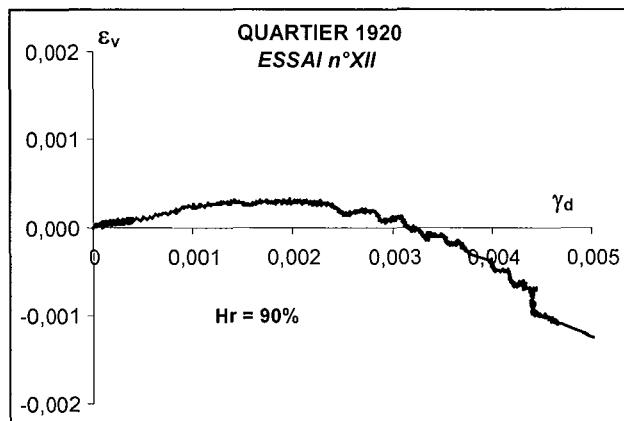


Figure 6.15 - Essai n°XII – Agrandissement de la partie initiale déformation volumique différée-distorsion différée

La figure 6.16 montre également l'évolution des déformations volumiques en fonction de la distorsion différée pendant un essai de fluage avec plusieurs paliers de contrainte et à hygrométrie constante (essai de fluage n°XIII').

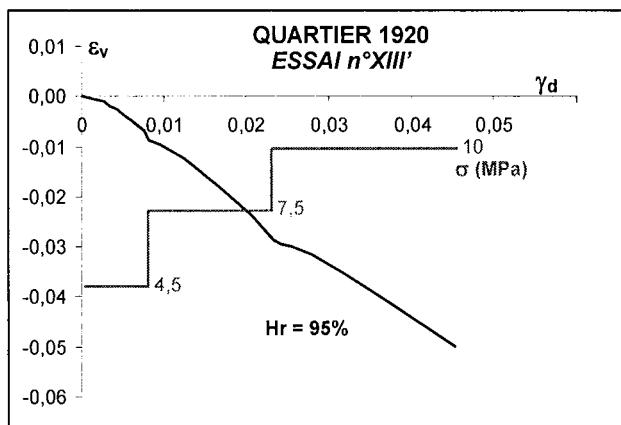


Figure 6.16 - Essai n°XIII' – Déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée

La figure 6.17 montre l'évolution des déformations volumiques différées en fonction de la distorsion différée pendant un essai de fluage multipalier où la contrainte et l'hygrométrie varient (essai de fluage n°IX). Après une variation initiale de l'angle de la dilatance, il ne varie plus. Les changements d'hygrométrie n'ont pas d'effet.

Il est important de remarquer qu'une hygrométrie de 30% provoque un changement du comportement différé. Ce n'est plus une dilatance mais une contractance qui est observée. Ce changement de comportement n'est pas surprenant : Sipple et al. (2001) déjà cités dans le chapitre « Comportement différé » constatent une « auto-réparation » de microfissures par une précipitation nanoscopique d'anhydrite. Cette dernière se produit grâce à des mouvements de molécules d'eau dans la structure cristalline quand l'hygrométrie est comprise entre 10 et 30%. Néanmoins, la précipitation ne doit pas être instantanée et elle doit progresser de la peau vers le cœur de l'échantillon. Une phase transitoire est indispensable. Les déformations volumiques différées et la distorsion différée en fonction du temps deviennent constantes puis elles diminuent (Figure 6.18).

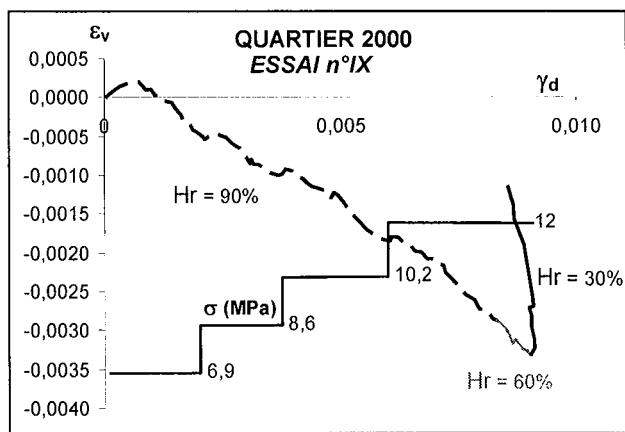


Figure 6.17 - Essai n°IX – Evolution des déformations volumiques en fonction de la distorsion différée (la contrainte et l'hygrométrie varient)

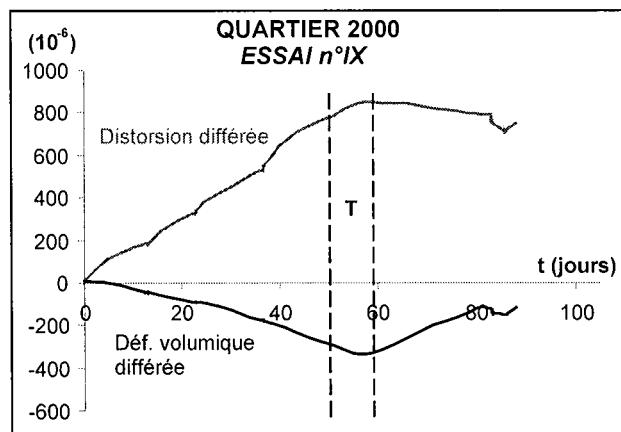


Figure 6.18 - Essai n°IX – Phase transitoire (T) où l'hygrométrie passe de 90% à 60% puis à 30%

La dernière hypothèse à vérifier est l'influence de la contrainte moyenne sur la dilatance. Un essai triaxial de fluage à contrainte déviatorique constante et à contrainte moyenne variable a été réalisé. Il a mis en évidence que les déformations différées de ces roches sont contrôlées uniquement par la contrainte déviatorique. En effet, à chaque palier de contrainte moyenne, les déformations différées et la distorsion ne présentent pas

d'augmentation brutale (Figure 6.19). La contrainte moyenne n'influence pas la vitesse des déformations (chapitre « Comportement différé »).

Il est important de souligner que l'hygrométrie n'est pas contrôlée pendant les essais de fluage triaxiaux. La prudence s'impose quant à la généralisation de ces résultats pour toutes les hygrométries.

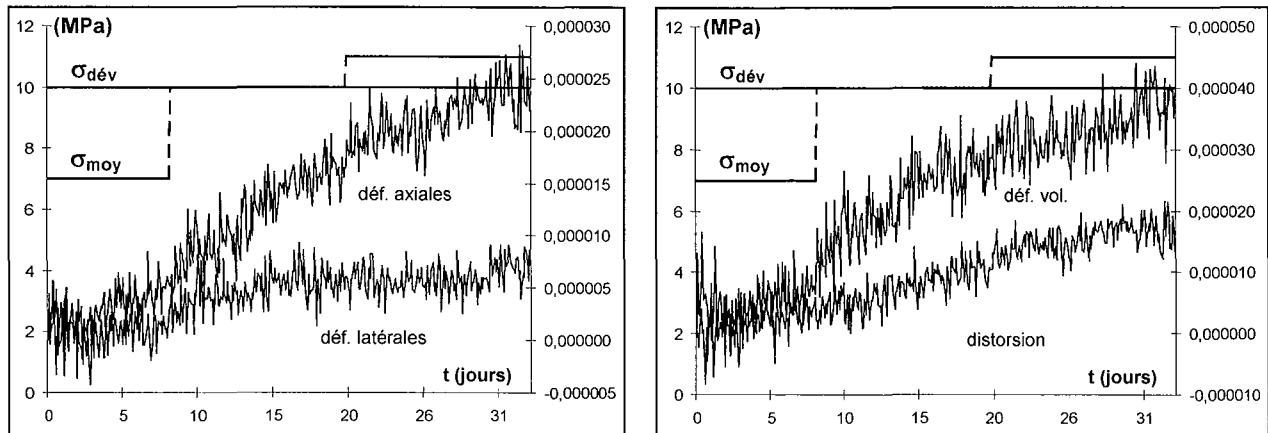


Figure 6.19 - Evolution des déformations différées et de la distorsion différée en fonction de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique (Grozon – essai de fluage triaxial)

Souvent la dilatance est témoin d'un endommagement par fissuration. Les essais de compression hydrostatique après fluage n'ont pas montré un changement significatif de la porosité de fissuration en comparaison à la porosité de fissuration initiale. Un endommagement significatif par un mécanisme de fissuration classique est donc peu probable.

Plusieurs auteurs, étudiant le comportement des gypses au niveau microscopique, s'accordent sur le fait que le mécanisme de fissuration des cristaux de gypse est tout à fait particulier. En effet, il est fortement lié à l'hygrométrie de l'environnement. De plus, un changement de l'hygrométrie peut conduire soit à une restitution de l'eau structurale (qui semble cependant ne pas avoir les mêmes propriétés que l'eau initiale, Finot et al., 1997 ; Mandal et Mandal, 2002) soit à une précipitation nanoscopique de l'anhydrite dans les espaces de fissures et donc à une auto-réparation de l'endommagement. En fait, les essais de compression isotrope ont été effectués après quelques jours à une hygrométrie ambiante. Ce délai a probablement contribué à minimiser les différences entre les fissurations initiale et post-fluage.

Deux alternatives se posent quant à la modélisation de la dilatance :

- La modélisation de la dilatance peut se faire par une approche plasto-endommageable en couplant le modèle de fluage présenté ci-dessus avec un modèle élasto-endommageable.
- La modélisation de la dilatance peut également se faire dans un cadre élastoplastique. Cette approche est plus simple mais elle ne permet pas de suivre l'état de l'endommagement de la roche.

Nous avons choisi la deuxième approche pour sa simplicité. En supposant la contrainte déviatorique comme force motrice du fluage et en supposant la dilatance uniquement fonction de la distorsion totale, nous essayons donc d'établir une relation $\delta=\delta(\gamma)$ où δ est l'angle de la dilatance.

A ce stade, il est important de distinguer les deux types de déformations différées que nous avons pu observer au laboratoire :

- un fluage dit classique avec une augmentation monotone de la distorsion ($d\gamma > 0$) ;
- des déformations dites anélastiques dues à la contrainte interne de retour « back stress » (Blum 2001). Elles se produisent après une diminution importante de la contrainte.

Lors des essais de laboratoire, nous avons constaté que pendant la phase de fluage classique, l'angle de la dilatance varie entre une contractance et une dilatance limite. Pendant la phase de déformations anélastiques, les déformations volumiques sont toujours contractantes.

Nous pouvons donc distinguer deux cas et la règle suivante pour l'angle de la dilatance peut être adoptée :

$$d\delta = \alpha(\operatorname{tg}\delta_\infty - \operatorname{tg}\delta_0) \cdot e^{-\omega\gamma} d\gamma \quad \text{si } d\gamma > 0 \quad (6.12)$$

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{const} = \operatorname{tg}\delta_c \quad \text{si } d\gamma \leq 0 \quad (6.13)$$

avec

δ_∞ : angle de la dilatance limite

ω : paramètre contrôlant la vitesse d'évolution de la dilatance en fonction de la distorsion

δ_c : angle de la dilatance pendant la phase de déformations anélastiques. Ces déformations sont la partie réversible des déformations différées. On peut donc approcher δ_c par δ_0 .

Dans l'expression (6.12), δ_0 est l'angle initial de la dilatance. Il est égal à l'angle de la dilatance instantanée et donc fonction de la contrainte. Dans le cas le plus simple, modèle de comportement instantané de type Mohr-Coulomb sans écrouissage, l'angle de la dilatance est égal à la contractance élastique tant que l'état de contrainte ne se trouve pas sur le critère de plasticité.

Pour un essai de compression triaxiale de révolution, nous pouvons admettre que $\operatorname{tg}(\delta_0)$ s'écrit de la manière suivante :

$$\operatorname{tg}(\delta_0) = \frac{1-2\nu}{1+\nu} \quad (6.14)$$

avec

ν : coefficient de Poisson

Dans notre cas, l'angle initial de la dilatance est bien égal à la contractance élastique. En effet, avec la contrainte imposée, le seuil de plasticité ne peut être dépassé.

Déformations anélastiques et contrainte interne :

Une autre caractéristique importante du modèle actuel est l'aptitude à décrire les déformations anélastiques. Selon Blum (2001), ces déformations sont dues à une contrainte interne. Cette dernière permet aux dislocations de se retrouver dans leur état d'origine.

Après une diminution importante de la contrainte déviatorique, la contrainte interne peut devenir le mécanisme principal des déformations différées. Certains auteurs appellent ce comportement, fluage inverse, (Hunsche et Hampel, 1999).

En effet, pendant les dernières phases de nos essais, lorsque nous avons mis les contraintes à zéro, nous avons bien observé des déformations qui vont dans le sens contraire des déformations obtenues par le fluage classique.

L'estimation de la contrainte interne est une tâche assez délicate (Blum, 2001). En fait, il faudra faire des tests de réduction de la contrainte déviatorique, jusqu'au moment où la déformation inverse se produit. Ceci implique une sensibilité dans la mesure des déformations bien supérieure à ce qu'on utilise habituellement.

Par la suite nous ne tenterons pas d'estimer directement la contrainte interne. Nous venons d'expliquer qu'elle est une force de réaction et que cette dernière permet le mouvement des dislocations. La vitesse des déformations doit être proportionnelle à la densité des dislocations dans des empilements et donc proportionnelle à la distorsion :

$$d\gamma_r \propto -\gamma \cdot dt \quad (6.15)$$

En prenant le coefficient de proportionnalité comme une fonction inconnue du temps, l'équation (6.9) peut définitivement s'écrire :

$$\dot{\gamma}_r = -A(t) \cdot \gamma \quad (6.16)$$

Par conséquent, l'ajustement des courbes expérimentales conduit à accepter une fonction de la forme suivante :

$$A(t) = A_0 \cdot \frac{t^{\chi-1}}{\chi-1} \quad (6.17)$$

En injectant (6.17) à (6.16) nous obtenons finalement :

$$\dot{\gamma}_r = -A_0 \cdot \frac{t^{\chi-1}}{\chi-1} \cdot \gamma \quad (6.18)$$

La vitesse de la distorsion différée totale est la somme des distorsions directe et inverse (anélastique). Le tenseur des déformations totales s'écrit :

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^d = (\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_R) \frac{\underline{\underline{S}}}{q} + (\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_R) \operatorname{tg} \delta \underline{\underline{I}} \quad (6.19)$$

Influence de l'hygrométrie et de la température

Traditionnellement l'influence de la température sur la vitesse du fluage est prise en compte en considérant que le paramètre B (équation 6.8) suit une loi d'Arrhénius, soit :

$$B = B_0 \cdot e^{-\frac{U}{RT}} \quad (6.20)$$

avec

U : énergie d'activation

R : constante universelle des gaz parfaits ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

L'influence de l'environnement sur la vitesse du fluage est supposée être liée à la variation de l'énergie d'activation (Blum, 2001). En effet une augmentation de l'hygrométrie dans nos essais conduisait à une augmentation de la vitesse des déformations, ce qui implique une diminution de l'énergie d'activation avec l'hygrométrie.

Nous pouvons déjà exclure une influence de la contrainte effective à cet effet. Plusieurs auteurs ont montré que le changement du comportement des cristaux de gypse en contact avec de l'eau ne pouvait pas être expliqué par l'eau se trouvant dans le volume intergranulaire cristallin (Finot et al., 1997 ; Finot et al., 2001). L'effet de l'humidité sur la vitesse du fluage se réduit donc à la seule diminution de l'énergie d'activation.

D'autre part plusieurs auteurs ont également signifié qu'en dessous d'une hygrométrie de 30%, aucun effet de l'hygrométrie n'est observable. On peut donc raisonnablement faire l'hypothèse qu'en dessous de 30% d'hygrométrie, l'évolution de l'énergie d'activation est négligeable.

Nous nous limitons donc à modéliser l'évolution de l'énergie d'activation pour des hygrométries supérieures à 30%.

Nous pouvons donc écrire une fonction de l'évolution de l'énergie d'activation :

$$U = U_{Hr=30} - \xi(Hr-30) \quad (6.21)$$

En remplaçant (6.21) dans (6.20) et en regroupant les termes, on obtient :

$$B = B_0 \left(e^{\frac{U_{Hr=30} - \xi(Hr-30)}{R.T}} \right) = B_0 \left(e^{\frac{U_{Hr=30}}{R.T}} \right) \cdot \left(e^{-\frac{\xi(Hr-30)}{R.T}} \right) = B_{30}(T) \cdot e^{-\frac{\xi(Hr-30)}{R.T}} \quad (6.22)$$

L'énergie d'activation ne figure pas explicitement dans cette dernière expression. Elle permet un calcul plus facile des paramètres qui interviennent dans la formule.

6.3.2.2- Détermination des paramètres

Identification :

Le modèle présenté compte 11 paramètres. Ils peuvent se classer en 5 catégories :

- 1. Paramètre élastique : ν

Il s'agit du coefficient de Poisson. Il représente le rapport d'un module axial sur le module latéral correspondant. Il est déterminé suivant la norme NF P 94-425.

- 2. Paramètres exprimant la distorsion différée des fluages primaire et secondaire : m , n , k et b

Le paramètre n représente l'exposant de la contrainte. m , k et b sont des exposants ou facteurs de la distorsion différée.

- 3. Paramètres rapportant la distorsion différée pendant les phases de recouvrance : A_0 et χ

Ils permettent de calculer les déformations anélastiques enregistrées pendant une contrainte nulle.

- 4. Paramètre traduisant l'influence de l'hygrométrie : B et ξ

Le paramètre B suit une loi d'Arrhénius, il dépend de l'hygrométrie. Le paramètre ξ représente un coefficient d'évolution de l'énergie d'activation.

- 5. Paramètres exprimant la dilatance : δ_0 et δ_∞

Il s'agit respectivement de l'angle initial de la dilatance correspondant à la contractance élastique et de l'angle de dilatance limite.

Procédure :

Nous commençons par la détermination des paramètres m et B . Ces paramètres peuvent être déterminés en analysant au moins deux phases de fluage secondaire (avec un niveau de contrainte différent).

L'utilisation de l'équation (6.9) avec $f(q,\gamma)=1$ permet de définir le paramètre B (pour une hygrométrie donnée) et le paramètre m .

Les paramètres k , n , b sont ensuite calculés par un ajustement non linéaire des courbes de fluage primaire. L'ajustement de ces paramètres a été fait par une procédure de Levenberg-Marquardt sous Mathematica 4.2.

Le paramètre k est calculé indirectement car c'est le produit $k.B$ qui est déterminé par un ajustement non linéaire. En connaissant préalablement le paramètre B , la valeur de k peut être alors calculée.

L'ajustement des paramètres de la dilatance (δ_0 , δ_∞ et ν) est réalisé en traçant les déformations volumiques en fonction de la distorsion différée. La valeur finale de la dilatance peut être définie dans la partie linéaire de la courbe déformation volumique en fonction de la distorsion différée (Figures 6.14 à 6.17).

Les paramètres des déformations anélastiques (A_0 et χ) sont définis par un ajustement non linéaire de la courbe de la distorsion différée en fonction du temps lorsque la contrainte appliquée est égale à zéro.

Le paramètre ξ est calculé à partir de B et de l'équation (6.22) par un ajustement linéaire de $RT \cdot \ln(B/B_{30})$ en fonction de $(Hr-30)$.

Stratégie et résultats :

La stratégie retenue pour déterminer l'ensemble des paramètres se décompose en plusieurs étapes : la première concerne le calcul des paramètres B , m , k , n et b correspondant à l'évolution de la distorsion différée en fonction du temps. La seconde étape permet de calculer les paramètres des déformations anélastiques et du paramètre ξ . La troisième étape concerne le calcul des paramètres de la dilatance.

1. Paramètres B , m , k , n et b :

Les essais de fluage multipaliers n°X à XIII' ont été choisis. Les 3 premiers paliers de contrainte ont été utilisés pour calculer les paramètres propres à chaque valeur d'hygrométrie c'est-à-dire 30, 60, 75, 90 et 95% (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 - Paramètres B , m , k , n et b déterminés pour chaque hygrométrie (Age d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
B	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$9,11 \cdot 10^{-5}$
m	0,44	0,21	0,44	0,80	1,00
k	$4,49 \cdot 10^{-8}$	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$9,06 \cdot 10^{-15}$	$7,94 \cdot 10^{-6}$	$7,84 \cdot 10^{-8}$
n	4,22	4,73	7,15	4,40	5,36
b	1,66	1,75	3,26	1,09	1,95

Il est intéressant de remarquer que les paramètres n et b varient peu en fonction de l'hygrométrie. Il faut exclure ceux qui correspondent à une hygrométrie de 75%. Aucune tendance ne semble ressortir en fonction de l'hygrométrie.

Après quelques tests, les valeurs de n et b ont été fixées respectivement à 4,4 et 1,6. Le produit $B.k$ a donc été redéterminé par un ajustement non-linéaire des courbes de fluage

primaire selon la même procédure (Levenberg-Marquardt sous Mathematica 4.2). Pour chaque hygrométrie, l'ensemble des paramètres est finalement présenté dans le tableau 6.5.

Tableau 6.5 - Paramètres B , m , k , n et b définitifs (Age d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
B	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$9,11 \cdot 10^{-5}$
m	0,44	0,21	0,44	0,80	1,00
k	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$4,59 \cdot 10^{-8}$	$8,53 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$
n			4,40		
b			1,60		

En imposant les paramètres n et b , une évolution de k en fonction de l'hygrométrie est alors perceptible. En effet, k augmente avec l'hygrométrie même si, pour 60%, sa valeur n'est pas comprise entre celles de 30 et 75%. Cette tendance est également vraie pour le paramètre B (Figure 6.20).

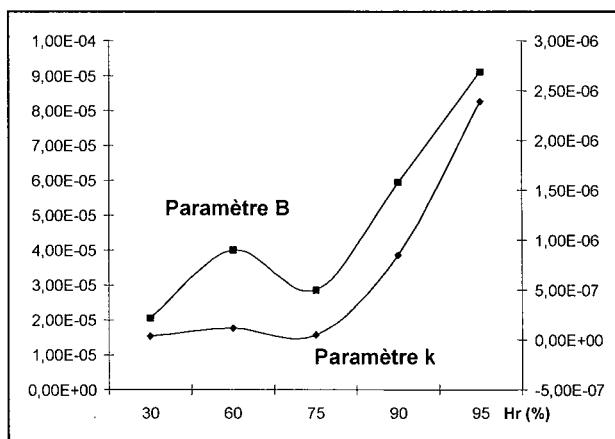


Figure 6.20 - Grozon – Age d'exploitation 1920 - Augmentation des paramètres B et k avec l'hygrométrie

2. Paramètres des déformations anélastiques (A_0 et χ) et coefficient ξ :

Les paramètres des déformations anélastiques A_0 et χ ont été calculés pour chacune des courbes de la distorsion des essais n°XII, n°XII' et XIII' en fonction du temps (Tableau 6.6).

Il est intéressant de remarquer que A_0 varie beaucoup plus que χ en fonction de l'hygrométrie. Des phases de recouvrance avec des hygrométries inférieures à 75% auraient permis d'ajuster deux équations décrivant la variation de A_0 et χ . Afin de pouvoir simuler cette phase et après plusieurs tests, une simplification a été choisie : χ a été fixé à 0,32. L'ensemble des paramètres A_0 et χ définitivement retenus est présenté dans le tableau 6.7. Nous constatons une diminution de A_0 avec l'augmentation de l'hygrométrie (Figure 6.21). Enfin le paramètre ξ a été calculé.

Tableau 6.6 - Paramètres (A_0 , χ) et ξ déterminés pour chaque hygrométrie (Age d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
A_0	-	-	0,23	0,08	0,04
χ	-	-	0,25	0,33	0,60
ξ			50,5		

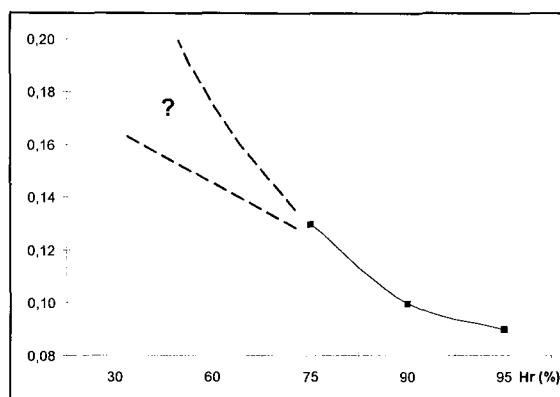


Figure 6.21 - Grozon – Age d'exploitation 1920 - Diminution du paramètre A_0 avec l'augmentation de l'hygrométrie (χ est fixé à 0,32)

3. Paramètres de la dilatance : δ_0 , δ_∞ et ν

L'évolution dans le temps de la déformation volumique différée en fonction de la distorsion différée permet de calculer l'angle de la dilatance finale (δ_∞). Quelle que soit la valeur de l'hygrométrie, ce paramètre est constant. Quant à la valeur de l'angle initial de la dilatance, il suffit de prendre l'équation (6.14). L'ensemble des quatre paramètres en fonction de l'hygrométrie figure dans le tableau 6.7.

Tableau 6.7 - Ensemble des paramètres de la dilatance (Age d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
ν			0,35		
δ_0			-0,22		
δ_∞			1,4		

Finalement, les paramètres utilisés pour les simulations de la distorsion différée, des déformations volumiques, axiales et transversales différées sont tous regroupés dans le tableau 6.8.

Tableau 6.8 - Ensemble des paramètres définitifs permettant de simuler la distorsion et les déformations différées mesurées pendant les essais de flUAGE (Age d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
B	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$9,11 \cdot 10^{-5}$
m	0,44	0,21	0,44	0,80	1,00
k	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$4,59 \cdot 10^{-8}$	$8,53 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$
n			4,40		
b			1,60		
ν			0,35		
δ_0			-0,22		
δ_∞			1,4		
A_0	-	-	0,13	0,10	0,09
χ	-	-		0,32	
ξ			50,5		

6.3.2.3- Simulations et interprétation

Toutes les simulations présentées ci-après se subdivisent en quatre groupes représentant ainsi l'évolution de la valeur des différents paramètres en fonction des remarques faites précédemment. Chaque simulation est commentée, l'interprétation de l'ensemble se fera à la suite.

Simulations 1 :

Les simulations de la distorsion de deux essais multipaliers (essais n°X et XII') avec les paramètres du tableau 6.4 sont présentées sur les figures 6.22 et 6.23. Elles sont représentatives de l'ensemble des simulations. Les autres simulations sont en annexe 6.1.

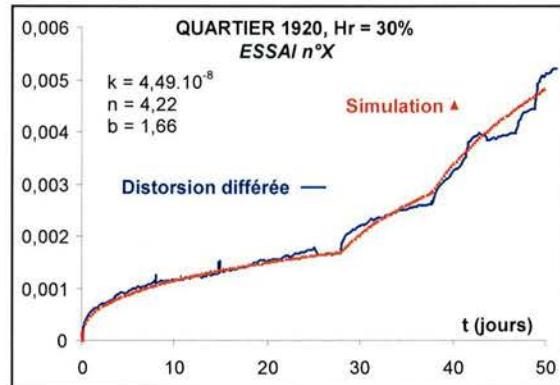


Figure 6.22 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation

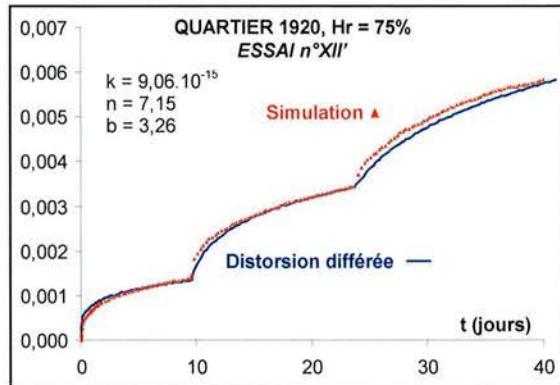


Figure 6.23 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée et simulation

Quels que soient l'essai et le niveau de contrainte, la simulation reproduit raisonnablement bien la distorsion différée. Pour ces simulations, l'hygrométrie est constante. Seul le début et la fin du 2^{ème} palier de contrainte des essais n°X, XI, et XII sont moins bien reproduits.

Simulations 2 :

Cette deuxième série de simulations a pour objectif de mettre en évidence des jeux de paramètres cohérents en fonction des valeurs de l'hygrométrie. Les simulations sont effectuées avec les paramètres du tableau 6.5. Dans ce cas, les paramètres n et b sont constants et seul le paramètre k est ajusté. Les simulations de la distorsion des essais multipaliers sont à nouveau présentées avec les nouveaux jeux de paramètres (Figures 6.24 à 6.28).

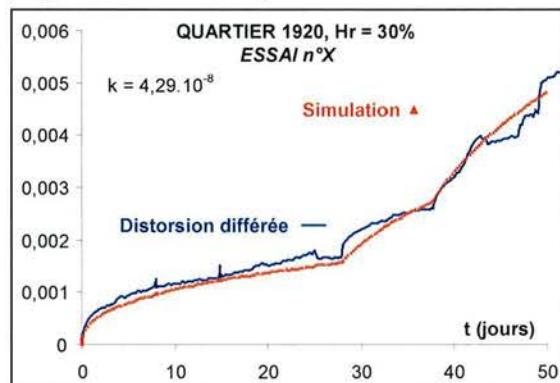


Figure 6.24 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)

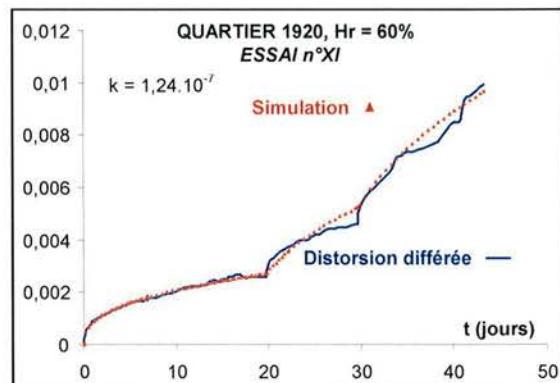


Figure 6.25 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 60% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)

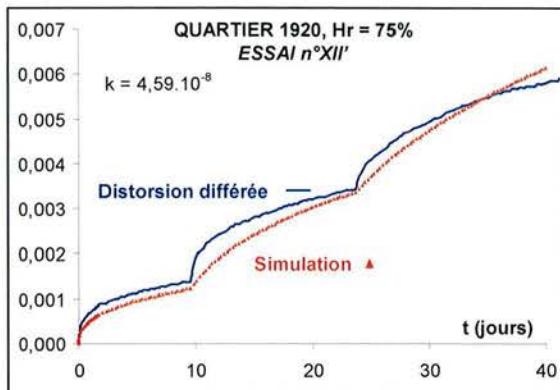


Figure 6.26 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)

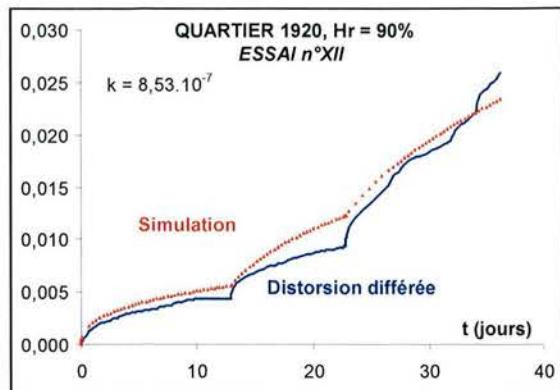


Figure 6.27 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)

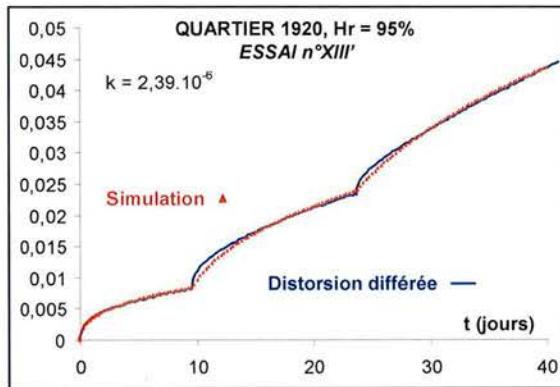


Figure 6.28 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 95% – Evolution de la distorsion différée et simulation ($n = 4,4$; $b = 1,6$)

Quels que soient l'essai, la valeur de l'hygrométrie et le niveau de contrainte, la simulation de la distorsion différée reste toujours satisfaisante.

A partir de ces jeux de paramètres, la distorsion différée des essais multipaliers avec un changement d'hygrométrie et des essais monopaliers peut être simulée (Figures 6.29 à 6.33). Les paramètres utilisés sont ceux du tableau 6.5 où n et b restent constants quelle que soit l'hygrométrie.

- **Essais multipaliers (contrainte et hygrométrie varient) :**

Sur la figure 6.29 comme sur la figure 6.30, les simulations des paliers où l'hygrométrie est égale à 90% ne sont pas satisfaisantes : elles sous-estiment la distorsion différée mesurée expérimentalement. Le jeu de paramètres déterminés à partir de l'essai n°XII où l'hygrométrie est égale à 90% (Figure 6.27) ne convient donc pas.

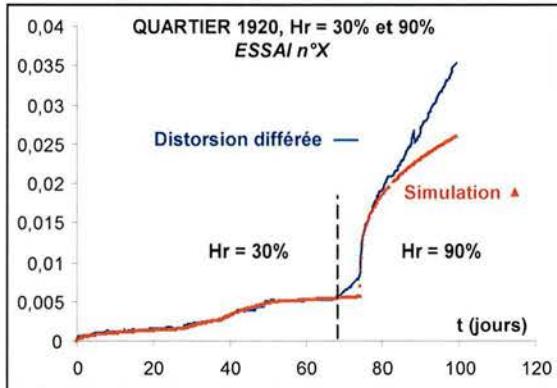


Figure 6.29 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométries 30% et 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation

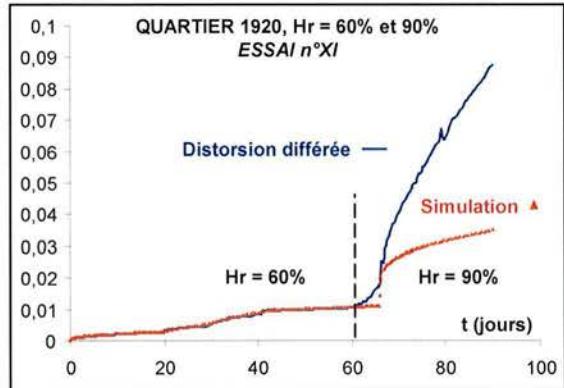


Figure 6.30 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométries 60% et 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation

- **Essais monopaliers :**

Les simulations de la distorsion différée des essais n°19 et 20 (Figures 6.31 et 6.32) avec les jeux de paramètres calculés à partir des essais n°X et XI (Figures 6.21 et 6.22) surestiment la distorsion différée expérimentale. Si l'on divise le paramètre k d'un facteur 10, la nouvelle simulation se rapproche convenablement de la distorsion.

