



HAL
open science

Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses

Jad Wakim

► **To cite this version:**

Jad Wakim. Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005. Français. NNT: . tel-00011993

HAL Id: tel-00011993

<https://pastel.hal.science/tel-00011993>

Submitted on 20 Mar 2006

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.



Collège doctoral

T051220JWAK

N° attribué par la bibliothèque



THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE PARIS

SPÉCIALITÉ : TECHNIQUE ET ÉCONOMIE DE L'EXPLOITATION DU SOUS-SOL

présentée et soutenue publiquement par

Jad WAKIM

le 20 Décembre 2005

**Influence des solutions aqueuses sur le comportement
mécanique des roches argileuses**

Directeur de thèse : Faouzi HADJ-HASSEN

Jury :

M. Jack-Pierre PIGUET	Professeur	ANDRA	Président
M. Alain MILLARD	Professeur	École Polytechnique	Rapporteur
M. Isam SHAHROUR	Professeur	Université de Lille	Rapporteur
M ^{me} Amel REJEB	Docteur	I.R.S.N.	Examineur
M. Laurent DE WINDT	Docteur	École des Mines de Paris	Examineur
M. Faouzi HADJ-HASSEN	Docteur	École des Mines de Paris	Examineur
M. Michel TIJANI	Professeur	École des Mines de Paris	Membre invité

Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol - École des Mines de Paris
35, Rue Saint-Honoré - 77305 Fontainebleau Cedex

AVANT PROPOS

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse Monsieur Faouzi Hadj-Hassen qui m'a témoigné son soutien et sa confiance et qui m'a prodigué un enseignement toujours judicieux et rigoureux durant toutes les phases de la thèse. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.

Un remerciement tout particulier à Monsieur Michel Tijani, Professeur à l'École des Mines de Paris, qui m'a transmis une partie de son savoir. J'ai particulièrement apprécié la pertinence de ses conseils, de ses commentaires et ses encouragements pour mener à bien cette recherche.

Je remercie Monsieur Damien Goetz, Directeur du Centre de Géotechnique et d'Exploitation de Sous-sol (CGES) de m'avoir accueilli au sein du Centre en vue de préparer ma thèse.

Je tiens à remercier Monsieur Jack-Pierre Piguet, Professeur à l'École des Mines de Nancy, pour m'avoir fait l'honneur d'être Président du jury. Je remercie également Monsieur Alain Millard, Professeur à l'École Polytechnique, et Monsieur Issam Shahrour, Professeur à l'Université de Lille, d'avoir accepté de faire partie du jury en tant que rapporteurs.

J'exprime mes remerciements à Madame Amel Rejeb, Expert-Chercheur à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire, d'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examinateur.

La partie chimique n'aurait pas pu se concrétiser sans l'aide précieuse de Monsieur Laurent de Windt et Monsieur Jan Van Der Lee, Chercheurs à l'École des Mines de Paris au Centre d'Informatique Géologique (CIG). Je les en remercie.

Je remercie Monsieur Dimitri Gordine, responsable du laboratoire de CGES, qui m'a accompagné durant toutes les expérimentations. J'ai beaucoup profité de ses conseils et de ses critiques constructives. Je tiens aussi à exprimer mes remerciements aux techniciens de la halle d'essais pour leur collaboration et leur aide lors de la réalisation des essais.

J'exprime mes remerciements à tous les chercheurs, secrétaires, thésards, stagiaires du CGES qui savent si bien rendre le travail agréable par leur bonne humeur.

J'exprime ma gratitude aux Charbonnages de France (CdF), à l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et à l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) pour nous avoir permis d'utiliser des échantillons de leur site dans cette recherche.

Le soutien moral et affectif d'êtres chers a constitué un des aspects les plus précieux tout au long de mes études de perfectionnement, sans lesquels la réalisation de cette recherche n'aurait pas été possible. Merci infiniment à tous les membres de ma famille qui ont su être avec moi chaque jour, malgré la distance qui sépare la France du Liban. Je remercie essentiellement ma mère pour son appui et ses encouragements. Elle m'a toujours poussé à aller au-delà de mes limites pour réaliser mes projets et je ne la remercierai jamais assez pour tout ce qu'elle a fait pour moi.

A ma mère

Le chef-d'œuvre de Dieu, c'est le cœur d'une mère (Grétry)

RÉSUMÉ

La mise en contact d'une roche argileuse avec une solution aqueuse entraîne l'apparition d'un gonflement qui joue un rôle important dans le comportement des ouvrages creusés dans ce type de terrain. Cette déformation est marquée par un caractère tridimensionnel et anisotrope et fait intervenir plusieurs mécanismes comme l'adsorption, l'osmose ou la capillarité.

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés au gonflement et ont souvent été controversés en raison de la complexité des phénomènes impliqués. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de ces recherches et vise à contribuer à la compréhension du gonflement des roches argileuses lorsqu'elles sont confinées et soumises à une solution hydratante. L'essentiel des travaux réalisés dans cette thèse a concerné l'argilite de Lorraine et l'argilite de Tournemire.

Pour caractériser le gonflement et identifier les principaux paramètres qui le gouvernent, il était nécessaire d'aborder le problème en premier lieu avec une approche expérimentale. De nombreux dispositifs ont alors été mis au point afin de réaliser des essais dans différentes conditions de gonflement. Afin de faciliter l'interprétation des essais et par la suite la modélisation des comportements observés, la démarche expérimentale adoptée a consisté à étudier le gonflement à partir d'une analyse mécanique suivie d'une analyse chimique.

Dans la partie mécanique, le gonflement a été étudié en imposant à l'échantillon des sollicitations mécaniques et en maintenant invariante la solution d'hydratation durant les essais. Les principaux points examinés étaient, d'une part, l'effet des conditions aux limites latérales sur le gonflement axial (déplacement nul ou contrainte constante), et d'autre part, l'influence de la contrainte axiale et son historique de déchargement sur le gonflement radial. L'anisotropie du gonflement a été étudiée en effectuant, pour différentes orientations de l'échantillon, des essais de gonflement libre, de gonflement empêché et de gonflement uniaxial. Cet éventail d'essais mécaniques a permis d'étudier le gonflement tridimensionnel anisotrope en passant du gonflement maximal au gonflement nul et de choisir le type d'essai le plus approprié à utiliser dans la suite de la recherche.

L'analyse précise effectuée pour expliquer les mécanismes qui sont à l'origine du gonflement a montré que le comportement est surtout régi par des phénomènes électrochimiques qui s'opèrent entre les ions de la solution et les feuillets argileux. Ce résultat important nous a conduit à développer plus en détail dans la partie chimique le rôle de la solution aqueuse. Dans cette partie, le gonflement a été dans ce cas étudié en imposant à un échantillon des sollicitations chimiques tout en maintenant constante la contrainte axiale appliquée durant les essais. Les sels monovalents et le sel divalent utilisés à différentes concentrations sont le chlorure de sodium (NaCl), le chlorure de potassium (KCl) et le chlorure de calcium (CaCl₂). L'objectif recherché était d'analyser les effets de l'historique du chemin chimique avec des concentrations décroissantes ou des concentrations cycliques et de mettre en évidence, sur le gonflement axial, le rôle de la normalité de la solution, de chaque type de sel, de l'anisotropie et de la contrainte appliquée.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis le développement d'un modèle rhéologique qui prend en considération le temps, l'anisotropie, le chargement appliqué et le chimisme de la solution d'hydratation. Ce modèle a été intégré dans un code numérique et des applications sur des cas simples ont été réalisées pour montrer sa validité.

Mots-clés : Argilite, Dispositifs expérimentaux, Gonflement tridimensionnel, Anisotropie, Pression de gonflement, Cinétique de gonflement, Chemin chimique, Retrait, Activité, Modélisation.

ABSTRACT

The hydration of the shale with an aqueous solution induces a swelling deformation which plays an important role in the behaviour of the structures excavated in this type of grounds. This deformation is marked by a three-dimensional and anisotropic character and involves several mechanisms like adsorption, osmosis or capillarity.

Several researches were dedicated to swelling and were often much debated due to the complexity of the implied phenomena. The goal of this thesis is therefore to contribute to a better understanding of shale swelling when the rock is confined and hydrated with an aqueous solution. The main part of the work accomplished was related to the Lorraine shale and to the Tournemire shale.

To characterize swelling and to identify the main governing parameters, it was necessary to start the issue with an experimental approach. Many apparatus were then developed to carry out tests under various conditions of swelling. In order to facilitate the interpretation of the tests and thereafter the modelling of the behaviour, the experimental procedure adopted consisted of studying first the mechanical aspect and then the chemical aspect of swelling.

In the mechanical part, swelling was studied by imposing on the sample a mechanical loading while maintaining during the tests the same aqueous solution. The principal parameters which were studied are the effect of the lateral conditions on axial swelling (impeded strain or constant stress) as well as the influence of the axial stress on radial swelling. The anisotropy of swelling was studied by carrying out, for different orientations of the sample, tests of free swelling, impeded swelling and uniaxial swelling. These various mechanical tests allowed to study the three-dimensional anisotropic swelling in all the conditions and to select the most appropriate test to be used in the second phase of the research.

The precise analysis performed to explain the mechanisms behind the swelling of an argillaceous rock when it is in contact of water showed that the mechanical response is ruled mainly by electrochemical phenomena which operate between the solution elements and the clay layers. This important result oriented the research to develop better the role of the chemistry in the behaviour. Swelling was therefore analysed by imposing on the sample a chemical loading while maintaining constant the axial stress. Monovalent and divalent salts which were used with various concentrations are the sodium chloride (NaCl), the potassium chloride (KCl) and the calcium chloride (CaCl₂). The foreseen objective was to analyze the effect of the chemical path with decreasing or cyclic concentrations and to highlight the role of the solution normality, the type of salt and the anisotropy on the axial swelling.

The experimental results obtained allowed the development of a new rheological model which takes into account the time, the anisotropy, the applied loading and the chemistry of the solution. This model was implemented in a finite element code to simulate simple cases and to prove its validity.

Key-words : Shale, Experimental apparatus, Three-dimensional Swelling, Anisotropy, Swelling pressure, Swelling kinetic, chemical Way, Shrinkage, Activity, Modelling.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I A propos du phénomène de gonflement	3
1 Impact du gonflement sur les ouvrages en géotechnique	4
1.1 Introduction	4
1.2 Ouvrages superficiels	4
1.3 Ouvrages souterrains	5
1.3.1 Tunnels	5
1.3.2 Puits pétroliers	6
1.3.3 Cavités de stockage des déchets radioactifs	6
1.3.4 Monuments historiques	7
1.4 Conclusion	8
2 Généralités sur le gonflement	9
2.1 Introduction	9
2.2 Les argiles	9
2.2.1 Étude microstructurale	10
2.2.2 Structure des argiles	11
2.2.3 Texture des argiles	13
2.3 Cations échangeables	14
2.4 Différents types d'eau	14
2.4.1 Potentiel chimique et activité	16
2.4.2 Activité de l'eau dans les milieux poreux	18
2.5 Principales causes du gonflement	19
2.5.1 Hydratation par adsorption	19
2.5.2 Hydratation par osmose	20
2.5.3 Hydratation par capillarité	23
2.5.4 Transformations chimiques	24
2.6 Paramètres macroscopiques	25
2.6.1 Teneur en eau initiale	25
2.6.2 Effet d'échelle	26
2.6.3 Régime de contraintes	26
2.7 Anisotropie du gonflement et anisotropie de la pression de gonflement	28
2.8 Conclusion	29

3	Approches théoriques de gonflement	30
3.1	Introduction	30
3.2	Approche de la double couche	30
3.2.1	Théorie de Gouy-Chapman	31
3.2.2	Influence des différents paramètres sur le gonflement	31
3.2.3	Forces électrostatiques	32
3.2.4	Passage micro-macro	33
3.2.5	Application de l'approche de la double couche	33
3.3	Approches phénoménologiques	37
3.3.1	Modèles en contraintes effectives	37
3.3.2	Modèle d'Alonso et Gens	40
3.4	Approches basées sur des modèles de gonflement	42
3.4.1	Modèles indépendants du temps	42
3.4.2	Modèles dépendants du temps	44
3.4.3	Modèles basés sur l'humidité relative ou l'activité	46
3.5	Conclusion	47
II	Analyse expérimentale	48
4	Dispositifs expérimentaux et roches étudiées	49
4.1	Introduction	49
4.2	Dispositifs expérimentaux	50
4.2.1	Cellule de mesure des déplacements libres	50
4.2.2	Cellule de mesure de la pression de gonflement	51
4.2.3	Cellule œdométrique	52
4.2.4	Cellule triaxiale	53
4.2.5	Cellules uniaxiales	54
4.2.6	Dispositifs d'échanges massique et chimique	56
4.3	Caractéristiques des roches	58
4.3.1	Capacité au gonflement des roches	61
5	Étude mécanique	63
5.1	Introduction	63
5.2	Procédure expérimentale	64
5.3	Résultats obtenus	66
5.3.1	Gonflement libre	66
5.3.2	Anisotropies du gonflement libre et de la pression de gonflement	69
5.3.3	Influence du confinement latéral	71
5.3.4	Influence de la contrainte axiale sur le gonflement radial	72
5.3.5	Influence de la contrainte déviatorique	76
5.3.6	Influence de l'historique du déchargement	76
5.3.7	Influence de la contrainte sur l'anisotropie du gonflement	78
5.3.8	Pression de gonflement	80
5.4	Conclusion	82

6	Étude chimique	84
6.1	Introduction	84
6.2	Procédure expérimentale	85
6.3	Résultats obtenus	87
6.3.1	Influence de l'activité de la solution	87
6.3.2	Influence du chemin chimique	89
6.3.3	Anisotropie sous l'effet du chimisme de la solution d'hydratation	95
6.3.4	Similitude entre l'anisotropie sous l'effet de la chimie et l'anisotropie sous l'effet de l'humidité	96
6.4	Gonflement et échange ionique	97
6.4.1	Rappel sur les échanges ioniques	97
6.4.2	Expérimentations	98
6.5	Conclusion	101
III	Modélisation	102
7	Modélisation	103
7.1	Introduction	103
7.2	Modèle proposé	103
7.2.1	Intégration du temps	104
7.2.2	Cas particuliers	105
7.2.3	Ajustement du modèle	106
7.3	Extension du modèle vers la chimie	110
7.3.1	Déformations libres	111
7.3.2	Déformations sous contraintes	114
7.4	Conclusion	117
	CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES	118
	BIBLIOGRAPHIE	121
IV	Annexes	129
A	Effet de la saturation ou de la désaturation sur les caractéristiques mécaniques des matériaux argileux	130
A.1	Introduction	130
A.2	Comparaison entre le comportement des sols argileux et des roches argileuses face à la désaturation	131
A.3	Modèles de comportement	132
A.4	Résistance à la compression simple	132
A.5	Compression triaxiale	132
A.6	Module de Young et coefficient de Poisson	133
A.7	Cas de l'argilite de Lorraine	134

B Essais unidimensionnels	136
B.1 Introduction	136
B.2 Comparaison entre les différentes méthodes	138
B.3 Influence du déplacement imposé	139
C Comportement hydrique de l'argilite de Bure	141
C.1 Introduction	141
C.2 Résultats obtenus	141
C.2.1 Essais de déformations libres	141
C.2.2 Essais uniaxiaux	143
C.2.3 Influence de l'emplacement des capteurs	144
C.2.4 Courbe de rétention	145
D Application du modèle développé sur un ouvrage souterrain	148
D.1 Introduction	148
D.2 Description du tunnel	148
D.3 Mesures in situ	149
D.4 Ajustement du modèle	150
D.5 Méthode de calcul	152
D.6 Comparaison entre la modélisation et les mesures in situ	152
D.7 Comportement du radier	153
D.8 Conclusion	153

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le gonflement des formations argileuses suscite actuellement l'intérêt de la plupart des chercheurs du fait de leur abondance dans le domaine sédimentaire et de leur responsabilité des désordres occasionnés sur différents ouvrages (tunnels, mines, cavités de stockage, forages pétroliers, ...). Paradoxalement, la plupart des recherches effectuées dans le passé pour essayer de caractériser le gonflement de ces terrains et éviter ainsi les difficultés encourues par les ouvrages n'ont pas abouti à des résultats cohérents. En effet, certains chercheurs supposent que le gonflement est dû uniquement à la non saturation du matériau argileux et d'autres considèrent qu'il est dû à l'affinité des minéraux argileux à la solution d'hydratation.