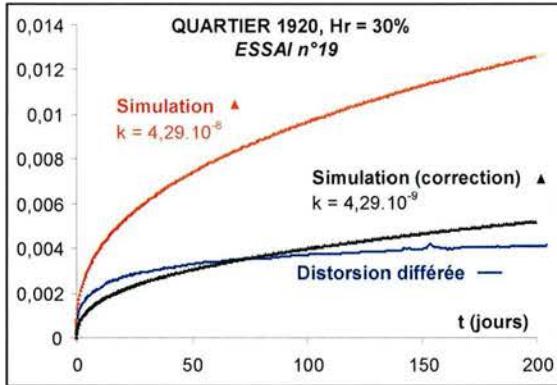


Figure 6.31 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 30% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)

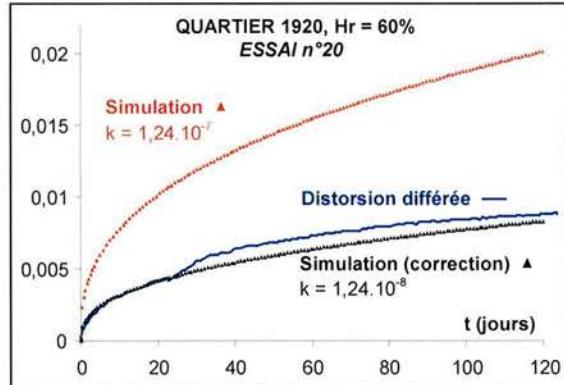


Figure 6.32 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 60% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)

Pour des hygrométries de 30 et 60%, la distorsion différée mesurée pendant les essais multipaliers est donc supérieure à celle mesurée pendant les essais monopaliers.

La simulation de la distorsion différée de l'essai n°21 (Figure 6.33) avec le jeu de paramètres calculés à partir de l'essai n°XII (Figure 6.27) reproduit de manière incorrecte la distorsion différée expérimentale. Cependant, cette distorsion expérimentale en fonction du temps évolue d'une manière linéaire, à l'inverse de tous les autres essais.

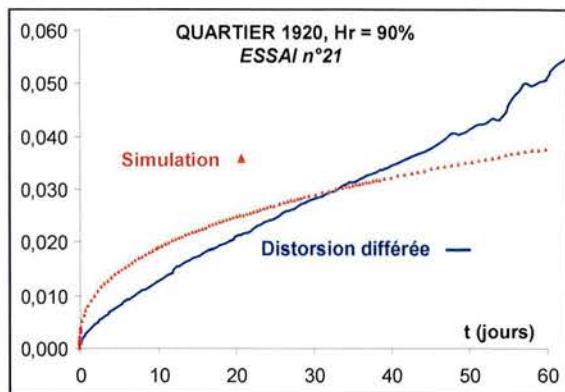


Figure 6.33 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée et simulation (paramètres déterminés à partir d'un essai multipalier)

Simulations 3 :

La distorsion déterminée pendant la phase de recouvrance des différents essais multiplicateurs peut être simulée avec les paramètres du tableau 6.6 (Figures 6.34 à 6.36). Les autres simulations sont en annexe 6.1.

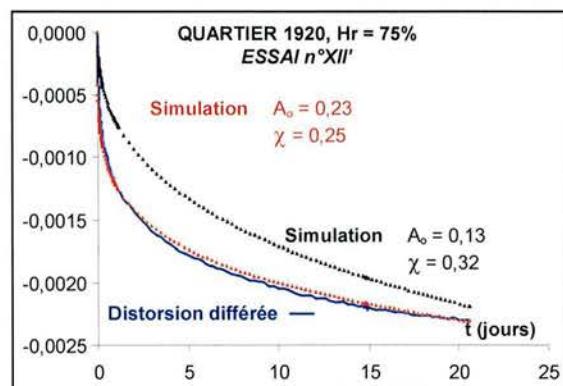


Figure 6.34 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 75% – Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation

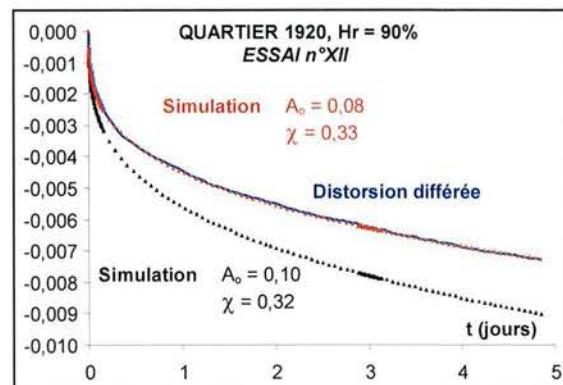
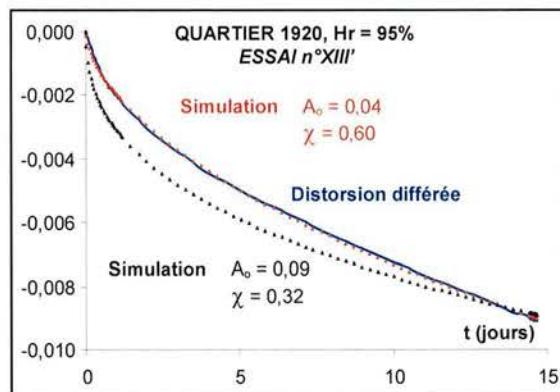


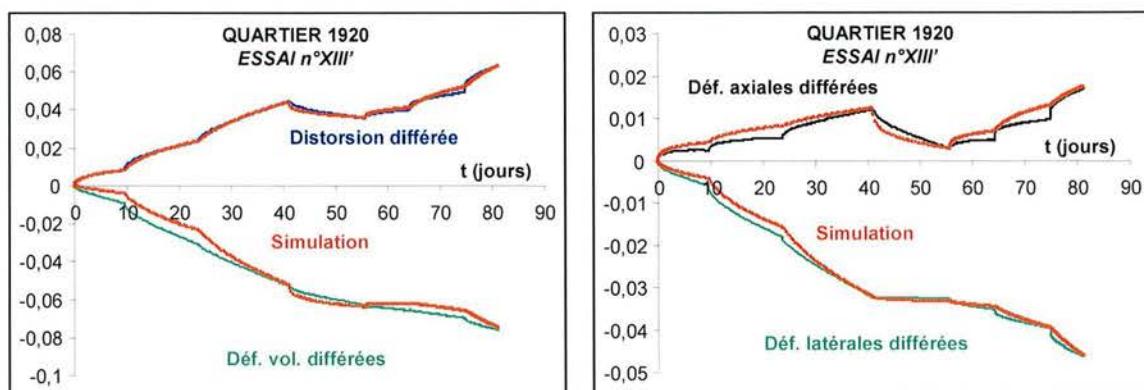
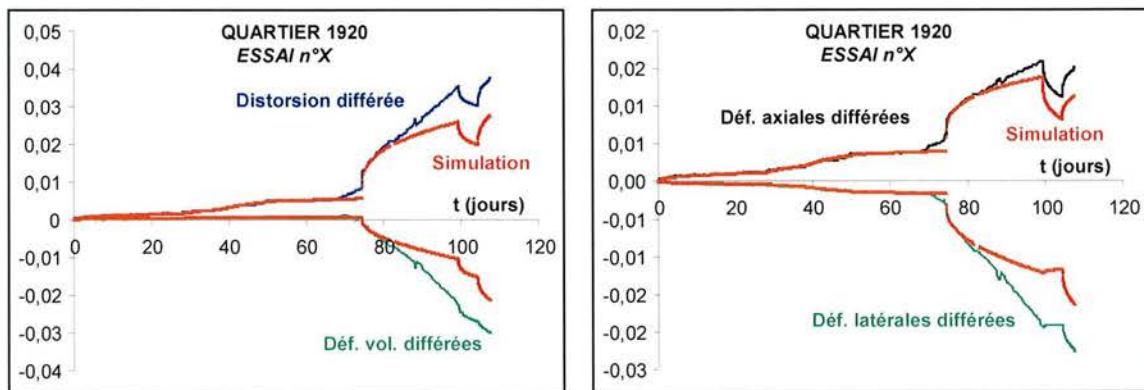
Figure 6.35 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation



Il est indiscutable que les simulations effectuées avec des valeurs de A_0 et χ propres à chaque essai sont d'une meilleure qualité que celles qui ont été réalisées avec χ égal à 0,32. Cependant, ces dernières restent tout de même correctes.

Simulations 4 :

La distorsion, les déformations volumiques, axiales et transversales différées des différentes phases des essais multiplicatifs sont simulées. Deux exemples sont présentés sur les figures 6.37 et 6.38. Les autres simulations sont en annexe 6.1.



Interprétations

La qualité des simulations, le fait de reproduire correctement ou pas les déformations différées, permet de s'interroger sur les valeurs des paramètres et par conséquent sur leurs ajustements. Un autre point important doit être également pris en compte : l'homogénéité ou bien l'hétérogénéité des échantillons.

Le choix de prendre n et b constants peut paraître discutable. Cependant, les différentes valeurs obtenues pour chaque hygrométrie ne présentent pas de tendance particulière. Un compromis a donc été fait pour obtenir des simulations d'une bonne qualité tout en imposant n et b . Quant à la variation de k , B , et A_0 , elle semble suivre une tendance qui est fonction de l'hygrométrie.

Dans la littérature, les valeurs de α sont supposées représenter un mécanisme de déformation (Tableau 6.3). Pour le gypse de Grozon, les valeurs imposées de n et b (respectivement 4,40 et 1,60) semblent correspondre à des phénomènes de diffusion (attribués généralement à des chargements thermiques) et à des phénomènes de glissements ou de cisaillements entre les cristaux. Nos essais n'ont pas été réalisés avec des paliers thermiques mais avec des paliers d'hygrométrie en plus de paliers de contrainte. Or, le phénomène de « diffusion assistée par fluide » a déjà été proposé comme mécanisme microcristallin de fluage stationnaire pour le sel gemme (Spiers, 1984). Le fluide ne correspond pas ici à celui qui est piégé entre les cristaux pendant la diagenèse mais à la vapeur d'eau pénétrant dans le réseau poreux. Le deuxième mécanisme, glissements ou cisaillements entre les grains, est envisageable. Néanmoins, sous une contrainte, glissements et/ou cisaillements peuvent également se produire à l'intérieur des cristaux de gypse suivant un axe privilégié (Finot et al., 2001). Une forte hygrométrie est susceptible d'amplifier un tel mécanisme (Finot et al., 1997 ; Sipple et al., 2001). Enfin, si nous tenons compte des valeurs de n et b pour le gypse de Livry Gargan (respectivement 6 ou 10 et 12 ou 15 suivant l'âge d'exploitation, annexe 6.2), il s'agirait plutôt de phénomènes de dislocations et de glissements entre cristaux favorisés par les fortes hygrométries.

La simulation des déformations lors des changements d'hygrométrie, 30 puis 90% ou bien 60 puis 90%, ne nous satisfait pas : les déformations expérimentales sont sous-estimées. De même, les simulations des essais monopaliers surestiment les déformations expérimentales.

Deux hypothèses peuvent être avancées :

- L'échantillon ayant subi un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie de 90% (essai n°XII) est différent des deux autres échantillons ayant subi un essai de fluage multipalier (essais n°X et XI).
- Les échantillons ayant subi un essai de fluage multipalier sous une hygrométrie de 30% et 60% (essais n°X et XI) sont différents de tous les autres échantillons.

Depuis les débuts de la caractérisation physico-mécanique du gypse, la dispersion des résultats maintes fois énoncée a été attribuée à une hétérogénéité structurale du matériau (distribution de la porosité, pureté gypse/anhydrite). Nous pouvons donc supposer que ces différences influencent également la quantité de déformation différée.

D'autres hétérogénéités peuvent aussi intervenir : il s'agit plus exactement d'impuretés comme le chlorure de calcium. Un tel élément dans la matrice, avec des conditions expérimentales particulières comme une forte hygrométrie, peut provoquer une

augmentation importante des déformations (Badens, 1998 ; Meer et Spiers, 1999). La présence d'éléments comme les chlorures ne semblerait pas surprenante étant donné le contexte géochimique du gisement de gypse. Les bancs de marnes situés au-dessus et sous le niveau de gypse sont des couches « poubelles », elles contiennent de nombreux éléments (Caudron et Labourguigne, 1971 ; Kerrien, 1982). Un autre argument est en notre faveur : d'après l'exploitant et suite à des analyses de pureté, le banc de gypse 2 (situé sous la couche échantillonnée) est très riche en chlorure et magnésium. Afin de vérifier cette hypothèse, des analyses de diffractométrie aux rayons X (Annexe 6.3) ont été réalisées sur un certain nombre d'échantillons (essais n°19 à 20 et X à XII).

L'intensité relative des raies du gypse varie d'un échantillon à l'autre. Cette différence peut avoir deux origines : soit des différences dans l'orientation préférentielle des phases, soit la présence d'impuretés mal cristallisées et en très petite quantité (inférieur à 1%). Par conséquent, ces résultats ne nous permettent pas d'écartez cette hypothèse.

6.3.2.4- Validité de la distorsion critique

L'existence d'une valeur critique de la distorsion γ_t pour laquelle le fluage secondaire a lieu a été postulée (équations 6.10 et 6.11). Cette valeur délimite le fluage primaire du secondaire. Elle doit obéir à deux exigences : elle ne peut être arbitraire et la vitesse de la distorsion doit être continue pendant le passage du fluage primaire au fluage secondaire. L'expression de ce paramètre est la suivante :

$$\gamma_t(q) = k^{\frac{1}{b}} \cdot q^{\frac{n-m}{b}} \quad (6.23)$$

Après l'ajustement des paramètres, tous les termes de cette équation sont maintenant connus (Tableau 6.8), il est important de vérifier si la valeur théorique correspond bien à la valeur expérimentale.

Avant même de comparer ces deux valeurs, nous pouvons déjà supposer qu'il existera des écarts étant donné que les déformations expérimentales n'ont pas toujours été convenablement reproduites (par exemple, les essais monopaliers).

Le tableau 6.9 rassemble toutes les valeurs critiques de la distorsion en fonction de l'hygrométrie et de la contrainte mais uniquement pour le gypse de Grozon. Les valeurs critiques de la distorsion du gypse de Livry Gargan sont en annexe 6.2.

Tableau 6.9 - Grozon – Ages d'exploitation 1920 et 2000 - Distorsion critique (valeur théorique)

	Age d'exploitation 1920					Age d'exploitation 2000
	Hygrométrie (%)	30	60	75	90	95
Contrainte (MPa)						
4,6	0,0011	0,0026	0,0011	0,0047	0,0079	0,0006
6,9	0,0030	0,0076	0,0031	0,0124	0,0186	0,0016
7,6	0,0038	0,0098	0,0039	0,0154	0,0228	0,0020
8,6	0,0051	0,0135	0,0053	0,0204	0,0297	0,0027
10	0,0074	0,0201	0,0077	0,0286	0,0409	0,0041
12	0,0116	0,0324	0,0122	0,0431	0,0603	0,0063

Plus les hygrométries et les contraintes sont élevées, plus cette valeur est importante. Cette tendance constatée expérimentalement (chapitre « Comportement différé ») semble vérifiée théoriquement. Seules les valeurs calculées pour une hygrométrie de 75% ne respectent pas cette variation (Figure 6.39).

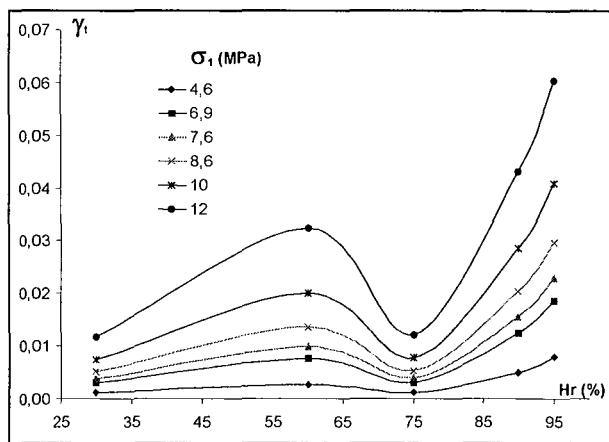


Figure 6.39 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Evolution de γ_t théorique en fonction de l'hygrométrie et de la contrainte

Les valeurs théoriques de la distorsion critique (γ_t) des essais multipaliers d'âge d'exploitation 1920 sont comparées à la limite expérimentale fluage I-fluage II (FI-FII). Cette dernière est estimée expérimentalement sur les courbes distorsion différencée-temps (Figures 6.40 à 6.44).

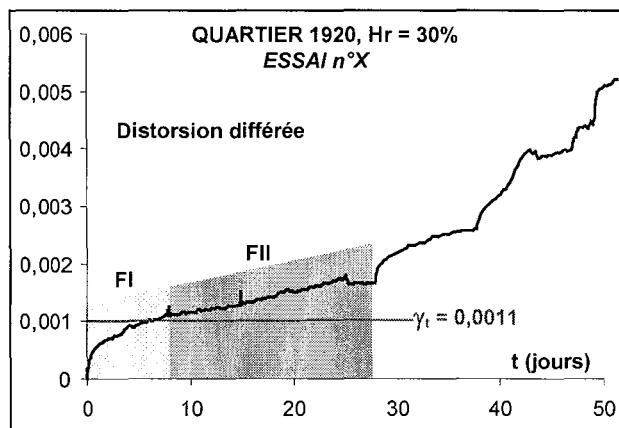


Figure 6.40 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 30% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

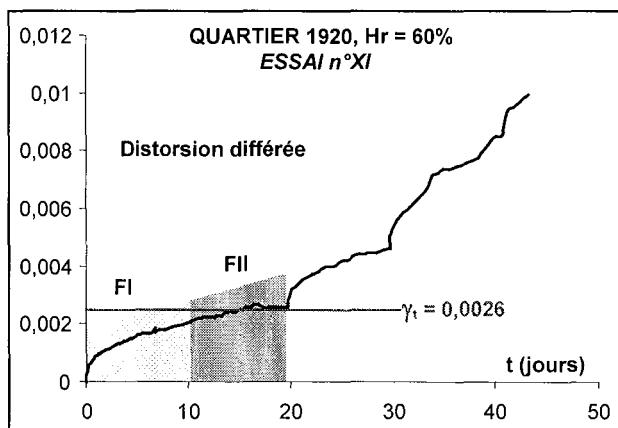


Figure 6.41 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 60% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

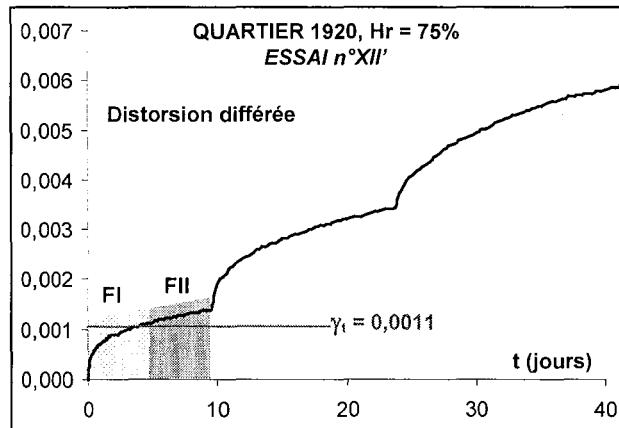


Figure 6.42 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 75% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

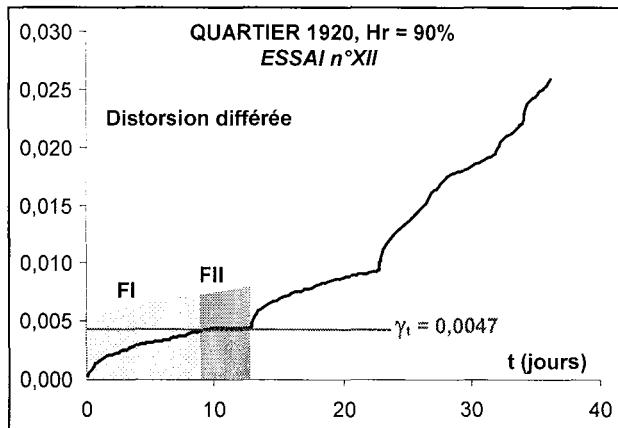


Figure 6.43 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 90% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

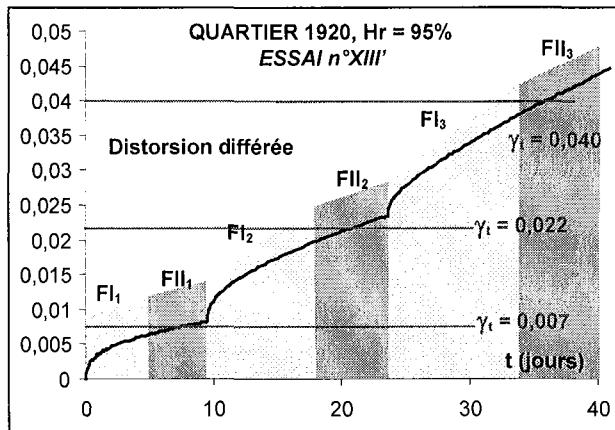


Figure 6.44 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 95% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II de trois paliers

La comparaison entre la distorsion critique théorique (γ_t) et la limite expérimentale fluage I-fluage II (FI-FII) des essais multipaliers d'âge d'exploitation 1920 donne lieu à trois interprétations :

- $\gamma_t < FI-FII$: le début de la phase du fluage secondaire expérimentale est plus précoce (le premier palier de l'essai n°X).
- $\gamma_t = FI-FII$: le début de la phase du fluage secondaire expérimentale a été correctement estimé (le premier palier de l'essai n°XII et XII').
- $\gamma_t > FI-FII$: la phase de fluage secondaire n'a pas encore été atteinte (le premier palier de l'essai n°XI et les trois paliers de l'essai n°XIII').

Il faut également ajouter que la distorsion critique de plusieurs paliers ne peut être représentée graphiquement (essais n°X à XII') : les déformations mesurées pendant ces paliers appartiennent encore à un fluage primaire.

La comparaison entre la distorsion critique théorique (γ_t) et la limite expérimentale fluage I-fluage II (FI-FII) de l'essai multipalier d'âge d'exploitation 2000 (Figure 6.45) donne lieu aux trois interprétations précédemment énoncées. En effet pour le premier palier, la valeur de la distorsion critique est après la limite expérimentale FI-FII. Pour les deux paliers suivants, le début de la phase expérimentale du fluage secondaire a été correctement estimé : il correspond à la distorsion critique. Enfin, pour le dernier palier, la valeur de la distorsion critique théorique se situe avant la limite expérimentale FI-FII.

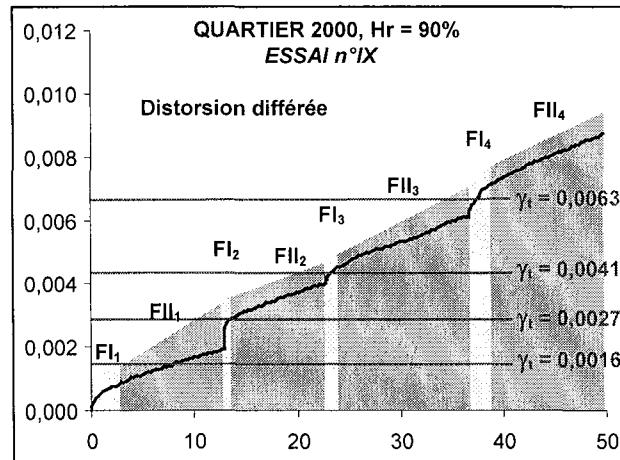


Figure 6.45 - Grozon – Age d'exploitation 2000
Hygrométrie 90% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II de quatre paliers

La comparaison entre la distorsion critique théorique (γ_t) et la limite expérimentale fluage I-fluage II (FI-FII) des essais monopaliers d'âges d'exploitation 1920 et 2000 n'est pas possible : la distorsion et les déformations n'ont pas été correctement simulées.

Finalement, le fait de postuler l'existence d'une valeur critique de la distorsion semble justifié. En effet, une bonne similitude entre la distorsion critique théorique (γ_t) et la limite expérimentale fluage I-fluage II (FI-FII) a été constatée pour plusieurs essais.

6.4- CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était de modéliser le comportement instantané mais surtout le comportement différé du gypse de la carrière de Grozon. Les résultats expérimentaux décrits et interprétés dans les chapitres précédents ont permis de négliger la phase du comportement instantané. Cependant, ces résultats sont à l'origine de la loi de comportement différé permettant ainsi de décrire le comportement différé du gypse. A cause d'un manque d'essais, seuls les échantillons d'âge d'exploitation 1920 ont été retenus.

Une fois les mécanismes de déformation différée identifiés (réactions dissolution/migration et phénomènes micromécaniques), une loi mécanique visco-élasto-plastique a été élaborée afin de décrire le comportement différé du gypse. Cette loi est basée sur l'unification de la loi de Lemaitre et de la loi de Norton. Suite aux essais, trois spécificités ont dû être prises en compte : des déformations volumiques dilatantes, des déformations dites « anélastiques » et une influence importante de l'hygrométrie.

L'ajustement des paramètres du modèle a été fait par une procédure de Levenberg-Marquardt sous Mathematica 4.2. Il a été rendu difficile par l'hétérogénéité structurale et/ou géochimique du matériau, paramètres inévitables quand il s'agit de matériaux naturels.

La validation du modèle a été effectuée en simulant les déformations différées de plusieurs essais de fluage réalisés sous des chemins de contraintes et d'hygrométries différentes de ceux qui ont servi à l'écriture de la loi. En éliminant les échantillons considérés comme exception c'est-à-dire ayant un comportement atypique pour des raisons texturales et/ou structurales, les simulations reproduisent convenablement les résultats expérimentaux. Cependant, le modèle ne peut être validé pour un âge d'exploitation récent : le nombre d'essais avec des échantillons de cet âge est insuffisant. Par conséquent, l'influence du vieillissement sur le comportement différé n'a pas pu être simulé.

CONCLUSIONES GENERALES

De nos jours, les problèmes de stabilité des carrières souterraines peuvent avoir des conséquences humaines, économiques et environnementales beaucoup plus importantes qu'au siècle dernier. Les carrières souterraines de gypse n'échappent pas à cette constatation. Devant la gravité des conséquences d'un effondrement majeur, la compréhension des phénomènes physico-chimico-mécaniques à l'origine du comportement à long terme du gypse s'avère indispensable. Afin de comprendre ces mécanismes, l'INERIS et le LaEGO ont mis en place un programme de recherche dans lequel le gypse y tient une place majeure.

La démarche scientifique proposée s'articulait autour de deux fils conducteurs : le comportement à court terme et le comportement à long terme du gypse. Le travail accompli a concerné les points suivants :

- Les particularités cristallographiques, physico-chimiques et physico-mécaniques du cristal de gypse complétées par une connaissance du contexte géologique des gisements et les particularités physico-mécaniques de ces gypses.
- La caractérisation du vieillissement du gypse exposé à l'atmosphère plus ou moins humide dans la carrière.
- L'étude du comportement mécanique instantané du gypse au laboratoire.
- L'étude du comportement mécanique différé du gypse *in situ* et au laboratoire
- La proposition d'un modèle avec l'écriture d'une loi de comportement incluant un couplage hydro-chimico-mécanique.

Le gypse est un matériau thermo-sensible. Avec une température avoisinant les 60°C, il perd une partie de ces molécules d'eau. Dans notre contexte, c'est son caractère hygro-sensible que nous retiendrons. L'aspect structural des cristaux se modifie suivant l'hygrométrie : pour des faibles valeurs, des molécules d'eau migrent vers la périphérie des cristaux créant ainsi des lacunes cristallines ; à l'inverse, pour des fortes valeurs et un temps d'exposition important, la migration peut se faire dans le sens inverse entraînant une dissolution. De plus, les trois clivages principaux favorisent un débit lamellaire des cristaux.

La nature de la structure cristalline du gypse, microcristalline ou saccharoïde, conditionne son hygro-sensibilité et son comportement mécanique. Elle est également liée à l'histoire géologique du gisement.

Nos observations au microscope électronique à balayage ont permis d'identifier la nature, les causes et l'intensité du vieillissement. Les traces de dissolution relevées sur les surfaces cristallines des cristaux ont comme principale origine l'action de la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère minière. L'intensité de cette manifestation est fonction du temps. Elle décroît plus ou moins rapidement vers le cœur des piliers d'âges d'exploitation différents. L'influence du vieillissement sur les caractéristiques physico-mécaniques a été

montrée. Son intensité a pour conséquence des variations significatives des paramètres physiques comme la porosité accessible à l'eau ou bien la vitesse des ondes ultrasonores. Les conséquences sont aussi mécaniques ; à titre d'exemple, la résistance en compression uniaxiale est plus faible en peau de pilier.

Le comportement mécanique instantané des deux gypses étudiés a été décrit. Une condition expérimentale importante doit être retenue : le matériau utilisé était sec. Pour le gypse sain provenant de la carrière de Livry Gargan, il est plutôt plastique avec une rupture quasi-ductile qui devient ductile avec l'augmentation de la pression de confinement. Avec un matériau vieilli, ce comportement devient élasto-plastique avec une rupture également quasi-ductile et devenant ductile avec l'augmentation de la pression de confinement. Pour le gypse de Grozon, quel que soit l'âge d'exploitation des échantillons, le comportement mécanique instantané reste élasto-plastique avec une rupture plutôt fragile qui devient quasi-ductile avec l'augmentation de la pression de confinement.

L'étude du comportement différé des piliers de gypse a permis d'avancer l'hypothèse suivante : les accélérations et les ralentissements de convergence sont probablement dus aux conditions d'aérage et plus précisément aux variations de l'hygrométrie dans la carrière souterraine. Les essais de fluage sous hygrométrie contrôlée réalisés au laboratoire ont en partie confirmé cette hypothèse : ils ont montré l'importance de la valeur de l'hygrométrie sur les déformations différées. Les mécanismes dissolution/migration et dislocation du gypse sont supposés être à l'origine du comportement différé.

Une loi mécanique viscoélastique endommageable a été élaborée afin de décrire le comportement différé du gypse. Elle est basée sur l'unification de la loi de Lemaître et de la loi de Norton. Elle prend en compte le couplage hydro-chimico-mécanique. D'une manière générale, nous constatons une bonne corrélation entre la théorie et les courbes expérimentales puisque les déformations de fluage ainsi que la dilatance du matériau sont correctement reproduites.

Tous ces résultats ont été obtenus en suivant une démarche méthodologique afin de montrer l'influence d'un certain nombre de paramètres (contrainte, hygrométrie et intensité du vieillissement) et d'identifier les phénomènes physico-chimico-mécaniques à l'origine du vieillissement et du comportement à long terme du gypse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- AIRES-BARROS R., GRAÇA R. C., VELEZ A. (1975) – Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks, *Engineering Geology*, vol. 9, pp. 249-265.
- ASANZA CRUZ M. (1985) – Contribution à l'étude expérimentale du comportement mécanique d'un gypse et d'un calcaire : compression triaxiale quasi-statique et cyclique, analyse de la pression interstitielle, Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, 175 p.
- ASCASO C., WIERZCHOS J., SOUZA-EGIPSY V., DE LOS RIOS A., DELGADO RODRIGES J. (2002) – In situ evaluation of the biodeteriorating action of microorganisms and the effects of biocides on carbonate rock of the Jeronimos Monastery (Lisbon), *International Biodegradation & Biodegradation*, vol. 49, pp. 1-12.
- AUGER F. (1991). Vieillissement par altération atmosphérique des matériaux de construction - Etude comparative in situ et en simulation. Colloque Int. Détérioration des matériaux de construction, La Rochelle, pp. 115-129.
- BADENS E. (1998) – Etude de l'adsorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques du plâtre pris pur et additive, Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille III, 124 p.
- BAUMANN W. (1984) – Rheologische untersuchungen an gips, *Elogae geol. Helv.*, vol. 77, n°2, pp. 301-325.
- BEAUFRETE C. (1985) – Etude du rôle des facteurs géologiques dans la stabilité des carrières souterraines, *Bull. Ass. Int. Géol. Ing.*, n°32, p. 11-24
- BELL F. G. (1981) – Propriétés géotechniques de quelques roches évaporitiques, *Bull. Ass. Int. Géol. Ing.*, n°24, pp. 137-144.
- BERMAN S., BEZARD R. (1973) – Statistique – Probabilités, tome 1, éd. Chiron, 243 p.
- BEZOU C., BUISSON L., MUTIN J. C., NONAT A. (1990) – Identification chimique et radiocrystallographique de deux formes sous-hydratées de sulfate de calcium, *C. R. Académie des Sciences, Série 2*, vol. 311, n°13, pp. 1493-1498.
- BEZOU C., NONAT A., MUTIN J. C. (1995) – Investigation of the crystal structure of γ -CaSO₄, CaSO₄.0,5H₂O, and CaSO₄.0,6H₂O by powder diffraction methods, *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 117, pp. 165-176.
- BIENIAWSKI Z. T. (1976) – Rock mass classifications in rock engineering, Proc. Symposium on exploration for rock engineering, Ed. Balkema, p. 97-106
- BIENIAWSKI Z. T. (1984) – Rock mechanics designs in mining and tunnelling, Ed. Balkema, 272 p.
- BILGIN N. (1982) – Critères d'abattage des évaporites ; *Bull. Ass. Int. Géol. Ing.*, n°25, pp 85-90
- BIRCH F. (1966) – Handbook of physical constant – Compressibility, elastic constants, Geological Society of America, vol. 97, pp. 97-173.
- BLUM W. (2001) – Creep of crystalline materials: experimental basis, mechanisms and models, *Materials Science and Engineering*, p.8-15.
- BOIDY E. (2002) – Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines, Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier à Grenoble, 315 p.

- BONTE A. (1951) – Contribution à la stratigraphie du Keuper du Jura ; Bull. Soc. Géol., Fr, vol. 1, n°4, 5, 6, 319 p.
- BONVALLET J. (1978) – Critères de stabilité des exploitations souterraines à faible profondeur – Application au cas des carrières souterraines du Nord. Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, 168 p.
- BOSBACH D., RAMMENSEE W. (1994) – In situ investigation of growth and dissolution on the (001) surface of gypsum by scanning force microscopy, Geoch. Et Cosmoch., vol. 58, n°2, pp. 843-849.
- BOX G. E. P., JENKINS G. M., REINSEL G. C. (1994) – Time series analysis : forecasting and control, éd. Prentice Hall, 598 p.
- BRAITSCH O. (1971) – Minerals, rocks and inorganic materials. Salt deposit. Their origin and composition, vol. 4, ED Springer-Verlag, 297 p.
- BUSHUEV N. N., BORISOV V. M. (1982) – Crystal hydrate water in the structures CaSO_4 multiplied by $0,67\text{H}_2\text{O}$ and CaSO_4 multiplied by $0,5\text{H}_2\text{O}$, Russian Journal of Inorganic Chemistry, vol. 27, n°3, pp. 610-615.
- CAMPOS DE ORELLA A. J. (1996) – Pressure solution creep and non-associated plasticity in the mechanical behaviour of potash mine openings, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., vol 33, n°4, p. 347-370.
- CANTON Y., SOLÉ-BENET A., QUERALT I., PINI R. (2001) – Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain : laboratory and field-based experimental approaches, Catena, vol. 44, pp. 111-132.
- CAUDRON M., LABOURGUIGNE J. (1971) – Carte géologique de Lagny au 1/50000, 2^{ème} édition, notice explicative, Ed. BRGM.
- CHAMBON C., ARCAMONE J., PIGUET J. P., JOSIEN J-P. (1983) – Evaluation de la stabilité d’exploitations par chambres et piliers et comportement du toit, 5^{ème} Congrès International de Mécanique des Roches, Melbourne, pp.91-95.
- CHAN K. S., BODNER S. R., FOSSUM A. F., MUNSON D. E. (1992) – A constitutive model for inelastic flow and damage evolution in solids under triaxial compression, Mechanics of materials, vol. 14, p. 1-14.
- CHEN J., BLUME H.-P., BEYER L. (2000) – Weathering of rocks induced by lichen colonization – A review, Catena, vol. 39, pp. 121-146.
- CHEN R., BRISBIN W. C., STIMPSON B. (1993) – Mining-induced deformation in potash yield pillars, Vanscoy, Saskatchewan, Can. Geotech. J., vol. 30, p. 297-307.
- CHENE G., BASTIAN G., BRUNJAIL C., LAURENT J. P. (1999) – Vieillissement accéléré de bloc de tuffeau en laboratoire sous l’effet de cycles d’imbibition-séchage. Matériaux et constructions, vol. 32, pp. 525-532.
- CHIGIRA M., OYAMA T. (1999) – Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks, Engineering Geology, vol. 55, pp. 3-14.
- COLE W. F., LANCUCKI C. J. (1974) – A refinement of the crystal structure of gypsum, Acta Crystallographica, vol. 30, pp. 921-929.
- CONLEY R. F., BUNDY W. M. (1958) – Mechanism of gypsification, Geoch. et Cosmoch., vol. 15, pp. 57-72.