Le gonflement est un problème très complexe car il est le résultat de plusieurs phénomènes associés ne pouvant pas être séparés expérimentalement en vue de l'identification de l'effet de chaque mécanisme. Par exemple, lorsque la roche est mise en contact avec l'eau ou avec une solution saline, on observe qu'elle réagit soit par gonflement si elle n'est pas saturée initialement et si elle présente un déficit en charge négative, soit par retrait si la roche est initialement saturée et mise en contact avec une solution plus concentrée que l'eau des pores.

Par ailleurs, les déformations engendrées ne sont pas uniformes suivant toutes les directions à cause de l'anisotropie structurelle du matériau et dépendent principalement de l'état de contrainte appliqué.

La problématique de cette thèse est donc d'étudier la réponse d'une roche argileuse soumise à un régime de contrainte et mise en contact soit avec une solution saline soit avec de l'eau. Pour atteindre cet objectif, la voie qui nous a paru la plus appropriée consistait à passer par des expérimentations spécifiques en laboratoire afin de comprendre le comportement d'un matériau argileux assujéti, d'après les recherches bibliographiques, à différentes explications autonomiques. Ce choix a impliqué la mise en oeuvre d'essais représentatifs permettant de cerner les différentes possibilités du gonflement tridimensionnel anisotrope. Les résultats expérimentaux obtenus ont servi par la suite au développement d'un modèle de gonflement qui prend en compte l'effet de l'anisotropie, de la contrainte appliquée et du chimisme de la solution d'hydratation. Le temps est directement intégré dans la formulation analytique proposée.

D'une manière générale, la démarche suivie dans cette thèse est à forte composante expérimentale mais elle est également, dans une moindre mesure, théorique. Pour plus de clarté, le plan de cette thèse est organisé en sept chapitres répartis en quatre parties dont la dernière est consacrée à des annexes.

La première partie est introductive et bibliographique. Elle est constituée de trois chapitres. Le premier chapitre consiste à dépeindre le cadre général de l'impact du gonflement sur les ouvrages en géotechnique pour en préciser les désordres rencontrés et l'importance d'étudier de tels phénomènes.

Le deuxième chapitre présente une approche générale du gonflement, c'est-à-dire les différents facteurs induisant et influençant le gonflement.

Pour clore cette première partie, le troisième chapitre s'attarde sur la présentation des diverses approches traduisant les différents mécanismes du gonflement par des expressions analytiques.

La deuxième partie est uniquement expérimentale. Elle est composée de trois chapitres (4, 5 et 6). Le chapitre 4 est consacré à la présentation des différents dispositifs réalisés ainsi que le mode opératoire suivi par chaque dispositif pour la réalisation des essais de gonflement. L'autre volet du chapitre aborde les caractéristiques des roches étudiées.

Le chapitre 5 illustre les résultats de l'étude mécanique qui est dans sa grande majorité effectuée sur l'argilite de Lorraine. Ce chapitre permet de clarifier le gonflement tridimensionnel anisotrope et aboutit à des recommandations générales relatives aux essais effectués dans le chapitre 6.

L'objectif du chapitre 6 est de caractériser l'effet de la contrainte appliquée sur le gonflement ou le retrait d'un échantillon soumis à plusieurs chemins chimiques composés de différentes solutions salines (NaCl, KCl et CaCl₂). Dans ce chapitre, l'anisotropie du gonflement est mise en évidence. Les essais effectués dans ce chapitre ont porté sur l'argilite de Tournemire.

La troisième partie est composée d'un seul chapitre et est dédiée au développement du modèle de gonflement qui, dans un premier temps, prend en considération l'effet de la contrainte et de l'anisotropie sur le gonflement tridimensionnel. Ce modèle intègre directement le facteur temps de telle manière à reproduire les essais effectués. Dans un second temps, la chimie a été intégrée dans le modèle au moyen de l'activité de la solution pour tenir compte de l'effet de la concentration sur le gonflement et d'autres paramètres expérimentaux pour introduire la réactivité de la roche à chaque type de sel.

La quatrième partie comporte quatre annexes concernant les thèmes suivants :

- l'effet de la saturation ou de la désaturation sur les caractéristiques mécaniques des matériaux argileux,
- les essais unidimensionnels,
- le comportement hydrique de l'argilite de Bure,
- l'application du modèle développé sur un ouvrage souterrain.

Première partie

A propos du phénomène de gonflement

Chapitre 1

Impact du gonflement sur les ouvrages en géotechnique

1.1 Introduction

Le gonflement de certains sols ou de certaines roches sédimentaires constitue un phénomène très important en géotechnique car il est à l'origine de nombreux dommages pour les ouvrages en surface et en souterrain.

Ce phénomène, qui est prépondérant dans les matériaux argileux, dépend des caractéristiques minéralogiques des minéraux argileux et se déclenche lorsque le matériau est mis en contact avec l'humidité ou avec une solution aqueuse.

Lorsque l'eau pénètre dans le matériau argileux, il conduit au gonflement dépendant de l'état de contraintes in situ. Différents types d'hydratation induisent le gonflement tels que la capillarité, l'osmose et l'adsorption. Ces phénomènes sont liés à la non saturation initiale de la roche d'une part, et aux propriétés électrochimiques des feuillets argileux d'autre part.

Les conséquences du gonflement sont nombreuses et dépendent principalement de chaque type d'ouvrage. A titre d'exemple, le gonflement autour des tunnels peut conduire au soulèvement puis à la dislocation du radier.

Le gonflement est généralement accompagné d'un changement des caractéristiques mécaniques et pétrophysiques de la roche qui peuvent avoir une influence sur la durée de vie de l'ouvrage.

L'intérêt de ce chapitre est de mettre en évidence l'importance du phénomène de gonflement dans le comportement et la stabilité des différents types d'ouvrages.

1.2 Ouvrages superficiels

Les ouvrages superficiels sujets au gonflement sont principalement les fondations et les murs de soutènement des bâtiments. Parmi ces derniers, les maisons individuelles construites sans mesures de précaution sur des sols gonflants présentent des dégradations et des fissures au niveau des murs porteurs, des murs de remplissage et des fondations (radier, semelle superficielle ou filante et les pieux).

Les dommages touchent aussi les réseaux de drainage qui peuvent, par exemple, subir des inversions de pente provoquant le débordement des drains alimentant ainsi le phénomène de gonflement ^[87]. Par ailleurs, des réactions chimiques générées peuvent conduire à la sulfatation des dalles de béton entraînant ainsi un gonflement additionnel apparent.

Les principaux facteurs déclenchant le gonflement des ouvrages superficiels sont les suivants :

- les facteurs climatiques (précipitations, évapotranspiration, ...),
- la végétation,
- l'hydrogéologie,
- la topographie (pente, exposition),
- les défauts de fondation et des actions anthropiques (modification des écoulements, imperméabilisation des sols, drainage ou fuite de réseaux, pompage, sources de chaleur enterrées et plantation d'arbres).

Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols gonflants ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars aux U.S.A en 1976 et à 5 milliards de dollars en France entre les années 1989 et 2000.

Différentes techniques peuvent être utilisées pour stabiliser le gonflement superficiel. Le choix d'une technique dépend de son efficacité et de son prix de revient.

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- la stabilisation mécanique (compactage, préhumidification),
- la stabilisation chimique (par ajout de matériaux comme les sels, le ciment et la chaux).

1.3 Ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains sujets au gonflement les plus communément répandus sont :

- les tunnels,
- les puits pétroliers,
- les cavités de stockage des déchets radioactifs,
- les monuments historiques.

1.3.1 Tunnels

Les tunnels en milieu gonflant posent de très importantes difficultés aussi bien lors de leur construction qu'après leur mise en service.

Le creusement du tunnel entraîne une modification des contraintes autour de l'ouvrage. Cette modification engendre souvent l'apparition de fissures facilitant la circulation de l'eau et l'hydratation des minéraux argileux. Cette dernière entraîne le gonflement qui se manifeste par un déplacement de la paroi du tunnel avant la mise en place du revêtement en béton ou par une pression de gonflement après cette mise en place.

Pour mieux décrire le comportement des tunnels excavés, Einstein et Bishoff ^[36] ont identifié différents types de déformations :

- l'adsorption de l'eau provoque une augmentation de volume en fonction du temps. Ce gonflement est causé par la différence de concentration chimique, de liaisons types non saturées ou partiellement saturées,
- les modifications de contraintes entraînent l'absorption de l'eau, autrement dit une augmentation supplémentaire de volume,
- l'adsorption de l'eau peut aussi être responsable de la modification des contraintes s'accompagnant d'une augmentation supplémentaire de volume.

Les désordres caractéristiques qui affectent le plus souvent les tunnels localisés dans un milieu gonflant sont les suivants ^[100] :

- soulèvement puis dislocation du radier (Fig. 1.1),

- bombement et convergence des piédroits,
- pincement de la voûte en clé.



FIG. 1.1 – *Soulèvement puis dislocation du radier d'un tunnel* ^[100]

1.3.2 Puits pétroliers

La boue de forage est un mélange complexe de divers produits chimiques. Elle joue un rôle à la fois physique, chimique et mécanique.

Ses caractéristiques physiques et chimiques permettent d'assurer une bonne stabilité des parois du puits, de refroidir et de lubrifier l'outil et le train de sonde et de transmettre la puissance hydraulique.

Dzialowski et al. ^[34] ont constaté que 90 % des formations rocheuses rencontrées dans les puits pétroliers sont de type argileux et sont impliquées dans 75 % des problèmes.

Les différents mécanismes induisant le gonflement de la roche autour du puits de forage peuvent être résumés comme suit ^[72] :

- la pression capillaire,
- la pression osmotique générée entre la boue de forage et l'eau des pores,
- la pression d'hydratation causée par l'interaction entre les ions de la boue et les surfaces argileuses chargées négativement.

Les principaux désordres rencontrés sont les suivants ^[91] :

- l'instabilité et l'élargissement de la paroi du puits de forage,
- la distorsion des tiges.

Les désordres causés par le gonflement des puits pétroliers sont estimés à 500 millions de dollars par an aux U.S.A ^[94].

Actuellement, les industries pétrolières cherchent à bien choisir la température et la nature de la boue de forage (concentration et nature des cations) pour réduire la réactivité de la roche. L'utilisation de l'huile minimise le gonflement en assurant la stabilité du puits mais elle a malheureusement pour conséquence d'engendrer de graves problèmes environnementaux.

1.3.3 Cavités de stockage des déchets radioactifs

Depuis quelques années, il est devenu nécessaire de trouver des moyens pour gérer à long terme les déchets radioactifs, de haute et moyenne activité, issus de la production d'énergie nucléaire et de l'industrie en général.

Une des solutions envisagées par plusieurs pays est le stockage en formations argileuses profondes. L'objectif de cette solution est d'isoler les déchets de la biosphère par trois barrières (Fig. 1.2) :

1. un conteneur métallique ou en béton afin de noyer les déchets,
2. une barrière ouvragée (BO) constituée d'argile gonflante fortement compactée placée autour des colis,
3. la couche hôte d'argilite assurant une sécurité à long terme.

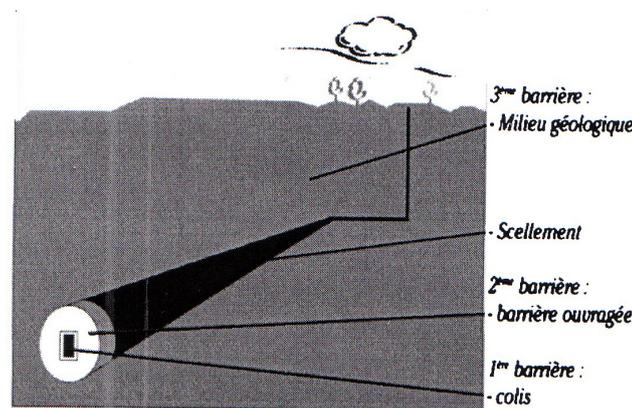


FIG. 1.2 – Les trois barrières de protection [96]

Les argilites contiennent une quantité élevée de minéraux argileux fortement gonflants et sont susceptibles d'agir avec le changement du degré d'hygrométrie et de température.

Différentes réactions chimico-mécaniques, hygro-mécaniques et thermo-mécaniques peuvent être observées. Ces réactions favorisent la formation de fissures perturbant par la suite le comportement mécanique et hydraulique et accroissant la possibilité future de transmission des radionucléides.

Le phénomène le plus apparent jusqu'à maintenant est l'ouverture et la fermeture de fissures localisées autour de l'excavation dans la zone endommagée EDZ (Excavation Disturbed Zone) qui sont dues aux variations saisonnières de l'hygrométrie.

Le stockage futur des colis va créer des variations thermiques favorisant la désaturation des argilites et pouvant être responsable de l'élargissement de la zone endommagée.

S'il y a présence de l'eau, il y a gonflement et ouverture des fissures dans la couche d'argilite, réduction d'espace poral dans la couche de bentonite compactée du fait du gonflement empêché et perturbations alcalines dans le béton.

Le problème réside dans la détermination et l'identification de plusieurs phénomènes (chimiques, physiques et mécaniques) ayant chacun des influences les uns par rapport aux autres.

1.3.4 Monuments historiques

Les monuments historiques peuvent être endommagés par le gonflement du terrain qui les encaissent ou sur lesquels ils reposent. Plusieurs exemples égyptiens illustrent ces situations, tels que le serapeum (Saqqarah), le temple d'Hatshepsout (Louxor) et le grand Temple de Deir El-Bahary [124]. Des décollements du toit, des chutes de blocs et l'apparition de fissures, ainsi que l'effondrement des murs, ont été observés au niveau des zones de contact de ces monuments avec des couches argileuses.

1.4 Conclusion

Les matériaux argileux, que ce soient les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre.

La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses. Pour chaque type d'ouvrage, certaines spécificités sont requises. Par exemple, pour les puits pétroliers, l'effet de la chimie est prépondérant, à l'opposé de la saturation en eau d'exhaure mise en contact avec la couche d'argile entourant les tunnels où il est amoindri.

Après cette brève présentation des conséquences du gonflement sur le comportement des ouvrages géotechniques, il convient à présent d'étudier plus en détail les différents mécanismes induisant et influençant ce phénomène.

Chapitre 2

Généralités sur le gonflement

2.1 Introduction

Le phénomène de gonflement dépend des caractéristiques minéralogiques du matériau argileux et de la nature de la solution d'hydratation. C'est pourquoi une description microscopique du phénomène est cruciale afin de bien comprendre le développement du gonflement.

Dans un premier temps, une étude détaillée de la structure et de la texture des matériaux argileux est proposée pour mettre en évidence l'affinité de ces matériaux à une solution aqueuse.

Ensuite, on s'intéresse aux caractéristiques de la solution d'hydratation, particulièrement au potentiel chimique qui est relié à l'activité de la solution dépendant de la concentration en sel et des forces d'hydratation.

Une fois les caractéristiques du matériau argileux et de la solution d'hydratation définies, on examine les différents mécanismes du gonflement afin de mettre en évidence l'effet de chaque mécanisme.

Après avoir décrit le phénomène de gonflement à l'échelle microscopique, les différents paramètres macroscopiques pouvant influencer le gonflement, tel que l'effet du régime de contraintes, sont analysés.

La dernière partie du chapitre est consacrée à l'anisotropie du gonflement et à l'anisotropie de la pression de gonflement qui vont occuper, par la suite, une place importante dans cette thèse.

2.2 Les argiles

Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre ^[75]. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories :

1. *les argiles plastiques* : elles sont tendres et très déformables,
2. *les argiles raides* : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité, et ce, à cause de la présence des carbonates et du quartz.

À l'échelle microscopique, les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μm chargées négativement comme la smectite, l'illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques ¹.

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution

¹ L'annexe A décrit le changement des caractéristiques mécaniques des matériaux argileux

induit le phénomène de retrait.

Il faut s'entendre sur la qualification de cette teneur en eau. Elle est composée de la teneur en eau liée et de la teneur en eau libre. Les cinétiques d'évolution dans le temps de ces deux teneurs en eau ne sont pas identiques. En effet, la vitesse d'adsorption de l'eau liée, due aux phénomènes électrostatiques, est plus rapide.

En ce qui concerne cette particularité du gonflement, il est difficile d'identifier si c'est l'arrivée d'eau qui provoque le gonflement ou si c'est le gonflement qui permet l'arrivée d'eau. Selon Barbour et Fredlund ^[10], ces deux mécanismes peuvent coexister dans les matériaux argileux.

La variation du volume des argiles est fortement influencée par des facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant.

Une description détaillée des phénomènes microscopiques est nécessaire pour bien comprendre et interpréter les phénomènes observables à l'échelle mésoscopique ou macroscopique.

2.2.1 Étude microstructurale

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Ces phyllosilicates sont formés par un empilement de feuillets, chacun étant formé par un arrangement de deux types de couches, l'une tétraédrique (T) à base de silice (Fig. 2.1) et l'autre octaédrique (O) à base d'hydroxyde d'aluminium (Fig. 2.2).

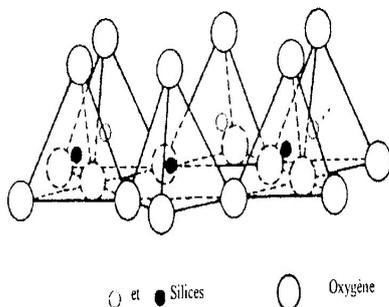


FIG. 2.1 – Feuillet tétraédrique (T)

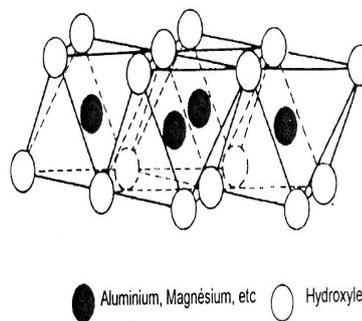


FIG. 2.2 – Feuillet octaédrique (O)

Dans chacun des feuillets décrits précédemment, les cations peuvent être remplacés par d'autres de taille voisine mais pas nécessairement de la même valence.

On parle de **substitution isomorphe** car les dimensions du feuillet restent quasi inchangées. Ces substitutions entraînent alors un excès de charges négatives à la surface des feuillets. Cette électronégativité est une caractéristique intrinsèque des matériaux argileux.

A l'échelle microscopique des argiles, on peut distinguer :

- la structure,
- la texture.

2.2.2 Structure des argiles

Les matériaux argileux sont constitués de petites particules dont la partie poreuse est partiellement ou en totalité occupée par une solution chimique. Ces particules sont formées par l'association des feuillets élémentaires et sont caractérisées par leur surface spécifique, leur capacité d'échange cationique et leur densité de charge surfacique.

Selon la structure chimique des argiles, il est possible de les classer en trois groupes les plus rencontrés dans la nature : la famille de Kaolinite T-O, la famille d'Illite T-O-T et la famille de Smectite T-O-T.

La capacité de gonflement des argiles est influencée par les arrangements et la composition minéralogique de ces feuillets. De même, le gonflement est contrôlé par l'intensité des liaisons interfeuillets qui peuvent se casser lors de l'hydratation et modifier par la suite la microtexture de l'argile.

L'analyse du comportement gonflant des argiles consiste alors à préciser la nature de ces liaisons pour chacune des trois familles d'argiles considérées.

Les Kaolinites (Kaolinite, Bertierine, Dickite, Nacrite, Halloysite) sont des argiles dites *peu gonflantes*. Une particule d'argile est formée d'un empilement de plusieurs feuillets. Chaque feuillet a une épaisseur approximative de 7 \AA et est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine (Fig. 2.3).

Le contact entre les feuillets se fait suivant un plan contenant des ions d'hydroxyles OH^- de l'octaèdre et des ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre.

Les liaisons interfoliaires, résultant de l'effet combiné de liaisons d'hydrogène et de la force de Van Der Waals, confèrent un lien assez fort. Les feuillets sont alors soudés les uns aux autres par des forces de liaisons très importantes rendant la kaolinite peu sensible au gonflement.

Les Illites sont des argiles dites *potentiellement gonflantes*. Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites.

Le feuillet élémentaire de l'illite est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. L'épaisseur d'un feuillet est d'environ 10 \AA (Fig. 2.3).

Des substitutions de Al^{3+} par Mg^{2+} et Fe^{2+} , ainsi que de Si^{2+} par Al^{3+} , sont possibles. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations de potassium K^+ . La présence de ces cations contribue à renforcer les liaisons interfeuillets. Le comportement des illites se rapproche alors de celui des kaolinites.

Les Smectites (Montmorillonites, Beidellite, Nontronite, Hectonite, Saponite, Sauconite) sont des argiles dites *potentiellement très gonflantes*.

Le feuillet élémentaire est composé, comme pour l'illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. L'épaisseur d'un feuillet est d'environ 10 \AA (Fig. 2.3).

Les liaisons entre les feuillets sont moins fortes que celles des kaolinites et des illites. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement.

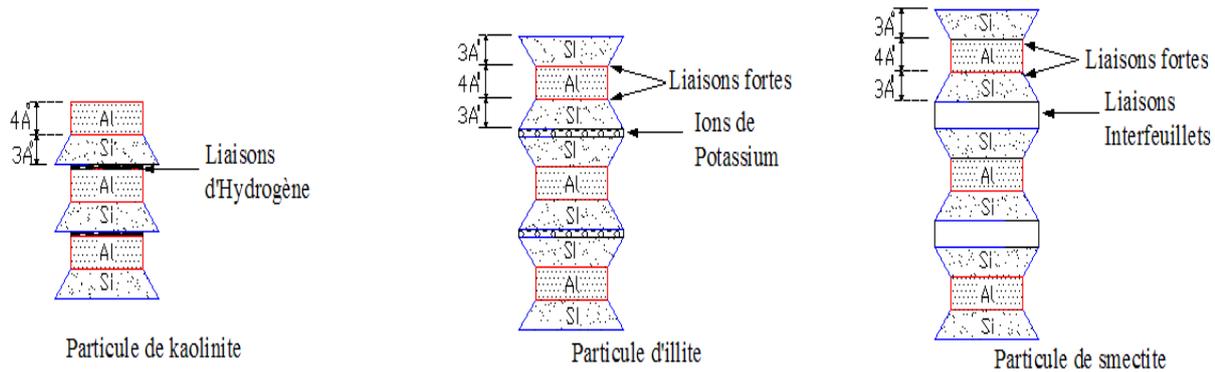


FIG. 2.3 – Les particules d'argile

Principales caractéristiques des minéraux argileux

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

La densité de charge spécifique σ est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse :

$$\sigma(\text{meq}/\text{m}^2) = \frac{CEC}{S}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique ; Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique),
- une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux.

L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur.

Lefèvre et Lajudie ^[74] ont effectué des essais de gonflement libre pour différentes argiles de densité de charges différentes et ont montré une baisse du potentiel de gonflement avec l'augmentation de la densité de charge.

La Capacité d'échange cationique (CEC) mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales ^[74].

La surface spécifique des argiles est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

Les principales caractéristiques des trois types d'argiles sont résumées dans le tableau suivant :

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (μm)	Épaisseur d'une particule (μm)	Surface spécifique (m^2/g)	CEC (meq/100 g)
Kaolinite	1 :1	100-200	0.1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	2 :1	1-10	0.1-1	0.003-0.01	65-100	10-40
Smectite	2 :1	1	0.1	0.001	700-840	80-150

TAB. 2.1 – *Caractéristiques des argiles*

2.2.3 Texture des argiles

La texture des minéraux argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope.

Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés des argiles. Au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés.

A titre d'exemple, l'argilite de Bure fait preuve d'une aptitude de gonflement supérieure à celle de l'argilite du Gard, bien que cette dernière contienne plus de minéraux gonflants [9]. La présence des carbonates dans l'argilite du Gard empêche la génération d'une partie du gonflement et peut créer un endommagement local en rendant le matériau plus fragile et en perturbant ses paramètres pétrophysiques.

Les observations microscopiques effectuées par Montes et al. [85] sur les argilites, subissant des cycles d'humidification-dessiccation, confirment des fracturations le long des surfaces localisées à proximité des matériaux rigides non gonflants (Fig. 2.4).

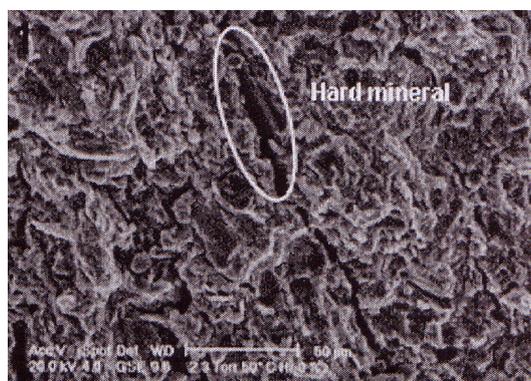


FIG. 2.4 – *Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides* [85]

L'évolution de la microtexture en fonction de l'hydratation peut être observée à l'aide du microscope électronique à balayage (M.E.B.) ou de la tomographie à rayons X [28, 42, 46].

Ces observations microscopiques confirment une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés.

Globalement, le pourcentage en minéraux gonflants, les carbonates, les minéraux non gonflants d'une part, et la nature de la consolidation d'autre part, présentent une influence notable sur le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques.

2.3 Cations échangeables

Les substitutions isomorphes de Al^{3+} par Mg^{2+} à la surface des feuillets entraînent un excès de charge négative. Pour assurer l'électroneutralité, ce déficit de charge est compensé par des cations Ca^{2+} ou Na^+ . Les montmorillonites compensées par des cations Ca^{2+} sont appelées des montmorillonites calciques. Lorsqu'elles sont compensées par des cations Na^+ , elles sont appelées des montmorillonites sodiques.

Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium Na^+ est plus faible que celle des cations de calcium Ca^{2+} , c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique aura la plus grande surface spécifique, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets.

En effet, deux types de gonflement peuvent se produire au sein des matériaux argileux :

1. le gonflement intraparticulaire ou interfoliaire,
2. le gonflement interparticulaire.

Gonflement interfoliaire et interparticulaire

Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins comme c'est le cas des smectites. L'eau pénètre alors à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires.

Il s'agit alors d'un gonflement *intraparticulaire ou interfoliaire*. Ce type de gonflement est réversible et intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse et peut présenter une ampleur de gonflement très importante.

La pression de gonflement interfoliaire des bentonites est extrêmement élevée, elle est approximativement égale à 400 MPa pour la première couche d'eau, à 110 MPa pour la deuxième couche et à 27 MPa pour la troisième couche ^[72].

Le gonflement est dit *interparticulaire* lorsque l'eau ne peut pénétrer à l'intérieur des feuillets argileux. Ce type de gonflement a une ampleur assez limitée mais affecte toutes les familles d'argiles.

La pression de gonflement interparticulaire est faible, elle est de l'ordre de 2 MPa pour les bentonites ^[72].

2.4 Différents types d'eau

Le caractère dipolaire de la molécule d'eau lui confère la propriété d'être attirée par l'intermédiaire de ses extrémités positives à la surface négative des minéraux argileux. Cette attraction modifie les propriétés hydrodynamiques de l'eau et cela dépend de la distance entre les molécules d'eau et la surface argileuse.

Trois types d'eau, existant dans la matrice argileuse, peuvent être distingués :

- l'eau libre remplissant les macropores entre les particules : elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105 °C.
- l'eau liée occupant les espaces interfeuillets par des interactions chimiques et électriques : elle a besoin d'une température élevée de 200 °C pour être évacuée.

Sa densité et surtout sa viscosité sont plus élevées que celles de l'eau libre. Sa quantité totale dépend de la surface spécifique, de la densité de charge et de la capacité d'échange cationique des minéraux argileux.

Ichikawa et al. ^[61] ont mis en évidence l'augmentation de la viscosité du fluide à proximité des particules argileuses de Kunigel (Fig. 2.5). Les travaux de Martin ^[82] ont montré que la densité de l'eau adsorbée est très élevée à proximité des feuillets puis diminue rapidement pour atteindre enfin la densité initiale du fluide (Fig. 2.6).

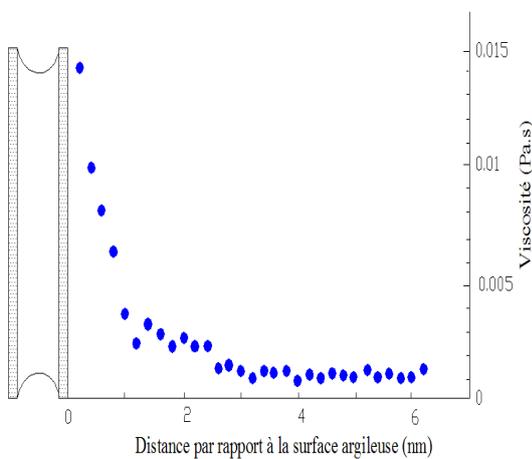


FIG. 2.5 – Viscosité de l'eau adsorbée ^[61]

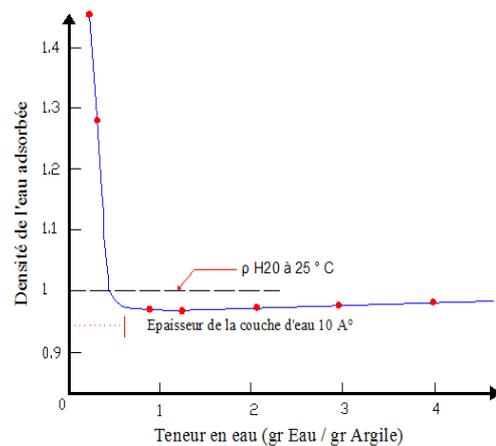


FIG. 2.6 – Densité de l'eau adsorbée ^[82]

D'après Hueckel ^[60], 25 à 50 % de l'eau interstitielle des roches argileuses est de type liée et cela a été vérifié sur l'argilite de Lorraine où l'eau liée occupe plus 50 % en masse de celle de l'eau interstitielle (Fig. 2.7).

- L'eau cristalline se situe au niveau des feuillets argileux et a besoin d'une température de 550 °C pour être éliminée.

Le changement de la teneur en eau liée et cristalline peut être le seul facteur de changement de la structure interne du matériau argileux ^[104].

Ces trois types d'eau sont influencés par la nature des minéraux argileux et par le chimisme de la solution d'hydratation.

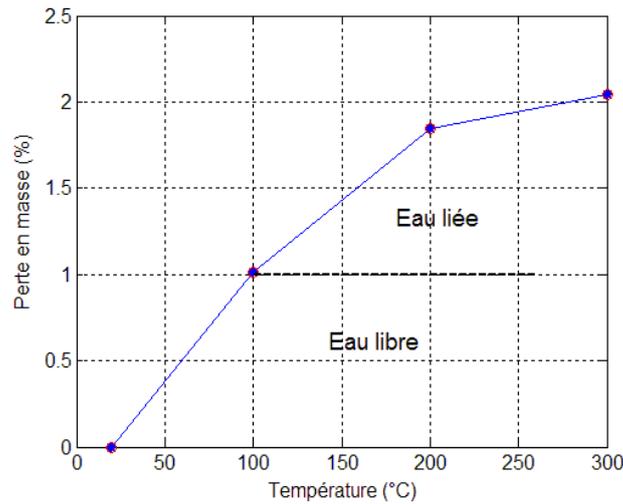


FIG. 2.7 – Distinction entre l'eau libre et l'eau liée pour l'argilite de Lorraine

2.4.1 Potentiel chimique et activité

Le potentiel chimique μ_i d'une espèce chimique i est défini par la variation de l'énergie libre de Gibbs. Ce potentiel est fréquemment utilisé pour prendre en compte les effets osmotique et capillaire dans les milieux poreux. Il peut être écrit sous la forme générale suivante :

$$\mu_i(J.mol^{-1}) = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,p,n_i} \quad (2.1)$$

n_i est le nombre de moles de l'espèce i et G est l'énergie de Gibbs du système.

L'équation 2.1 peut être simplifiée en supposant que le système est idéal, c'est-à-dire lorsque le potentiel chimique peut s'écrire de la forme suivante :

$$\mu_i = \mu_i^0(T, P) + R.T.Ln(a_i)$$

$\mu_i^0(T, P)$ est le potentiel chimique d'une eau pure libre dans un état de référence de pression et de température et a_i est l'activité d'une espèce i présente dans un solvant.

Comme le potentiel chimique est relié à l'activité des ions présents dans la solution, il suffit de détailler les différentes expressions reliant l'activité aux concentrations en ions de telle manière à avoir accès au potentiel chimique.

L'activité d'une solution est adimensionnelle, elle diminue avec la salinité de la solution et vaut 1 dans le cas de l'eau pure.

A la pression atmosphérique normale, elle dépend de la composition chimique des ions dissous et peut être écrite sous la forme suivante :

$$a_i = \gamma_i \cdot \frac{C_i}{C_i^0}$$

où γ_i est le coefficient d'activité de l'espèce i , C_i sa concentration molale (mol par kg de solvant), C_i^0 est une concentration de référence et vaut 1 mol/kg.