Références bibliographiques

- COOPER A. H., WALTHAM A. C. (1999) - Subsidence caused by gypsum dissolution at Ripon, North Yorkshire, Q. J. of Eng. Geology, vol. 32, pp. 305-310.
- CRISTESCU N. D., HUNSCHE U. (1997) – Time effect in rock mechanics, éd. J Wiley et Sons, 342 p.
- DEJEAN M, TRITSCH J. J. (1976) – Rapport sur des essais mécaniques de gypse de la carrière souterraine de Grozon, CERCHAR.
- DELATIEUX F., CARDELL C., TODOROV V., DEKOV V, GRIEKEN R. V. (2001) – Environmental conditions controlling the chemical weathering of the Madara Horseman monument, NE Bulgaria, Journal of Cultural Heritage, vol. 2, pp. 43-54.
- DELAUNAY J. (1977) – Principes d'une étude des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol dans un domaine d'échelle régionale ; Application : typologie des mouvements et pathologie des terrains en Touraine, Mémoire du Conservatoire National des Arts et Métiers, 219 p.
- DELETIE P., HAGUENAUER B., QUENEY B., ROBINET A. (1990) – Etude et surveillance de la dissolution du gypse sur deux sites d'ouvrages hydrauliques, Mém. Soc. Géol. France, n°157, pp. 33-42.
- DELL'ANGELLO L. N., OLGAARD D. L. (1995) – Experimental deformation of fine-grained anhydrite : evidence for dislocation and diffusion creep, J. of Geophysical Research, vol. 100, p. 15425-15440.
- DURVILLE J-L., MASSIEU E., MARTINEAU F. (1993) – Etude physico-mécanique du gypse d'une carrière souterraine en région parisienne, Geotech. Eng. Hard Soils, Ed. Anagno., pp 1427-1432
- DUSSEAUT M.B., FORDHAM C. J. (1993) – Time-dependent behavior of rocks, Comprehensive Rock Engineering, p. 119-149.
- EL GHORFI A., GIAFFERI J-L. (1991) – Galerie d'aménée de l'usine Hassan 1er (Maroc) Problèmes liés à la présence des gypses, Mém. Soc. Géol. France, n°157, pp. 40-49
- ENSMP (1972) – Caractéristiques mécaniques du gypse de Livry Gargan, carrière Aubry-Pachot
- ENSMP (1972) – Caractéristiques mécaniques du gypse de Livry Gargan, carrière Aubry-Pachot – Essais complémentaires
- FABRE D., DAYRE M. (1982) – Propriétés géotechniques de gypses et anhydrites du Trias des Alpes de Savoie, Bull. Ass. Géol. Eng., n°25, pp. 91-98
- FARRAN J., THENOZ B. (1965) – L'altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. Suppl. Ann., Inst. Tech. Bâtim. Trav. Publics, France, n°215, pp. 2729-2736.
- FASSIMA V. (1995) – New findings on past treatments carried out on stone and marble monument's surfaces, The Science of the Total Environment, vol. 167, pp. 185-203.
- FINE J. (1999) – Projet d'exploitation de gypse sous la forêt de Montmorency – Dimensionnement des méthodes d'exploitation, ENSMP.
- FINOT E., LESNIEWSKA E., GOUDONNET J-P., MUTIN J-C. (1997) – Influence des contraintes sur les propriétés élastiques de surface du gypse sondées par microscopie à force atomique, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 325, Série II b, pp. 577-586.
- FINOT E., LESNIEWSKA E., GOUDONNET J-P., MUTIN J-C., DOMENECH M., KADI A. A. (2001) – Correlating surface forces with surface reactivity of gypsum crystals

by atomic force microscopy. Comparison with rheological properties of plaster, Solid State Ionics, vol. 141-142, p. 39-46.

FINOT E., LESNIEWSKA E., MUTIN J-C., GOUDONNET J-P. (1997) – Reactivity of gypsum faces according to the relative humidity by scanning force microscopy, Surface Science, vol. 384, p. 201-217.

FLIERVERT T. F., WHITE S. H. (1995) – Quartz deformation in a very fine grained quartzo-felspathic mylonite : a lack evidence for dominant grain boundary sliding deformation, Journal of Structural Geology, vol. 17, p. 1095-1109.

FOUCAULT A., RAOULT J. F. (1995) – Dictionnaire de géologie, éd. Masson, 4^{ème} édition, 326 p.

FREEMAN B., FERGUSON C. C. (1986) – Deformation mechanism and micromechanism of rocks with distributed grain sizes, J. of Geophysical Research, vol. 91, p. 3849-3860.

FURLAN V., GIRARDET F. (1991) – Pollution atmosphérique et durabilité des pierres de construction. Colloque Int. Sur la détérioration des matériaux de construction, La Rochelle, pp. 79-91.

FUSEY P., HYVERT G. (1964) – Les altérations physico-chimiques et biologiques des grès des monuments khmers, C. R. Acad. Sci. France, vol. 258, pp. 6573-6575.

GARDNER G. H. F., GARDNER L. W., GREGORY A. R. (1974) – Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, vol. 39, n°6, pp. 770-780.

GIMPEL J. (1975) – La révolution industrielle du Moyen Age, éd. Seuil, 244 p.

GOKCEAGLU C. ULUSAY R. SONNEZ H. (2000) – Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, Engineering Geology, vol. 57, pp.215-237.

GOMEZ-ALARCON G., CILLEROS B., FLORES M., LORENZO J. (1995) – Microbial communities and alteration processes in monuments at Alcala de Henares, Spain, The Science of the Total Environment, vol. 167, pp. 231-239.

GRATIER J.-P. (1984) – La déformation des roches par dissolution-cristallisation : aspects naturels et expérimentaux de ce fluage de la croûte terrestre, Thèse d'Etat de l'Université Joseph Fourier à Grenoble, 315 p.

GRATIER J.-P. (1993) – Experimental pressure solution of halite by an indenter technique, Geophysical research letters, vol. 20, n°15, p. 1647-1650.

GRATIER J.-P. (1993) – Le fluage des roches par dissolution/cristallisation sous contrainte, dans la croûte terrestre, Bull. Soc. Géol. France, vol. 164, pp. 267-287.

GRATIER J.-P., GAMOND J. F. (1990) – Transition between seismic and aseismic deformation in the upper crust, Geological Society Special Publications, vol.54, pp.461-473.

GRATIER J.-P., RENARD F., LABAUME P. (1999) – How pressure solution creep and fracturing processes interact in the upper crust to make it behave in both a brittle and viscous manner, Journal of Structural Geology, vol. 21, p. 1189-1197.

Références bibliographiques

- GRGIC D., HOMAND F., DAGALLIER G. (2002) – Altération du minerai de fer dans les mines abandonnées de Lorraine. Revue Française de Géotechnique, n°99, pp. 49-60.
- GRIGGS D. T. (1939) – Creep of rocks, Journal of Geology, vol. 47, p. 225-251.
- GRIGGS D. T. (1940) – Experimental flow of rocks under conditions favouring recrystallisation, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 51, p. 1001-1022.
- GRIGGS D. T., HANDIN (1960) - Rocks deformation, a symposium, Geol. Soc. Amer. Mem., 382 p.
- GROB H. (1976) – Gonflement et soulèvement dans les tunnels suisses, Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°13, pp 55-60.
- GUMUSOGLU M. C., ULKER R. (1982) – Influence de la présence de gypse sur la conception des fondations, Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°25, pp. 99-105
- GUPTA A. S., SESHAGIRI RAO K. (2000) – Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. Engineering Geology, vol. 56, pp. 257-274.
- GURUNG N., IWAO Y. (1998) – Observations of deformation and engineering geology in the Lam Ta Khong tunnel, Thailand, Engineering Geology, vol. 51, p. 55-63.
- HALSEY D. P., MITCHELL D. J., DEWS S. J. (1998) – Influence of climatically induced cycles in physical weathering, Quaternary Journal of Engineering Geology, vol. 31, pp. 359-367.
- HAUPT M. (1991) – A constitutive law for rock salt based on creep and relaxation tests, Rock Mech. And Rock Eng., vol. 24, p. 179-206.
- HEIJNEN W. M. M., HARTMAN P. (1991) – Structural morphology of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), brushite ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and pharmacolite ($\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Journal of Crystal Growth, vol. 108, pp. 290-300.
- HEILBRONNER R., BRUHN D. (1998) – The influence of three-dimensional grain size distributions on the rheology of polyphase rocks, J. of Structural Geology, vol. 20, n°6, p. 695-705.
- HENKE K. F. (1976) – Grandeur absolue et relative du soulèvement dans des tunnels creusés dans CaSO_4 , Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°13, pp. 61-64.
- HIPEL, K.W., MCLEOD, A.I. (1994) – Time series modelling of water resources and environmental systems, éd. Elsevier Amsterdam, 1013 p.
- HOLLIDAY D. W. (1970) – The petrology of secondary gypsum rocks : a review, J. of Sedimentary Petrology, vol. 40, n°2, pp. 734-744.
- HUDSON J. A. (1984) - Comprehensive rock engineering, principles, practices, projects : fundamentals, vol. 1, p. 137, Ed Pergamon Press, 752 p.
- HUDSON J. A. (1984) – Comprehensive rock engineering, principles, practices, projects : excavation, support and monitoring, vol. 4, p. 392, Ed. Pergamon Press, 847 p.
- HUNSCHE U, HAMPEL A (1999) – Rock salt – The mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository, Eng Geology, n°52, p. 271-291.
- INIGO A. C., VICENTE-TAVERA S. (2001) – Different degrees of stone decay on the inner and outer walls of cloister, Building and Environment, vol. 36, pp. 911-917.

Références bibliographiques

- IRFAN T. Y., OZKAYA I. (1981) – Levé de cartes géotechniques dans les formations gypseuses, Sivas, Turquie, Bull. Ass. Int. Géol. Ing., n°24, pp. 33-37.
- JAMES A. N., KIRKPATRICK I. M. (1980) – Design of foundations of dams containing soluble rocks and soils, Q. J. Eng. Geol., vol. 13, pp. 189-198.
- JAMES A. N., LUPTON A. R. R. (1978) – Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures, Géotechnique, vol. 28, n°3, pp. 249-272.
- JAMES J. H. (1963) – An exploration report on the Grozon mine area, British Plaster Holding
- JARDIN J. (1975) – Fondation sur le gypse. Expérience acquise en région parisienne, Bull. Liaison Labo. Ponts et Chaussées, vol. 78, pp. 53-63.
- JAVEY C. (1972) – L'altération des roches et des monuments, étude documentaire – Weathering of rocks and monuments, documentary study, Bulletin BRGM, Section 3, vol. 1, pp. 39-66.
- JEANNETTE D. (2000) – Originalité des mécanismes d'altération sur les vestiges archéologiques de Délos (Cyclades, Grèce), C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes, vol. 330, pp. 683-688.
- JESCHKKE A. A., VOSBECK K., DREYBRODT W. (2001) – Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics, Geoch. Cosmoch. Acta, vol. 65, n°1, pp. 27-34.
- JOESTEN R. (183) – Grain growth and grain boundary diffusion in quartz from the Christmas Mountain (Texas) contact aureole, Am. J. Sci., vol. 283A, p. 233-254
- JONG W. F., BOUMAN J. (1959). – General crystallography, a brief compendium, éd. Freeman and Co., 281 p.
- JOSIEN J-P. (1995) – Carrières souterraines abandonnées. Risques et prévention. Diagnostic et caractérisation des aléas, Bull. Ass. Int. Géol. Ing., n°51, pp. 95-111.
- KAILL I. J. (1977) – Grozon mine, a situation report, Britisch Plaster Holding
- KAISER P. K., MORGESTERN N. R. (1981) – Time-Dependent deformation of small tunnels I-Experimental facilities, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 18, p. 129-140.
- KAISER P. K., MORGESTERN N. R. (1981) – Time-Dependent deformation of small tunnels II-Typical test data, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 18, p. 141-152.
- KARMARZSIN E., MURAT M., COMEL C. (1979) – Experimental determination of nucleation and crystal growth rates during the hydration reaction of hemihydrated calcium sulphate, Bull. Soc. Fr. Céramique, vol. 124, pp. 3-12.
- KASIM M., SHAKOOR A. (1996) – An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock types, Engineering Geology, vol. 44, pp. 213-227.
- KAZAN Y., GHOREYCHI M. (1997) – Convergence des galeries dans les formations salifères – Mesures in situ et interprétation, Revue française de Géotechnique, n°80, p. 3-16.

Références bibliographiques

- KERRIEN Y. (1982) – Carte géologique de Poligny au 1/50000, notice explicative, Ed. BRGM
- KONTOGIANNI V. A., STIROS S. (2002) – Prediction and observations of convergence in shallow tunnels : case histories in Greece, *Engineering Geology*, vol. 63, p. 333-345.
- KRAUSE H. (1976) – Les roches sulfatées dans la province de Bade-Wurtemberg et leur importance pour le génie civil, *Bull. Ass. Int. Géol. Eng.*, n°13, pp. 45-49.
- KUZEL H. J., HAUNER M. (1987) – Chemical and crystallographical properties of calcium sulfate hemihydrate and anhydrite III, *Zement-Kalk-Gips*, vol. 40, pp. 628-632.
- LAGNY P., ROUCHY J.-M., ORSZAG-SPERBER F., PIERRE C., GUILHAUMOU N. (2001) – Les évaporites, *Géochronique*, Vol. 80, 10-36.
- LEMAITRE J., CHABOCHE J.-L. (1985) – Mécanique des matériaux solides, éd. Dunod, 532 p.
- LLOYD G. E., FARMER A. B., MAINPRICE D. (1997) – Misorientation analysis and the formation and orientation of subgrain and grain boundaries, *Tectonophysics*, vol. 279, p. 55-78.
- LYON G., BESCOND B. (1996) – Roquevaire-Confortement des carrières souterraines de gypse "Maison Blanche", CETE Méditerranée.
- MACDONALD G. J. (1953) – Anhydrite-gypsum equilibrium relations, *American Journal of Science*, vol. 251, pp. 884-898.
- MANDAL P. K., MANDAL T. K. (2002) – Anion water in gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), *Cement and Concrete Research*, vol. 32, p. 313-316.
- MARTIN B., ROLLER K., STOCKHERT B. (1999) – Low-stress pressure solution experiment on halite single-crystals, *Tectonophysics*, vol. 308, p. 299-310.
- MASSIEU E. (1996) – Etude du comportement au fluage du gypse provenant d'une carrière souterraine de la région parisienne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport interne, 27 p.
- MASSIEU E., DURVILLE J-L. (1992) – Etude physico-mécanique de gypse de trois carrières souterraines de la Butte de l'Hautil, LCPC
- MASSIEU E., DURVILLE J-L. (1997) – Etude numérique du traitement des carrières souterraines abandonnées par remblaiement partiel, LCPC
- MASSUDA K. (2001) – Effects of water on rock strength in a brittle regime, *Journal of Structural Geology*, vol. 23, pp. 1653-1657.
- MEER S., SPIERS C. J. (1995) – Creep of wet gypsum aggregates under hydrostatic loading conditions, *Tectonophysics*, vol. 245, pp. 171-183.
- MEER S., SPIERS C. J. (1999) – Influence of pore-fluid salinity on pressure solution creep in gypsum, *Tectonophysics*, p. 311-330.
- MEERS S., SPIERS C. J., PEACH C. J. (1997) – Pressure solution creep in gypsum : evidence for precipitation reaction control, *Phys. Chem. Earth*, vol. 22, pp. 33-37.
- MORLIER P.-J. (1964) – Etude expérimentale de la déformation des roches, Thèse Université de Paris, Faculté des Sciences, 40 p.

- MOUSTACHI O. E. K. (1995) – Etude du comportement d'échantillons de schiste lors d'essais de compression et de fluage avec suivi ultrasonique et acoustique, Thèse de l'Université Catholique de Louvain.
- MULLER-SALZBURG L., GOTZ H. (1976) – Soulèvement du sol au cours du percement d'un tunnel, Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°13, pp.51-53.
- NETTLETON L. L. (1940) – Geophysical prospecting for oil, Ed. McGraw-Hill, 444 p.
- NF EN ISO 483. Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses pour maintenir l'humidité relative à une valeur constante. AFNOR 1999.
- NF X 15-119. Mesure de l'humidité de l'air, Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres. AFNOR 1999.
- NF EN ISO 483. Petites enceintes de conditionnement et d'essai utilisant des solutions aqueuses pour maintenir l'humidité relative à une valeur constante, AFNOR 1999
- NF P 94-410-1. Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches. Partie 1 – Détermination de la teneur en eau pondérale – Méthode par étuvage, AFNOR 2001
- NF P 94-410-2. Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches. Partie 2 – Détermination de la masse volumique – Méthode géométrique et par immersion dans l'eau, AFNOR 2001
- NF P 94-410-3. Essais pour déterminer les propriétés physiques des roches. Partie 3 – Détermination de la porosité, AFNOR 2001
- NF P 94-411. Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores en laboratoire, AFNOR 2002
- NF P 94-420. Détermination de la résistance à la compression uniaxiale, AFNOR (en projet)
- NF P 94-422. Détermination de la résistance à la traction indirecte, AFNOR 2001
- NF P 94-423. Détermination de la résistance à la compression triaxiale, AFNOR 2002
- NF P 94-425. Détermination du module de Young et du coefficient de Poisson, AFNOR 2002
- NF X 15-119. Mesure de l'humidité de l'air, Générateurs d'air humide à solutions salines pour l'étalonnage des hygromètres, AFNOR 1999
- NORBURY D., HENCHER S., CRIPPS J., LUMSDEN A. (1995) – The description and classification of weathered rocks for engineering purposes-Geological Society Engineering Group Working Party Report, Quarterly Journal of Engineering Geology, vol. 28, pp. 207-242.
- NORTON F.H. (1929) – Creep of steel at high temperatures, éd. McGraw-Hill Book Company, NY, 90 p.
- OGNIBEN L. (1955) – Inverse graded bedding in primary gypsum of chemical deposition, Journal of Sedimentary Petrology, vol. 25, pp. 273-281.
- OLGAARD D. L., KO S-C., WONG T-F. (1995) – Deformation and pore pressure in dehydrating gypsum under transiently drained conditions, Tectonophysics, vol. 245, pp. 237-248
- OYAMA T., CHIGIRA M. (1999) – Weathering rate of mudstone and tuff on old unlined tunnel walls, Engineering Geology, vol. 55, pp. 15-27.

Références bibliographiques

- PANET M. (1976) – La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 235 p.
- PAPADOPoulos Z., KOLAITI E., MOURTZAS N. (1994) – The effect of crystal size on geotechnical properties of Neogene in Crete, Q. J. Eng. Geol., vol. 27, pp. 267-273
- PIGUET J. P., TRITSCH J. J. (1986) – Gisement de gypse de Bergholtz. Etude complémentaire des possibilités d'exploitation en carrière souterraine, CERCHAR
- POCHAN J., JATON C. (1967) – The role of microbiological agencies in the deterioration of stone, Chem. Ind., pp. 1587-1589;
- POSNAJK E. (1940) – Deposition of calcium sulfate from sea water, American Journal of Science, vol. 238, pp. 559-568.
- POUYA A. (1991) – Comportement rhéologique du sel gemme. Application à l'étude des excavations souterraines, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 211 p.
- RABOTNOV N. (1969) – Creep problems in structural members, North Holland Publ. Compagny, p. 176-266.
- RAMANA Y. V., GOGTE B. S. (1982) – Quantitative studies of weathering in saprolized charnockites associated with a landslip zone at the Porthimund dam, India, Engineering Geology, vol. 19, pp. 29-46.
- RENARD F., GRATIER J.-P., JAMTVEIT B. (2000) – Kinetics of crack-sealing, intergranular pressure solution, and compaction around active faults, Journal of Structural Geology, vol. 22, p. 1395-1407.
- RICKEN W. (1986) – Diagenetic bedding; Ed. Springer Verlag, 210 p.
- ROBINET A. (1990) – Le comportement du gypse soumis à la dissolution. Exemple du réservoir du Mont Cenis (Savoie), surveillance de l'évolution et évaluation quantitative du phénomène. Thèse de Doctorat de l'université de Nancy, 122 p.
- RODE N., HOMAND-ETIENNE F., BOTH J. (1989) – Analyse des effondrements de carrières souterraines de Gironde, France, Bull. Ass. Int. Géol. Ing., n°39, p. 137-143
- ROLNIK E. (1984) – Dimensionner aujourd'hui un stockage de déchets de haute activité dans le sel gemme : quelle rhéologie ?, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Mines de Paris, 240 p.
- ROZIERE A., ROQUES G. (1982) – Des cavités karstiques sous les voies ferrées à Beaucaire, Tunnel et ouvrages souterrains, vol. 51, p. 12-137.
- SAITO T., ARAKI H., KAMEOKA Y., HIRAMATSU Y. (1986) – Increasing the extraction ratio at Yanahara mine and an associated programme of field measurements, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 23, n°1, p. 77-83.
- SHERWOOD J. N., RISTIC R. I. (2001) – The influence of mechanical stress on the growth and dissolution of crystals, Chemical Engineering Science, vol. 56, p. 2267-2280.
- SIMECSOL (1995) – Plâtre Lambert-Tranchée de taverny-Campagne de reconnaissance de sol, rapport de synthèse géologique
- SIPPLE E.-M. (1999) – Réarrangements structuraux et modifications microstructurales associés aux transformations de phases dans le système CaSO_4 (s) – H_2O (g), Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, 140 p.

- SIPPLE E-M., BRACONNI P., DUFOUR P., MUTIN J-P. (2001) – Electronic microdiffraction study of structural modifications resulting from the dehydration of gypsum. Prediction of the microstructure of resulting pseudomorphs. Solid State Ionics, vol. 141-142, p. 455-461.
- SIPPLE E-M., BRACONNI P., DUFOUR P., MUTIN J-P. (2001) – Microstructural modifications resulting from the dehydration of gypsum. Solid State Ionics, vol. 141-142, p. 447-454.
- SPIERS C. J. (1984) – Fluid-assisted grain boundary migration in rock salt, Colloque sur les matériaux géologiques, Université de Jussieu.
- THORIN R. (1995) – Prise en compte dans l'urbanisme des risques d'effondrements des carrières souterraines de gypse abandonnées du massif de l'Hautil, Inspection Générale des Carrières des Yvelines, de l'Essonne et du Val d'Oise, Rapport interne, 12 p.
- TOULEMONT M. (1988) – Prévision des risques d'évolution des anciennes carrières souterraines de gypse de la région parisienne, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°158, pp. 5-17.
- TREPIED L., DOUKHAN J. C., PAQUET J. (1980) – Subgrain boundaries in quartz. Theoretical analysis and microscopic observations, Phys. Chem. Mineral, vol. 105, p. 176-180.
- TRITSCH J. J., DEJEAN M. (1976) – Rapport sur des essais mécaniques de gypse de la carrière souterraine de Grozon, CERCHAR.
- VACHAT J.C. (1982) – Les désordres survenant dans les carrières souterraines de la région parisienne. Thèse de Doctorat du Conservatoire National des Arts et Métiers, 276 p.
- VILES H. A., MOSES C. A. (1998) – Experimental production of weathering nanomorphologies on carbonate stone, Quaternaly Journal of engineering Geology, vol. 31, pp. 347-357.
- WATELET J-M. (1991) – Carrière souterraine de gypse de Prat-Bonrepaux. Stabilité et dimensionnement, INERIS.
- WATELET J-M., TRITSCH J.-J. (1996) – Carrière de Bessancourt-Etude de la faisabilité d'un nouveau dimensionnement, INERIS
- WATELET J-M., TRITSCH J.-J. (1996) – Etude de la faisabilité d'un nouveau dimensionnement de la carrière de Bessancourt, INERIS
- WILLIAMS S. C. (1988) – The shear strength of gypsum single crystal on three cleavage planes, Tectonophysics, vol. 148, pp. 163-173.
- WILSON A. H., ASHWIN B. (1972) – Research into the determination of pillar size, The Mining Engineer, vol. 131, p. 409-430.
- WINKLER E. M. (1966) – Important agents of weathering for building and monumental stone, Engineering Geology, vol. 1, pp. 381-400.
- WINKLER E. M. (1975) – Applied Mineralogy, Stone : properties, durability in man's environment, 2^{ème} edition, éd. Springer-Verlag, 230 p.
- YUZER E. (1982) – Propriétés géotechniques des évaporites et formations évaporitiques de Turquie, Bull. Ass. Int. Géol. Eng., n°25, pp. 107-110.

ANNEXES



ANNEXES CHAPITRE 4

Annexe 4.1 – Paramètres de la caractérisation physique

Annexe 4.2 – Présentation des essais mécaniques

Annexe 4.3 – Livry Gargan – Courbes contrainte-deformation

Annexe 4.4 – Grozon – Courbes contrainte-deformation

ANNEXE 4.1 – PARAMETRES DE LA CARACTERISATION PHYSIQUE

1. DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS AU PYCNOMETRE A HELIUM

La détermination de la masse volumique se fait à partir des masses et des volumes réels. Le pycnomètre détermine les volumes réels par mesure d'une variation de pression d'hélium dans un volume calibré.

Le matériau nécessaire se trouve sous la forme de poudre dont 95 % est de granulométrie inférieure à 80 µm. Elle est obtenue par broyage dans une broyeuse annulaire, dite FABIOLA. Avant de procéder au broyage, le matériau doit être exempt d'humidité, il faut le passer à l'étuve à 50 °C. La masse volumique moyenne est exprimée en g/cm³.

2. DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE

L'essai est mené suivant la norme NF P 94-410-2 sur une éprouvette cylindrique et d'élancement 2 passée au préalable à l'étuve à 50 °C. Elle est mesurée au pied à coulisse : 6 diamètres et 2 hauteurs. Ces mesures permettent de calculer le volume de l'éprouvette :

$$V(\text{cm}^3) = \frac{\pi * D^2 * H}{4} \quad (4.1.1)$$

D (cm) : Moyenne des 6 diamètres

H (cm) : Moyenne des 2 hauteurs

La masse volumique sèche est donc calculée de la manière suivante :

$$\rho_d (\text{g/cm}^3) = \frac{M}{V} \quad (4.1.2)$$

M (g) : Masse de l'éprouvette sèche

V (cm³) : Volume de l'éprouvette

3. DETERMINATION DE LA TENEUR EN GYPSE

La détermination du pourcentage de gypse par rapport à l'anhydrite se fait de la manière suivante : la masse volumique des grains d'un gypse pur (ρ_G) est égale à 2,32 g/cm³ et celle de l'anhydrite (ρ_A) est de 2,93 g/cm³. Les échantillons prélevés ne contenant que du gypse et de l'anhydrite suite à des analyses en diffraction aux rayons X et thermogravimétriques, la détermination de la masse volumique des grains (ρ_m) permet de calculer, en volume, ce pourcentage gypse-anhydrite :

$$G = \frac{\rho_m - \rho_A}{\rho_G - \rho_A} * 100 \quad (4.1.3)$$

teneur en gypse (%) :

$$A = \frac{\rho_m - \rho_G}{\rho_A - \rho_G} * 100 \quad (4.1.4)$$

teneur en anhydrite (%) :

4. DETERMINATION DE LA POROSITE AU MERCURE

L'essai de porosimétrie permet d'approcher la géométrie du milieu poreux en donnant la répartition de la dimension des seuils de pores, une mesure des porosités libre et piégée et leur répartition en fonction de leurs rayons d'accès.

L'échantillon nécessaire doit mesurer environ 2,5 cm X 1,5 cm X 1,5 cm. Ce volume peut poser problème vis à vis de la représentativité du matériau. Le passage à l'étuve à 50 °C est également nécessaire.

Deux injections de mercure espacées de 24 heures permettent de déterminer différents paramètres. Tout d'abord, un histogramme de distribution de taille des accès aux pores permet d'observer le nombre de familles. La courbe de porosité cumulée permet également de voir à chaque point d'inflexion les différentes familles de pores. La courbe de la deuxième injection permet la mesure de la porosité libre (n_{Hg} en %) et sa répartition réelle pour des rayons d'accès donnés.

5. DETERMINATION DE LA POROSITE TOTALE

Ce paramètre est calculé à partir des masses sèches, des masses saturées en eau et de la masse volumique des grains. Il est déterminé suivant la norme NF P 94-410-3. L'eau saturant les éprouvettes est préalablement neutralisée avec du sulfate de calcium pour éviter toute dissolution de la roche. Le calcul est le suivant :

$$n_{tot.} (\%) = 1 - \left(\frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \cdot 100 \quad (4.1.5)$$

6. DETERMINATION DE LA POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

Ce paramètre est calculé à partir de la masse volumique sèche et de la masse volumique des grains. Il est déterminé suivant la norme NF P 94-410-3. Il dépend donc du volume de l'éprouvette et de sa masse sèche mais aussi du calcul au pycnomètre à hélium, de la masse volumique des grains. La relation s'écrit de la manière suivante :

$$n_w (\%) = \left(\frac{M_{sat.} - M_{sec.}}{M_{sat.} - A} \right) \cdot 100 \quad (4.1.6)$$

$$A = M_{sec.} \left[\left(\frac{(\rho_s * \rho_w) - 1}{\rho_s * \rho_w} \right) \right]$$

$M_{sat.}$ (g) : Masse de l'éprouvette saturée en eau

$M_{sec.}$ (g) : Masse de l'éprouvette sèche

ρ_s (g / cm³) : Masse volumique des grains

ρ_w (g / cm³) : Masse volumique de l'eau à 20 °C

7. DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU NATURELLE PONDERALE

La teneur en eau naturelle pondérale est une caractéristique du matériau *in situ*. Elle est déterminée suivant la norme NF P 94-410-1. elle est mesurée par une différence de masse d'un échantillon avant et après passage à l'étuve. L'échantillon prélevé *in situ* doit être conditionné de telle sorte qu'il n'y ait ni apport, ni évaporation d'eau par rapport à l'état naturel.

Dans le cas du gypse, l'échantillon a été enveloppé sur le terrain dans un film plastique puis emballé dans du papier d'aluminium et enfin mis dans un sac plastique fermé. Après la pesée initiale, l'échantillon est mis à l'étuve à 50 °C pendant 24 heures. Les pesées suivantes sont espacées de 8 heures minimum. Quand les différences de masses entre deux pesées sont négligeables, le calcul de la teneur en eau peut être effectué avec l'expression suivante :

$$W_{\text{nat.}} (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100 \quad (4.1.7)$$

M_1 (g) : Masse initiale

M_2 (g) : Masse finale après étuvage

8. DETERMINATION DU DEGRE DE SATURATION

Ce paramètre est calculé à partir de la teneur en eau pondérale naturelle, de la masse volumique sèche et de la masse volumique des grains.

$$Sr(\%) = \frac{\rho_d * W_{\text{nat.}}}{\left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) * \rho_w} * 100 \quad (4.1.8)$$

$W_{\text{nat.}}$ (%) : Teneur en eau pondérale naturelle

ρ_d (g / cm³) : Masse volumique sèche

ρ_s (g / cm³) : Masse volumique des grains

ρ_w (g / cm³) : Masse volumique de l'eau à 20 °C

9. DETERMINATION DE LA PERMEABILITE A L'AZOTE

L'essai est conduit de la manière suivante : une pression de confinement est maintenue constante autour de l'éprouvette tandis qu'une pression d'injection est assurée par de l'azote. La lecture du débit d'azote à travers l'éprouvette est enregistrée quand le débit a atteint un régime permanent. La perméabilité intrinsèque est calculée de la manière suivante :

$$K_N (\text{m}^2) = \frac{2 * Q * \mu * L * P_a}{(P_i^2 - P_f^2) * S} \quad (4.1.9)$$

Q (m³/s) : débit mesuré par un débitmètre à bulle ou à bille

μ (Pa.s) : viscosité du fluide

L (m) : longueur de l'éprouvette

P_a (Pa) : pression atmosphérique

P_i et P_f (Pa) : pression d'injection et pression aval

S (m²) : surface d'injection

10. Détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores P et S

L'essai est conduit de la manière suivante (norme NF P 94-411) : un générateur envoie une impulsion électrique à un transducteur piézo-électrique qui la transforme en une onde mécanique. Cette onde se propageant à travers l'échantillon – une éprouvette cylindrique – est reçue par un transducteur/récepteur qui la convertit en impulsions électriques. Un oscilloscope permet la visualisation de ce signal ainsi que la détermination de son temps de parcours.