Plusieurs relations semi-empiriques permettent d'obtenir le coefficient d'activité d'un ion (ex : Na^+ , Cl^- , ...) en solution à partir de la valeur de la force ionique I :

Formule de Debye-Hückel :

$$\log(\gamma_i) = -0.5.Z_i^2.\sqrt{I}$$

Cette formule n'est valable que si la force ionique I est faible : $(1 + \sqrt{I}) \approx 1$, $\sqrt{I} \ll 1$.

Formule de Güntleberg (AG) :

$$\log(\gamma_i) = -0.5.Z_i^2.\left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}\right)$$

Z_i est le nombre de charge de l'ion i .

La force ionique I s'exprime en mol/kg et est calculée de la manière suivante :

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sum_i C_i \cdot Z_i^2$$

Dans une solution, le coefficient d'activité d'un ion donné (ex : Ca^{2+} , ...) n'est pas mesurable car il est expérimentalement impossible de mesurer le potentiel chimique d'un ion en solution. C'est pourquoi on introduit la notion de *coefficient d'activité moyen* γ_s .

Pour un électrolyte de type, $A_{v_+} B_{v_-}$, il est égal à :

$$\gamma_s = (a_-^{v_-} \cdot a_+^{v_+})^{1/v}$$

v_+ est le nombre total de moles de cations par mole de solution, v_- est le nombre total de moles d'anions par mole de solution et $v = v_+ + v_-$ est le nombre total de moles d'ions par mole de solution.

Dans ce cas, l'activité moyenne de la solution a_s de concentration C_s peut s'écrire sous la forme :

$$a_s = \gamma_s \cdot C_s$$

L'activité chimique de la solution peut être également déterminée par des expressions empiriques simples qui prennent en considération la concentration en masse C_s pour chaque type de sel dissous dans l'eau [51, 56].

– Pour un sel CaCl_2 :

$$a_s = 1 - 6.5 \cdot 10^{-4} \cdot C_s - 4.38 \cdot 10^{-4} \cdot C_s^2 + 2.81 \cdot 10^{-6} \cdot C_s^3 - 2.65 \cdot 10^{-8} \cdot C_s^4 \quad (2.2)$$

– Pour un sel NaCl :

$$a_s = 1 - 4.51 \cdot 10^{-3} \cdot C_s - 1.99 \cdot 10^{-4} \cdot C_s^2 \quad (2.3)$$

– Pour un sel KCl :

$$a_s = 0.9999 - 3.443 \cdot 10^{-3} \cdot C_s - 9.691 \cdot 10^{-5} \cdot C_s^2 \quad (2.4)$$

Pour une concentration en sel inférieure à 1 mol/kg, Keijzer et Loch [67] ont attribué cette forme à l'activité :

$$a_s = 1 - 0.017 \cdot v \cdot m \quad (2.5)$$

v est le nombre de moles d'ions dissout (pour NaCl , $v = 2$), m est la molalité (mol/kg).

2.4.2 Activité de l'eau dans les milieux poreux

Dans les milieux poreux, l'activité de la solution diminue du fait des phénomènes de capillarité, d'osmose et d'adsorption physico-chimique.

Onaisi et al. ^[91] ont estimé approximativement l'activité de l'eau des pores a_p avec prise en compte de la porosité et du degré de saturation de la roche sous la forme :

$$a_p = e^{-M.V_m}$$

M est la molarité qui peut être écrite de la forme suivante :

$$M = \frac{C_s \cdot \rho_r}{M_s \cdot \phi \cdot S_r}$$

où V_m est le volume molaire de l'eau, C_s est la concentration en masse du sel, ρ_r est la densité de la roche, M_s est la masse molaire du sel, ϕ est la porosité et S_r est le degré de saturation de la roche. Cette équation est uniquement applicable dans le cas où l'eau des pores est homogène et ne contient qu'un seul type de solution saline et dans le cas où la roche est inerte électriquement.

Afin d'estimer expérimentalement l'activité de l'eau des pores, Chenevert ^[22] a exposé plusieurs échantillons d'argilite à différentes humidités relatives Hr puis a mesuré pour chacun la variation de la masse après stabilisation.

L'activité est déterminée de manière à ce qu'il n'y ait aucun changement de masse et peut être exprimée comme suit :

$$a_p = \frac{Hr}{100} \quad (2.6)$$

Cette procédure a été appliquée pour l'argilite de Lorraine (Fig. 2.8) et celle de Bure (Fig. 2.9) au moyen d'une enceinte hygrométrique à une température de 30 °C et a mis en évidence une désaturation initiale de ces deux roches. L'activité de l'eau de pores de l'argilite de Lorraine est égale à 0.34 tandis que celle de Bure est égale à 0.47.

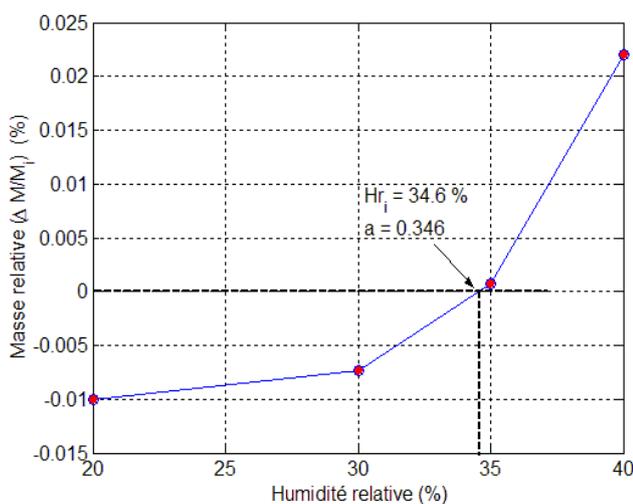


FIG. 2.8 – Activité de l'eau des pores de l'argilite de Lorraine

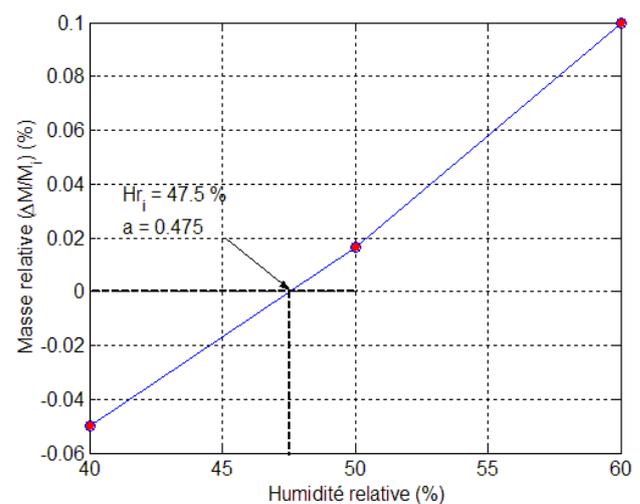


FIG. 2.9 – Activité de l'eau des pores de l'argilite de Bure

2.5 Principales causes du gonflement

La recherche bibliographique a permis de mettre en évidence quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement :

- hydratation par adsorption,
- hydratation par osmose,
- hydratation par capillarité,
- transformations chimiques.

2.5.1 Hydratation par adsorption

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique dû à une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Il en résulte alors la formation de la **double couche diffuse** due à la fixation des cations échangeables qui s'installent à la surface des feuillets du fait des forces électrostatiques qui sont les suivantes :

1. forces d'attraction généralement causées par les forces de Van Der Waals entre les feuillets voisins,
2. forces de répulsion ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux deux feuillets, énergie d'hydratation des cations compensateurs).

Ces deux forces décroissent rapidement avec la distance interparticulaire. Quant à la force de répulsion, elle diminue également avec l'augmentation de la concentration en électrolytes (Fig. 2.10).

Les variations de concentrations en cations et en anions dans la double couche diffuse sont déterminées à partir de l'équation de Poisson-Boltzmann et sont présentées sur la figure 2.11.

A proximité de la surface chargée, la concentration en cations est plus élevée que celle en anions.

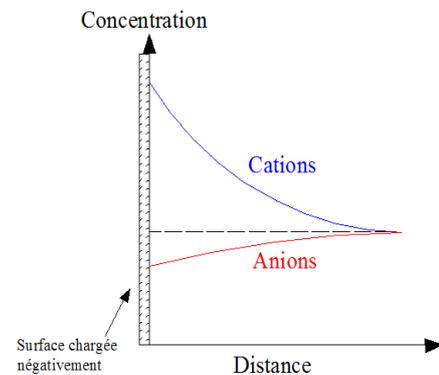
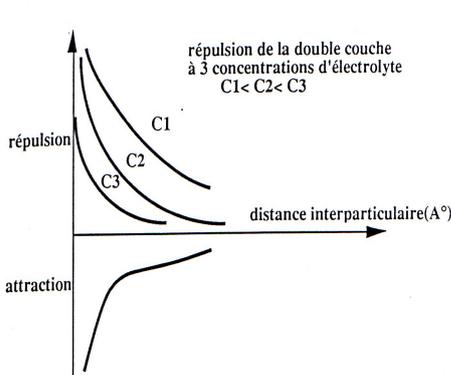


FIG. 2.10 – Forces électrostatiques dans la double couche ^[90]

FIG. 2.11 – Répartition des ions autour d'une particule chargée

Theng ^[117] affirme que le gonflement est d'autant plus élevé que les potentialités de développement des doubles couches sont importantes. Cette double couche dépend de la nature des minéraux argileux et des cations compensateurs.

La nature du cation compensateur joue un rôle important. En effet, le rayon ionique hydraté varie avec le type du cation échangeable comme le montre le tableau 2.2.

Lors de l'hydratation du cation compensateur, l'écartement des feuillets d'argiles sera d'autant plus faible que le rayon ionique hydraté sera petit.

Cation compensateur	Rayon ionique A^0	
	Non hydraté	Hydraté
Li^+	0.6	7.3
Na^+	0.95	5.6
K^+	1.33	3.8
Rb^+	1.58	3.6
Cs^+	1.67	3.6
Ca^{2+}	0.99	9.6
Mg^{2+}	1.08	10.8

TAB. 2.2 – Dimensions des cations hydratés et non hydratés ^[62]

Aboubeker et Mamoune ^[1] ont montré l'influence du rayon hydraté de la solution chimique (KCl , $NaCl$ et $CaCl_2$) sur le gonflement des argiles. Leurs essais du gonflement libre témoignent du fait que le cation Ca^{2+} cause le plus grand gonflement, K^+ le plus faible et Na^+ est intermédiaire.

La stabilité des cations compensateurs est aussi très importante. En effet, les cations sont liés aux feuillets par des forces de nature électrostatique et possèdent la propriété d'être échangeables. Cette facilité d'échange sera aussi un facteur influant sur le gonflement.

Le classement général admis est le suivant ^[62] :

Li^+ Na^+ NH_4^+ K^+ Mg^{2+} Ca^{2+} Al^{3+}

D'après cette série, le lithium est le plus facile à remplacer alors que l'aluminium est le plus difficile.

2.5.2 Hydratation par osmose

Lorsqu'une solution saline est séparée de l'eau pure par une membrane semi-perméable idéale (permettant uniquement le passage des molécules d'eau mais non des substances dissoutes), l'eau pure a alors tendance à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution.

Ce phénomène est appelé *osmose*. La pression qu'il faut appliquer pour empêcher l'arrivée de l'eau dans la solution saline est nommée *la pression osmotique* (Fig. 2.12).

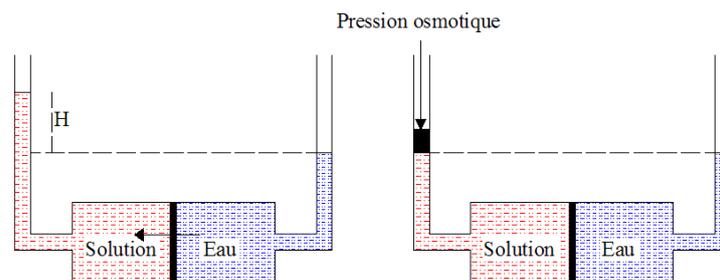


FIG. 2.12 – Phénomène osmotique idéal

Si la concentration de l'eau libre est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, il en résulte alors une migration des molécules d'eau des pores larges vers les particules argileuses entraînant l'augmentation de la distance interfeuille.

A contrario, il en résulte une pression osmotique d'attraction entraînant la contraction du matériau argileux.

Le phénomène d'hydratation par osmose permet d'expliquer le fait que lorsque la salinité de la solution d'hydratation augmente, le matériau argileux gonfle moins ^[28, 136, 115].

Morgenstern et Balasubramonran ^[86] ont étudié l'influence du chimisme de l'eau des pores sur le gonflement des argiles. Ils ont montré que l'eau distillée ou pure évince les substances chimiques augmentant par conséquent le gonflement et la pression de gonflement.

Dans le domaine pétrolier, les chercheurs ont assimilé l'effet osmotique à l'activité chimique. Cette activité, comme déjà mentionné, diminue avec la salinité de la solution et vaut 1 dans le cas de l'eau pure.

A partir des essais d'échange massique effectués sur des échantillons d'argilite plongés dans différentes solutions salines, Hale et Mody ^[51] ont mis en évidence l'importance de l'activité initiale de l'argilite. Si la solution saline possède une activité plus faible que celle de l'eau des pores, une déshydratation est observée. A l'inverse, si cette activité est plus élevée, il y a un gonflement et une augmentation de la teneur en eau. L'immersion de la roche dans une solution dont les caractéristiques chimiques sont proches de celles de l'eau des pores ne provoque aucun changement.

Chenevert ^[23] a utilisé l'appareil triaxial pour mesurer la pression du gonflement latérale des échantillons d'argilite bloqués axialement. Ses essais montrent une diminution de la pression de gonflement avec la diminution de l'activité initiale de la solution hydratante.

Efficacité de l'argilite

Plusieurs recherches ont fait apparaître la non idéalité de la membrane semi-perméable. Pour mieux tenir compte de l'efficacité de l'argilite (efficiency of shale), un nouveau concept a permis d'introduire un facteur correcteur inférieur à 1 appelé *coefficient de réflexion (reflection coefficient)*. Ce coefficient est égal au rapport entre la pression de gonflement mesurée en laboratoire, dans le cas du gonflement empêché, et la pression osmotique $\Delta\pi$ qui peut s'écrire sous la forme suivante ^[22, 91] :

$$\Delta\pi = \left(\frac{R.T}{V_m} \right) . Ln \left(\frac{a_s}{a_p} \right) \quad (2.7)$$

R est la constante des gaz parfaits ($8,3143 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T est la température absolue ($^{\circ}\text{K}$), V_m est le volume molaire de l'eau ($1,8.10^{-5} \text{ m}^3.\text{mol}^{-1}$), a_p est l'activité de l'eau des pores et a_s est l'activité de la solution d'hydratation.

Trois cas sont à considérer ^[51, 93] :

- si l'argilite interdit le passage des ions, elle réagit alors comme une membrane semi-perméable idéale avec un coefficient de réflexion égal à 1,
- si l'argilite laisse passer librement les ions, elle réagit alors comme une membrane semi-perméable non-sélective avec un coefficient de réflexion égal à 0. Dans ce cas, le mouvement des ions tend à équilibrer le système et à éliminer les forces osmotiques,
- si l'argilite agit intermédiairement entre les deux cas précédents, le coefficient de réflexion est alors compris entre 0 et 1.

L'efficacité de la membrane dépend de plusieurs facteurs comme la capacité d'échange cationique, la porosité, la surface spécifique et la concentration de l'eau des pores ^[43, 94] .

Lal ^[72] a relié le coefficient de réflexion aux rayons des pores r_p , aux rayons des ions de la solution r_s et aux rayons des molécules d'eau r_w de la façon suivante :

$$\sigma = 1 - \frac{(r_p - r_s)^2}{(r_p - r_w)^2}$$

Expérimentalement, l'efficacité des argilites peut être aussi déterminée par des essais de transmission

de pression hydraulique [37, 94, 105] ou par des essais électrochimiques [78].

Van Ort et al. [94] ont utilisé le concept des essais de transmission de pression hydraulique afin de déterminer l'efficacité de la membrane semi-perméable. L'échantillon est alors placé dans une cellule triaxiale. Une solution chimique est injectée en bas de l'échantillon à une pression constante. La pression de sortie en haut de l'échantillon est enregistrée au fur et à mesure du temps. Après un certain temps, cette pression se stabilise. La différence entre la pression d'injection et la pression finale récupérée en haut de l'éprouvette (Δp) est une bonne illustration de la non-idéalité de la membrane.