Les grandeurs mesurées sont les vitesses des ondes ultrasonores longitudinales (V_p) et transversales (V_s), mais aussi les coefficients élastiques dynamiques (module de Young dynamique et coefficient de Poisson dynamique) calculés à partir des ondes P et S par les formules suivantes :

$$E = \left[(\rho / 1000) * V_p^2 \frac{(1 + v)(1 - 2v)}{(1 - v)} \right] / 1000 \text{ (GPa)} \quad (4.1.10)$$

$$v = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2}{1 - \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2} \quad (4.1.11)$$

E : module de Young (GPa)

v : coefficient de Poisson

ρ : masse volumique de la roche (g.cm⁻³)

V_p et V_s : vitesses des ondes longitudinales et transversales (m.s⁻¹)

ANNEXE 4.2 – PRESENTATION DES ESSAIS MECANIQUES

1. ESSAI DE TRACTION INDIRECTE : ESSAI BRESILIEN

La procédure employée est celle de la Société Internationale de Mécanique des Roches, reprise par l'ASTM. Elle reprend la norme NF P 94-422. La mesure effectuée est une résistance à la rupture d'un cylindre de roche comprimé suivant deux génératrices diamétralement opposées. L'effort de compression simple appliqué selon les génératrices a une vitesse constante de 100 N s^{-1} . Pour que l'essai soit validé, la rupture doit s'amorcer au centre de l'éprouvette et se propager suivant le plan diamétral vertical. Afin de ne pas être influencé par les hétérogénéités de la matrice rocheuse, le positionnement de l'éprouvette se fera toujours de la même manière : l'orientation ouest étant toujours connue sur l'éprouvette, elle sera dirigée systématiquement vers le plateau supérieur. Cette orientation est donc purement arbitraire. La résistance à la traction est calculée par :

$$\sigma_{\tau} (\text{MPa}) = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4.2.1)$$

P (N) : effort à la rupture

D (mm) : diamètre moyen de l'éprouvette

L (mm) : longueur moyenne de l'éprouvette

L'état de contrainte au centre de l'éprouvette, au moment de la rupture, est représenté par une contrainte de compressions verticale σ_y et horizontale σ_x égale à :

$$\sigma_y (\text{MPa}) = \frac{6P}{\pi DL} \quad (4.2.2)$$

$$\sigma_x (\text{MPa}) = \sigma_{\tau} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4.2.3)$$

2. ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE

L'essai de compression est effectué suivant la norme NF P 94-420 avec enregistrement simultané du déplacement des capteurs LVDT, des déformations axiales ε_a ou ε_1 et des déformations transversales ε_t ou ε_3 des jauge. Seule n'est considérée que la moyenne des mesures suivant une direction, après élimination éventuelle des valeurs estimées comme aberrantes (mauvais fonctionnement d'une jauge, rupture prématurée d'une jauge). La déformation volumique de l'échantillon durant l'essai a pour expression :

$$\Delta V/V = \theta = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (4.2.4)$$

3. ESSAI DE COMPRESSION TRIAXIALE

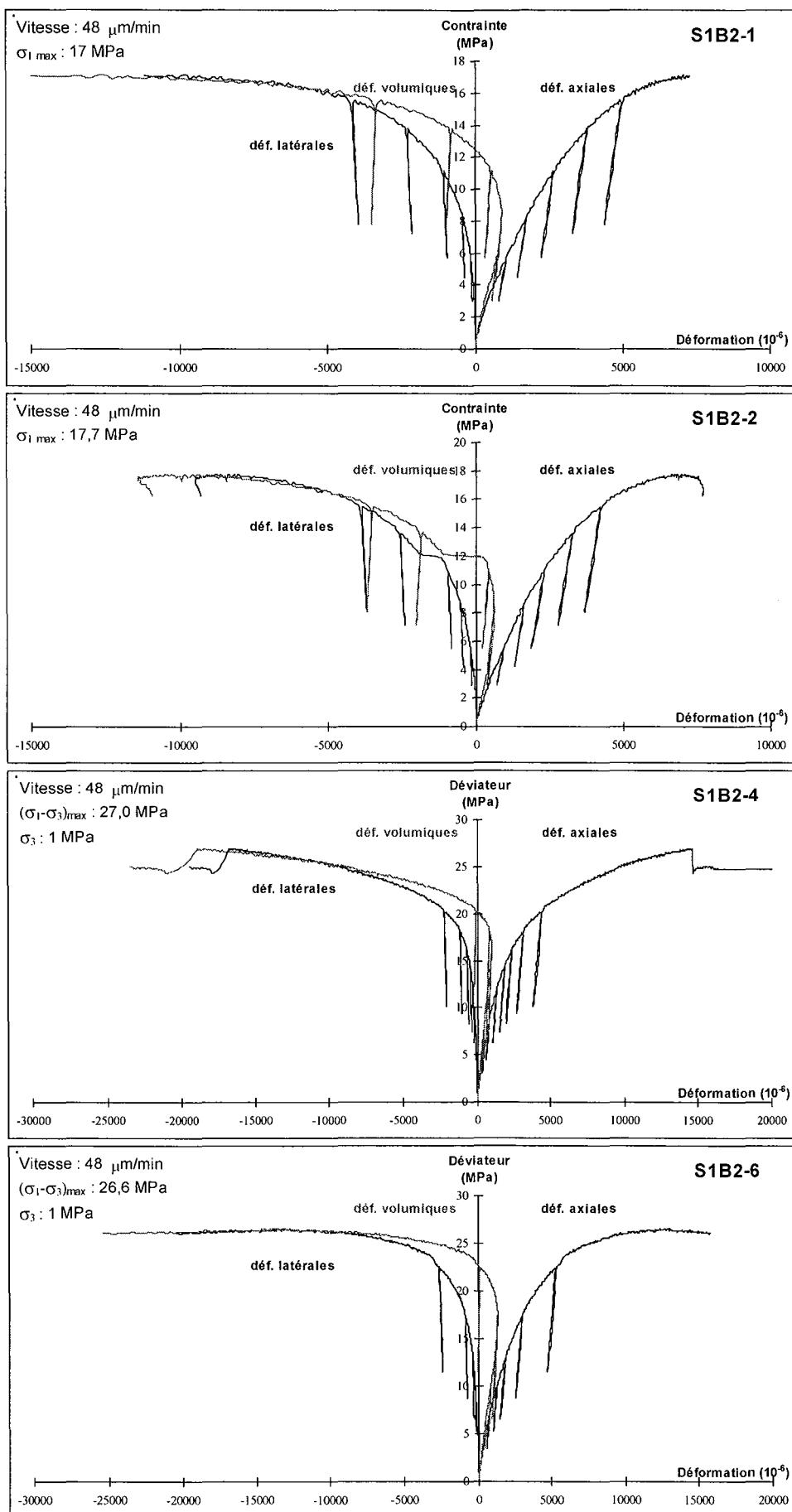
Cet essai est réalisé suivant la norme NF P 94-423 sur des éprouvettes identiques à celles de l'essai de compression uniaxiale. Il s'agit d'un essai triaxial de révolution où $\sigma_2 = \sigma_3 = P_c$ (pression de confinement). L'éprouvette est placée dans une jaquette étanche et souple. L'essai est conduit en imposant d'abord un chargement hydrostatique $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_c$. Puis la contrainte axiale est augmentée en respectant une consigne de vitesse de déformation constante à partir du signal des capteurs LVDT, de 10^{-5} s^{-1} jusqu'au maximum qui correspond à la résistance à la compression triaxiale.

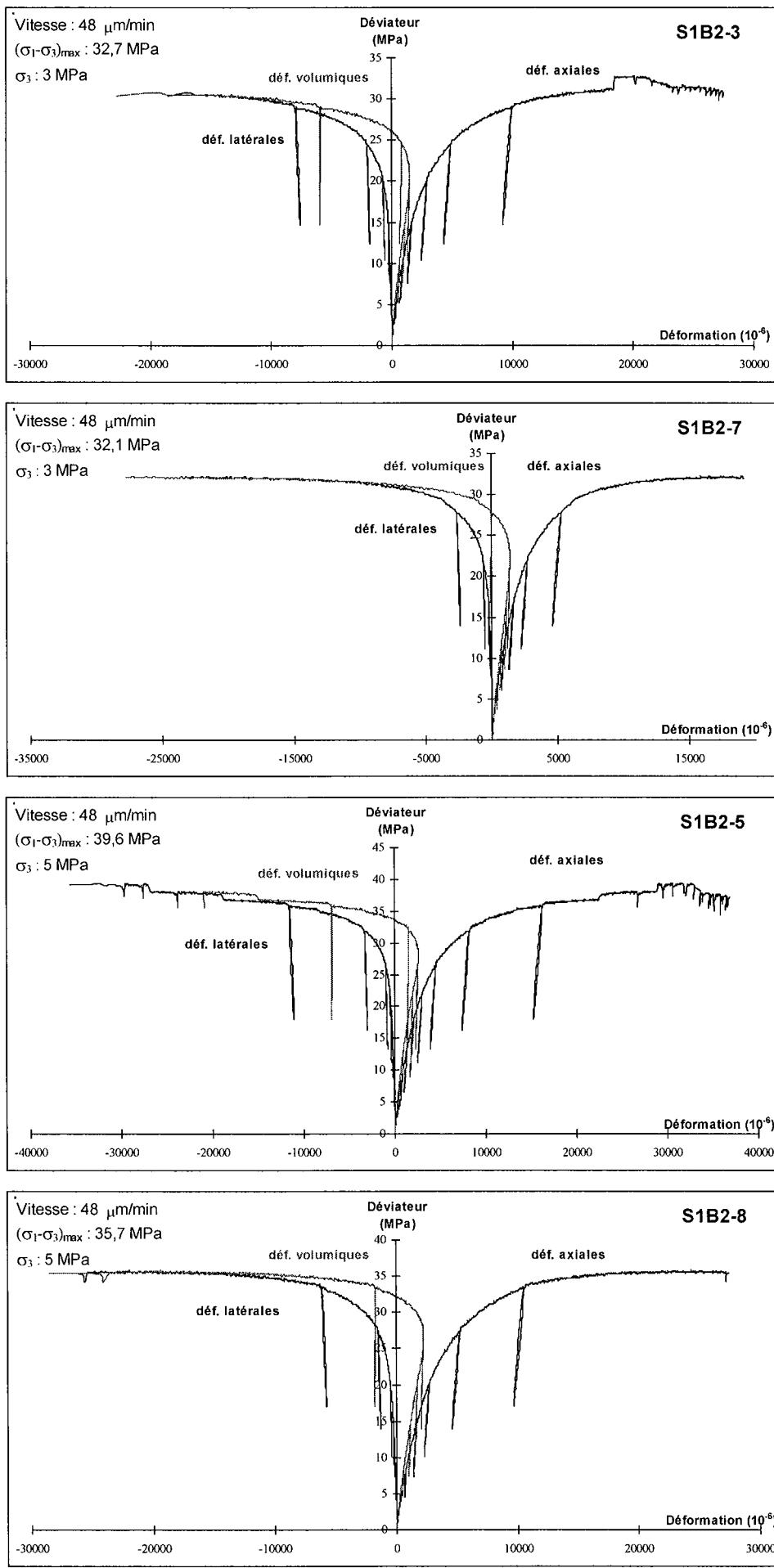
L'éprouvette est testée telle que : aucun fluide n'est introduit dans la roche. L'essai est réalisé à vitesse de déformation constante jusqu'à la rupture pour un confinement donné. Les confinements utilisés sont de 1, 3 et 5 MPa.

4. ESSAI DE COMPRESSION ISOTROPE

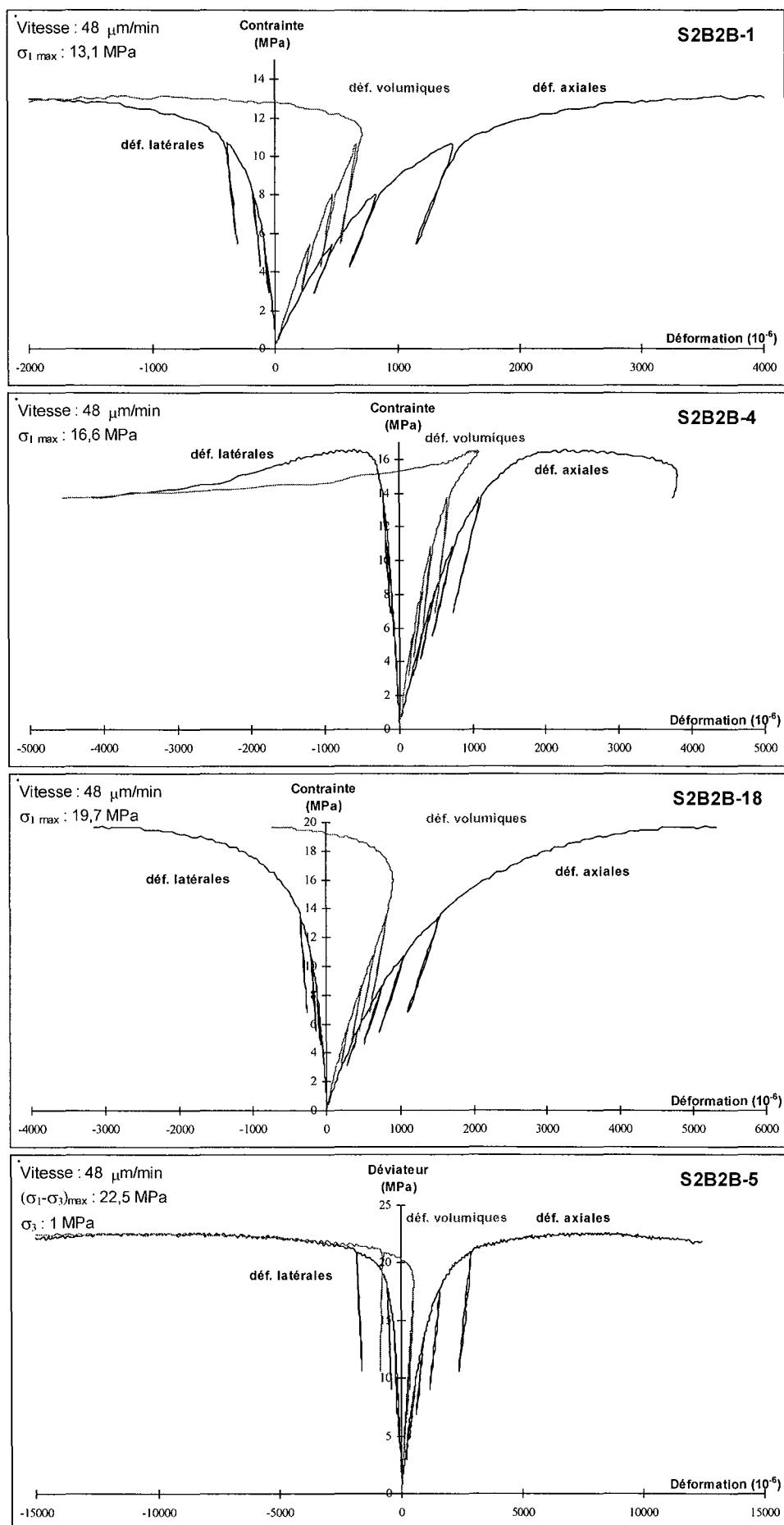
Cet essai consiste à mesurer les déformations d'une éprouvette de roche soumise à une pression hydrostatique P croissante ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Pour un matériau non fissuré, les courbes contrainte-déformation obtenues sont linéaires. Si les courbes présentent une concavité tournée vers le haut avant de devenir linéaire, le matériau testé initialement était microfissuré. L'intersection de la partie linéaires de la courbe des déformations volumiques avec l'axe des abscisses donne la valeur de la porosité de fissure initiale N_f .

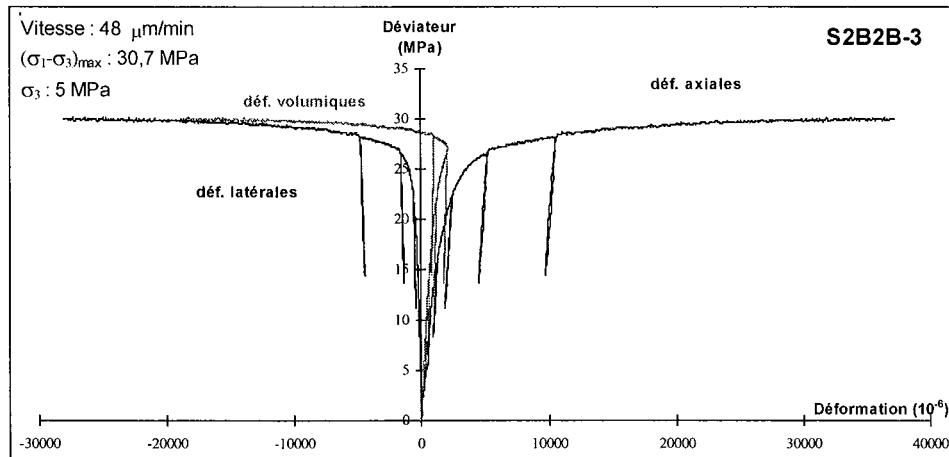
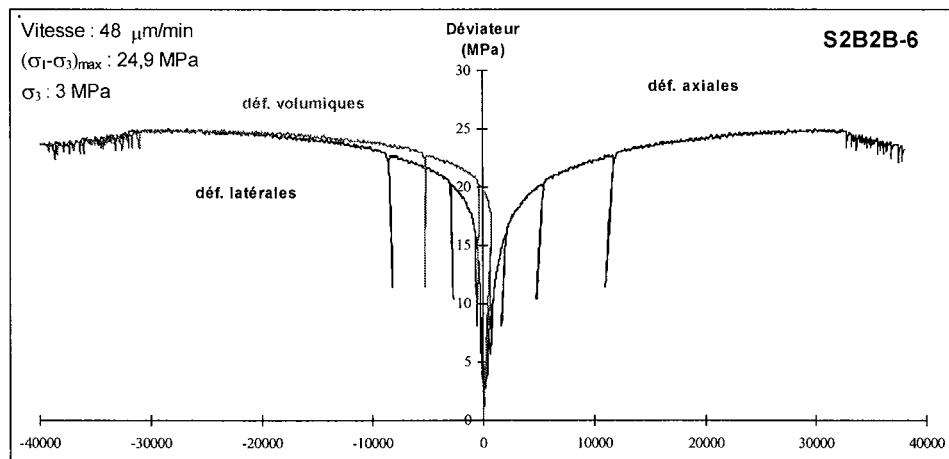
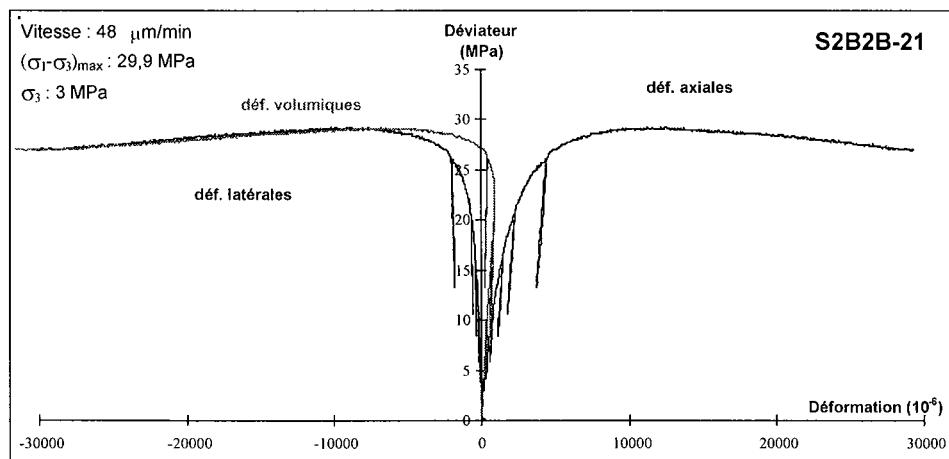
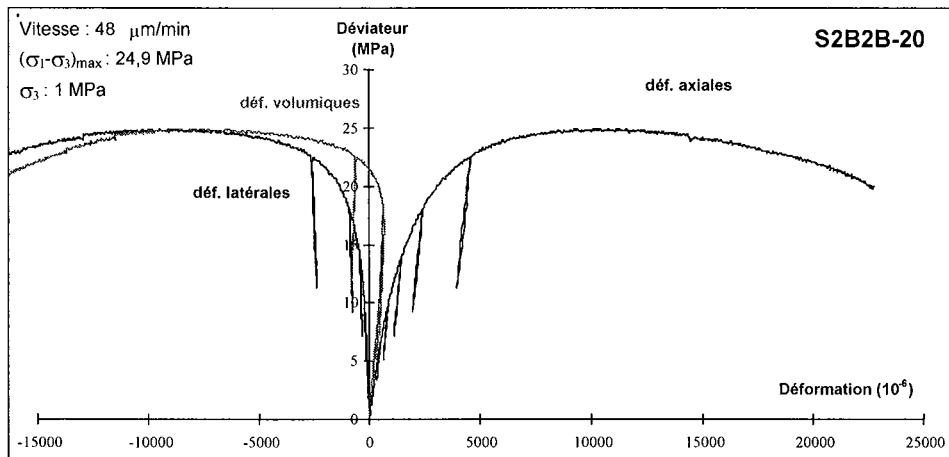
ANNEXE 4.3 – LIVRY GARGAN – COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION
Age d'exploitation 2000 – Prélèvement : blocs

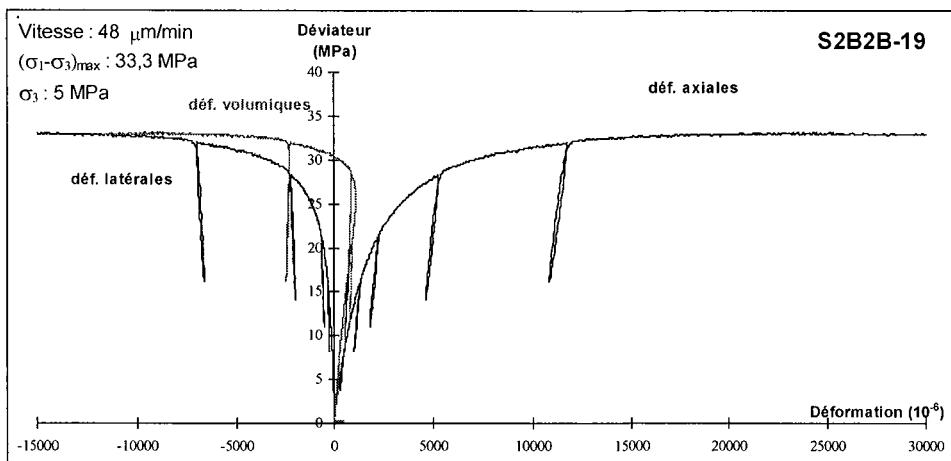




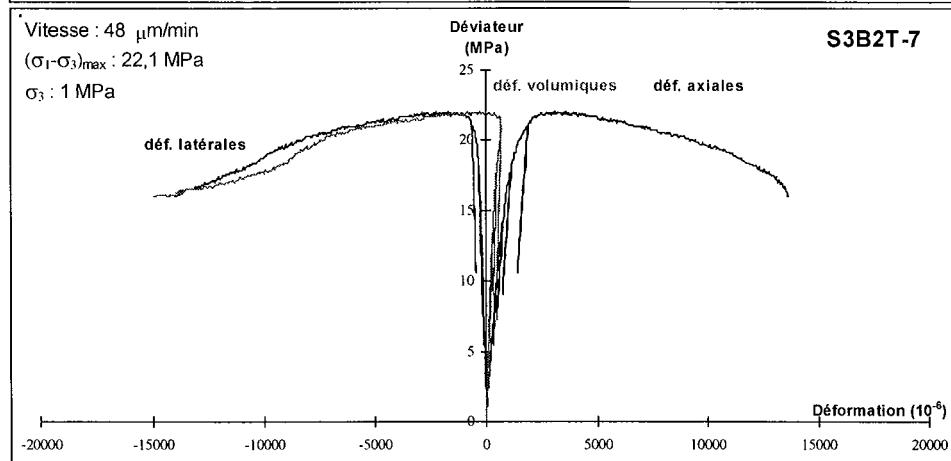
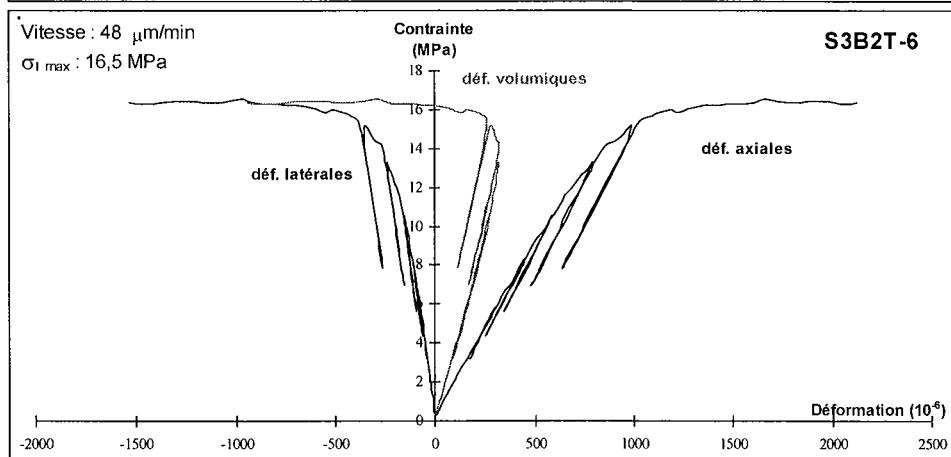
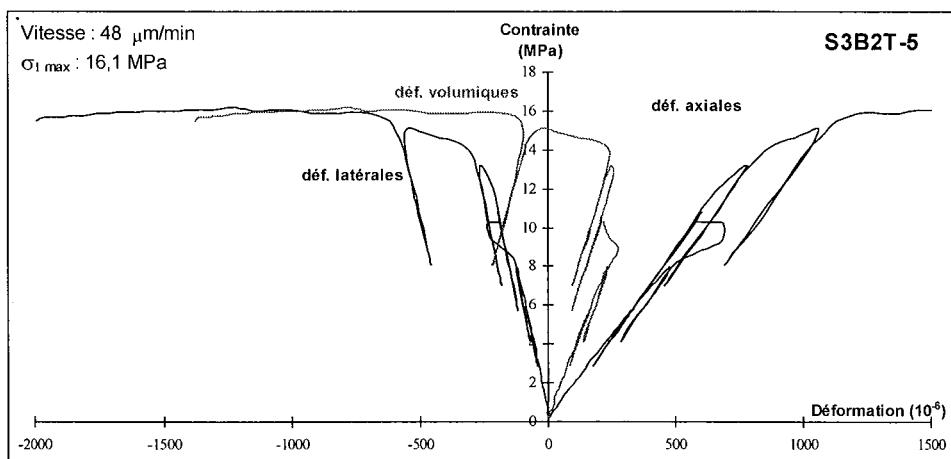
Age d'exploitation 1950 – Prélèvement : blocs

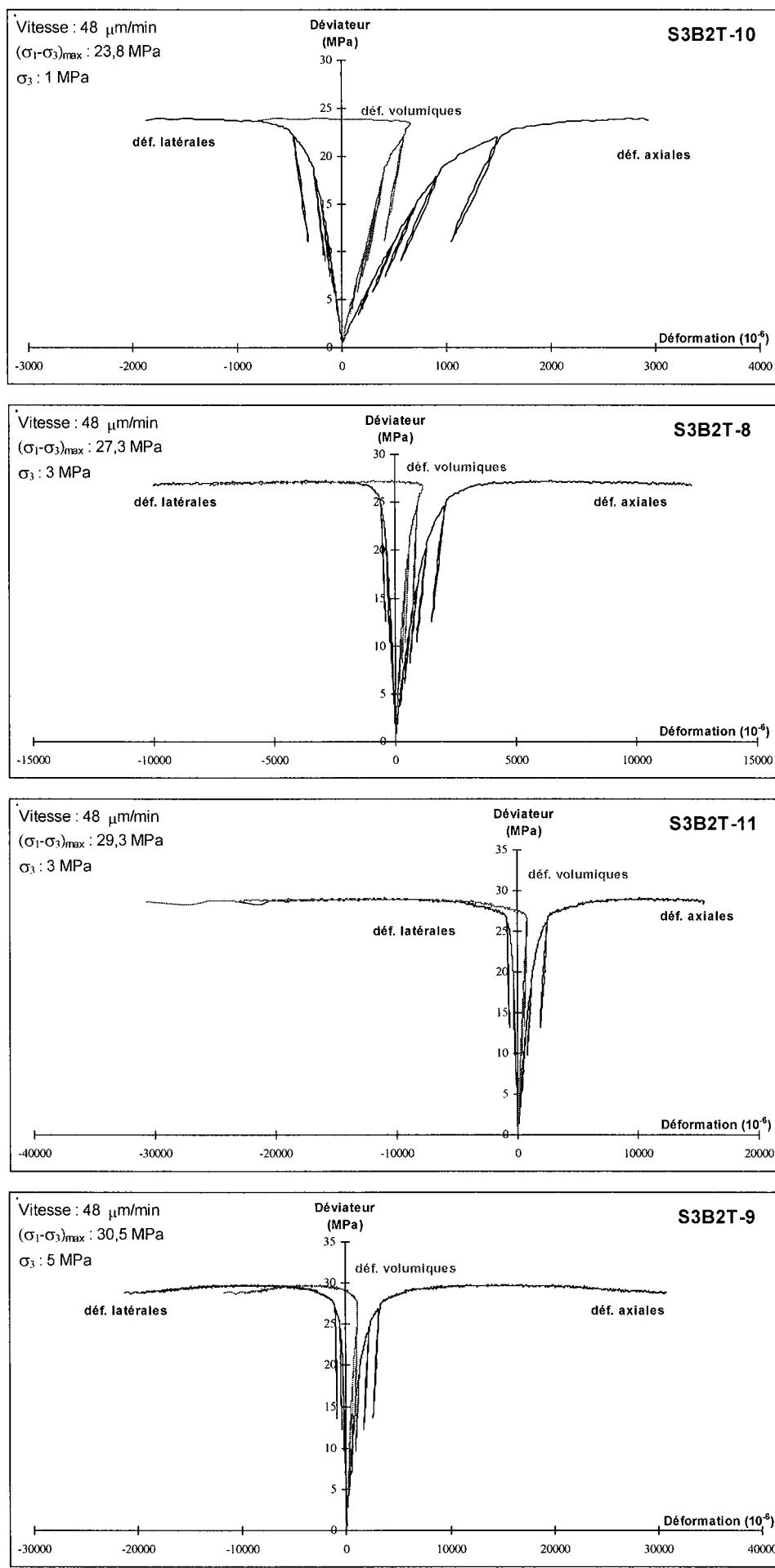


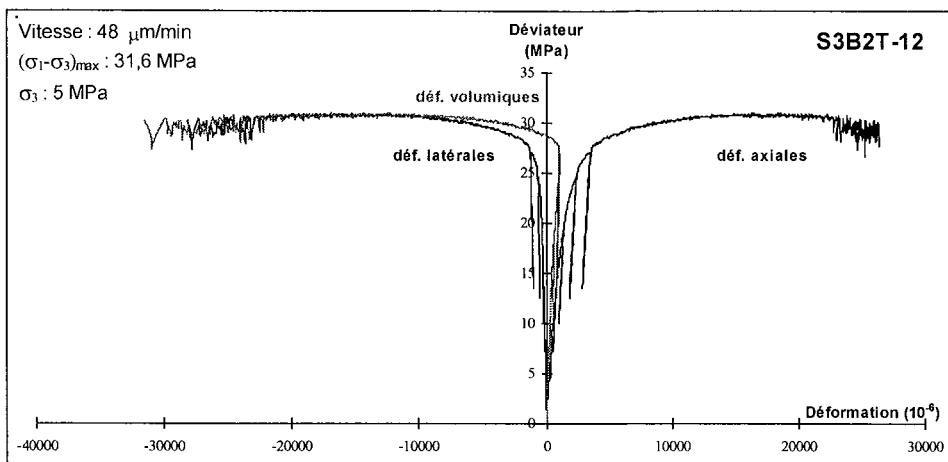




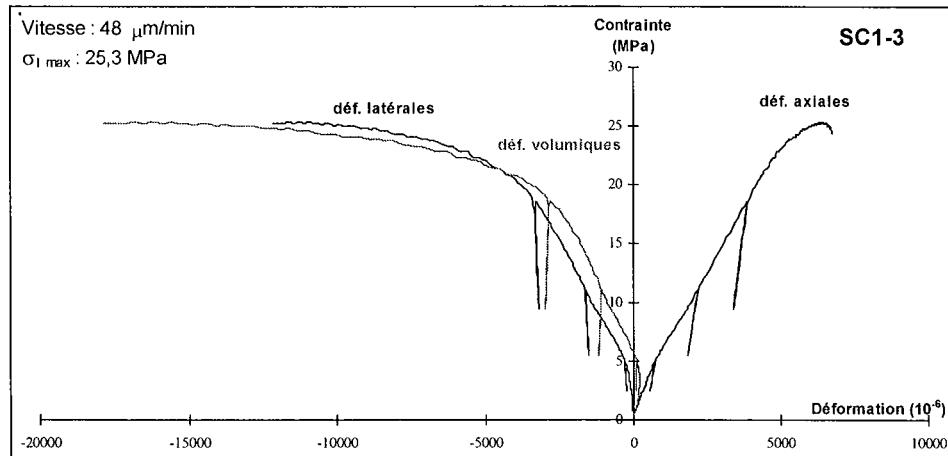
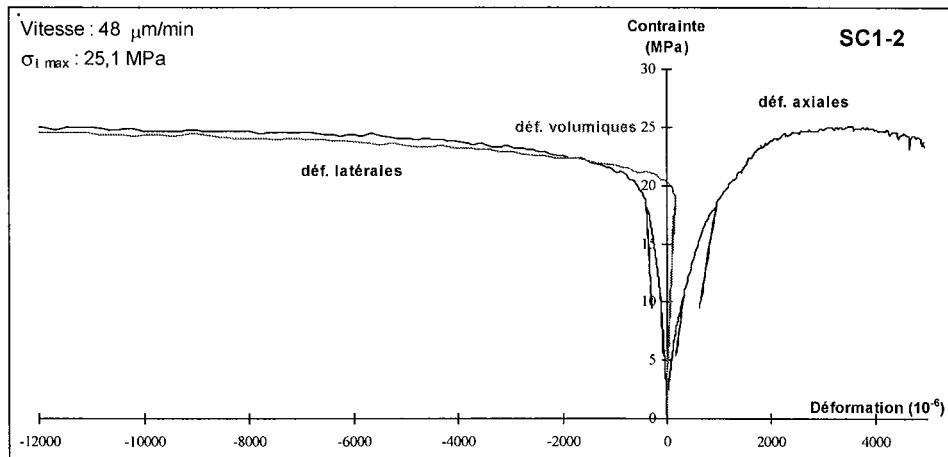
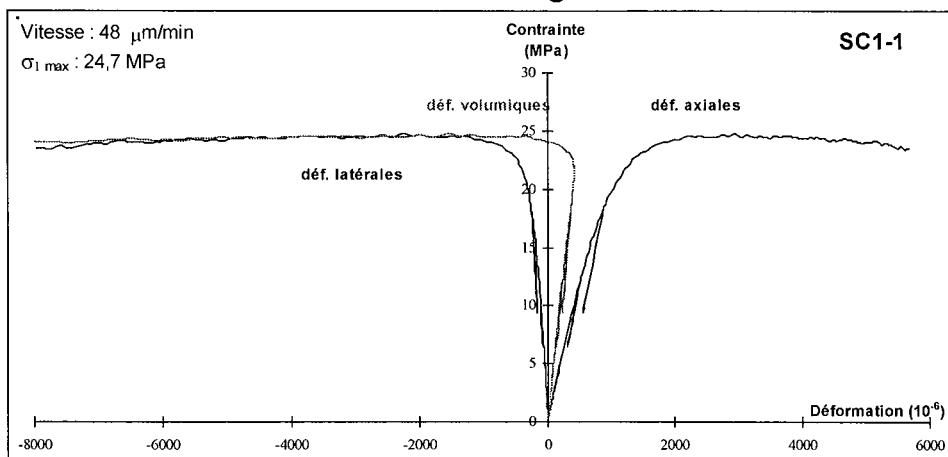
Age d'exploitation 1900 – Prélèvement : blocs

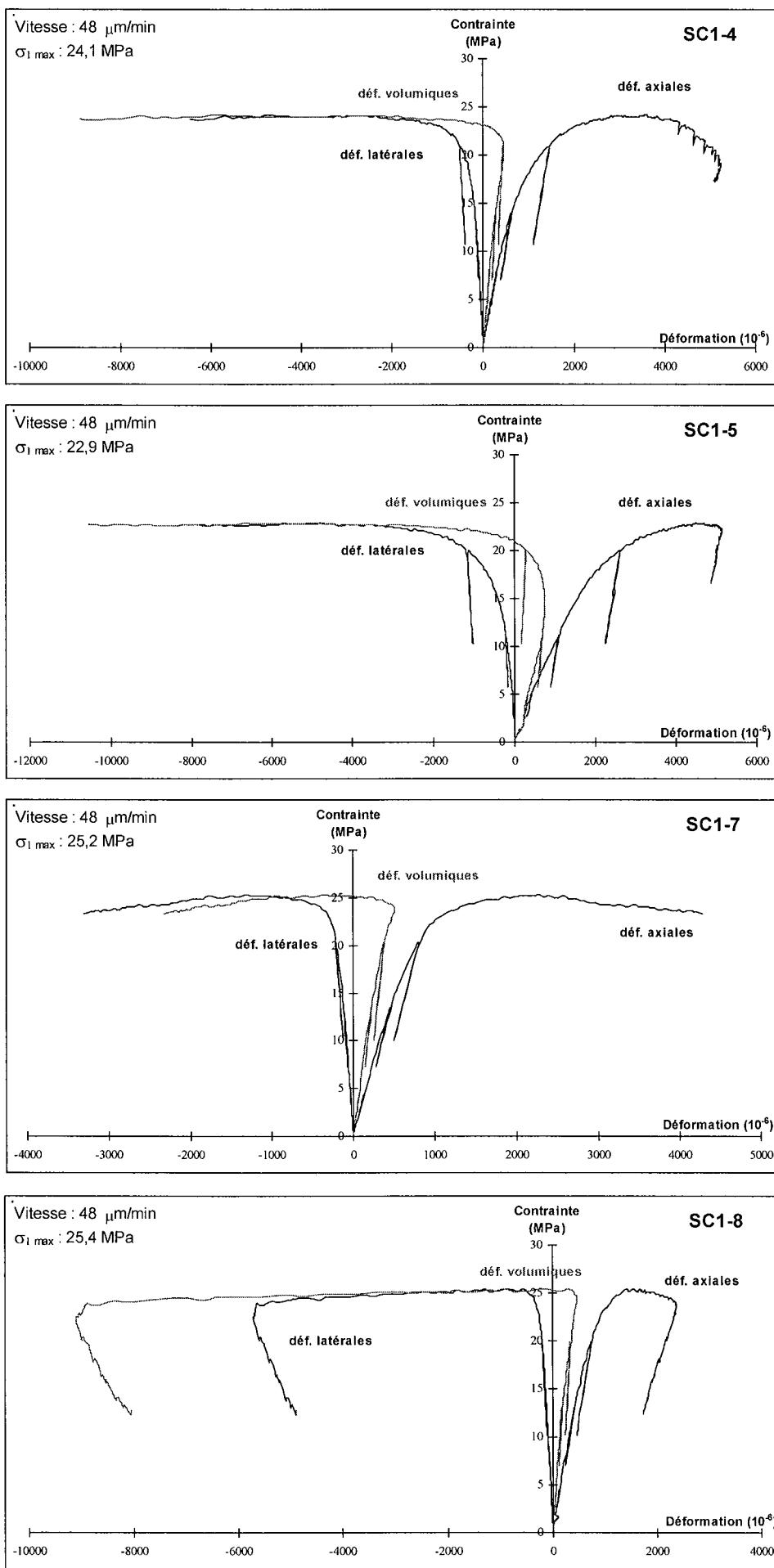


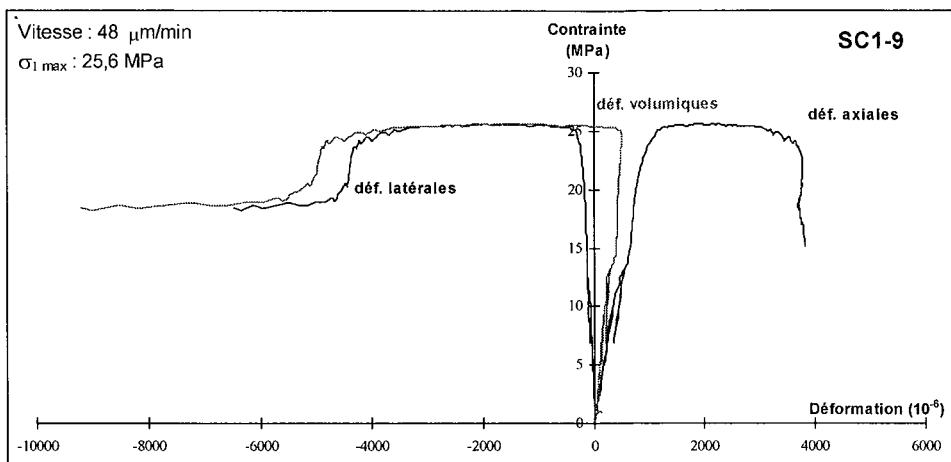




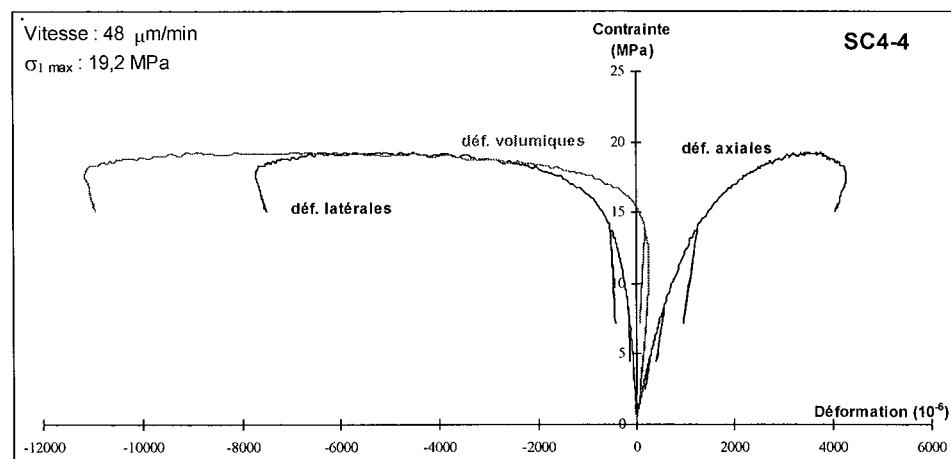
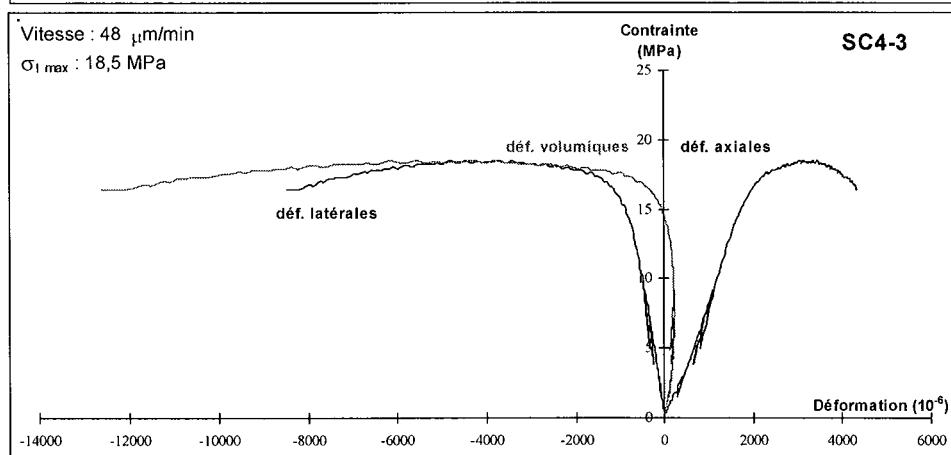
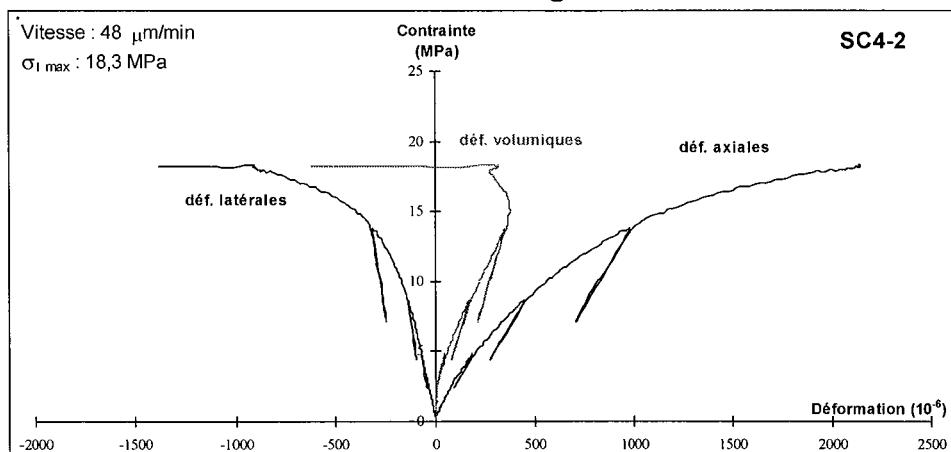
Age d'exploitation 2000 – Prélèvement : sondage LG1

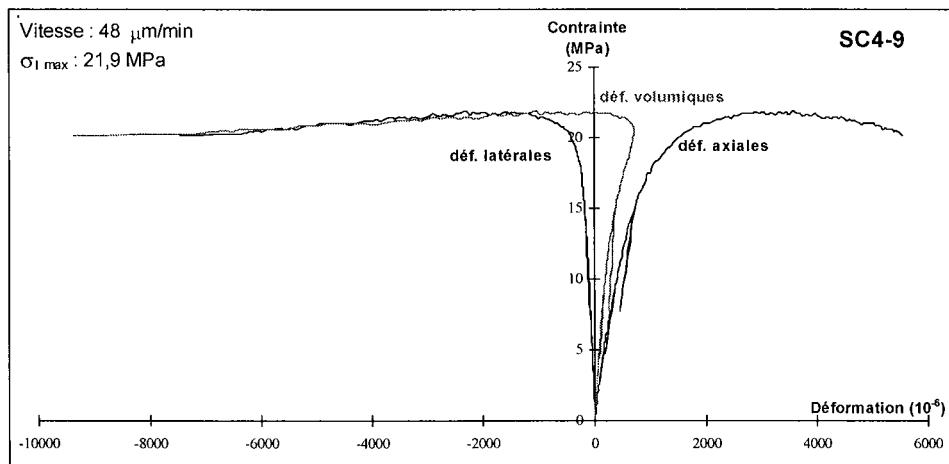
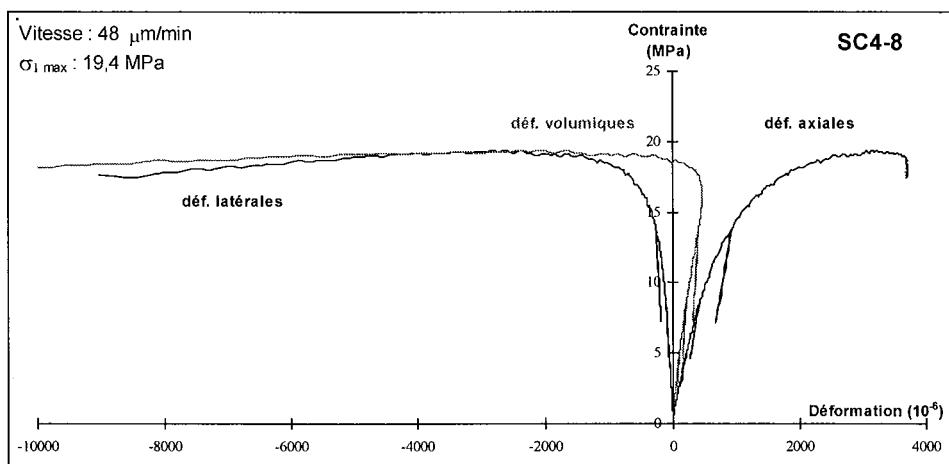
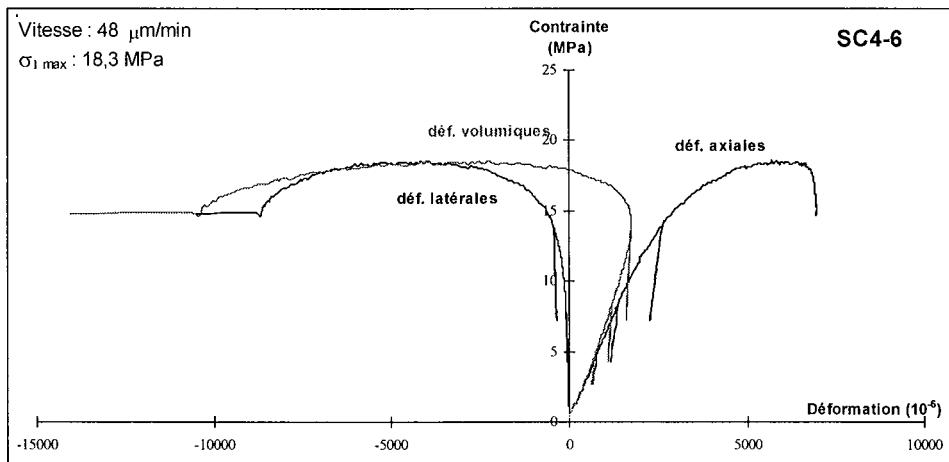




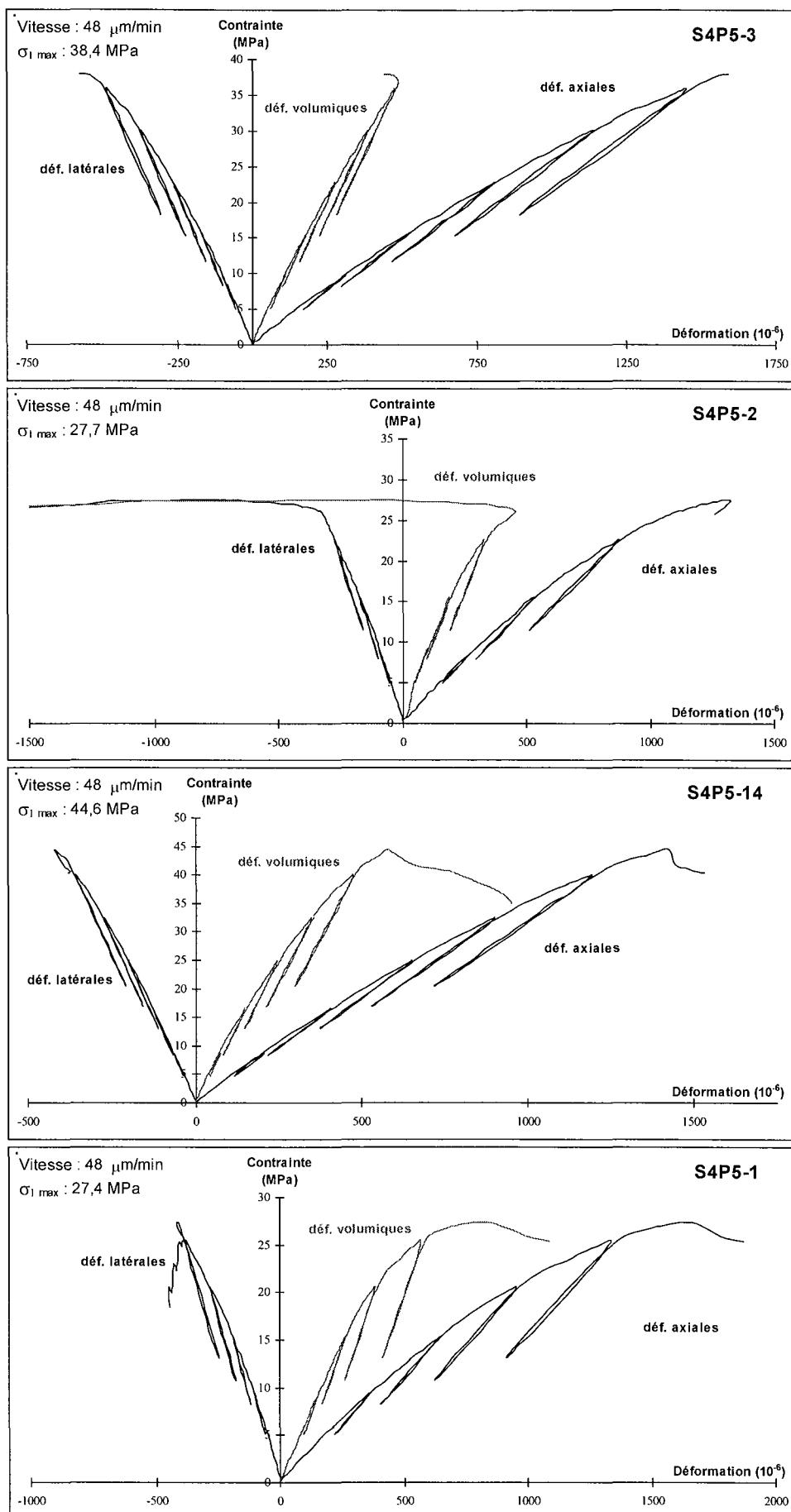


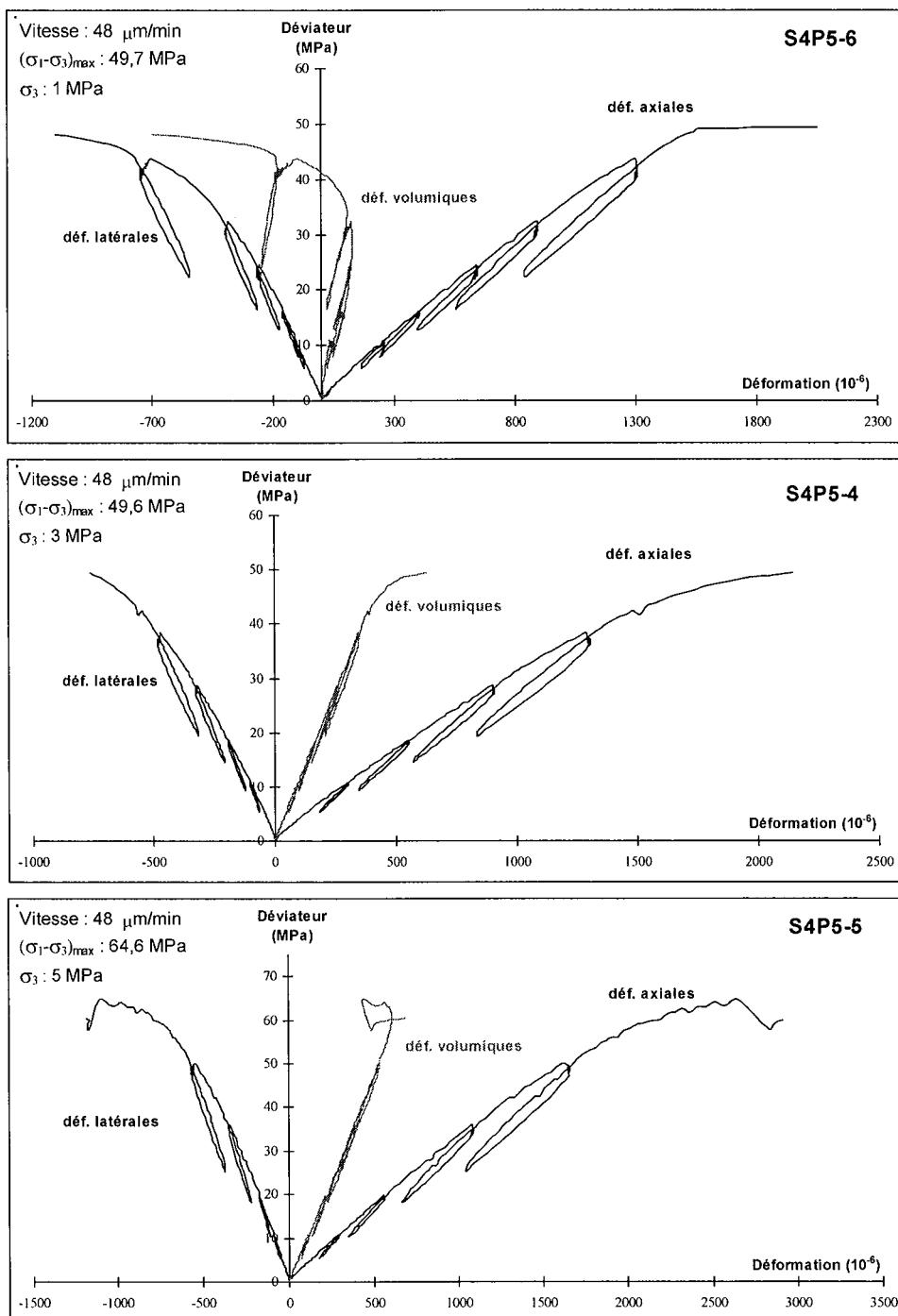
Age d'exploitation 1950 – Prélèvement : sondage LG4



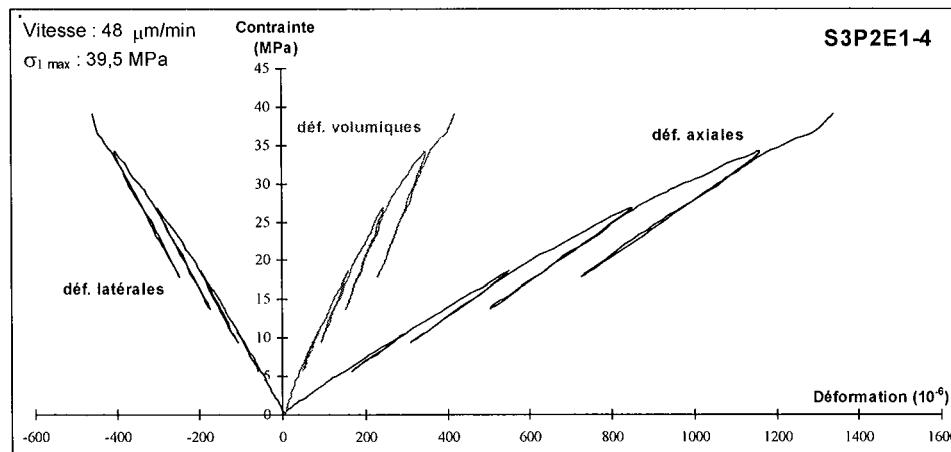


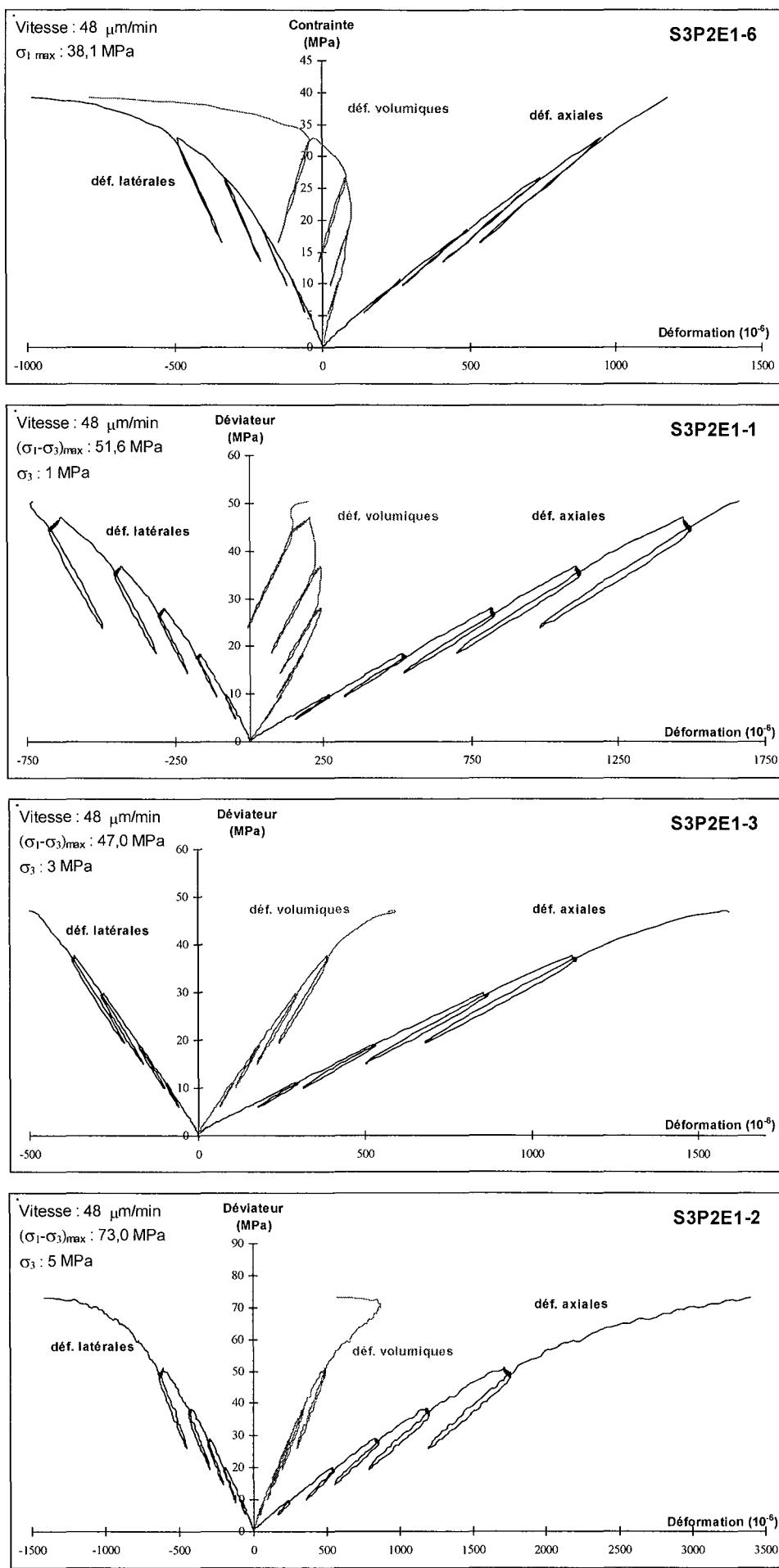
ANNEXE 4.4 – GROZON – COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION
Age d'exploitation 2000 – Prélèvement : blocs



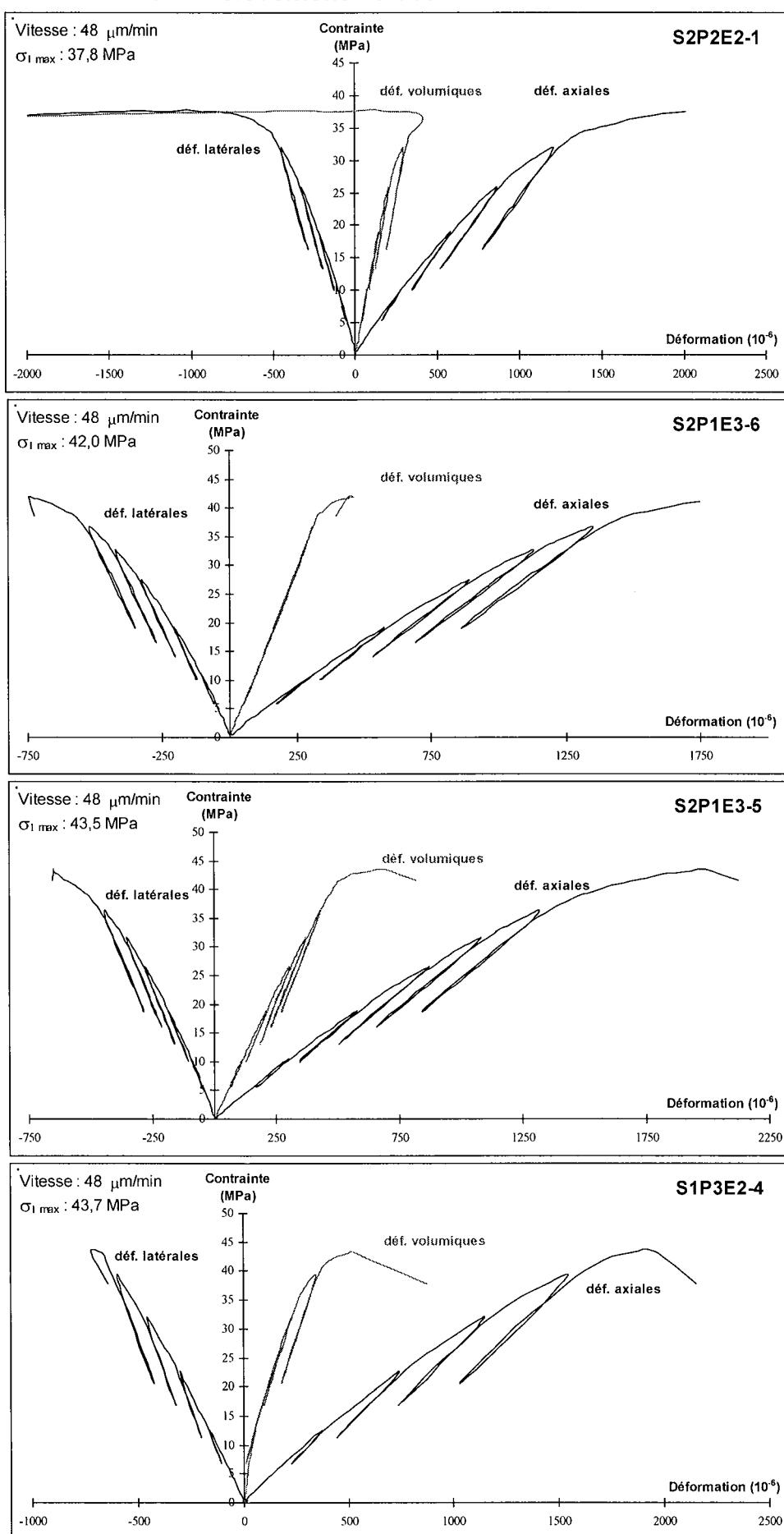


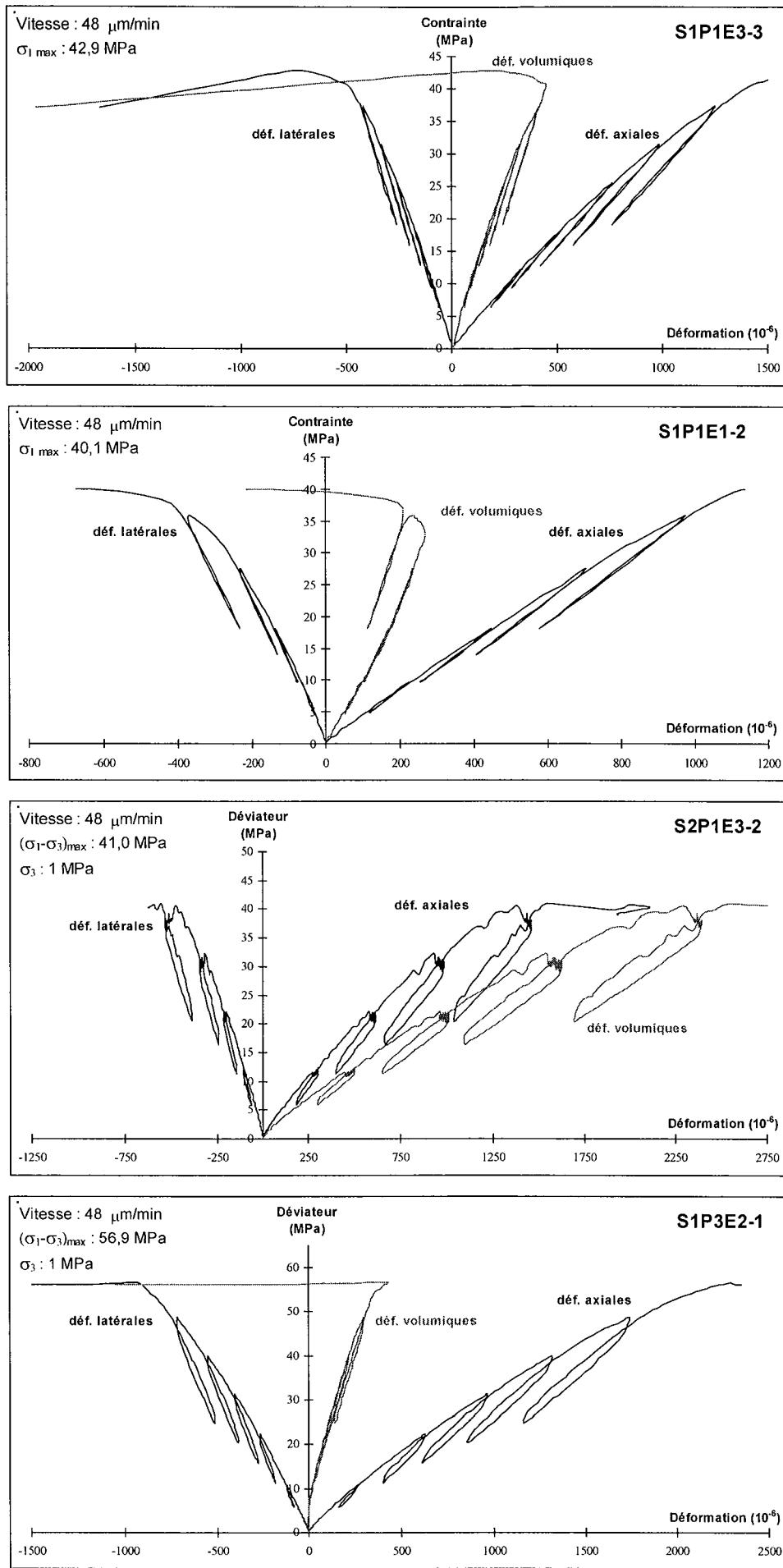
Age d'exploitation 1970 – Prélèvement : blocs

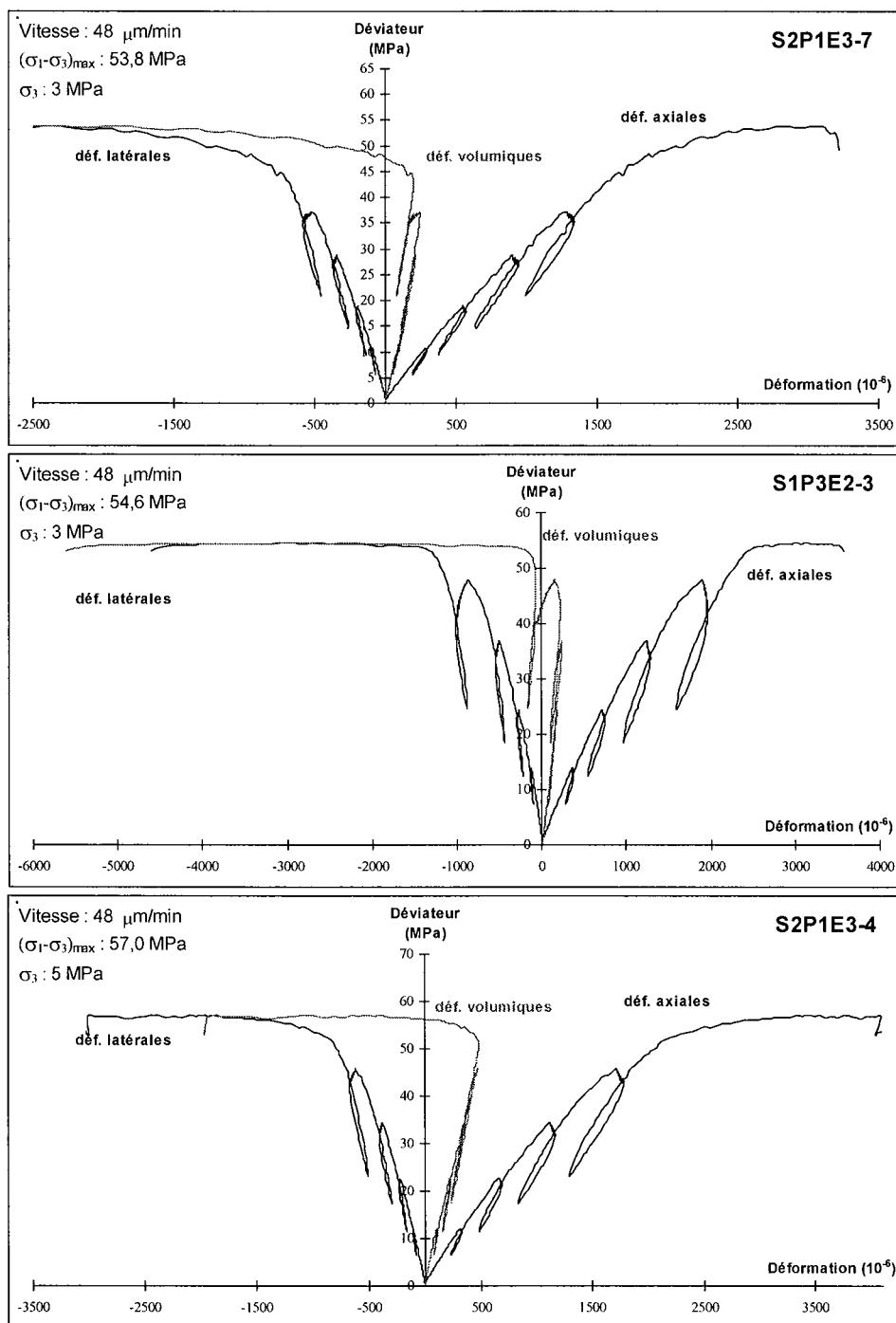




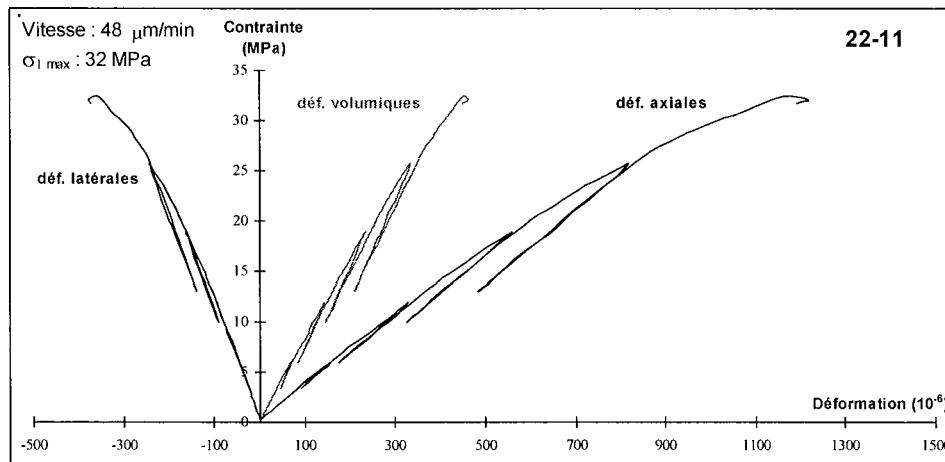
Age d'exploitation 1920 – Prélèvement : blocs