Le coefficient de réflexion est calculé alors en utilisant l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{\Delta p}{\Delta \pi}$$

Lomba et al. [78] ont utilisé une nouvelle approche expérimentale afin de mesurer l'efficacité de la membrane semi-perméable. Cette approche consiste à mesurer la différence du potentiel électrochimique entre deux solutions chimiques de différentes concentrations placées aux deux extrémités de l'échantillon. Ces auteurs ont mis en évidence l'influence de la composition chimique initiale de l'eau des pores sur le potentiel électrochimique.

L'efficacité des argilites n'est applicable que dans le cas où la solution chimique traverse l'échantillon par des forces osmotiques dues à la différence de concentrations entre la solution externe et l'eau des pores.

Critique de l'utilisation de l'activité

Le phénomène de gonflement ne peut pas être imputé uniquement à une différence de concentration ou d'activité entre la solution externe et l'eau des pores. Cela n'est pas spécifique aux matériaux argileux qui se caractérisent par la formation de la double couche diffuse.

D'après Horsud et Sonstebo [55], le gonflement dépend seulement des dimensions des cations échangeables de la solution hydratante et non de l'effet de l'activité.

Gasc-Barbier [46] a effectué des essais triaxiaux sur l'argilite de Bure sous confinement isotrope de 12 MPa. Pour l'eau distillée et pour des solutions de NaCl et de CaCl₂ à deux concentrations différentes (1 M et 0.2 M), les taux de gonflement axial et radial sont presque identiques quelque soit la composition de la solution chimique. A partir de ces essais, l'auteur a imputé le phénomène de gonflement aux échanges ioniques interfeuillet et non aux effets osmotiques.

De même, l'interprétation des essais mécaniques par l'utilisation de l'activité présente des inconvénients.

Les essais de mesure de la vitesse du son, effectués par Holt et al [54], sur des argilites préalablement immergées dans des solutions chimiques (KCl, NaCl, CaCl₂), se manifestent par un accroissement de la vitesse du son, autrement dit une rigidification de la roche, avec la concentration en K⁺. CaCl₂ n'a aucun effet alors que NaCl a tendance à réduire la vitesse du son, ce qui entraîne une dégradation des propriétés mécaniques.

Les auteurs ont attribué ces différentes interactions aux dimensions des cations échangeables et non à l'activité de la solution saline. Le rayon de K⁺ est 50 % plus petit que celui de Ca²⁺.

L'évolution du comportement mécanique des argilites en fonction de la concentration en cations K⁺, Na⁺ et Ca²⁺ de la solution chimique a été étudiée par Sonstebo [112] et Horsud et Sonstebo [55]. Leurs résultats expérimentaux montrent que le KCl entraîne la contraction de la roche. Cependant, la résistance à la compression simple augmente jusqu'à certaines concentrations en K⁺ puis décroît

au-delà. La partie élastique n'est pas affectée par la contraction, au contraire de la partie plastique et du pic de résistance.

A l'inverse, l'exposition de l'argilite à une solution de CaCl_2 ayant la même activité que KCl n'induit aucun changement des paramètres mécaniques.

Les auteurs ont imputé la diminution de la rigidité du matériau à l'extraction de l'eau liée provoquant une modification de la structure interne de la roche. Par contre, l'extraction de l'eau libre entraîne une diminution de la pression des pores et n'a aucun effet sur le changement de la rigidité de la roche.

2.5.3 Hydratation par capillarité

La capillarité est une caractéristique des matériaux non saturés de faible porosité. Elle se traduit par une extension dans la phase liquide lors de la saturation ou par une contraction lors de la désaturation.

La saturation des matériaux fins après une phase de drainage peut entraîner le piégeage de l'air par l'eau à l'intérieur du réseau poreux. Ce mécanisme peut engendrer la compression de l'air responsable de la dégradation ou de la fragmentation des matériaux argileux [18, 35, 106, 120].

La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, le film d'eau adsorbé diminue l'espace poreux et modifie par la suite la capillarité.

Dans l'hypothèse de pores cylindriques, la pression capillaire P_c est déterminée par la loi de Jurin :

$$P_c = u_a - u_w = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_c} \quad (2.8)$$

u_a et u_w sont respectivement les pressions d'air et d'eau, σ est la tension de surface eau-air et θ est l'angle de raccordement entre le ménisque et le solide.

Cette relation implique qu'au niveau du ménisque, plus r est petit, plus la pression d'eau est inférieure à la pression d'air. Comme en mécanique des sols ou des roches, la pression atmosphérique étant nulle, il s'ensuit que la pression de l'eau à proximité du ménisque est négative.

Plusieurs facteurs affectent la capillarité des milieux poreux :

- la dimension et la distribution des pores,
- les fluides et solides impliqués et l'histoire de saturation.

Couramment, les phénomènes capillaires et osmotiques sont réunis sous le nom de *succion totale* ψ_t . Elle est égale à la somme de la succion matricielle ψ_m due à l'hydratation par capillarité avec la succion osmotique ψ_o due à la différence de concentration en sel entre deux points de la matrice solide :

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o$$

La succion totale peut également être définie par une des relations fondamentales de la thermodynamique : *la loi de Kelvin* qui suppose que le matériau soit inerte vis-à-vis de l'eau.

Elle est exprimée de la manière suivante :

$$\psi_t = \frac{R \cdot T}{V_m} \cdot \ln(a_s) \quad (2.9)$$

La loi de Kelvin nous amène à supposer que le gonflement des billes de verre de petit diamètre est régi par le même phénomène que le gonflement d'un sol argileux.

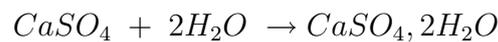
En résumé, l'attraction de l'eau par un matériau argileux non saturé ne se réduit pas simplement à l'action de la succion totale où interviennent également les actions d'adsorption physico-chimiques. Santos et al. ^[103] ont exposé deux échantillons d'argilite initialement séchés à l'eau et à l'huile. L'échantillon mis en contact avec de l'eau est altéré. Malgré le fait que l'huile se soit infiltré dans le deuxième échantillon, ce dernier n'a pas réagi. Les auteurs ont attribué ce phénomène aux interactions physico-chimiques primordiales dans les milieux argileux et non à l'effet de la capillarité.

2.5.4 Transformations chimiques

Trois types de transformations chimiques se distinguent principalement :

- la transformation de l'anhydrite en gypse,
- l'oxydation de la pyrite,
- la dissolution des carbonates dans l'eau.

La transformation de l'anhydrite (CaSO_4) en gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) se produit sous certaines conditions de pression, de température et de teneur en eau ^[99] et s'accompagne d'une variation de volume spécifique :



$$\text{Masse}(g) : \quad 36 \quad 136 \quad 172$$

$$\text{Volume}(\text{cm}^3) : \quad 46 \quad 36 \quad 74$$

Wittke ^[132] a conclu que, dans la nature, deux cas sont susceptibles de se présenter :

- dans un volume fermé contenant de l'anhydrite et l'eau nécessaire à la transformation, le gypse se forme avec une réduction de volume :

$$\Delta v = \frac{74 - (46 + 36)}{46} \cdot 100 = -9 \%$$

- par contre, si l'eau provient de l'extérieur, c'est-à-dire dans un système ouvert, théoriquement, un gonflement s'observe :

$$\Delta v = \frac{74 - 46}{46} \cdot 100 = 61 \%$$

Dans la nature, les conditions sont plus proches de celles du système ouvert, c'est pourquoi on assiste généralement à un gonflement.

L'oxydation de la pyrite (FeS_2) est le processus le plus important de décomposition chimique des roches sédimentaires à granulométrie fine ^[116]. Cette oxydation conduit à la formation de l'acide sulfurique. L'acide réagit à son tour avec les carbonates de calcium. Cette réaction produit du sulfate et peut former du gypse dont la cristallisation provoque l'éclatement du matériau argileux.

L'oxydation de la pyrite peut créer un réseau de microfissures se traduisant par un risque de rupture et également des chemins préférentiels d'écoulement.

La dissolution des carbonates dans l'eau rend l'argilite de plus en plus sensible à la variation de son état hydrique. A long terme, la dissolution des carbonates rend les matériaux argileux de plus en plus ductiles. Une diminution des propriétés mécaniques peut être observée.

2.6 Paramètres macroscopiques

D'autres paramètres indépendants de la structure des argiles et de la composition chimique de la solution hydratante peuvent avoir une influence importante sur le gonflement, on cite en particulier :

- la teneur en eau initiale,
- l'effet d'échelle,
- le régime de contraintes.

2.6.1 Teneur en eau initiale

Lorsque les argiles ne sont pas saturées, par suite d'une dessiccation, les forces d'attraction dues aux charges électriques, les forces dérivant de l'énergie d'hydratation des cations échangeables et les forces capillaires ont la primauté. Succinctement, plus le matériau argileux est sec, plus il a tendance à gonfler par saturation.

Les essais de gonflement libre effectués sur l'argilite de Lorraine de stratification horizontale montrent une diminution du gonflement avec l'augmentation de leur humidité relative initiale. Les essais ont été réalisés pour des humidités relatives initiales de 20 %, 50 % et 99 % imposées par l'enceinte hygrométrique et leurs résultats sont illustrés sur la figure 2.13.

Pareillement, la pression de gonflement diminue avec l'augmentation de la teneur en eau initiale et cela a été vérifié sur des essais de gonflement empêché effectués sur des marnes. La figure 2.14 présente une baisse de la pression de gonflement de 20 KPa lorsque la teneur en eau initiale passe de 0 % à 0.2 %.

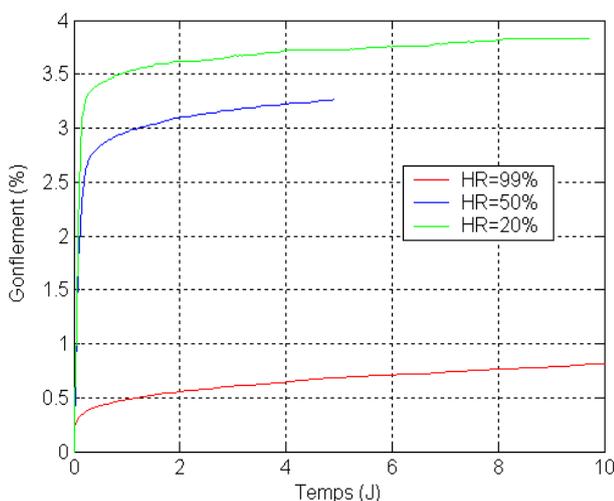


FIG. 2.13 – Évolution du gonflement axial en fonction du temps de l'argilite de Lorraine pour trois différentes humidités relatives initiales

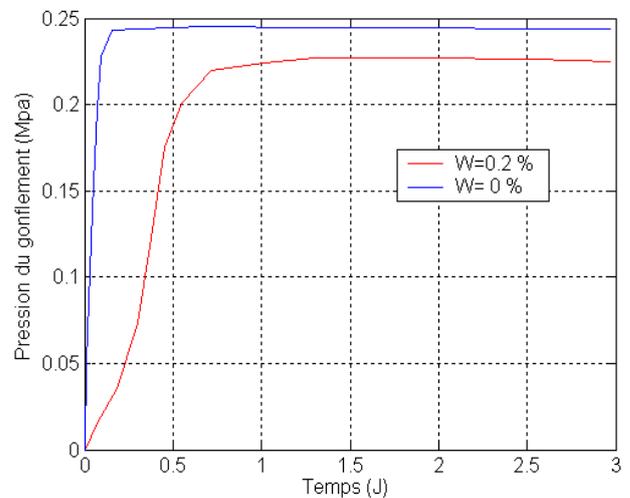


FIG. 2.14 – Évolution de la pression de gonflement axial pour une marne en fonction du temps pour deux différentes teneurs en eau initiales

En revanche, les essais réalisés par Al-Mukhtar et al. ^[4] sur l'argile (Laponite) à différentes humidités initiales montrent que la pression de gonflement est invariable avec le degré d'humidité initial tandis que le gonflement augmente avec la diminution de ce degré.

Mais au-delà de ces constatations, les essais cycliques du gonflement-retrait sous contraintes pré-

sentent un phénomène de fatigue à cause de la destruction des liaisons microscopiques qui peut entraîner une forte baisse du potentiel de gonflement [3, 29, 31, 42].

2.6.2 Effet d'échelle

L'effet d'échelle consiste à examiner l'influence de la hauteur ou du diamètre de l'échantillon sur le gonflement libre ou sur la pression de gonflement. Cet effet est fréquemment observé en mécanique des sols.

Dans des conditions oedométriques de déformations, les essais effectués par Chen [21] sur l'argile de Denver et par Vayssade [123] sur l'argile verte ne montrent aucune influence de la hauteur sur le gonflement libre.

Cependant, les essais réalisés par Khaddaj [68] sur l'argile de Flandre présentent une diminution du potentiel de gonflement de 20 % quand l'épaisseur de l'échantillon passe de 12 à 24 mm.

En ce qui concerne la pression de gonflement, Khaddaj [68] montre une augmentation de cette dernière avec la hauteur de l'échantillon. La pression varie de 116 à 275 KPa lorsque la hauteur de l'échantillon passe de 12 à 54 mm.

D'un autre côté, les essais réalisés par Duilio [33] sur les bentonites montrent que la pression de gonflement ne dépend pas de la hauteur de l'échantillon.

Ces différentes constatations nous ont mené à étudier, dans le chapitre 5, l'influence de la hauteur de l'échantillon sur le gonflement tridimensionnel et l'influence du diamètre de l'échantillon sur le gonflement axial.

2.6.3 Régime de contraintes

Le gonflement par saturation décroît lorsque la pression appliquée augmente. On arrive ainsi à la notion de pression de gonflement qui correspond à un gonflement nul.

A l'échelle microscopique, la contrainte mécanique appliquée est compensée par les pressions physico-chimiques et osmotiques interparticulaires de nature répulsive dépendant de la distance interfeuillet. Plus la pression appliquée est élevée, plus l'espacement interfeuillet est réduit.

Pour une pression supérieure à la pression de gonflement, le matériau argileux a tendance à se tasser ou à s'effondrer.

L'influence du régime de contraintes sur le gonflement tridimensionnel peut être étudiée par des essais isotropes ou déviatoriques.

Essais isotropes

Andy et al. [8] ont utilisé l'appareil triaxial afin de mesurer la pression de gonflement latérale des argiles. Après la mise en place de l'échantillon dans une membrane percée qui assure la circulation de l'eau circonférentielle, la saturation de l'échantillon est alors effectuée par injection de l'eau sur sa base inférieure à travers une pierre poreuse. Dans un premier temps, pour empêcher le gonflement, une surcontrainte pilotée par ordinateur est appliquée. Cette méthode de surcontrainte n'a pas compensé totalement le gonflement. Les auteurs ont alors adopté la méthode de contrainte en parallèle par application de contraintes isotropes. La pression de gonflement axial ou radial correspond au point d'intersection de la courbe qui relie les points des essais effectués avec l'axe des contraintes (Fig. 2.15 et Fig. 2.16). Leurs essais confirment une anisotropie du gonflement et de la pression de gonflement.

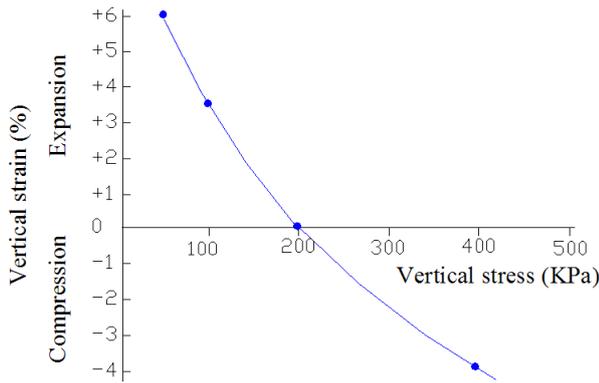


FIG. 2.15 – Variation du gonflement axial en fonction des contraintes isotropes [8]

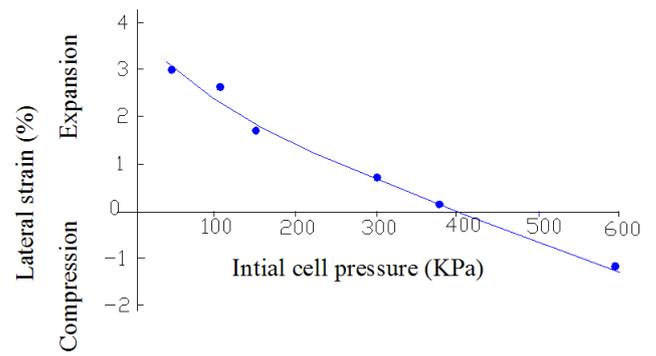


FIG. 2.16 – Variation du gonflement latéral en fonction des contraintes isotropes [8]

Au moyen des essais isotropes de gonflement, El Gamali et al. [45] ont mis en évidence le gonflement anisotrope des argiles compactées et ont conclu que la pression de gonflement volumique, correspondant à la moyenne des pressions de gonflement axial et latéral, est égale à la pression de gonflement axial mesurée à l'œdomètre.

Essais déviatoriques

Les essais déviatoriques sont conceptualisés afin d'analyser l'effet du déviateur de contraintes ou de la contrainte moyenne sur le gonflement axial, radial ou volumique.

Dakshanamurthy [27] a montré que le gonflement volumique dépend uniquement de la contrainte moyenne. Le gonflement axial et le gonflement radial diminuent exponentiellement avec la contrainte moyenne et dépendent du rapport des contraintes principales $\frac{\sigma_1}{\sigma_3}$.

Yesil et al. [137] et Bilir et Muftuoglu [14] ont déterminé le gonflement et la pression de gonflement axiaux des argiles compactées au moyen d'un dispositif triaxial pour différentes pressions de confinement. L'essai consiste à charger l'échantillon par petits paliers successifs de contraintes axiales au fur et à mesure que se développe le gonflement en autorisant des déplacements de faible ampleur. Ce cycle (gonflement et pression de gonflement) se répète jusqu'à la stabilisation du gonflement. La pression de gonflement finale correspond alors à la contrainte maximale atteinte à la fin de l'essai. Une fois la stabilisation de la pression de gonflement atteinte, on poursuit avec le déchargement axial par mesure du gonflement pour chaque palier de contrainte. Les résultats obtenus montrent une augmentation du gonflement axial avec la pression de confinement.

Kiehl [69] a réalisé des essais triaxiaux sur des échantillons d'anhydrite dans différentes conditions de confinement latéral. Il a montré que le gonflement suivant une direction principale dépend uniquement de la contrainte appliquée suivant cette direction et non des contraintes suivant les autres directions principales.

Ces différentes observations expérimentales montrent que le comportement tridimensionnel des matériaux argileux n'est pas unique. On reviendra sur ce point lorsque l'on abordera les approches de gonflement dans le chapitre 3.

2.7 Anisotropie du gonflement et anisotropie de la pression de gonflement

L'anisotropie du gonflement et l'anisotropie de la pression de gonflement ont été peu étudiées. Elles sont dues, en particulier, au mode de consolidation et à la répartition des feuillets argileux. Elles peuvent être identifiées aux moyens d'essais expérimentaux ou par observation au moyen d'un microscope optique ou d'un microscope électronique.

La plupart des analyses expérimentales ont été effectuées sur des échantillons cylindriques mis en contact avec de l'eau et uniquement pour deux orientations de l'axe de l'échantillon par rapport aux plans de stratification de la roche ou de compactage des sols argileux.

L'anisotropie du gonflement a_g et l'anisotropie de la pression de gonflement a_{pg} correspondant au temps de stabilisation peuvent être identifiées par les deux rapports :

$$a_g = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad , \quad a_{pg} = \frac{p_z}{p_x} \quad (2.10)$$

qui sont respectivement le rapport entre le gonflement perpendiculaire et le gonflement parallèle au plan privilégié du matériau et le rapport entre la pression de gonflement perpendiculaire et parallèle à ce plan.

Dans le plan horizontal de stratification des roches argileuses, Shimada et al. ^[110] ont montré une isotropie de gonflement. En revanche, ils ont observé, suivant la direction normale aux strates, une anisotropie de gonflement bien marquée qui augmente avec le pourcentage des minéraux gonflants tels que les smectites.

Aux moyens des essais de gonflement libre et des essais monoaxiaux réalisés sur des roches argileuses, Murayama et Yagi ^[88] ont conclu que le coefficient d'anisotropie du gonflement est égal au coefficient d'anisotropie de la pression de gonflement.

Contrairement aux sols argileux, le coefficient d'anisotropie de gonflement est plus marqué pour les roches argileuses. A titre d'exemple, pour les sols argileux, les valeurs des coefficients d'anisotropie a_g et a_{pg} se situent aux alentours de 1.1 ^[48, 71, 101] et sont généralement plus élevées pour les roches argileuses. La figure 2.17 montre que l'orientation des feuillets dans les sols argileux est aléatoire et ne présente pas une direction privilégiée. Cependant, les roches argileuses sont plus orientées et cela est due à la transformation d'un sédiment en roche sous l'effet des processus de la diagenèse qui vont de la compaction du sédiment à sa cimentation.

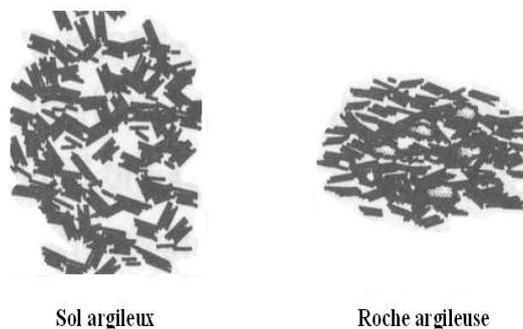


FIG. 2.17 – *Différents modes de compaction* ^[13]

Froehlich ^[44] a observé une forte anisotropie du gonflement pour des échantillons de roches argileuses. En moyenne, les déformations perpendiculaires aux couches de stratifications sont neuf fois

supérieures à celles parallèles à ces mêmes couches. L'auteur a attribué cette forte anisotropie du gonflement à l'anisotropie de la structure de la roche argileuse.

L'influence des différents angles de stratification (0° , 30° , 60° , 90°) des bentonites compactés a été étudiée par Kabbaj ^[65] à partir des essais de gonflement oedométriques sous contraintes et des essais de pression de gonflement. L'auteur a constaté une diminution du gonflement et de la pression de gonflement avec l'accroissement de l'angle de stratification ainsi qu'une diminution du coefficient d'anisotropie avec la charge appliquée. Il a attribué cette dernière diminution à la modification de la structure interne en cours de processus d'humidification sous charges.

A contrario de tout ce qui vient d'être dit, les essais de pression de gonflement effectués par Johnson ^[64] à l'aide de l'appareil triaxial sur des échantillons d'argile intacts montrent une isotropie de la pression de gonflement malgré la présence d'une anisotropie structurale. L'auteur a attribué ce phénomène à la succion réagissant d'une manière isotrope.

Ce point sera plus amplement traité dans la partie expérimentation où l'on ne s'arrêtera pas à l'étude de l'anisotropie du gonflement et l'anisotropie de la pression de gonflement d'un échantillon mis en contact avec de l'eau mais on ira au-delà en abordant l'effet du chimisme de la solution d'hydratation et l'effet de l'humidité sur l'anisotropie du gonflement.

2.8 Conclusion

Ce chapitre a montré qu'il est d'une grande complexité de caractériser le comportement des matériaux faiblement poreux, anisotropes et électrisés mis en contact avec un fluide.

La notion de la double couche diffuse nous permet de conclure que le phénomène de gonflement ne peut pas être expliqué dans sa globalité par la notion de la succion totale car, étant donné qu'elle est présente dans n'importe quel milieu poreux, elle n'est pas caractéristique du **gonflement des argiles**.

Le gonflement des matériaux argileux peut se manifester à deux échelles :

- à l'échelle microscopique où se créent les forces électrochimiques,
- à l'échelle des pores où se manifeste la succion totale (osmose et capillarité).

Par ailleurs, les dégradations des caractéristiques mécaniques ne peuvent pas non plus être expliquées par la notion de succion totale, bien que quelques auteurs le prétendent.

Chapitre 3

Approches théoriques de gonflement

3.1 Introduction

Les différents mécanismes détaillés dans le chapitre précédent ont été intégrés dans diverses approches permettant de modéliser le gonflement d'un matériau argileux mis en contact avec un fluide et soumis à un régime de contraintes.

Le développement d'un modèle, faisant intervenir les aspects électrochimiques et mécaniques, constitue une tâche très ardue en géotechnique.

Trois types d'approches sont habituellement utilisés. Chacune de ces approches aborde le problème d'une façon différente.

Pour les matériaux fortement gonflants qui contiennent une quantité élevée de smectite, l'approche de la double couche est la plus scientifiquement utilisée. Elle repose sur les caractéristiques microscopiques des minéraux argileux et sur les propriétés de l'électrolyte. L'explication de cette approche est complétée par un exemple sur la bentonite où est mise en relief l'influence de la contrainte et de la concentration de la solution sur le gonflement.

Les approches phénoménologiques s'appuient généralement sur la succion totale introduite dans la notion de contrainte effective. Ce type d'approches est le plus utilisé par les modèles couplés basés sur diverses lois d'écoulement de l'eau ou de la vapeur d'eau dans les milieux faiblement poreux.

Les approches du gonflement sont les plus exploitées pour les matériaux argileux subissant une saturation définitive. Soit elles ont été établies à la phase ultime de stabilisation qui correspond au gonflement le plus prononcé, soit elles font intervenir le temps d'hydratation.

Par la suite, on va présenter et discuter chacun de ces trois types d'approches.

3.2 Approche de la double couche

Les minéraux argileux présentent un déficit en charges positives dû aux substitutions isomorphes. Les charges électriques des solides engendrent des propriétés électrostatiques à l'interface solide-liquide. Pour assurer l'électroneutralité, ces charges sont compensées par un nuage d'ions en solution qui se développe à proximité de la surface chargée. La formation de la double couche diffuse entraîne le gonflement ou la pression de gonflement du matériau argileux. Cette double couche dépend des caractéristiques des minéraux argileux mais également du chimisme de la solution hydratante.

La plupart des chercheurs ont utilisé la méthode de la double couche afin d'évaluer la pression de gonflement des bentonites destinées au stockage des déchets radioactifs. Un bon accord a été trouvé entre l'expérimentation et la théorie [70, 81, 83, 139].

La distribution des ions autour des feuillets argileux peut être déterminée par la théorie de la double couche diffuse de Gouy-Chapman appelée aussi d.d.l. (diffuse double layer).

3.2.1 Théorie de Gouy-Chapman

Cette théorie d'origine électrique suppose que la double couche soit composée d'une couche fixe liée au solide et d'une couche diffuse en affinité avec les particules argileuses. L'attraction des cations par la surface argileuse entraîne une modification de la concentration en ions par rapport à l'interface des particules. Cette variation de concentration en fonction du potentiel est répartie dans la double couche selon la statistique de Boltzmann :

$$n_i = n_0 \cdot \exp\left(\frac{-Z_i \cdot e \cdot \psi}{K_b \cdot T}\right) \quad (3.1)$$

n_i est le nombre d'ion/ m^3 , Z_i est la valence de l'ion, e est la charge d'un électron ($1.6 \cdot 10^{-19} C$), ψ est le potentiel électrique (V), K_b est la constante de Boltzmann ($13.8 \cdot 10^{-24} J/K$) et T est la température absolue ($^{\circ}K$).

Cette équation décrit la distribution des ions en fonction du potentiel électrique. Dans le cas de la double couche, ce potentiel n'est pas constant mais décroît en fonction de la distance par rapport à la surface de la particule. Il est décrit, en unidimensionnel, par l'équation de Poisson-Boltzmann qui peut être écrite d'une manière simplifiée :

$$\psi(x) = \psi_0 \cdot \exp(-K_d \cdot x) \quad (3.2)$$

avec,

$$K_d^2 = \frac{2 \cdot Z^2 \cdot e^2}{\varepsilon \cdot K_b \cdot T} \cdot n_0$$

Ainsi, le potentiel électrique diminue de façon exponentielle si l'on s'éloigne de la surface du feuillet. L'insertion de l'équation 3.2 dans l'équation 3.1 nous permet de calculer les profils de densités de cations ou d'anions en fonction de la distance par rapport à l'interface solide-liquide.

Les chercheurs ont communément fait référence à l'épaisseur de la double couche qui correspond à la distance K_d^{-1} , où $\psi = \psi_0 / e$. Il ne s'agit donc pas réellement d'une épaisseur mais elle permet de visualiser l'effet de différents paramètres sur l'extension de la double couche.

L'épaisseur de la double couche diffuse H_{DC} est alors définie par l'équation suivante :

$$H_{DC} = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot K_b \cdot T}{2 \cdot n_0 \cdot Z^2 \cdot e^2}} \quad (m) \quad (3.3)$$

3.2.2 Influence des différents paramètres sur le gonflement

D'après la théorie de la double couche, il est aisé d'en déduire les constatations suivantes :

- l'augmentation de la concentration en solution entraîne une diminution de l'épaisseur de la double couche diffuse,
- lorsque la valence de l'électrolyte augmente, l'épaisseur de la double couche diffuse diminue,
- l'augmentation du constant diélectrique entraîne une augmentation de l'épaisseur de la double couche,
- l'augmentation de la température accroît l'épaisseur de la double couche diffuse.

3.2.3 Forces électrostatiques

Les feuillets argileux sont soumis à trois forces par unité de surface dont deux de nature répulsive et l'autre attractive du type Van der Waals :

1. \prod_r : force de répulsion,
2. \prod_a : force d'attraction de Van der Waals,
3. \prod_h : force d'hydratation.

La résultante des forces, qui est de nature répulsive, diminue avec l'augmentation de la distance interfeuille, autrement dit avec le gonflement.

Force de répulsion

Une force répulsive est générée entre deux feuillets parallèles de distance $2d$. Cette force par unité de surface dérive de la distribution du potentiel électrique et est écrite sous la forme [70, 83, 89] :

$$\prod_r(d) = 2.n.K_b.T. [\cosh(u) - 1] \cdot 10^{-6} \quad (MPa) \quad (3.4)$$

avec :

$$u = 8. \tanh^{-1} \cdot \left[\exp(-K_d.d) \cdot \tanh\left(\frac{z}{4}\right) \right] \quad (3.5)$$

Et,

$$z = 2. \sinh^{-1} \cdot \left(96.5. \frac{CEC}{S} \cdot \sqrt{\frac{1}{8.\varepsilon.n.K_b.T}} \right)$$

CEC est la capacité d'échange cationique ($mequi.g^{-1}$) et S est la surface spécifique ($m^2.g^{-1}$). Cette pression de nature répulsive n'est pas la pression osmotique, bien que certains auteurs l'appellent ainsi.

Force d'attraction

La force de Van der Waals est de nature attractive. Elle génère une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets. Elle peut être écrite comme suit [70] :

$$\prod_a(d) = \frac{A_h}{24.\pi} \cdot \left[\frac{1}{d^3} + \frac{1}{(d+t)^3} - \frac{2}{(d+\frac{t}{2})^3} \right] \cdot 10^{-6} \quad (MPa) \quad (3.6)$$

A_h est la constante de Hamaker et varie de 2.10^{-20} à $5.10^{-20} J$, t est l'épaisseur du feuillet (m).

Force d'hydratation

En théorie, lorsque la distance interfeuille est réduite, les forces d'attraction dominent les forces de répulsion, autrement dit il n'y a pas de gonflement. Expérimentalement, ce phénomène ne se vérifie pas.

La force supplémentaire de répulsion est attribuée au changement de liaison d'hydrogène dans l'eau adjacente aux feuillets argileux et prévient l'effondrement de la double couche.

Cette force n'est pas prise en compte dans la théorie DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek)

qui est basée uniquement sur les forces de répulsion et d'attraction.

La force supplémentaire de répulsion, appelée force d'hydratation, peut être écrite sous la forme suivante ^[121] :

$$\prod_h(d) = k_h \cdot e^{\frac{-d}{\lambda}} \cdot 10^{-6} \quad (MPa) \quad (3.7)$$

λ varie de $0.6 \cdot 10^{-9}$ à $2 \cdot 10^{-9}$ m, k_h varie de $3 \cdot 10^6$ à $30 \cdot 10^6$ J.m⁻³. Pour une valeur élevée de K_h correspond une faible valeur de λ .

La résultante des forces au centre de deux feuillets $F_R(d)$ est alors la suivante :

$$F_R(d) = \prod_r(d) - \prod_a(d) + \prod_h(d) \quad (3.8)$$

3.2.4 Passage micro-macro

Le passage micro-macro reste le plus délicat. Il impose que le matériau argileux soit pur et homogène (dimensions des feuillets et espaces interfeuillets identiques) et que les feuillets restent parallèles durant le processus de gonflement.