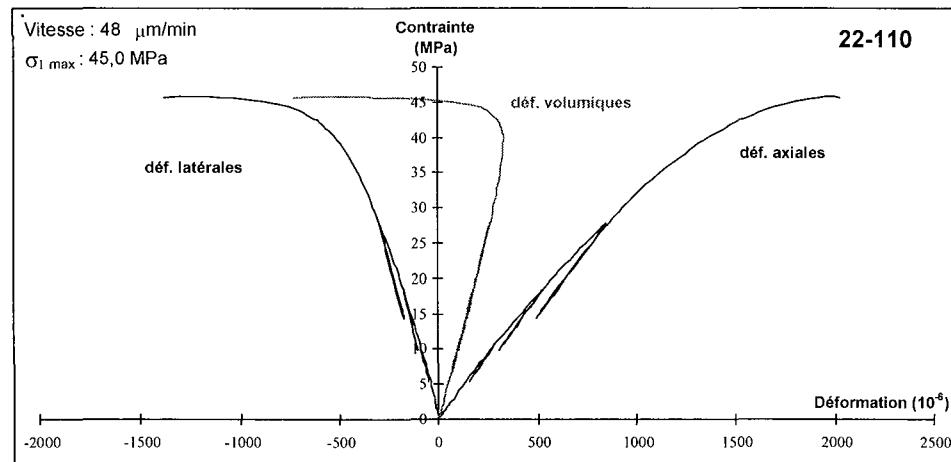
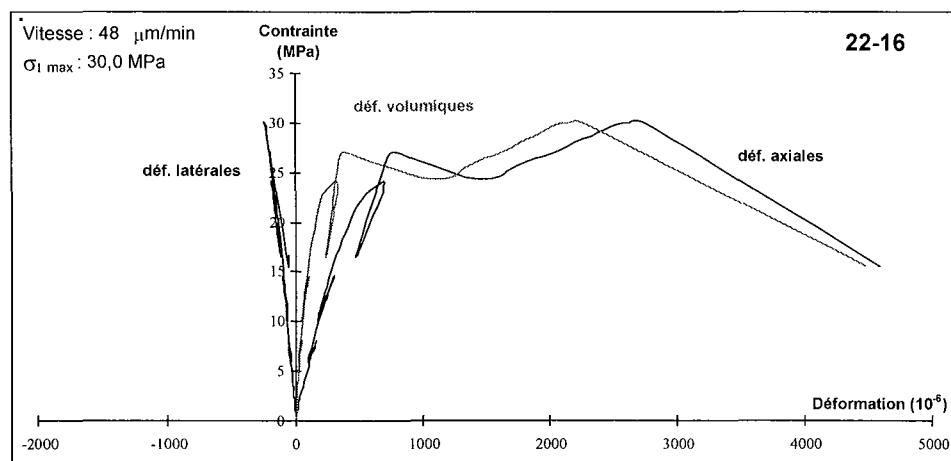
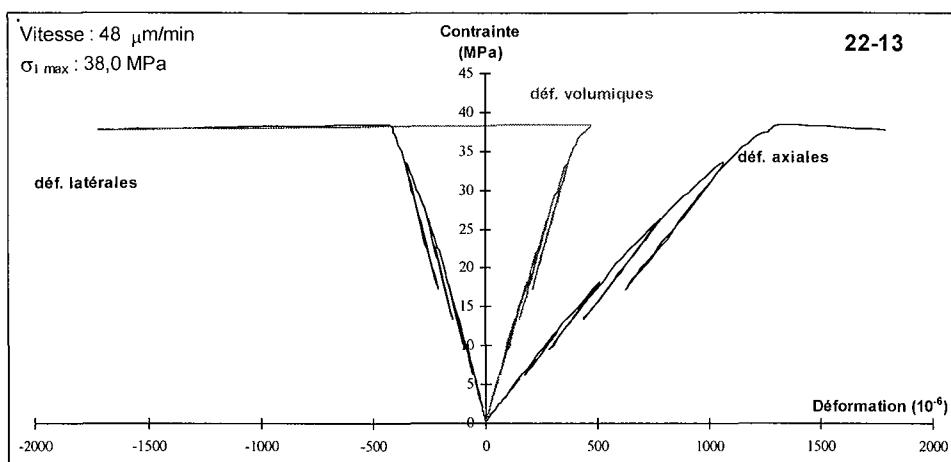
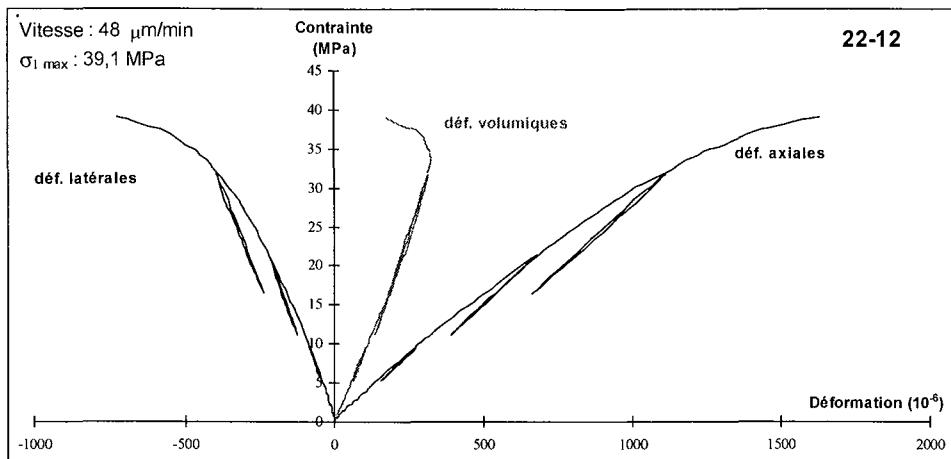




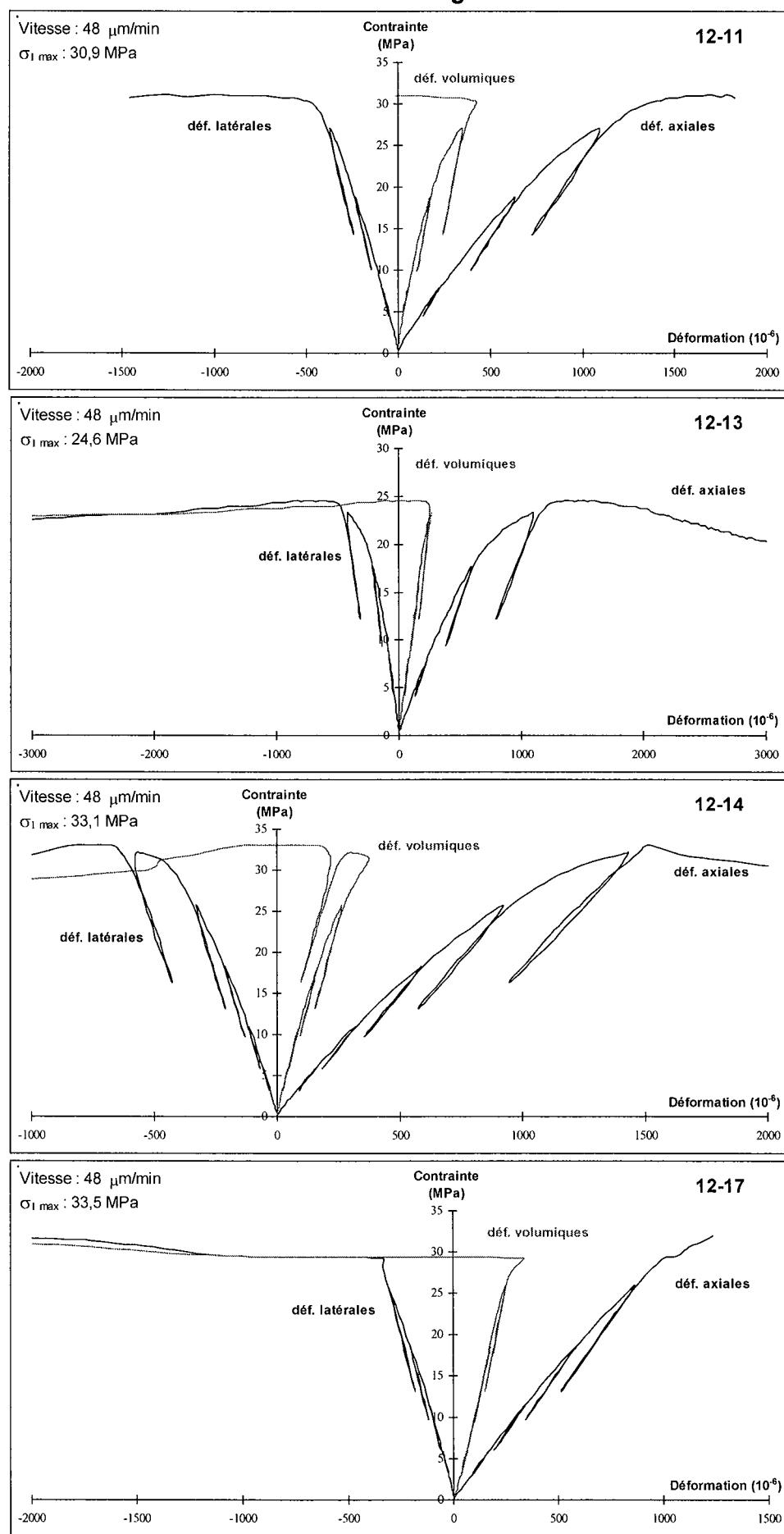


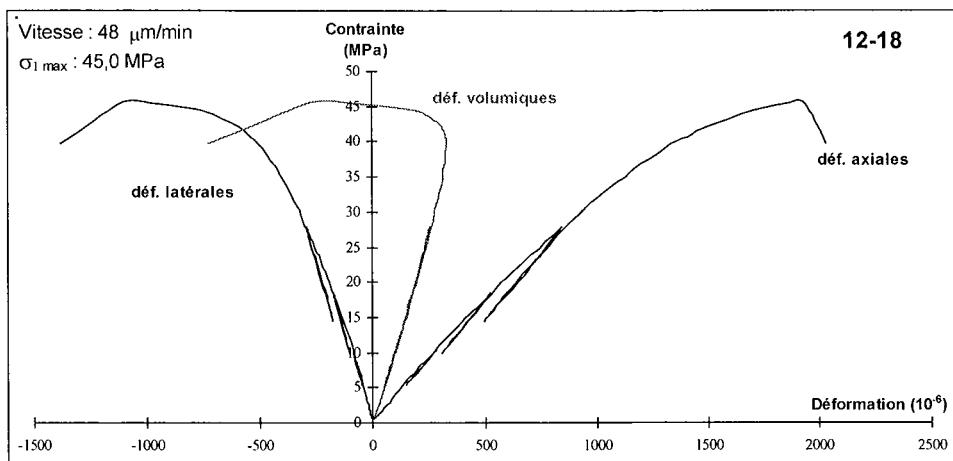
Age d'exploitation 2000 – Prélèvement : sondage G1





Age d'exploitation 1920 – Prélèvement : sondage G2





ANNEXES CHAPITRE 5

Annexe 5.1 – Convergence et expansion – Analyse saisonnière

Annexe 5.2 – Essais de compression uniaxiale – Influence de la résine

Annexe 5.3 – Le fluage des roches

Annexe 5.4 – Essais de compression isotrope après l'essai de fluage

ANNEXE 5.1 – CONVERGENCE ET EXPANSION : ANALYSE SAISONNIERE

Le calcul des indices saisonniers avec la méthode du rapport à la tendance comprend les étapes suivantes :

- 1. Mise en forme de mesures : les mesures de convergence sont ordonnées en fonction de l'année et du mois considéré (Tableau 5.1.1).

Tableau 5.1.1 - Mesures de convergence (déplacement brut entre les piédroits de deux piliers, mm)

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
janvier		31,67	32,68															
février		31,67	32,72															
mars		31,67	32,79															
avril			32,55	32,87														
mai				32,57		32,96	32,71				32,83							
juin										34,01			33,86					
juillet																		
août															34,45			
septembre											33,65				34,39			
octobre					31,71	32,89	32,95		33,12								35,18	
novembre							32,68		32,60					34,16				
décembre										31,66	32,93						35,56	

- 2. Détermination de l'équation de la tendance de la série chronologique : c'est une régression linéaire des mesures de convergence en fonction du temps qui permet de la déterminer (Figure 5.1.1). Une régression non linéaire peut être utilisée pour d'autres séries chronologiques.

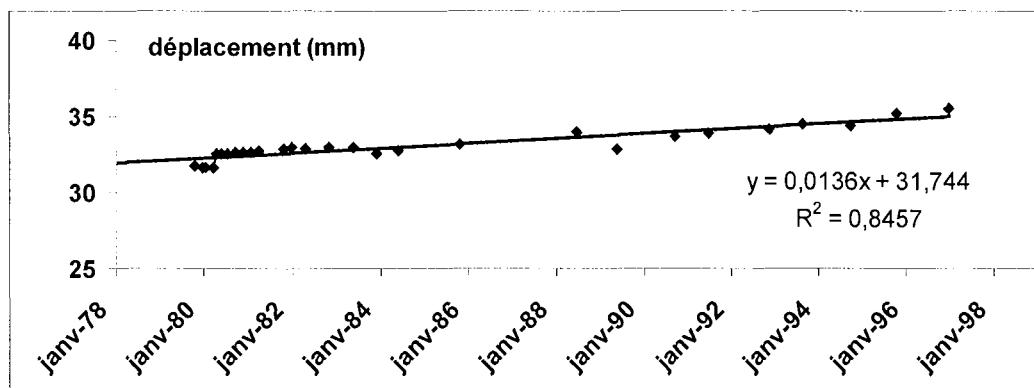


Figure 5.1.1 - Détermination de l'équation de la tendance de la série chronologique

- 3. Calcul des indices mensuels IM : il est égal à la valeur mesurée d'un mois donné x d'une année y, divisée par la valeur de la tendance du même mois de la même année.

$$IM_{x,y} = (\text{valeur mesurée})_{x,y} / (\text{valeur de la tendance})_{x,y}$$

Les différents indices sont placés dans le tableau identique à celui des mesures brutes de convergence (Tableau 5.1.2).

Tableau 5.1.2 - Indices mensuels calculés à partir des données du tableau 5.1.1 et de la courbe tendance de la figure 5.1.1

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
janvier		0,982	1,008															
février		0,982	1,010															
mars		0,981	1,011															
avril		1,008		1,008														
mai		1,008			1,005	0,993					0,972							
juin										1,012		0,993						
juillet		1,007																
août													1,000					
septembre		1,010									0,990			0,993				
octobre		0,985		1,011	1,008			0,998									1,010	
novembre			1,009			0,992							0,995					
décembre		0,982		1,011														1,016

- 4. Calcul des indices saisonniers IS : pour un mois donné x, il est égal à la moyenne des indices mensuels des différentes années considérées.

$$IS_x = \sum(IM)_x / (nIM_x) \text{ où } n \text{ est le nombre de IM}$$

Pour pouvoir comparer les différentes séries d'indices saisonniers, leur somme doit être égale à 12. Une correction est donc systématique (Tableau 5.1.3 et Figure 5.1.2).

	indice	indice corrigé
janvier	0,995	0,996
février	0,996	0,995
mars	0,996	0,995
avril	1,008	1,007
mai	0,995	0,994
juin	1,002	1,001
juillet	1,007	1,006
août	1,000	0,999
septembre	0,998	0,997
octobre	1,002	1,002
novembre	0,999	0,998
décembre	1,003	1,002
	12,008	12,000

Tableau 5.1.3 - Indices saisonniers corrigé 5.1.s

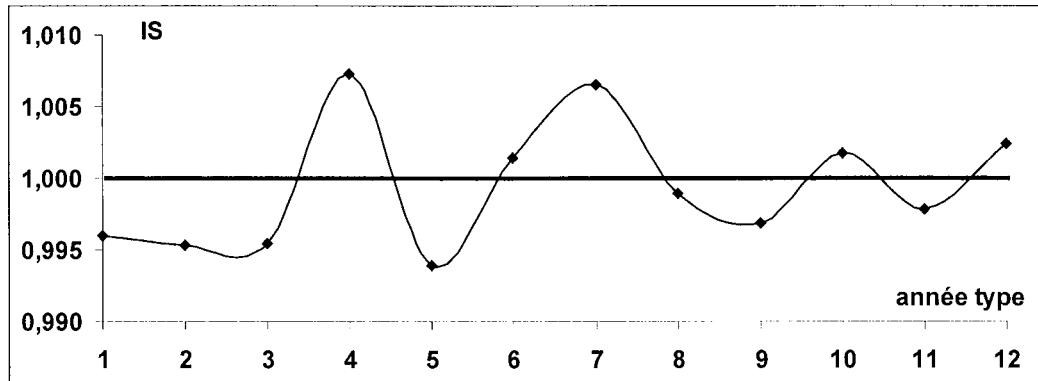


Figure 5.1.2 - Variations des indices saisonniers de convergence d'une galerie

Finalement, cette analyse temporelle des mesures de convergence et d'expansion repose sur une base de donnée présentant de nombreux « trous ». Les mesures n'ont pas été effectuées systématiquement tous les mois pendant 20 ans. Les résultats seuls de cette analyse doivent être considérés avec précaution et doivent être corrélés avec d'autres paramètres pour pouvoir être confirmés.

ANNEXE 5.2 – ESSAIS DE COMPRESSION UNIAXIALE : INFLUENCE DE LA RESINE

Essais de résistance en compression uniaxiale :

Le but de ces essais est de connaître sur une éprouvette de gypse l'influence d'un anneau continu ou discontinu de résine époxy sur la valeur de la résistance en compression uniaxiale par rapport à une éprouvette sans résine.

Trois expériences ont été réalisées :

- expérience n°1 : compression uniaxiale avec des éprouvettes de gypse sans anneau de résine ;
- expérience n°2 : compression uniaxiale avec une éprouvette de gypse encerclée par un anneau continu de résine ;
- expérience n°3 : compression uniaxiale avec une éprouvette de gypse encerclée par un anneau discontinu de résine.

Les résultats de ces expériences avec les deux gypses, Grozon et Livry Gargan se trouvent respectivement dans le tableau 5.2.1 et le tableau 5.2.2.

Tableau 5.2.1 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Descriptifs, résultats et conclusions des tests de résistance en compression uniaxiale

Expérience n°1 :	Expérience n°2 :	EXPERIENCE N°3 :
Utilisation d'éprouvettes de gypse SANS ANNEAU DE RESINE	Utilisation d'une éprouvette de gypse AVEC ANNEAU DE RESINE Mise en forme d'un anneau de résine de 1mm d'épaisseur et de 13mm de hauteur	Utilisation d'une éprouvette de gypse AVEC ANNEAU DISCONTINU DE RESINE Mise en forme d'un anneau discontinu de 1mm d'épaisseur et de 13mm de hauteur avec 4 coupures verticales, diamétralement opposées deux à deux.
Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 40 +/- 2 MPa	Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 49 MPa (résistance attendue : 40 +/- 2 MPa)	Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 42 MPa (résistance attendue : 40 +/- 2 MPa)
	Conclusion : Augmentation de la résistance : 20%	Conclusion : Résistance obtenue dans l'intervalle

Tableau 5.2.2 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Descriptifs, résultats et conclusions des tests de résistance en compression uniaxiale

Expérience n°1 :	Expérience n°2 :	EXPERIENCE N°3 :
Utilisation d'éprouvettes de gypse SANS ANNEAU DE RESINE	Utilisation d'une éprouvette de gypse AVEC ANNEAU DE RESINE Mise en forme d'un anneau de résine de 1mm d'épaisseur et de 13mm de hauteur	Utilisation d'une éprouvette de gypse AVEC ANNEAU DISCONTINU DE RESINE Mise en forme d'un anneau discontinu de 1mm d'épaisseur et de 13mm de hauteur avec 4 coupures verticales, diamétralement opposées deux à deux.
Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 16 +/-3 MPa	Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 25 MPa (résistance attendue : 16 +/-3 MPa)	Résultat : Résistance en compression uniaxiale : 17 MPa (résistance attendue : 16 +/-3 MPa)
Conclusion :	Augmentation de la résistance : 55%	Conclusion : Résistance obtenue dans l'intervalle

Si l'anneau de résine est discontinu, la résistance obtenue est alors dans l'intervalle de résistance attendue. Toutes les éprouvettes utilisées pour les essais de flUAGE sous hygrométrie constante sont donc équipées avec un anneau de résine discontinu.

Essais de déformabilité en compression uniaxiale :

Le but de ces essais est de connaître l'influence d'un anneau continu ou discontinu de résine époxy sur la déformabilité d'une éprouvette de gypse en compression uniaxiale par rapport à une éprouvette sans résine.

Trois expériences ont été réalisées avec la même éprouvette :

- expérience n°1 : essai de compression uniaxiale (contrainte maximale égale à 25% de la résistance estimée) avec une éprouvette de gypse sans anneau de résine. Trois cycles de déchargement-rechargement ont été effectués à 30%, 60% et 85% de la contrainte maximale appliquée.
- expérience n°2 : essai de compression uniaxiale (contrainte maximale égale à 25% de la résistance estimée) avec une éprouvette de gypse encerclée par un anneau continu de résine. Trois cycles de déchargement-rechargement ont été effectués à 30%, 60% et 85% de la contrainte maximale appliquée.
- expérience n°3 : Essai de compression uniaxiale (contrainte maximale égale à 25% de la résistance estimée) avec une éprouvette de gypse encerclée par un anneau discontinu de résine. Trois cycles de déchargement-rechargement ont été effectués à 30%, 60% et 85% de la contrainte maximale appliquée.

Les courbes contrainte-déformation pour chaque essai avec une éprouvette de gypse de Grozon et de Livry Gargan sont respectivement sur les figures 5.2.1 et 5.2.2. Les valeurs des modules de Young (E), modules de déformation transversale (E_T) et des coefficients de Poisson (ν) sont regroupés dans les tableaux 5.2.3 et 5.2.4.

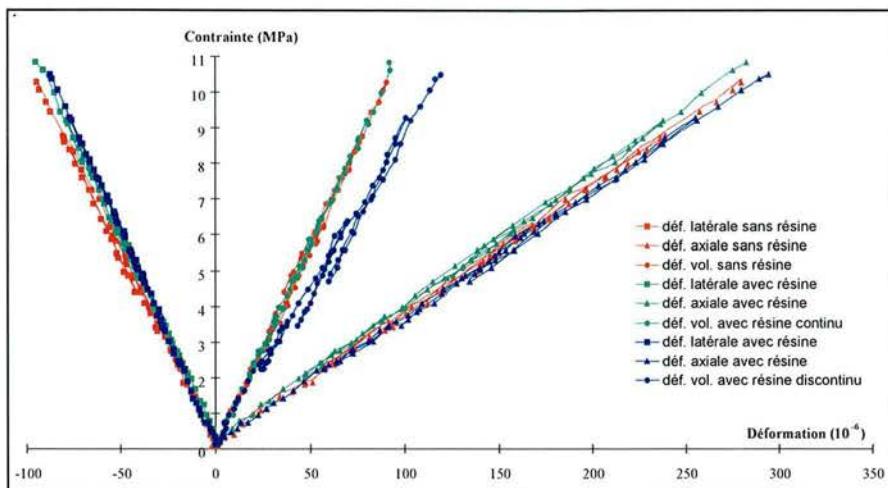


Figure 5.2.1 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Courbes contrainte-déformation des trois essais test de déformabilité

Tableau 5.2.3 - Grozon – Age d'exploitation 1970 – Modules de Young, modules de déformation transversale et coefficient de Poisson

	SANS RESINE			AVEC RESINE			RESINE DISCONTINU		
	E_axial (GPa)	E_lateral (GPa)	v	E_axial (GPa)	E_lateral (GPa)	v	E_axial (GPa)	E_lateral (GPa)	v
Cycle 1	37,6	-118,6	0,32	37,7	-112,6	0,33	34,4	-116,0	0,30
Cycle 2	37,5	-115,8	0,32	37,6	-111,8	0,34	34,3	-115,7	0,30
Cycle 3	37,4	-113,4	0,32	37,6	-111,1	0,34	34,3	-114,9	0,30

Quelle que soit l'instrumentation considérée, les paramètres élastiques du gypse de Grozon ne diffèrent pas de manière notable. Toutes les éprouvettes utilisées pour les essais de fluage sous hygrométrie constante sont donc équipées d'un anneau de résine discontinue.

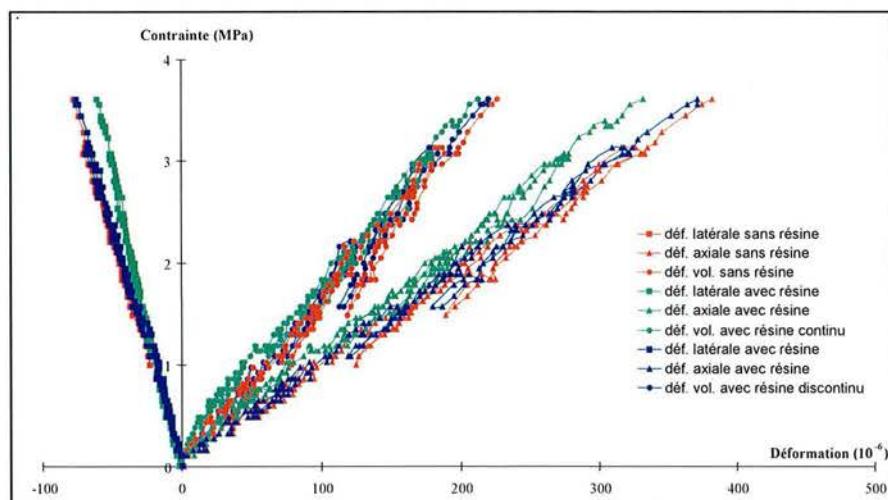


Figure 5.2.2 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Courbes contrainte-déformation des trois essais test de déformabilité

Tableau 5.2.4 - Livry Gargan – Age d'exploitation 1950 – Modules de Young, modules de déformation transversale et coefficient de Poisson

	SANS RESINE			AVEC RESINE			RESINE DISCONTINU		
	E_{axial} (GPa)	$E_{\text{latéral}}$ (GPa)	ν	E_{axial} (GPa)	$E_{\text{latéral}}$ (GPa)	ν	E_{axial} (GPa)	$E_{\text{latéral}}$ (GPa)	ν
Cycle 1	13,9	-60,8	0,23	14,0	-60,6	0,23	13,9	-59,9	0,23
Cycle 2	13,7	-67,6	0,21	14,7	-70,8	0,21	13,7	-69,9	0,20
Cycle 3	13,2	-60,9	0,22	14,1	-61,1	0,23	13,0	-61,3	0,21

Avec un anneau de résine, les paramètres élastiques du gypse de Livry Gargan sont différents de ceux qui ont été déterminés avec les deux autres instrumentations. Les éprouvettes utilisées pour les essais de fluage sous hygrométrie constante sont également équipées d'un anneau de résine discontinu.

ANNEXE 5.3 – LE FLUAGE DES ROCHES

« La méthode la plus simple pour mettre en évidence l'importance du temps pour le comportement des roches est d'effectuer un essai de fluage » Homand et Duffaut, 2000. En effet, dans le cas le plus simple, une contrainte monoaxiale est appliquée et maintenue constante pendant toute la durée de l'essai. Les déformations axiales et latérales sont alors enregistrées.

Si le matériau est purement élastique, il subit à l'instant $t = t_0$ une déformation $\varepsilon = \varepsilon_0$ qui ne variera pas avec le temps (Figure 5.3.1a). Cependant, l'expérience montre qu'il n'en est pas souvent ainsi : le matériau subit à l'instant $t = t_0$ une déformation instantanée $\varepsilon = \varepsilon_0$ et la déformation évolue ensuite de façon plus ou moins croissante avec le temps (Figure 5.3.1b). Cette croissance avec le temps dépend de la valeur de la contrainte et d'une manière plus générale du déviateur.

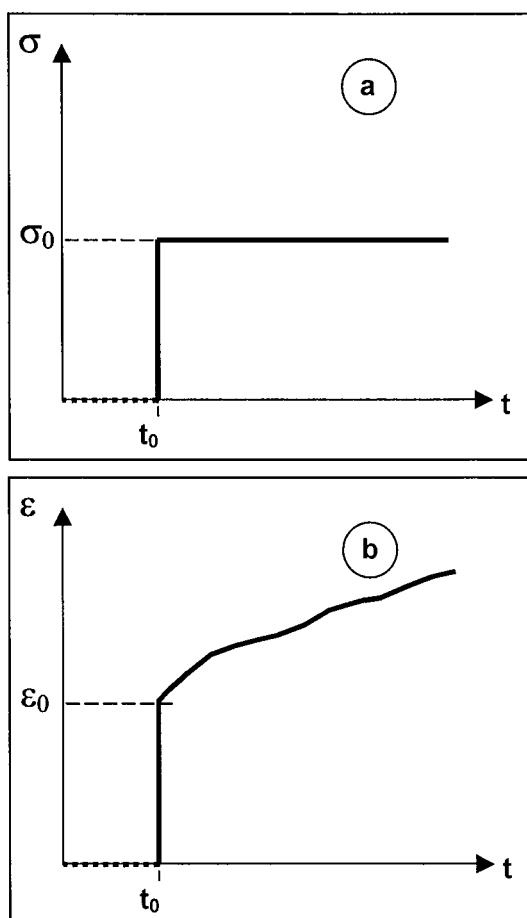


Figure 5.3.1 - Chemin et réponse d'un essai de fluage

Les différentes phases du fluage en mécanique des roches sont représentées sur la figure 5.3.2. Si la charge est faible, au cours de l'essai de fluage en compression monoaxiale sur une éprouvette, par rapport à la contrainte à la rupture (estimée au préalable grâce à des essais de compression monoaxiale), la vitesse de fluage s'annule rapidement après une phase transitoire (courbe a) et la déformation de fluage reste toujours faible. La courbe de fluage correspondant à des niveaux de contraintes plus élevés (courbe b) peut être décomposée de la manière suivante :

- la phase de fluage primaire ou fluage transitoire ou stade I : c'est un stade où la vitesse de fluage diminue rapidement avec le temps ;
- la phase de fluage secondaire ou fluage stationnaire ou stade II : la vitesse de fluage est sensiblement constante.

Après ce stade II, les déformations peuvent s'amortir ou se poursuivre à une vitesse constante ; il s'agit alors d'un fluage dit permanent. La vitesse croît alors avec la contrainte appliquée et la température peut jouer un rôle très important sur cette vitesse de fluage.

Si la charge appliquée est encore augmentée, il apparaît alors un troisième stade (fluage tertiaire ou fluage accéléré ou stade III) caractérisé par une accélération rapide de la vitesse de fluage conduisant à plus ou moins long terme à la rupture de l'éprouvette (courbe c). Enfin, si l'on effectue un essai de fluage sous des contraintes proches de la contrainte de rupture, les deux premiers stades peuvent disparaître pour ne laisser place qu'au stade de fluage accéléré.

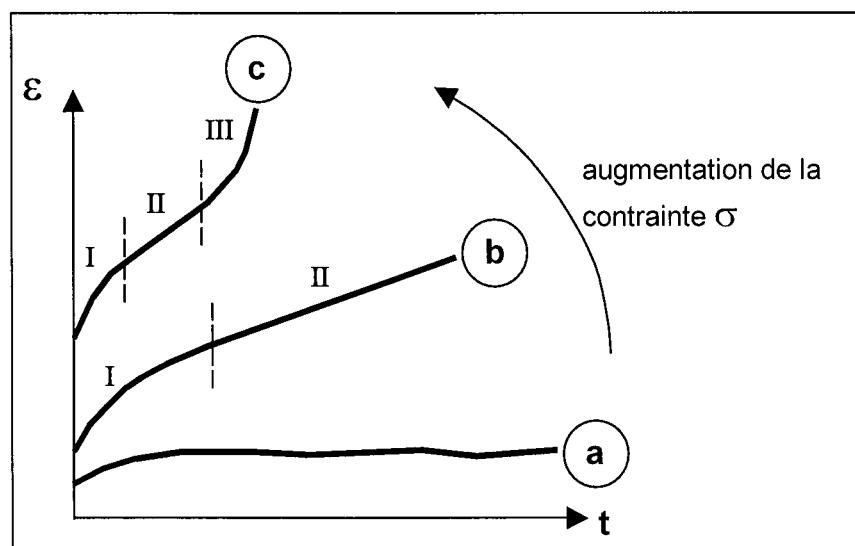


Figure 5.3.2 - Influence de la contrainte monoaxiale (réponse en fluage)
Identification des trois stades de fluage

ANNEXE 5.4 – ESSAIS DE COMPRESSION ISOTROPE APRES L’ESSAI DE FLUAGE

Afin de vérifier l’existence d’un mécanisme d’endommagement par microfissuration du matériau pendant l’essai de fluage, des essais de compression isotrope ont été réalisés après les essais de fluage.