Dans ce cas, la distance $2d$ interfeuille est reliée à l'indice des vides e_v par cette approximation ^[32] :

$$d = \frac{e_v}{\rho_s \cdot s} \quad (3.9)$$

avec,

$$s = \frac{2 \cdot S_f \cdot N_f}{\rho_s \cdot V_s} \quad (3.10)$$

ρ_s et V_s sont respectivement la densité et le volume des particules solides, S_f et N_f sont respectivement la surface d'un feuillet et le nombre de feuillets argileux.

Si l'argile n'est pas pure et contient une fraction θ de minéraux argileux, on peut écrire :

$$d = \frac{e_v}{\rho_s \cdot s \cdot \theta} \quad (3.11)$$

3.2.5 Application de l'approche de la double couche

Le modèle présenté est inspiré des travaux de Komine et Ogata ^[70]. Ce modèle a été élaboré afin de prédire le gonflement sous contraintes et la pression de gonflement.

En supposant que le matériau argileux soit composé de minéraux gonflants et non gonflants, la surface spécifique de la totalité est alors :

$$S = C_g \cdot S_g + (1 - C_g) \cdot S_{ng}$$

S est la surface spécifique totale, S_g est la surface spécifique des matériaux gonflants, S_{ng} est la surface spécifique des matériaux non gonflants et C_g est la concentration en volume des matériaux gonflants.

Komine et Ogata ^[70] ont observé deux types de gonflement :

1. un gonflement apparent,

2. un gonflement propre des minéraux argileux.

En se référant à la figure 3.1, le gonflement propre des minéraux argileux ε_p est décrit par l'équation suivante :

$$\varepsilon_p = \frac{V_v + V_{sw}}{V_g} \quad (3.12)$$

Le gonflement apparent est déterminé de la manière suivante :

$$\varepsilon_a = \frac{V_{sw}}{V_v + V_s} \quad (3.13)$$

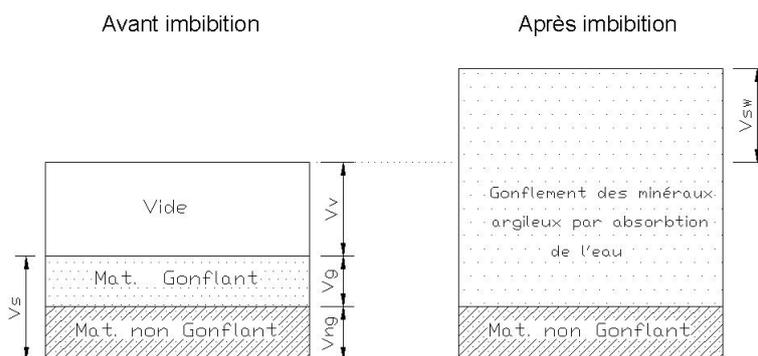


FIG. 3.1 – *Imbibition*

En utilisant l'équation 3.13, on peut déterminer le gonflement propre des minéraux argileux :

$$\varepsilon_p = \frac{(1 + \varepsilon_a) \cdot \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1}{C_g} \quad (3.14)$$

V_v est le volume des vides, V_g est le volume des matériaux gonflants, V_s est le volume des particules solides, V_{ng} est le volume des matériaux non gonflants, et ρ_s et ρ_d sont respectivement la densité de particules solides et la densité sèche.

En supposant que le gonflement interfeuillet ε_m soit égal au gonflement propre des minéraux argileux (Fig. 3.2), le passage micro-macro est décrit par l'équation suivante :

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p \quad (3.15)$$

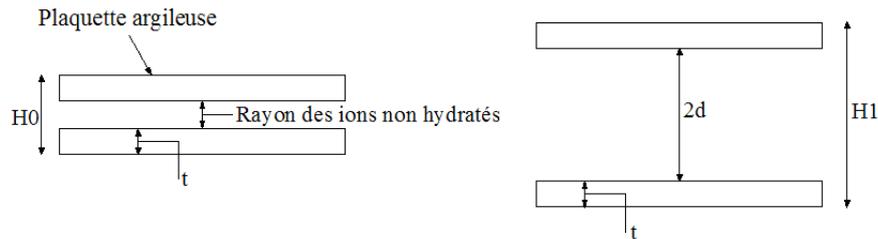
Le gonflement interfeuillet ε_m est déterminé par l'équation suivante :

$$\varepsilon_m = \frac{H_1 - H_0}{H_0} = \frac{d - R_{ion}}{t + R_{ion}}$$

La variation de la concentration en ions des pores n (mol/m^3) en fonction du gonflement propre des minéraux argileux peut être simplifiée par l'équation suivante :

$$n = \frac{n_0 \cdot N_A}{1 + \varepsilon_p} \quad (3.16)$$

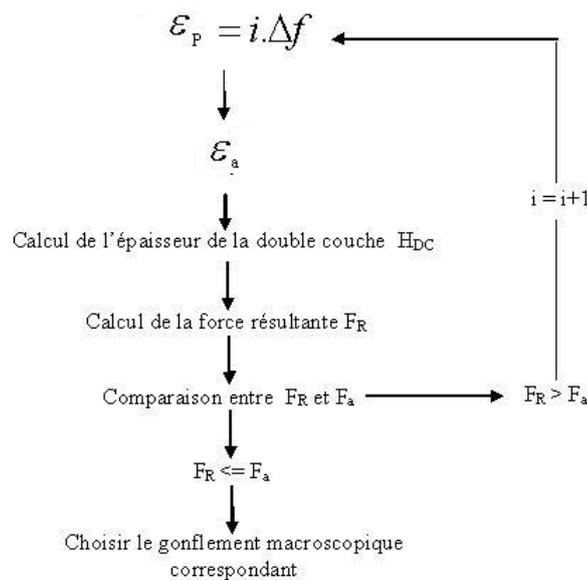
N_A est le nombre d'Avogadro ($6.023 \cdot 10^{23}$).

FIG. 3.2 – *Gonflement microscopique*

Pour calculer la *pression de gonflement* dans le cas où le gonflement apparent est nul (pour une densité sèche constante), on procède au calcul du gonflement interparticulaire non apparent des minéraux argileux pour aboutir à la force résultante $F_R(d)$.

Ce procédé de calcul nous amène à penser que si le gonflement apparent est nul, il y a toujours présence du gonflement microscopique non apparent.

Pour déterminer le gonflement normal aux feuillets subissant une pression imposée F_a , il faut suivre la marche itérative nécessaire décrite par la figure 3.3.

FIG. 3.3 – *Processus itératif*

Le chemin itératif débute avec un gonflement apparent nul ($i = 0$), puis on l'incrémente par $i \cdot \Delta f$. Δf est une déformation fixée au départ et i est un incrément.

Cette itération converge lorsque la pression de gonflement est égale ou légèrement inférieure à la pression appliquée. A ce stade, on choisit le gonflement apparent correspondant.

Afin de se familiariser avec le gonflement d'origine physico-chimique, un exemple sur la bentonite a été traité.

Le but de cet exemple est de montrer l'influence de la contrainte sur le gonflement chimique.

Les caractéristiques de la bentonite et de l'électrolyte sont présentées dans le tableau suivant :

Densité de la bentonite ρ_s	2.79
Surface spécifique totale S	388 m^2/g
Capacité d'échange cationique CEC	0.732 meq/g
Valence ionique moyenne Z	2
Température absolue T	295 0K
Constante de Boltzmann K_b	13.8.10 ⁻²⁴ J/K
Constante de Hamaker A_h	2.2.10 ⁻²⁰ J
Charge électrique des ions e	1.602.10 ⁻¹⁹ C
Constante diélectrique ε	708.3360.10 ⁻¹² $C^2.J^{-1}.m^{-1}$
Epaisseur des feuillets t	9.6.10 ⁻¹⁰ m
Nombre d'Avogadro N_A	6.023.10 ²³

TAB. 3.1 – Caractéristiques de la bentonite et de l'électrolyte [70]

La variation du gonflement, en fonction de la concentration, pour quatre contraintes appliquées (0.5, 1, 2 et 3 MPa), est illustrée sur la figure 3.4. Il faut noter que le processus itératif utilisé induit une irrégularité des courbes.

La figure 3.5 montre que l'effet de la contrainte réduit l'effet de la chimie. Lorsque la concentration n_0 passe de 20 à 170 mol/m^3 , la différence de gonflement diminue avec la contrainte appliquée.

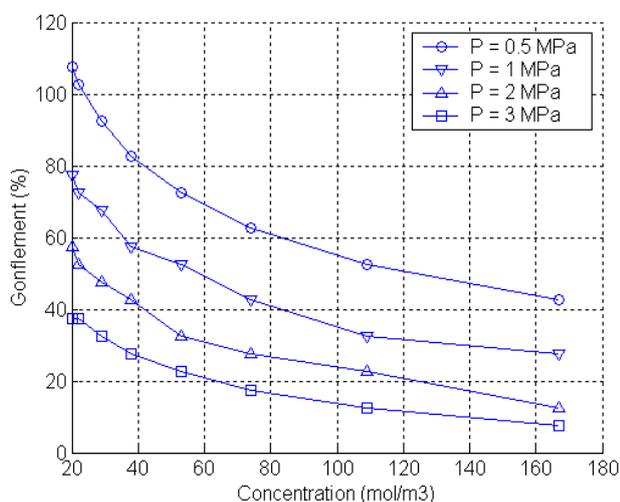


FIG. 3.4 – Variation du gonflement en fonction de la concentration

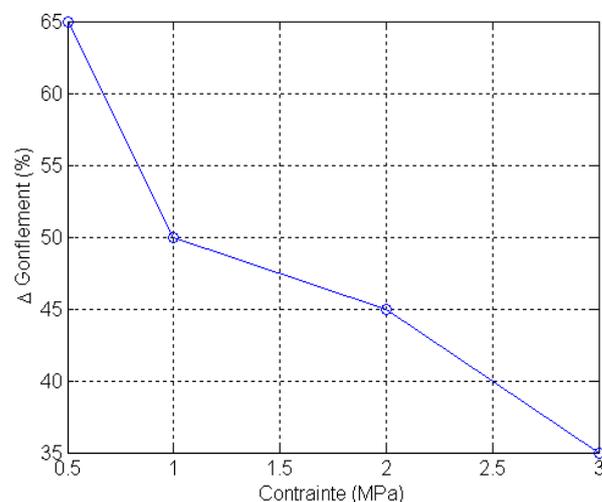


FIG. 3.5 – Δ gonflement = Gonflement pour $n_0 = 20 mol/m^3$ - Gonflement pour $n_0 = 170 mol/m^3$

L'influence de la concentration sur le gonflement est très prononcée lorsque l'échantillon est soumis à une faible contrainte axiale. Son effet s'amenuise lorsque la contrainte axiale est élevée.

3.3 Approches phénoménologiques

Ces approches sont destinées aux milieux non saturés bien que certains auteurs aient introduit la notion de succion totale afin d'intégrer le rôle de la chimie. La pression générée due à cette succion est supposée isotrope.

Deux types de modèles sont à distinguer :

1. les modèles en contraintes effectives,
2. le modèle d'Alonso et Gens.

3.3.1 Modèles en contraintes effectives

Ce type d'approche est basé sur le principe développé par *Terzaghi* qui suppose que, dans un milieu poreux saturé et non réactif, la contrainte appliquée est égale à la somme de la pression interstitielle supportée par la phase aqueuse P avec la contrainte effective supportée par la phase solide σ' :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P.\delta_{ij} \quad (3.17)$$

Biot puis Vincké et al. ^[125] ont amélioré la formulation de *Terzaghi* par l'introduction des coefficients de Biot β_{ij} qui dépendent de la compressibilité du squelette et du solide. Dans le cas où le matériau est isotrope, on peut écrire :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \beta.P.\delta_{ij} \quad (3.18)$$

Le modèle présenté rejoint celui de *Terzaghi* dans le cas où $\beta = 1$, ce qui est équivalent à dire que le squelette est déformable et incompressible.

Dans un milieu non saturé et non réactif, *Bishop* et al. ^[15, 16] ont été parmi les premiers à avoir formulé un modèle basé sur la contrainte effective pour modéliser le comportement des sols non saturés suite à une variation de succion $(u_a - u_w)$. Ce modèle peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a.\delta_{ij}) + f.(u_a - u_w).\delta_{ij} \quad (3.19)$$

f est un paramètre fonction du degré de saturation.

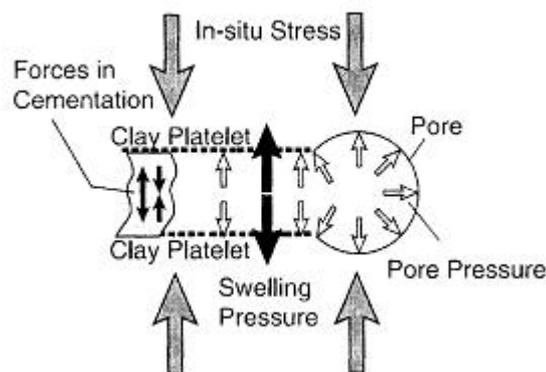
Croney et al. ^[24] ont utilisé la notion de contrainte effective pour simuler le comportement des sols non saturés par l'introduction d'un paramètre d'état β' . Leur modèle est le suivant :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \beta'.u_w.\delta_{ij} \quad (3.20)$$

Ces différentes expressions de la contrainte effective sont utilisées dans le cas d'un matériau non saturé et ne présentent pas d'interactions physico-chimiques entre la phase solide et la phase liquide.

La prise en compte de l'effet physico-chimique des argiles se traduit par l'ajout à la contrainte effective des contraintes isotropes de répulsion (R) et d'attraction (A).

La figure 3.6 illustre les forces électrostatiques d'une part et la pression des pores d'autre part. Ces forces sont maintenues par les liaisons de cimentation dont les propriétés mécaniques varient avec l'imbibition.


 FIG. 3.6 – Forces microscopiques ^[92]

Lambe ^[73] a suggéré d'ajouter à la formulation de Terzaghi les forces électrostatiques de répulsion (R) et d'attraction (A) :

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + [-P - (R - A)] \cdot \delta_{ij} \quad (3.21)$$

Pour les milieux non saturés, Sridharan et Venkatappa ^[114] ont proposé la formulation suivante :

$$\sigma'_{ij} = (\sigma_{ij} - u_a \cdot \delta_{ij}) + [f \cdot (u_a - u_w) - (R - A)] \cdot \delta_{ij} \quad (3.22)$$

La difficulté réside dans la détermination de ces forces électrostatiques qui sont reliées aux propriétés microscopiques des argiles.

Fonesca et Chenevert ^[38] ont utilisé l'activité de l'eau des pores pour déterminer la force électrostatique ($R - A$) d'une argilite mise en contact avec de l'eau :

$$R - A = \frac{R \cdot T}{V_m} \cdot \ln(a_p) \quad (3.23)$$

Dans le cadre du forage pétrolier, Lal ^[72] a pris en compte l'efficacité σ de l'argilite pour déterminer la pression des pores :

$$P = P_w - P_c + \sigma \cdot \Delta\pi \quad (3.24)$$

P_w est la pression de la boue de forage, P_c est la pression capillaire et $\Delta\pi$ est la pression osmotique.

Ghassemi et Diek ^[47] et Sherwood ^[109] ont utilisé le potentiel chimique afin de déterminer les déformations des argilites mises en contact avec des solutions chimiques.

L'effet de la chimie est pris en compte par une différence de potentiel chimique entre les constituants de l'eau des pores et la solution chimique externe.

Dans le cadre de la poroélasticité linéaire, leur formulation est la suivante (pour la convention de signe, les contraintes de compression sont positives) :

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \cdot \dot{\varepsilon}_{kl} - \beta_{ij} \cdot \dot{p} + \sum_{\beta} w_{\beta} \cdot \dot{\mu}_{\beta} \cdot \delta_{ij} \quad (3.25)$$

μ_{β} et w_{β} sont respectivement le potentiel chimique et le coefficient osmotique de l'espèce ionique β . Pour simplifier l'expression des potentiels chimiques, on suppose que l'eau des pores et la solution externe sont non idéales. Le potentiel chimique μ , rapporté au volume molaire de l'eau, peut

s'écrire ^[91] :

$$\mu(Pa) = \mu_{(T,P)}^0 + \frac{R.T}{V_m} \cdot \ln(a) \quad (3.26)$$

La contrainte chimique générée peut être écrite sous la forme suivante :

$$\sum_{\beta} w_{\beta} \cdot \dot{\mu}_{\beta} = \frac{R.T}{V_m} [\dot{\ln}(a)]$$

Dans le cas où la contrainte appliquée est constante, on peut écrire :

$$\dot{\varepsilon}_{kl} = - \frac{R.T}{V_m} \cdot \frac{[\dot{\ln}(a)]}{C_{ijkl}} \cdot \delta_{ij} \quad (3.27)$$

Au temps de stabilisation, le gonflement est :

$$\varepsilon_{kl} = - \frac{R.T}{V_m} \cdot \frac{[\ln(a_s/a_p)]}{C_{ijkl}} \cdot \delta_{ij} \quad (3.28)$$

Lorsque le tenseur d'élasticité est indépendant du potentiel chimique, le gonflement ne varie pas avec la contrainte initialement appliquée. Cela n'a pas été observé par l'approche de la double couche.