Gypse de Grozon

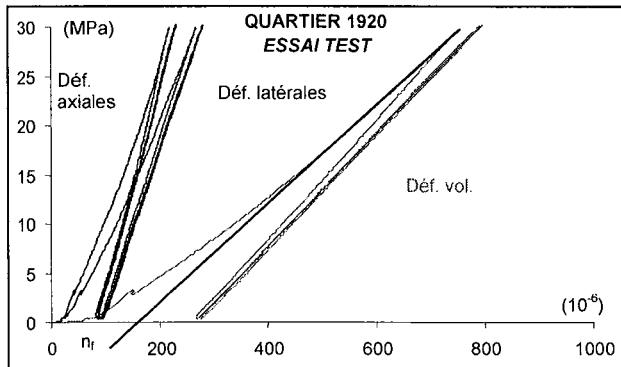


Figure 5.4.1 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Essai de compression isotrope avec un échantillon test - Courbes contrainte-déformation

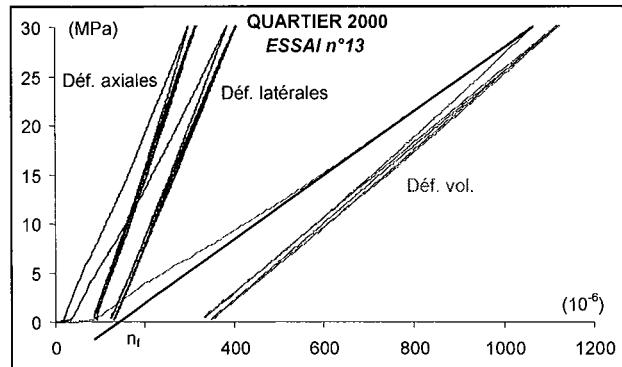


Figure 5.4.2 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Essai de compression isotrope avec l’échantillon de l’échantillon n°13 - Courbes contrainte-déformation

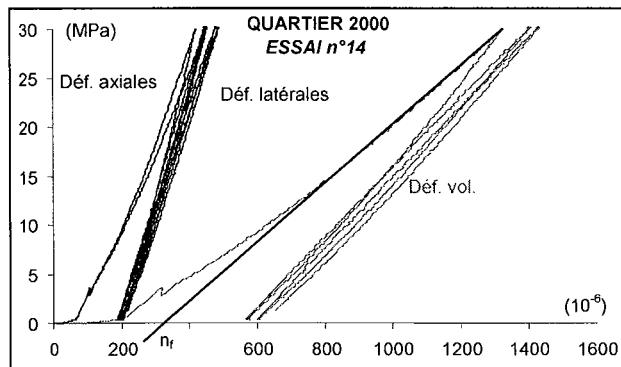


Figure 5.4.3 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Essai de compression isotrope avec l’échantillon de l’échantillon n°14 - Courbes contrainte-déformation

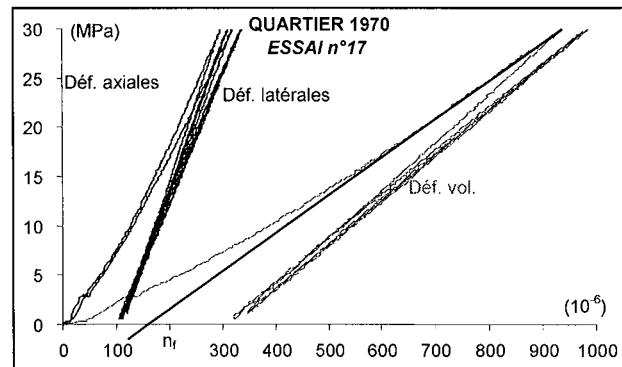


Figure 5.4.4 - Grozon – Age d’exploitation 1970
Essai de compression isotrope avec l’échantillon de l’échantillon n°17 - Courbes contrainte-déformation

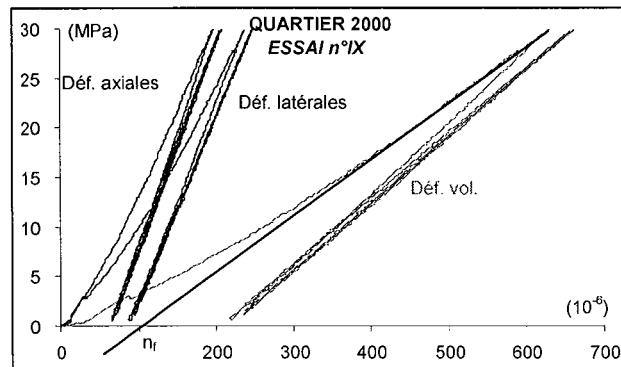


Figure 5.4.5 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Essai de compression isotrope avec l’échantillon de l’échantillon n°IX - Courbes contrainte-déformation

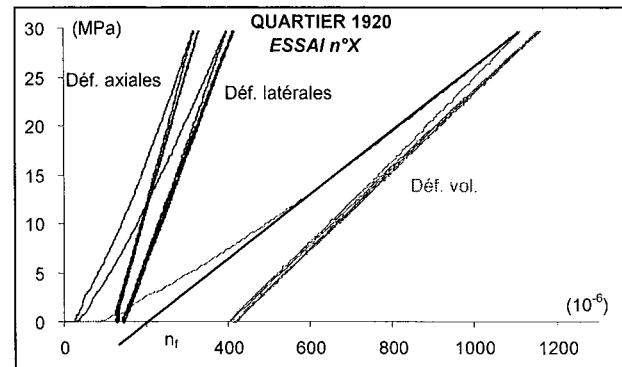


Figure 5.4.6 - Grozon – Age d’exploitation 1920
Essai de compression isotrope avec l’échantillon de l’échantillon n°X - Courbes contrainte-déformation

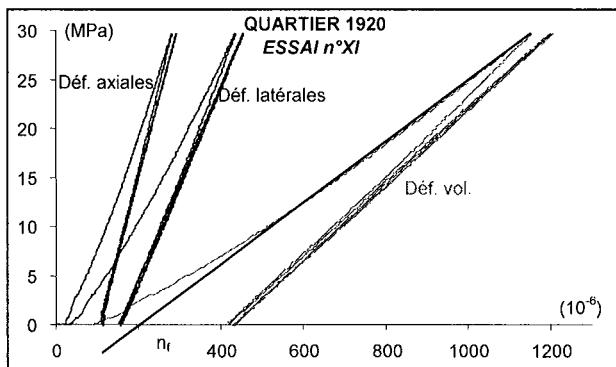


Figure 5.4.7 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'échantillon n°XI - Courbes contrainte-déformation

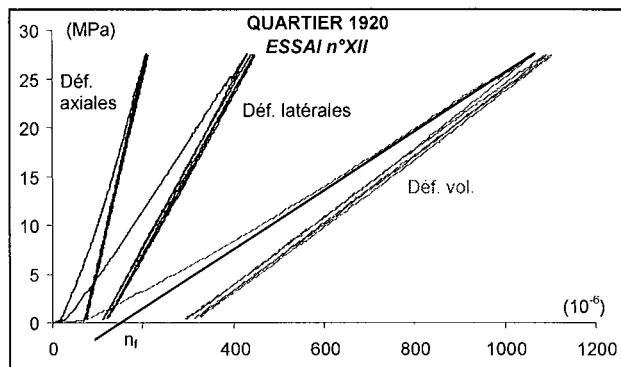


Figure 5.4.8 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'échantillon n°XII - Courbes contrainte-déformation

Gypse de Livry Gargan

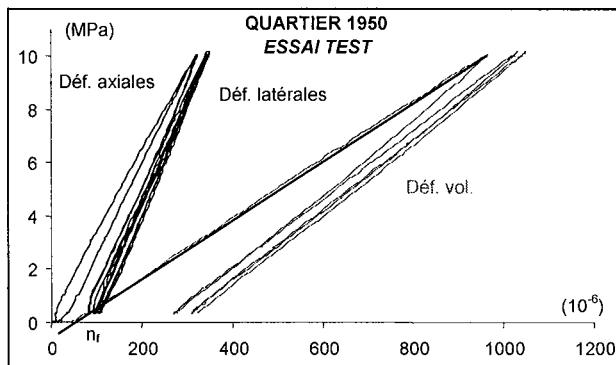


Figure 5.4.9 - Livry Gargan – Age 1950
Essai de compression isotrope avec un échantillon test - Courbes contrainte-déformation

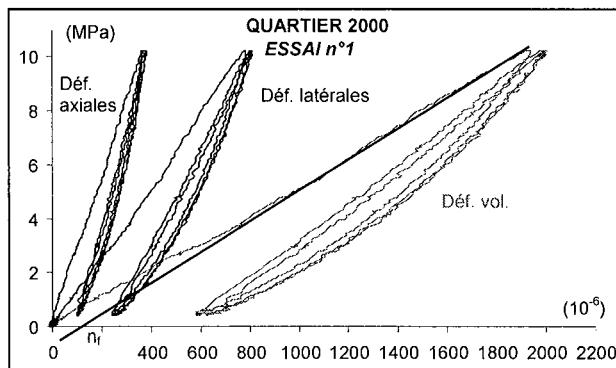


Figure 5.4.10 - Livry Gargan – Age 2000
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'échantillon n°1 - Courbes contrainte-déformation

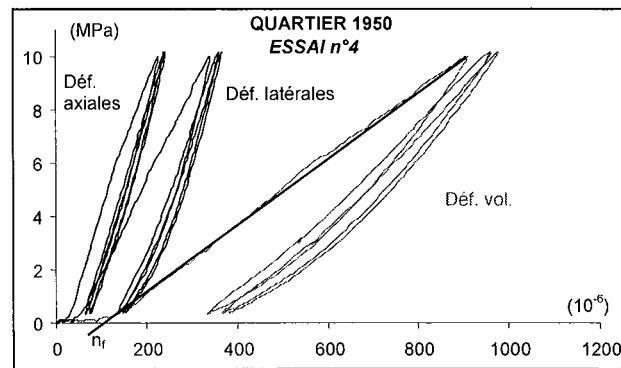


Figure 5.4.11 - Livry Gargan – Age 1950
Essai de compression isotrope avec l'échantillon de l'échantillon n°4 - Courbes contrainte-déformation

ANNEXES CHAPITRE 6

Annexe 6.1 – Simulations – Grozon

Annexe 6.2 – Simulations – Livry Gargan

Annexe 6.3 – Diffractométries aux rayons X

ANNEXE 6.1 – SIMULATIONS : GROZON – AGE D’EXPLOITATION 2000

Un seul essai multipalier avec un échantillon d’âge d’exploitation 2000 et sous hygrométrie de 90% (essai n°IX) a été réalisé. Il ne permet donc pas de déterminer tous les paramètres nécessaires à la simulation des déformations différées mesurées pendant tous les essais de flUAGE monopalier avec le même âge et sous la même hygrométrie. Seules les déformations différées de l’essai n°15 pourront être simulées.

Simulation 1 (Figure 6.1.1) :

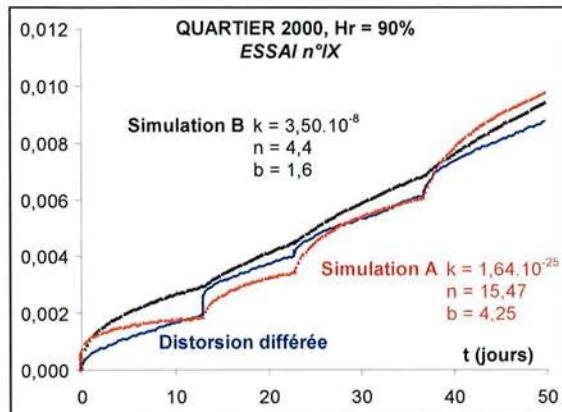


Figure 6.1.1 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Hygrométrie 90% - Evolution de la distorsion différée et simulation

Tous les paramètres de la simulation A ont été ajustés avec la distorsion différée expérimentale. Les paramètres n et b de la simulation B ont été imposés, seul le paramètre k a été ajusté. Dans les deux cas, la simulation reproduit d’une manière convenable la distorsion différée expérimentale.

Simulation 2 (Figure 6.1.2) :

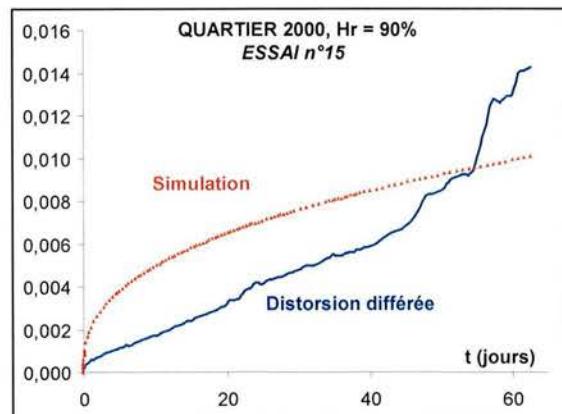


Figure 6.1.2 - Grozon – Age d’exploitation 2000
Hygrométrie 90% - Evolution de la distorsion différée et simulation

La simulation de la distorsion différée de l’essai n°15 avec le jeu de paramètres calculés à partir de l’essai n°IX reproduit de manière incorrecte la distorsion différée expérimentale. Cependant, cette distorsion expérimentale en fonction du temps évolue d’une manière linéaire.

Simulation 3 (Figure 6.1.3) :

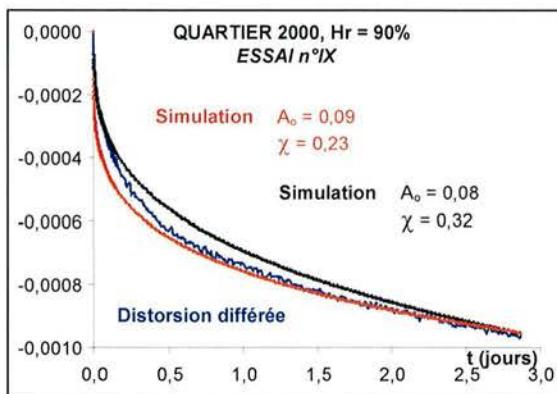


Figure 6.1.3 - Grozon – Age d'exploitation 2000
Hygrométrie 90% - Evolution de la distorsion différée avec une contrainte nulle et simulation

La simulation avec des valeurs A_0 et χ ajustées est d'une meilleure qualité que celle qui a été réalisée avec χ égal à 0,32. Cependant, cette dernière reste tout de même correcte.

Simulation 4 (Tableau 6.1.1 et Figure 6.1.4) :

Tableau 6.1.1 - Ensemble des paramètres définitifs permettant de simuler les déformations différées mesurées pendant les essais de fluage (âge d'exploitation 2000)

Hr (%)	B	m	k	n	b	v	δ_0	δ_∞	A_0	χ
90	$4,5 \cdot 10^{-5}$	0,43	$3,5 \cdot 10^{-8}$	4,4	1,6	0,35	-0,33	0,48	0,08	0,32

L'ordre de grandeur des paramètres reste le même que celui des paramètres déterminés pour des échantillons d'âge d'exploitation 2000. Le manque de données expérimentales avec des hygrométries différentes ne nous permet pas d'élargir l'interprétation de ces paramètres.

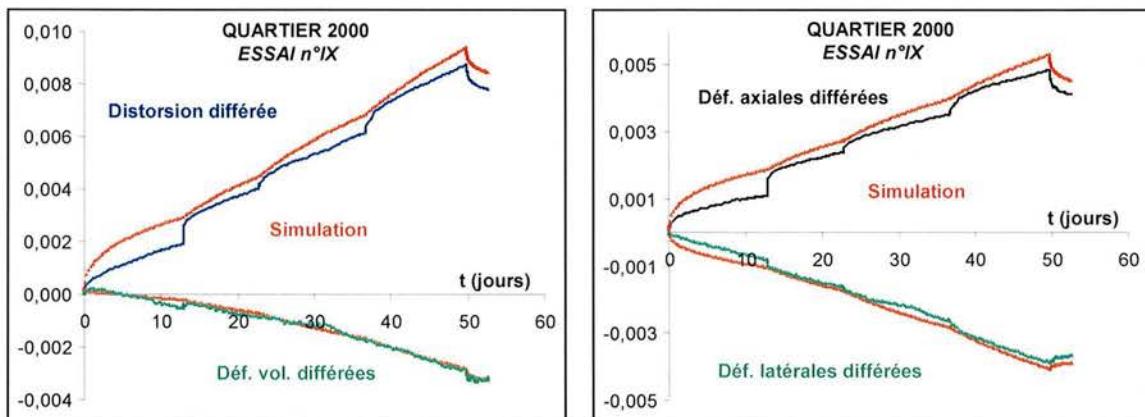


Figure 6.1.4 - Grozon – Age d'exploitation 2000 – Hygrométrie 90%
Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation

Seuls les paliers réalisés sous une hygrométrie de 90% et avec une contrainte nulle ont pu être simulés. Pour les paliers avec une hygrométrie différente, les paramètres ne pouvaient être calculés, faute d'essais. Néanmoins, les simulations de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées reproduisent convenablement les mesures expérimentales. Des essais supplémentaires avec d'autres hygrométries seraient nécessaires pour pouvoir calculer le paramètre ξ .

GROZON – AGE D'EXPLOITATION 1920 (RESULTATS COMPLEMENTAIRES)

Un certain nombre de simulations illustrent les propos tenus dans le chapitre « Modélisation ». Les autres simulations sont maintenant présentées.

Le tableau 6.1.2 rappelle tous les paramètres permettant de simuler la distorsion et les déformations différencées mesurées pendant les essais.

Tableau 6.1.2 - Ensemble des paramètres définitifs permettant de simuler les déformations différencées mesurées pendant les essais de flUAGE (âge d'exploitation 1920)

Hr (%)	30	60	75	90	95
B	$2,05 \cdot 10^{-5}$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$2,87 \cdot 10^{-5}$	$5,95 \cdot 10^{-5}$	$9,11 \cdot 10^{-5}$
m	0,44	0,21	0,44	0,80	1,00
k	$4,29 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$4,59 \cdot 10^{-8}$	$8,53 \cdot 10^{-7}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$
n	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
b	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
v	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
δ_0	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33
δ_∞	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
A ₀	-	-	0,13	0,10	0,09
χ	-	-	0,32	0,32	0,32
ξ	50,5				

Simulations 1 (Figures 6.1.5 à 6.1.7) :

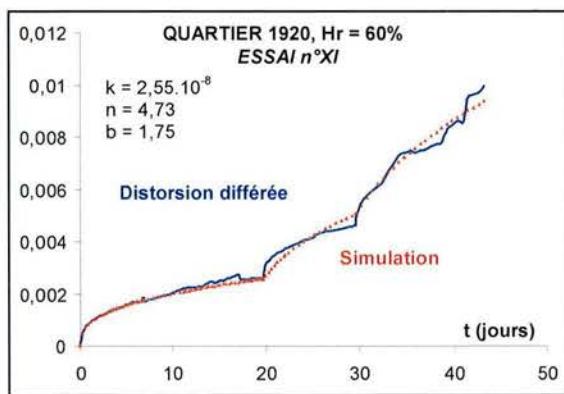


Figure 6.1.5 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 60% – Evolution de la distorsion différencée et simulation

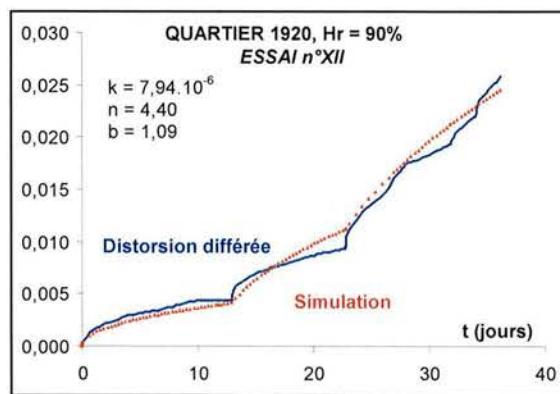
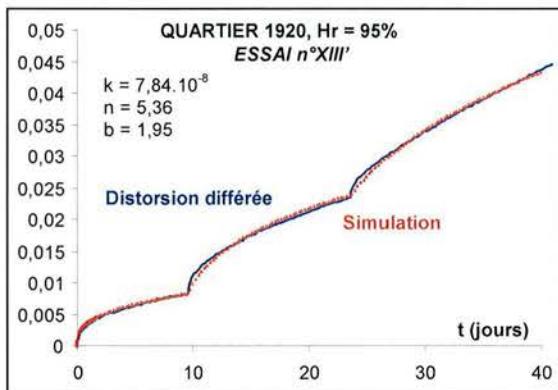
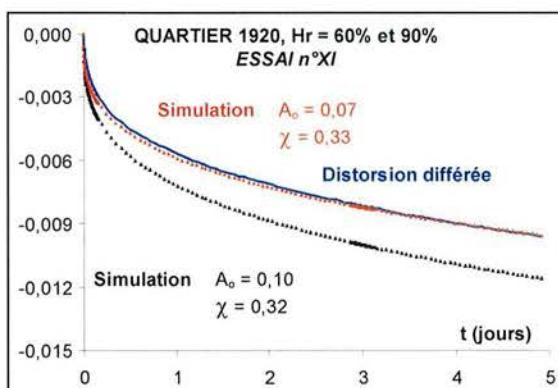
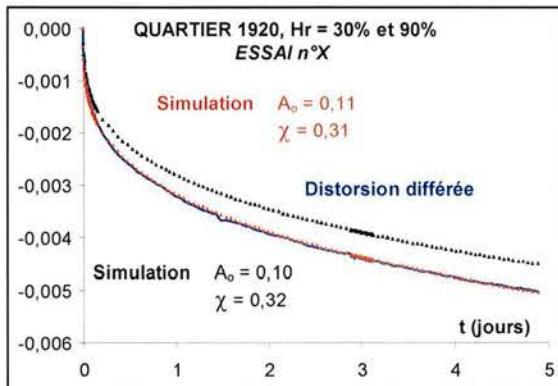


Figure 6.1.6 - Grozon – Age d'exploitation 1920
Hygrométrie 90% – Evolution de la distorsion différencée et simulation



Les valeurs des paramètres n et b ajustés pour chaque essai sont proches des valeurs imposées (4,4 et 1,6).

Simulations 3 (Figures 6.1.8 et 6.1.9) :



Les phases de recouvrance des deux essais présentés ci-dessus ont été réalisées sous une hygrométrie de 90% après des paliers avec des hygrométries différentes. Les simulations avec les paramètres imposés ($A_0 = 0,10$ et $\chi = 0,32$) reproduisent moins bien les mesures expérimentales que celles pour lesquelles les paramètres ont été calculés.

Simulations 4 (Figures 6.1.10 à 6.1.12) :

La distorsion, les déformations volumiques, axiales et transversales différées des différentes phases des essais multipaliers sont simulées.

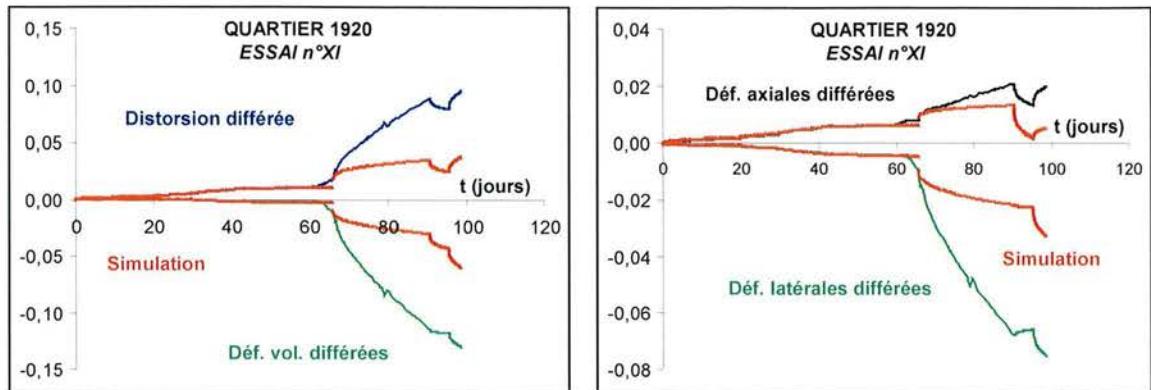


Figure 6.1.10 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométries 60% et 90%
Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation

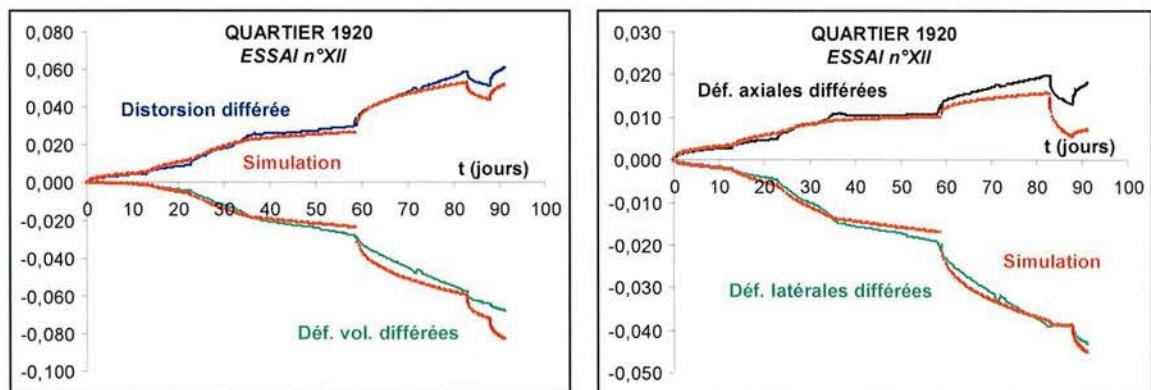


Figure 6.1.11 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 90%
Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation

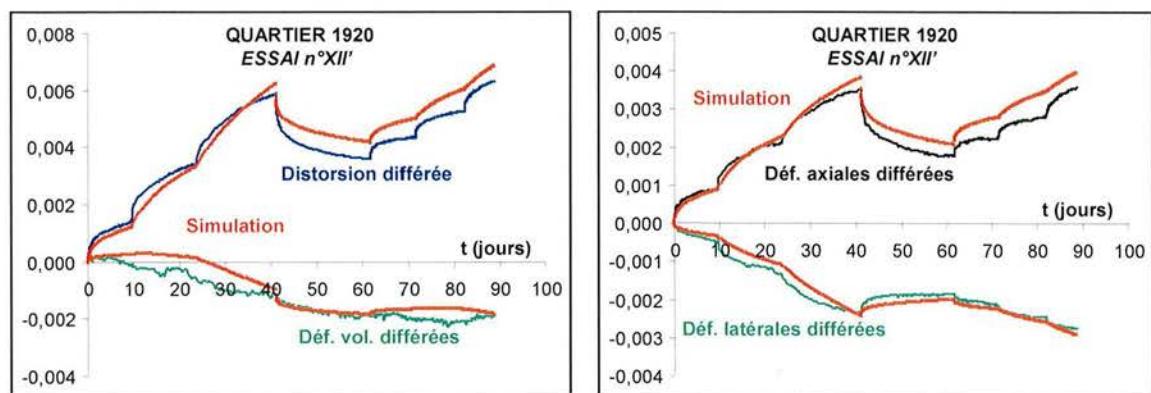


Figure 6.1.12 - Grozon – Age d'exploitation 1920 – Hygrométrie 75%
Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différées et simulation

ANNEXE 6.2 – SIMULATIONS : LIVRY GARGAN

Deux essais multipaliers avec un échantillon d'âge d'exploitation 2000 et sous des hygrométries de 75% et de 95% (essais n°I et II) ont été réalisés. Deux autres essais multipaliers avec un échantillon d'âge d'exploitation 1950 et sous des hygrométries de 75% et 95% (essais n°V et VI) « complètent » les deux premiers essais.

La distorsion et les déformations volumiques, axiales et latérales différées sont simulées. Cependant, ces quatre essais ne permettent pas de déterminer les paramètres nécessaires à la simulation des déformations différées mesurées pendant tous les essais de fluge monopalier. Les hygrométries ne correspondent pas.

Simulation 1 (Figure 6.2.1 à 6.2.4) :

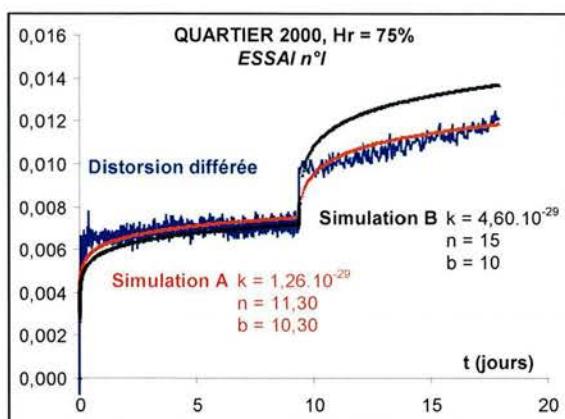


Figure 6.2.1 - Livry Gargan
Age d'exploitation 2000 – Hygrométrie 75%
Evolution de la distorsion et simulation

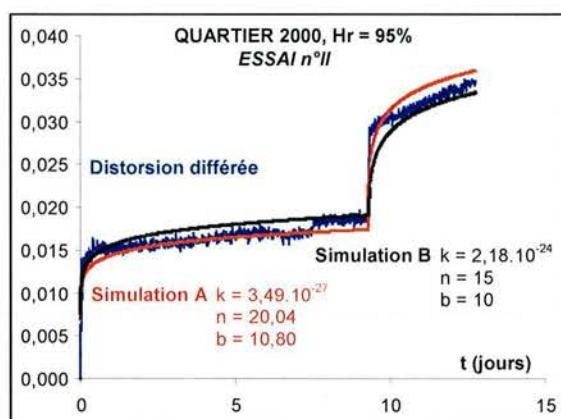


Figure 6.2.2 - Livry Gargan
Age d'exploitation 2000 – Hygrométrie 95%
Evolution de la distorsion et simulation

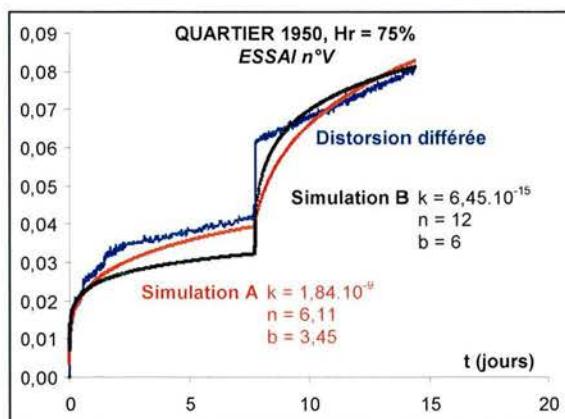


Figure 6.2.3 - Livry Gargan
Age d'exploitation 1950 – Hygrométrie 75%
Evolution de la distorsion et simulation

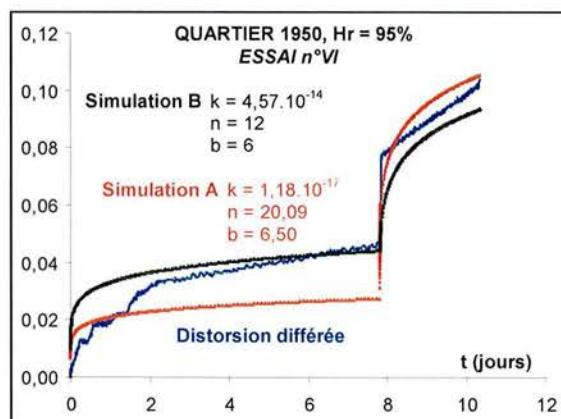


Figure 6.2.4 - Livry Gargan
Age d'exploitation 1950 – Hygrométrie 95%
Evolution de la distorsion et simulation

Tous les paramètres de la simulation A ont été ajustés avec la distorsion différée expérimentale. Les paramètres n et b de la simulation B ont été imposés, seul le paramètre k a été ajusté. Dans les deux cas, la simulation reproduit d'une manière convenable la distorsion différée expérimentale.

Simulation 4 (Tableau 6.2.1 et Figures 6.2.5 à 6.2.8) :

Tableau 6.2.1 - Livry Gargan – Ensemble des paramètres définitifs permettant de simuler les déformations différencées mesurées pendant les essais de flUAGE

Age d'exploitation	2000		1950		
	Hr (%)	75	95	75	95
B		$2,63 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-4}$	$8,24 \cdot 10^{-4}$	$7,49 \cdot 10^{-4}$
m		2,62	2,86	1,33	2,80
k		$1,75 \cdot 10^{-24}$	$1,73 \cdot 10^{-20}$	$7,82 \cdot 10^{-12}$	$6,10 \cdot 10^{-11}$
n		15		12	
b		10		6	
v			0,21		
δ_0			-0,48		
δ_∞		1,2		1,45	

En imposant les paramètres n et b pour chacun des âges, une évolution de k en fonction de l'hygrométrie est alors perceptible. En effet, k augmente nettement avec l'hygrométrie. Cette tendance est également vraie pour les paramètres B et m. Pour les paramètres n et b, ils diminuent avec l'ancienneté de l'exploitation et inversement δ_∞ augmente.

Des essais complémentaires sous des hygrométries différentes seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer ces tendances.

Néanmoins, la distorsion, les déformations volumiques, axiales et latérales différencées ont été simulées avec ces deux jeux de paramètres.

Les paramètres (A_0 et χ) n'ont pas été déterminés : aucune phase de recouvrance n'a été réalisée pendant ces essais. Des essais supplémentaires avec d'autres hygrométries seraient nécessaires pour pouvoir calculer le paramètre ξ .

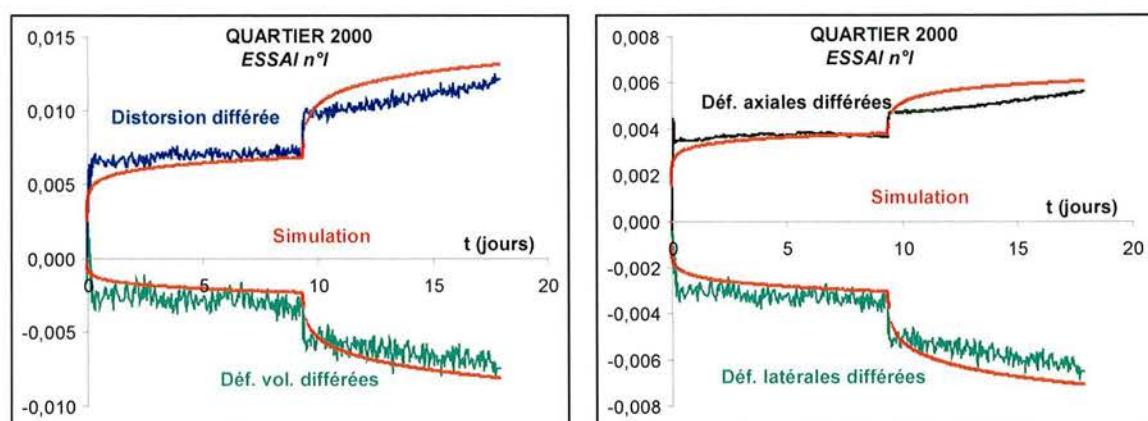
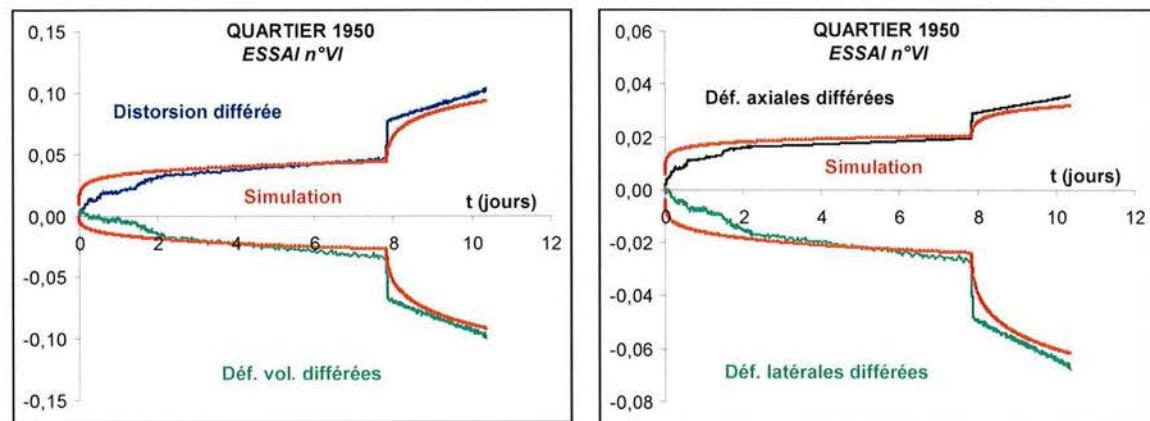
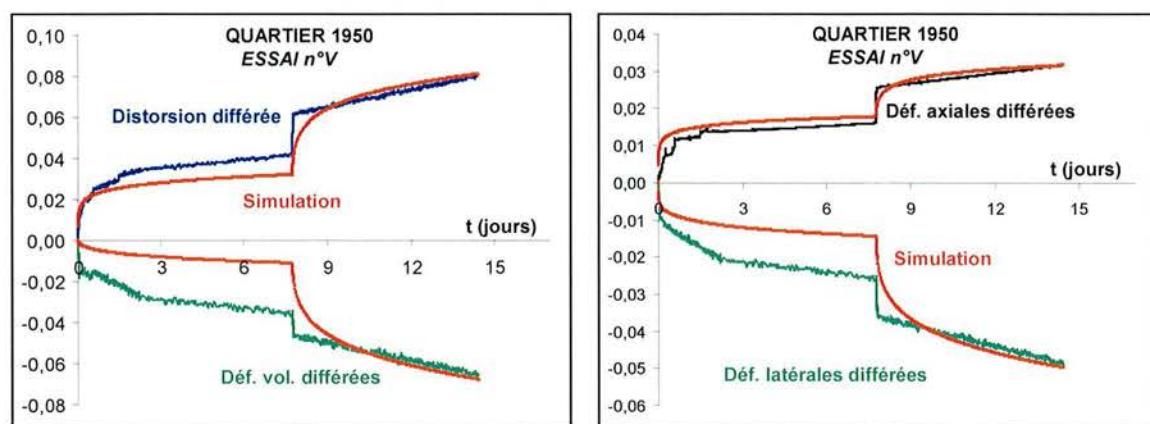
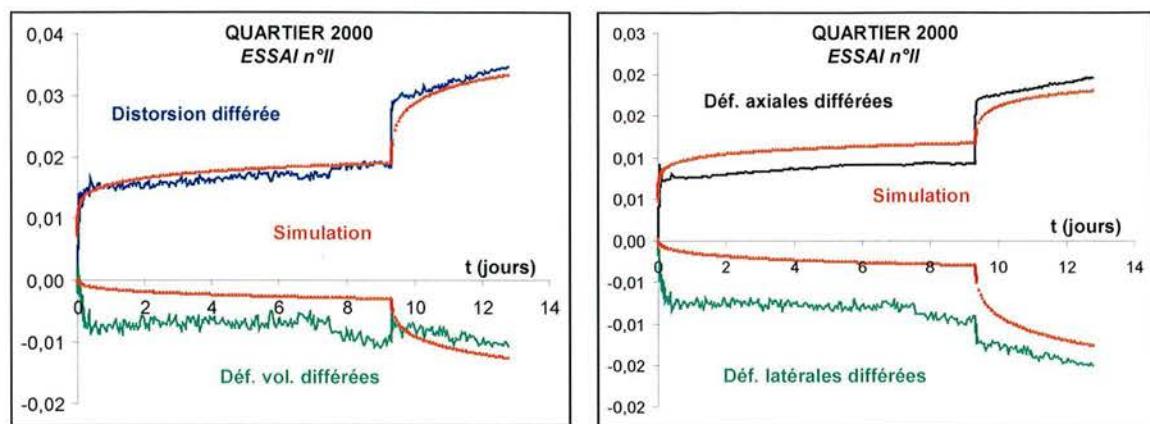


Figure 6.2.5 - Livry Gargan – Age d'exploitation 2000 – Hygrométrie 75%
Evolution de la distorsion, des déformations volumiques, axiales et latérales différencées et simulation



Validité de la distorsion critique :

Le tableau 6.2.2 rassemble toutes les valeurs critiques de la distorsion en fonction de l'hygrométrie et de la contrainte. Elles ont été calculées avec les paramètres du tableau 6.2.2 en utilisant l'équation suivante :

$$\gamma_t(q) = k^{\frac{1}{b}} \cdot q^{\frac{n-m}{b}} \quad (6.2.1)$$

Tableau 6.2.2 - Livry Gargan – Ages d'exploitation 1950 et 2000 - Distorsion critique (valeur théorique)

	Age d'exploitation 1950		Age d'exploitation 2000	
Hygrométrie (%) Contrainte (MPa)	75	95	75	95
1,5	0,0070	0,0173	0,0307	0,0385
2,5	0,0131	0,0321	0,0751	0,0843

Plus les hygrométries et les contraintes sont élevées, plus cette valeur est importante. Les valeurs théoriques de la distorsion critique (γ_t) des essais multipaliers d'âges d'exploitation 1950 et 2000 sont comparées à la limite expérimentale fluage I-fluage II (FII_I-FII). Cette dernière est estimée expérimentalement avec difficulté sur les courbes distorsion différée-temps (Figures 6.2.9 à 6.2.12).

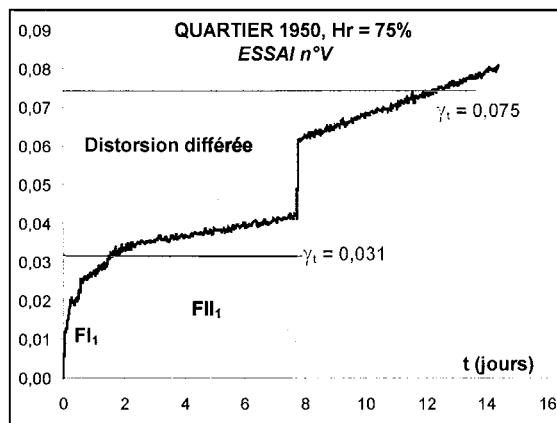


Figure 6.2.9 - Livry Gargan – Age 1950
Hygrométrie 75% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

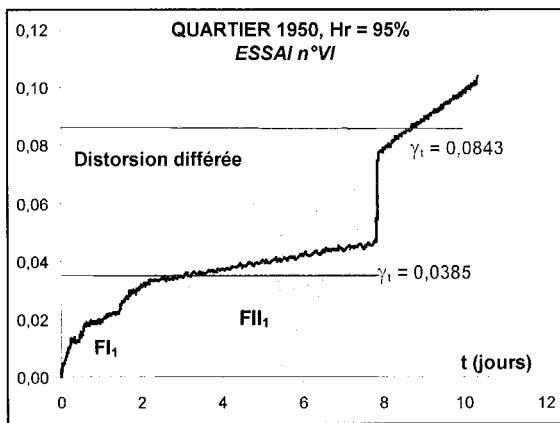


Figure 6.2.10 - Livry Gargan – Age 1950
Hygrométrie 95% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

La phase de fluage primaire n'apparaît pas au début de second palier de contrainte. Un problème de métrologie semble être à l'origine de ce manque d'informations. La comparaison entre γ_t et la limite FII_I-FII n'est donc pas possible.

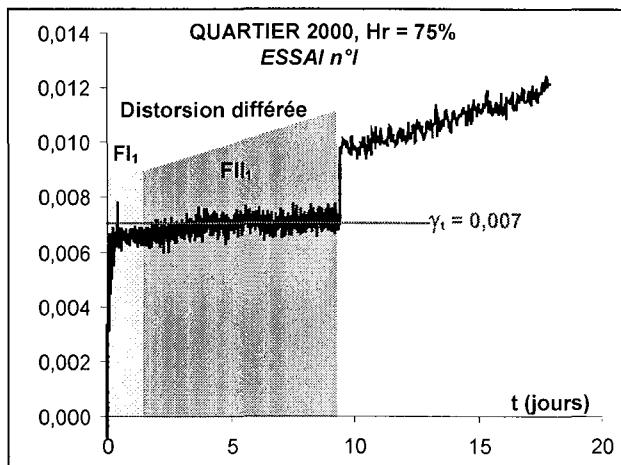


Figure 6.2.11 - Livry Gargan – Age 2000
Hygrométrie 75% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

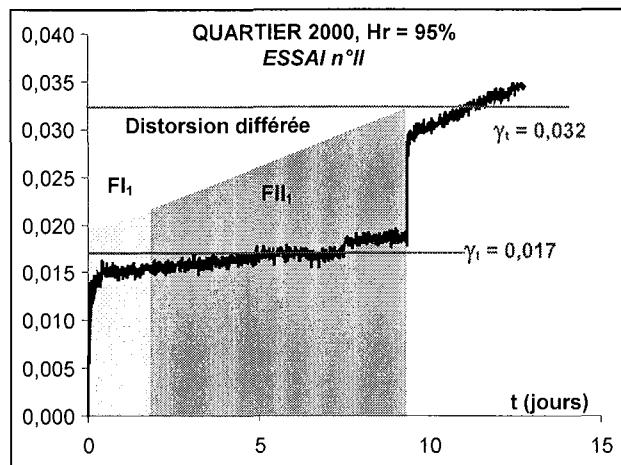


Figure 6.2.12 - Livry Gargan – Age 2000
Hygrométrie 95% - Limites théoriques (γ_t) et expérimentales fluage I-fluage II du premier palier

Comme pour les essais avec des échantillons d'âge d'exploitation 1950, la phase de fluage primaire n'apparaît pas au début du second palier de contrainte. Un problème de métrologie semble être à l'origine de ce manque d'informations. La comparaison entre γ_t et la limite FI-FII n'est donc pas possible.

ANNEXE 6.3 – DIFFRACTOMETRIES AUX RAYONS X

Une diffraction de rayons X est réalisée sur des échantillons prélevés sur les éprouvettes utilisées pour les essais de fluage.

Les échantillons correspondant aux éprouvettes des essais sont les suivants :

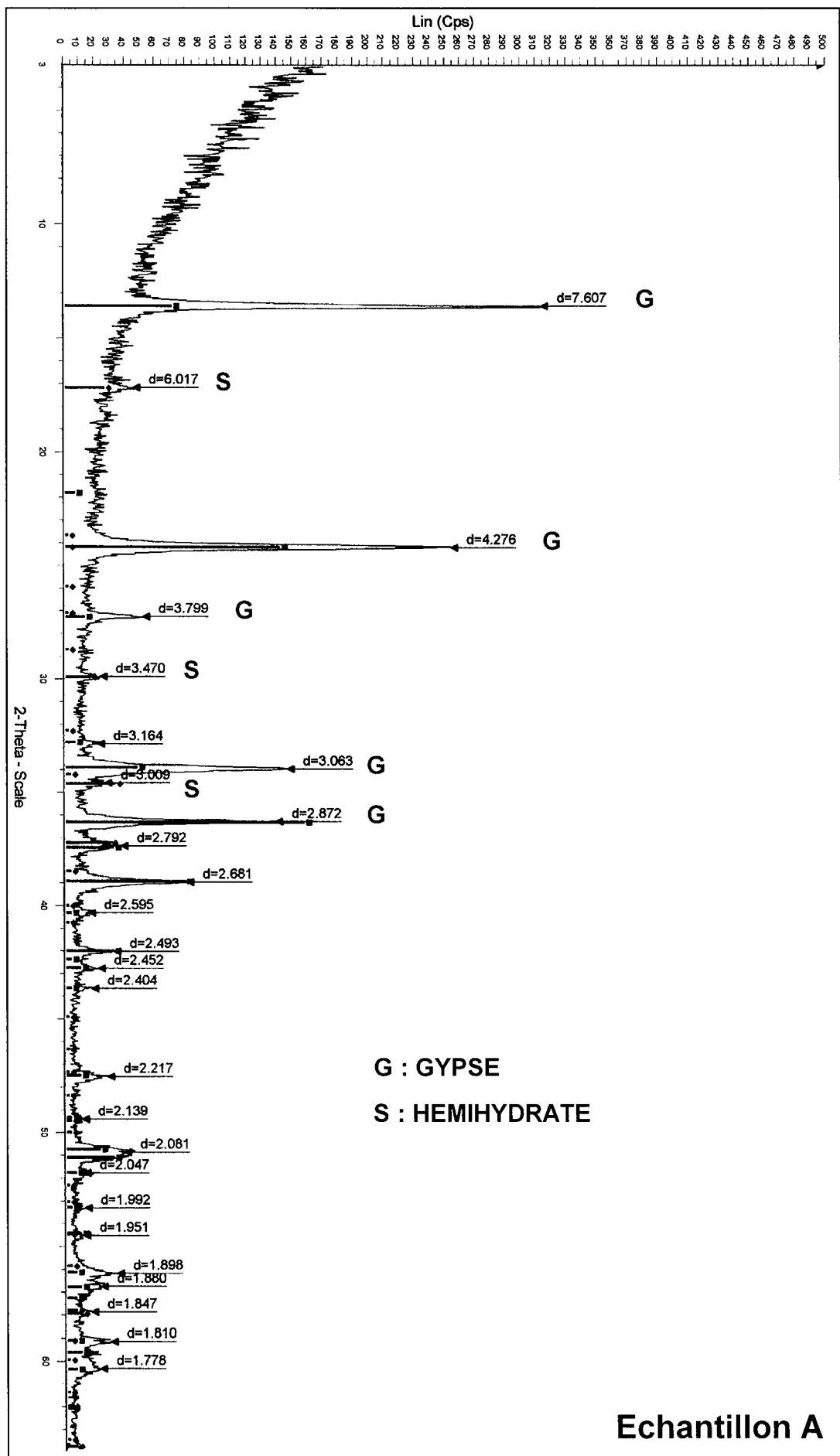
- Echantillon A : Essai n° 19, fluage monopalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 30%
- Echantillon B : Essai n° 20, fluage monopalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 60%
- Echantillon C : Essai n° 21, fluage monopalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 90%
- Echantillon D : Essai n° X, fluage multipalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 30% puis 90%
- Echantillon E : Essai n° XI, fluage multipalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 60% puis 90%
- Echantillon F : Essai n° XII, fluage multipalier, âge d'exploitation 1920, hygrométrie 90%

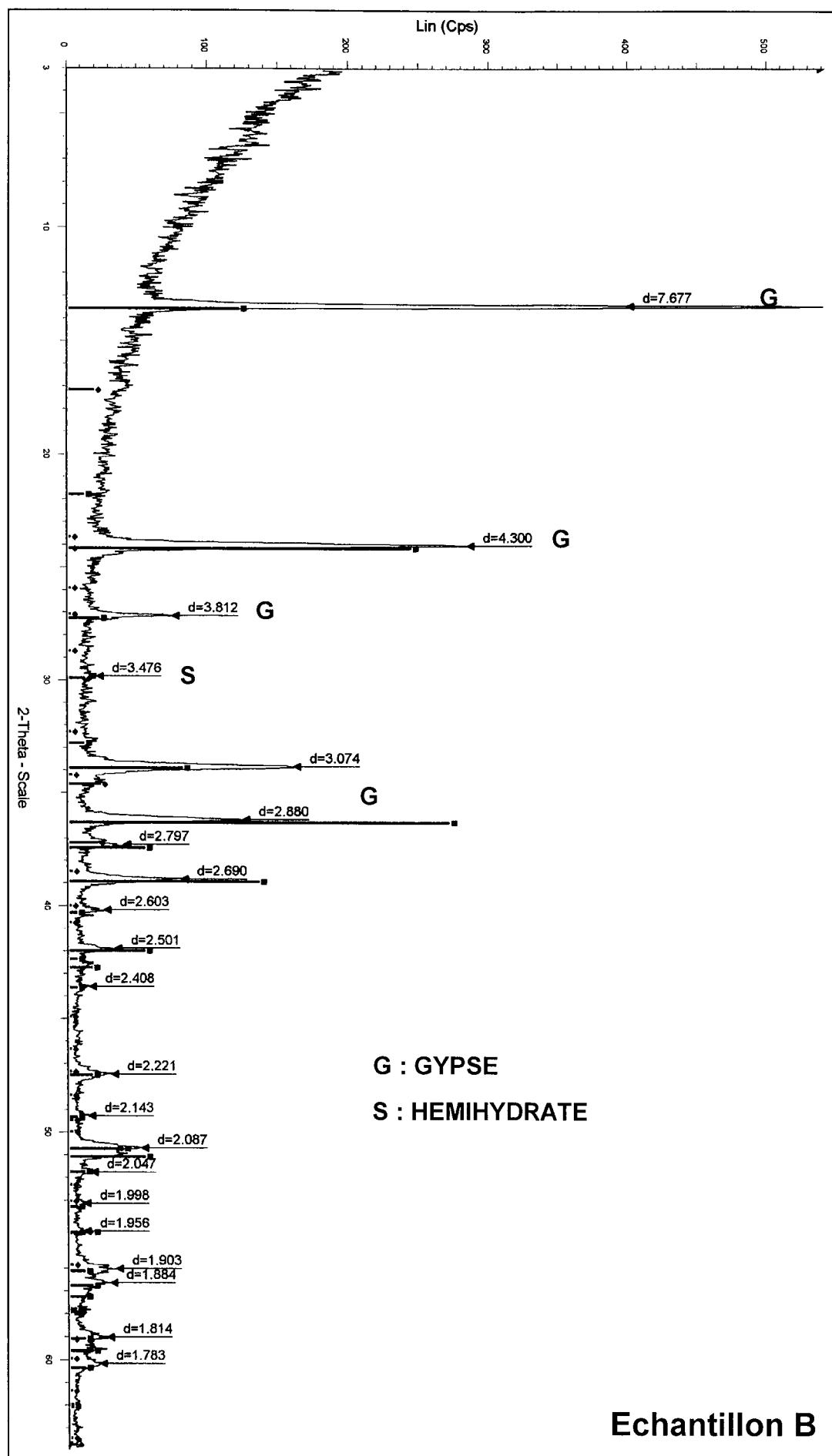
Commentaires :

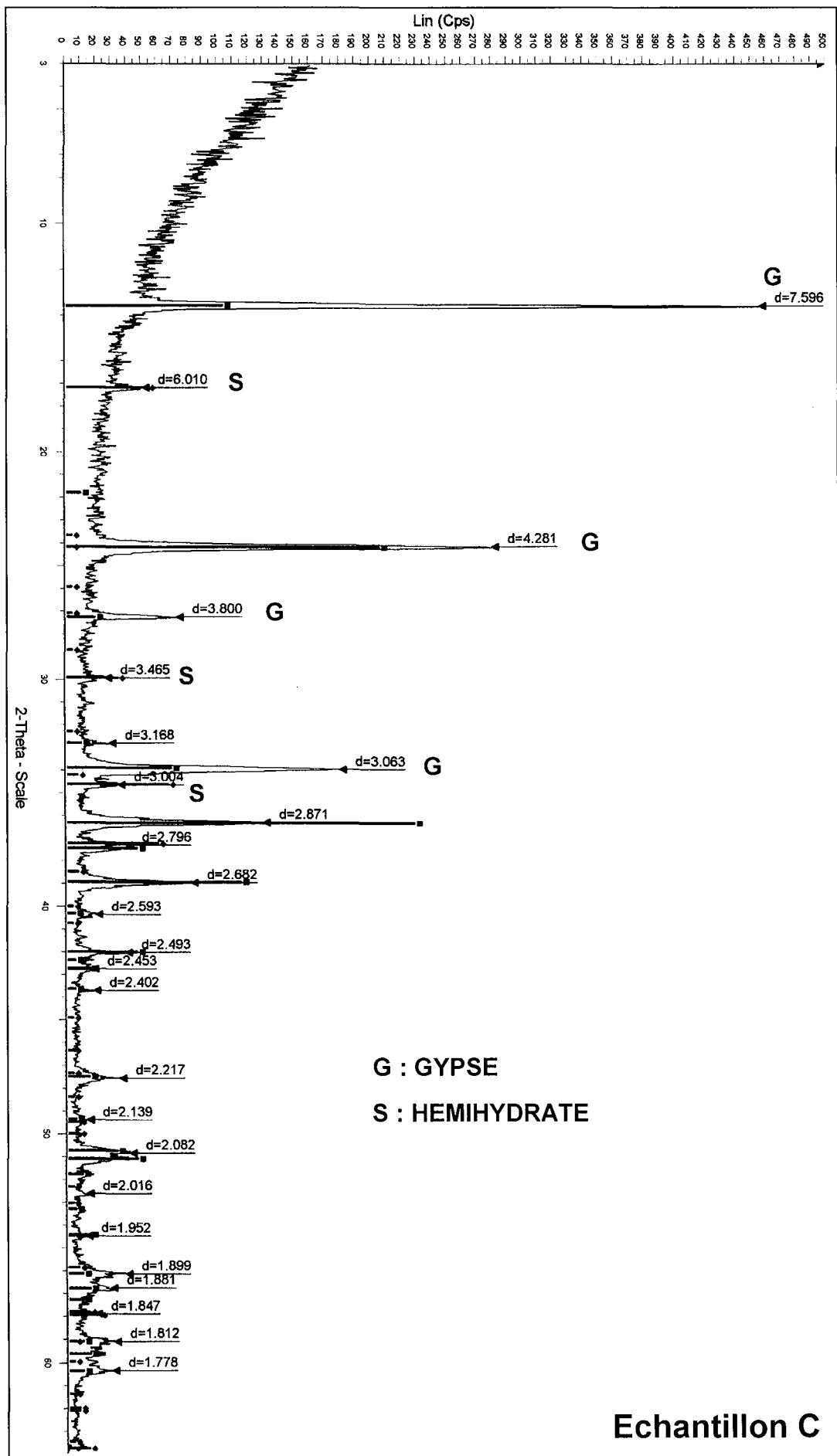
Les analyses de la diffractométrie aux rayons X effectuées sur les échantillons précédemment cités permettent d'identifier deux phases cristallisées : du gypse et de l'hémihydrate.

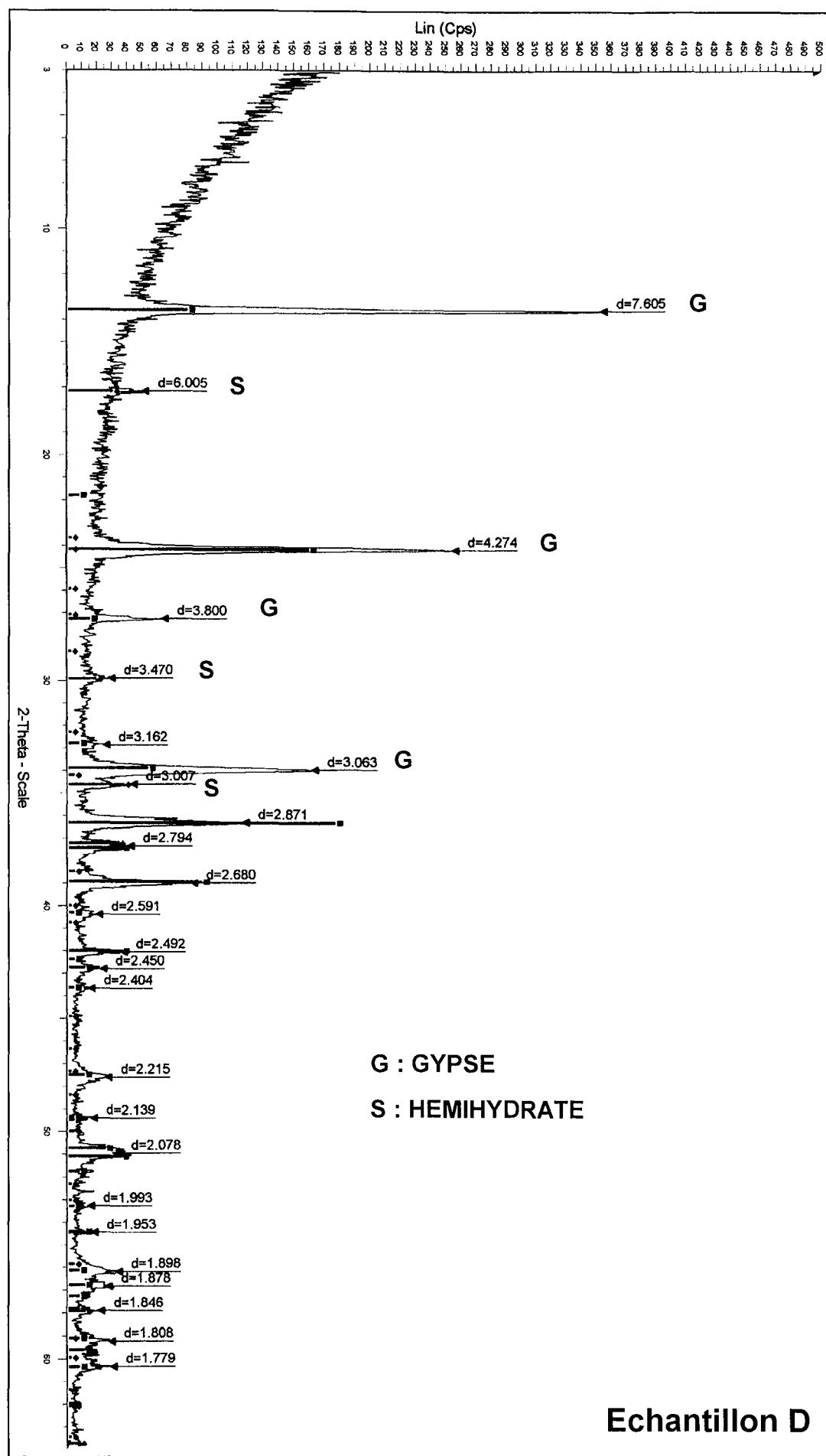
Les différences relatives des raies de gypse (entre la raie à 7,57 Å et la raie à 3,06) sont probablement dues à des problèmes d'orientation préférentielle des particules. Sur les diffractogrammes, seules les principales raies sont identifiées G ou S (G : gypse et S : hémihydrate) même si les autres sont identifiables G ou S.

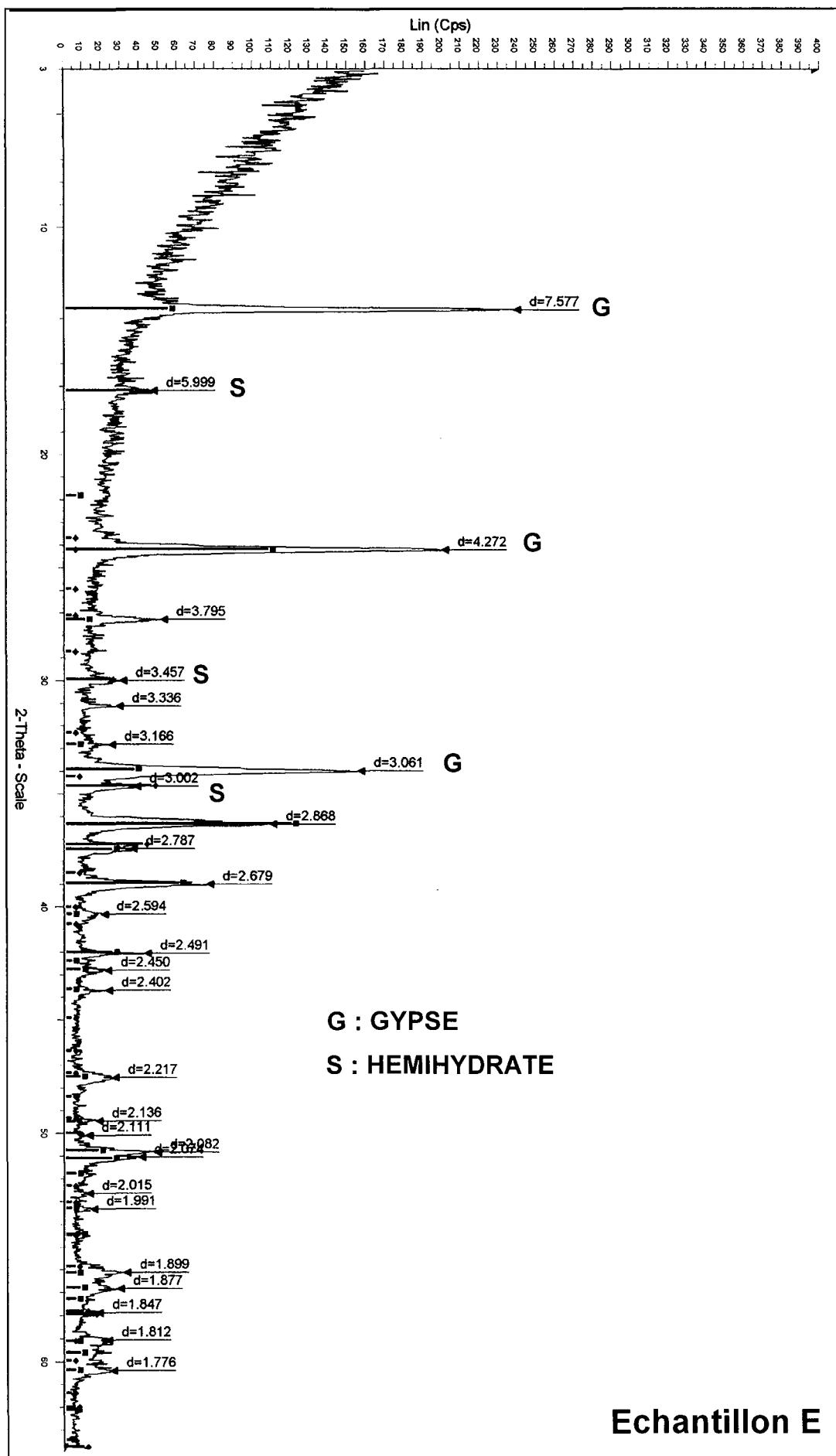
D'un échantillon à l'autre, la variation de l'intensité des raies n'est pas considérée comme significative si l'on ne s'intéresse qu'aux phases majeures. Cependant, dans notre cas, ces petites variations peuvent être l'illustration de la présence d'impuretés.

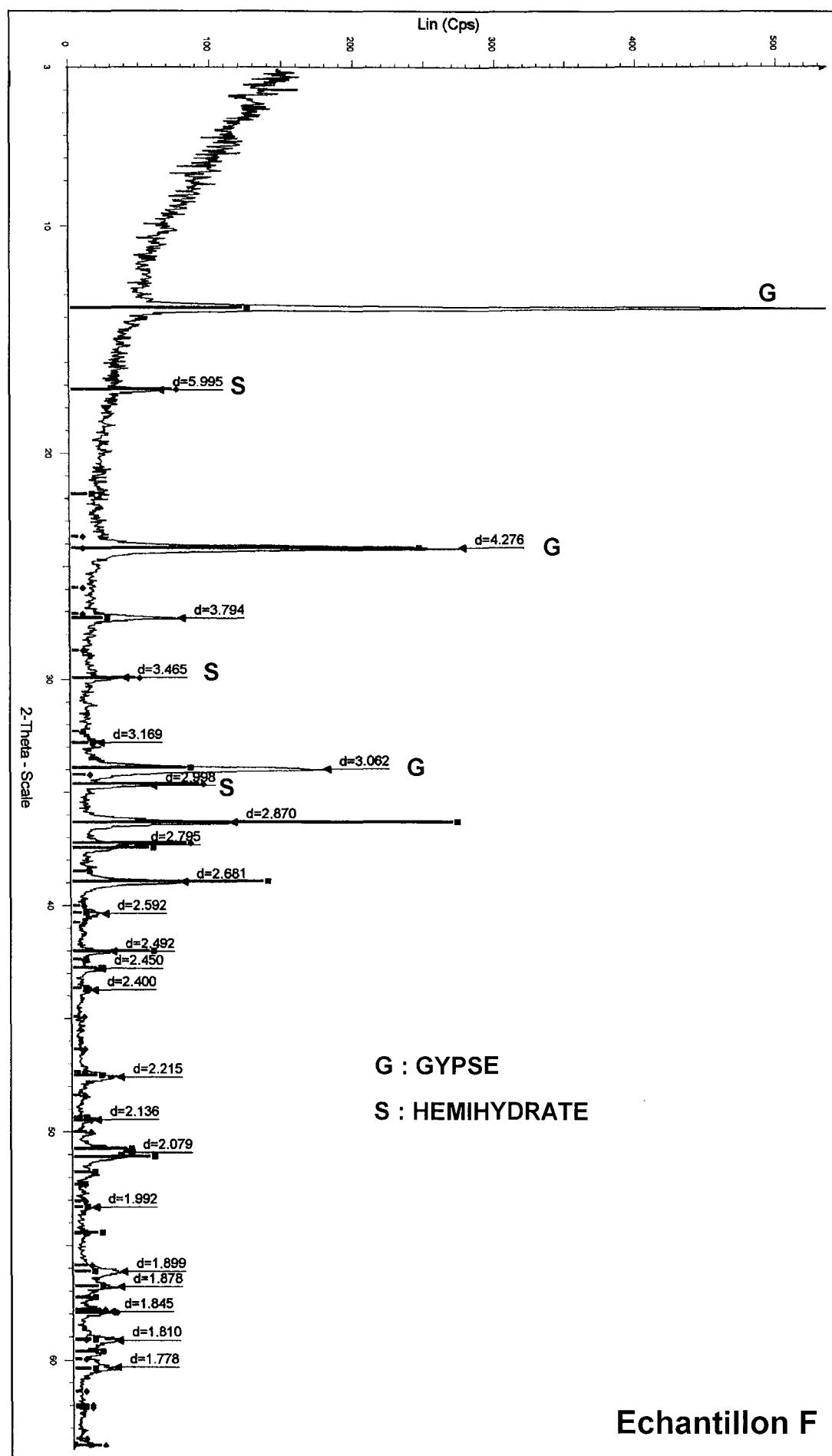












AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

000

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Pierre BEREST, Ingénieur, Ecole Polytechnique, Palaiseau

Monsieur Jian-Fu SHAO, Professeur, Ecole Polytechnique universitaire de Lille

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur AUVRAY Christophe

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Vieillissement et comportement rhéologique du gypse"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Génie Civil - Hydrosystèmes - Géotechnique »

Fait à Vandoeuvre, le 02 décembre 2003

Le Président de l'I.N.P.L.,

L. SCHUFFENECKER





Les carrières souterraines de gypse peuvent présenter plusieurs types d'instabilités qui ont des conséquences en surface mais également en profondeur. Ces désordres peuvent être une expansion prononcée des piliers, une montée des murs ou encore la formation de fontis. Leur importance est fonction de l'âge d'exploitation du quartier. Généralement, les quartiers d'âge d'exploitation les plus anciens sont les plus dégradés. Afin de déterminer la nature, les causes et l'intensité du vieillissement du gypse, des observations au microscope électronique à balayage de plusieurs échantillons provenant de quartiers d'âge d'exploitation différent ont été réalisées. Des traces de dissolution ont été décrites sur les faces et les extrémités des cristaux. Leur origine est probablement due à la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère minière. De plus, l'intensité de ces dissolutions diminue du parement vers le cœur des piliers. Le comportement mécanique instantané du gypse a été décrit à partir des résultats de la caractérisation physico-mécanique. Des mesures de convergence de galeries, d'expansion de piliers et des essais de fluage sous hygrométrie contrôlée avec des échantillons centimétriques ont permis d'étudier, *in situ* et au laboratoire, le comportement différencié du gypse. Un couplage hydro-chimico-mécanique est proposé pour contrôler les déformations différenciées. Celles-ci seraient dues à deux mécanismes : dissolution-migration d'eau et dislocation. Les différents résultats et hypothèses ont permis de proposer une loi mécanique visco-élasto-plastique afin de décrire le comportement différencié du gypse. Le comportement instantané a été négligé car aucun phénomène de désordre n'a été relevé à court terme. La loi de comportement est basée sur l'unification de la loi de Lemaitre et celle de Norton. Elle prend en compte le couplage hydro-chimico-mécanique et le caractère dilatant du matériau. Une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et les simulations a montré la capacité du modèle à prédire le comportement à long terme de la roche étudiée.

Mots-clé : gypse, carrière souterraine, vieillissement, hygrométrie, comportement mécanique, essai de fluage, couplage

The underground gypsum mines could show multiple types of instabilities which have major consequences in the surface and in depth. The demonstrations of these disorders are expansions of pillars, ascents of walls, the forming of subsidence. Generally, the old exploited districts are more degraded than the recent ones. To determine the identity, the source and the intensity of gypsum aging, scanning electron microscope observations were conducted on samples located in zones mined during different time periods. Dissolution traces were described on both crystals faces and extremities. Their origin is probably due to water vapor present in the mining atmosphere. Their intensity decreases with distance from the wall towards the middle of the pillar. The short time behaviour of the gypsum was described. Measurements of rooms convergence, pillars expansion and creep tests with controlled hygrometry made it possible to study (*in situ* and in laboratory) the long term behaviour of gypsum. A coupling hydro-chimico-mechanics was proposed to control the differed deformations. Two mechanisms of differed deformations were proposed : dissolution/migration of water and dislocation. To describe the differed behaviour, a law of long-term behaviour was proposed. The short time behaviour was not taken into account : no instability was noted. The law was based on the unification of the Lemaitre law and Norton law. The good agreement between experimental curves and the simulations showed the capacity of the coupled model to predict the long-term behaviour of the gypsum.

Key words : underground mine , gypsum, aging, hygrometry, mechanical behaviour, creep test, coupling