Les différentes formulations mentionnées ne sont pas spécifiques aux milieux argileux car la force osmotique n'est pas celle de répulsion électrostatique.

Une simple comparaison entre les essais de gonflement libre effectués par Daupley ^[28] sur l'argilite de Tournemire et par Aboubeker et Mamoune ^[1] sur la bentonite de Maghnia nous amène à penser que le potentiel chimique n'est pas un facteur déterminant du gonflement (Fig. 3.7 et Fig. 3.8).

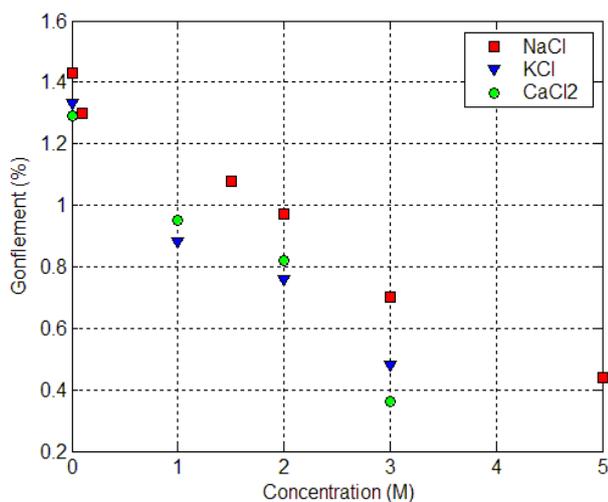


FIG. 3.7 – Argilite de Tournemire ^[28]

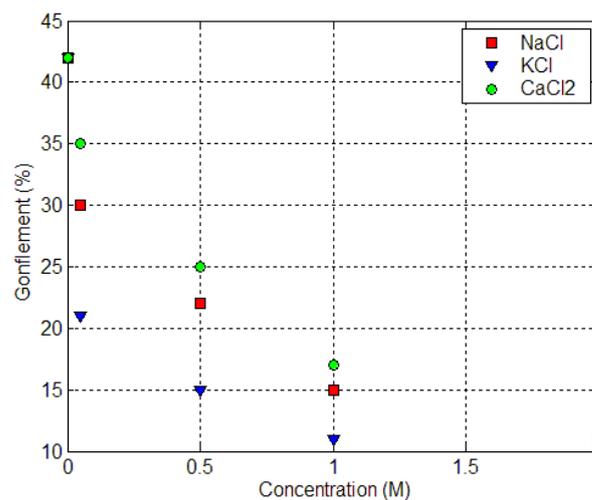


FIG. 3.8 – Bentonite de Maghnia ^[1]

Bien que le gonflement diminue avec la concentration du sel dissous, l'argilite de Tournemire réagit davantage avec le NaCl alors que la bentonite réagit, quant à elle, avec le CaCl₂.

En raisonnant en potentiel chimique, il faut que le gonflement soit plus élevé pour un sel de NaCl

que pour un sel de CaCl_2 . Cependant, cette hiérarchie n'a pas été observée sur la bentonite. Afin de prendre en compte les effets électrochimiques entre l'eau des pores et la solution externe, Molenaar et Huyghe ^[84] ont utilisé le potentiel électrochimique qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\mu_\beta = \mu_{\beta(T,P)}^0 + \frac{1}{V_m} \cdot [R.T. \ln(\gamma_\beta \cdot C_\beta) + e_\beta \cdot F \cdot \psi] \quad (3.29)$$

e_β est la charge électrique de l'espèce ionique β , F est la constante de Faraday et ψ est le potentiel électrique.

Cette formulation est utilisée dans une formulation semblable à celle de l'équation 3.25.

Mécaniquement, les essais d'effondrement effectués par Jennings et Burland ^[63] puis par Cui et al. ^[25] font apparaître la limite du concept de la contrainte effective.

Cui et al. ^[25] ont effectué des essais de gonflement oedométriques sur des échantillons de Loess de Picardie. Les échantillons sont imbibés sous contraintes constantes élevées, ce qui entraîne leur effondrement.

Ce comportement (gonflement ou effondrement) dépend de la contrainte appliquée. Si on résonne en contrainte effective, l'imbibition des matériaux argileux entraîne une diminution de la contrainte effective, puis un gonflement, ce qui n'est pas observable expérimentalement pour des contraintes dépassant une certaine limite.

Pour une contrainte nulle, Freissmuth ^[42] a observé un effondrement complet des échantillons d'argilite de Bure lorsqu'ils sont immergés dans l'eau. Cet effondrement ne peut pas être aussi expliqué par la notion de contrainte effective.

3.3.2 Modèle d'Alonso et Gens

Alonso et al. ^[6] ont développé un modèle élasto-plastique étendant le modèle de Cam-Clay aux milieux non saturés. Ce modèle permet d'expliquer plusieurs phénomènes :

- augmentation de la cohésion avec l'augmentation de la pression de consolidation,
- développement d'un gonflement réversible suite à la diminution de la succion sous faibles contraintes de confinement,
- effondrement du sol si la succion diminue sous de fortes valeurs de contraintes de confinement,
- déformations volumiques irréversibles pour des succions dépassant la limite élastique de succion.

Le modèle est basé sur deux surfaces de charge (Fig. 3.9) :

- la première est liée au comportement mécanique de type Cam-Clay LC (Loading Collapse),
- la deuxième est liée à la succion SI (Suction Increase).

Les surfaces de charge délimitent une zone élastique réversible et sont exprimées de la façon suivante :

$$p = p_0(s) \quad (3.30)$$

$$s = s_0 \quad (3.31)$$

p_0 est la pression de surconsolidation, s_0 est un paramètre de surconsolidation lié à la succion, il s'agit de la valeur maximum de succion subie dans l'histoire hydrique du sol.

Si le chemin de contraintes ou de succions dépasse la zone élastique, il se produit une déformation irréversible et un écrouissage du matériau qui fait évoluer les surfaces de charge.

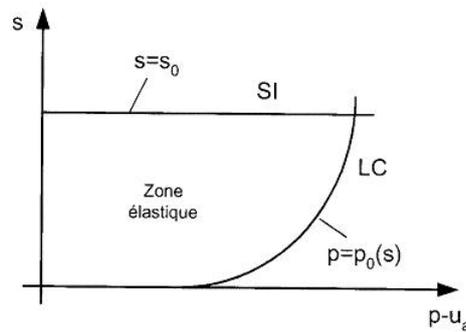


FIG. 3.9 – Surfaces de charge sous chargement isotrope [6]

Le modèle d'Alonso et Gens présente une certaine limitation en terme de réversibilité. En effet, un essai de gonflement-retrait sans contrainte, effectué sur l'argilite de Bure à une température de 30°C et pour un chemin d'humidification par paliers correspondant à Hr : 60–70–80 % suivi par une dessiccation jusqu'à Hr de 70 %, se manifeste par une irréversibilité (Fig. 3.10).

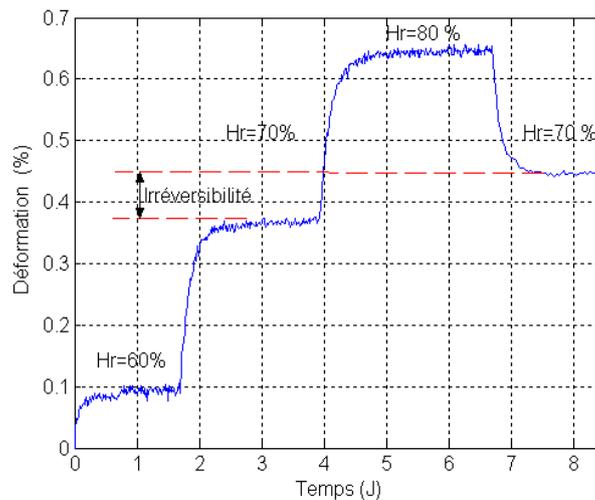


FIG. 3.10 – Irréversibilité du gonflement libre pour l'argilite de Bure

Cependant, l'humidité relative initiale est approximativement égale à 47 % (Fig. 2.9, page 18) correspondant à une succion initiale S_0 de 105.76 MPa (Eq. 2.9, page 23).

D'après ce modèle, le chemin d'humidification-dessiccation suivi reste dans le domaine élastique et cela pour une pression d'air égale à la pression atmosphérique ($u_a = 0$).

Par ailleurs, ce modèle ne peut pas être étendu aux sols gonflants. Ceci est dû principalement à la complexité des phénomènes à l'échelle microscopiques, surtout d'ordre chimique.

De plus, la modélisation nécessite un grand nombre de données expérimentales et difficilement applicables pour des roches anisotropes comme l'argilite. Le modèle est basé sur des notions caractéristiques des sols comme le comportement sousconsolidé et surconsolidé.

3.4 Approches basées sur des modèles de gonflement

Ce type d'approches est basé sur des expériences réalisées en laboratoire. Ces approches ne prennent en considération ni les caractéristiques mécaniques du matériau argileux (module Young, coefficient de Poisson, ...) ni les propriétés électrochimiques des minéraux argileux.

Trois types de modèles sont à distinguer :

1. les modèles indépendants du temps,
2. les modèles dépendants du temps,
3. les modèles basés sur l'humidité relative et sur l'activité.

3.4.1 Modèles indépendants du temps

Ces modèles ne prennent en compte ni le temps ni le chimisme de la solution d'hydratation, le gonflement obtenu correspondant au gonflement maximal au temps infini ou au temps de stabilisation. On en distingue deux :

1. les modèles unidirectionnels,
2. les modèles tridirectionnels.

Modèles unidirectionnels

Huder et Amberg ^[59] ont relié la déformation axiale du gonflement ε_g au logarithme de la contrainte axiale σ_a par une équation linéaire de la forme suivante :

$$\varepsilon_g = K \cdot \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_g} \right) \quad (3.32)$$

K est l'indice de gonflement, σ_g est la pression de gonflement.

Cette équation n'est valable que pour les contraintes σ_a comprises entre σ_c et σ_g . σ_c est la contrainte en-dessous de laquelle il n'y a plus de gonflement.

La formulation générale de la loi peut être écrite de la manière suivante :

$$\varepsilon_g = \begin{cases} 0 & \sigma_a > \sigma_g \\ K \cdot \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_g} \right) & \sigma_c < \sigma_a < \sigma_g \\ K \cdot \log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_g} \right) & \sigma_a < \sigma_c \end{cases} \quad (3.33)$$

Modèles tridirectionnels

Wittke et al. ^[133, 134] se sont appuyés sur le modèle d'Huder et Amberg pour passer du gonflement unidirectionnel au gonflement tridirectionnel en se basant sur un comportement élastique linéaire isotrope.

D'après leur modèle : *c'est la contrainte moyenne $\sigma_m = \frac{1+v}{1-v} \cdot \left(\frac{\sigma_a}{3}\right)$ qui commande le gonflement.*

Dans le cas oedométrique, la déformation volumique ε_v est égale à la déformation axiale ε_a .

En utilisant l'équation d'Huder et Amberg, le gonflement tridirectionnel peut alors être écrit comme suit :

$$I_{1\varepsilon}^g = K \cdot \log \left[\frac{I_{1\sigma} (1 - \nu)}{\sigma_g (1 + \nu)} \right] \quad (3.34)$$

$I_{1\varepsilon}^g$ et $I_{1\sigma}^g$ sont respectivement les premiers invariants des déformations et des contraintes.

Froehlich [44] s'est basé sur des essais de gonflement non confinés latéralement réalisés sur des roches argileuses et sur le modèle d'Huder et Amberg pour mettre en évidence une forte anisotropie du gonflement à cause de la répartition parallèle des feuillets argileux. Il a développé un modèle élastique isotrope qui prend en considération le gonflement normal au plan de la stratification en négligeant le gonflement parallèle à ce plan. Le modèle peut s'écrire de la manière suivante :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \Delta\sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} + n_i \cdot n_j \cdot f(\sigma_n) \quad (3.35)$$

$$f(\sigma_n) = \begin{cases} 0 & \sigma_a \geq \sigma_g \\ K \cdot \log\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_g}\right) & \sigma_a < \sigma_g \end{cases} \quad (3.36)$$

$\sigma_n = \sigma_{ij} \cdot n_i \cdot n_j$ est la contrainte normale à la stratification, \underline{n} est le vecteur normal à la stratification, E est le module de Young et ν est le coefficient de Poisson.

Anagnostou [7] s'est inspiré du modèle d'Huder et Amberg pour développer un modèle de gonflement tridirectionnel pour des matériaux argileux anisotropes. Le tenseur du gonflement $\underline{\underline{\varepsilon}}^g$ peut s'écrire comme suit :

$$\underline{\underline{\varepsilon}}_g = \begin{cases} K \cdot \underline{\underline{\beta}} \cdot \log\left(\frac{\underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}}}{\underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}}_g}\right) & \underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}} \leq \underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}}_g \\ 0 & \underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}} \geq \underline{\underline{\beta}} : \underline{\underline{\sigma}}_g \end{cases} \quad (3.37)$$

$\underline{\underline{\sigma}}$ est le tenseur des contraintes totales, $\underline{\underline{\sigma}}_g$ est le tenseur des pressions de gonflement, $\underline{\underline{\beta}}$ est le tenseur d'anisotropie et K est l'indice de gonflement.

Le tenseur d'anisotropie $\underline{\underline{\beta}}$ s'écrit de la forme suivante :

$$\underline{\underline{\beta}} = \frac{1 - \beta_a}{3} \cdot \underline{\underline{1}} + \beta_a \cdot n \otimes n \quad (3.38)$$

Le paramètre β_a permet d'étudier le caractère anisotrope de gonflement. A titre d'exemple :

- pour $\beta_a = 0$, le gonflement est isotrope et ne possède pas de directions privilégiées,
- pour $\beta_a = 1$, le gonflement est marqué suivant la direction normale à la stratification. Par contre, le gonflement parallèle à la stratification est nul.

L'influence de la pression de confinement σ_3 sur le gonflement axial ε_1 des roches argileuses a été étudiée par Yesil et al. [137] au moyen de l'appareil triaxial. D'après les auteurs : *le gonflement axial augmente avec la pression de confinement*. Le modèle peut s'écrire de la forme suivante :

$$\varepsilon_1 = (a + b \cdot \sigma_3) - (c + d \cdot \sigma_3) \cdot \log(\sigma_1) \quad (3.39)$$

a, b, c et d sont les paramètres du modèle dépendant du pourcentage des minéraux argileux, de la teneur en eau initiale et de la température.

Wong et Wang [136] se sont basés sur les approches statistiques et une forme simplifiée de la théorie de la double couche afin de modéliser le gonflement tridimensionnel anisotrope. L'approche statistique a été introduite dans le modèle par une densité de fonction probabiliste.

3.4.2 Modèles dépendants du temps

Parmi les modèles dépendants du temps, on en distingue deux :

1. les modèles unidirectionnels,
2. les modèles tridirectionnels.

Modèles unidirectionnels

A partir des essais de gonflement libre œdométrique effectués sur des sols argileux, Dakshanamurthy [26], Vayssade [123], Parcevaux [95], Sivapullaiah et al. [111] et Al-Mukhtar et al. [4] ont représenté l'évolution du gonflement en fonction du temps par une fonction hyperbolique en forme de S . Ces auteurs ont distingué trois types de gonflement :

1. Gonflement intervide correspondant au remplissage des vides des matériaux non gonflants : ce gonflement n'est pas apparent macroscopiquement, il dépend de l'indice des vides et du pourcentage des matériaux gonflants et non gonflants.
2. Gonflement primaire dû à l'hydratation des minéraux argileux : il est le plus rapide à se manifester et présente la plus grande ampleur.
3. Gonflement secondaire dû à la formation de la double couche diffuse : il se manifeste lentement avec une faible vitesse de gonflement.

Leur approche, intégrant ces trois types de gonflement, peut être simplifiée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_g (\%) = \frac{G.t}{B + t} \quad (3.40)$$

G est le taux de gonflement maximal pour un temps infini et B est le temps du demi-gonflement.

Modèles tridirectionnels

La modélisation de l'évolution du gonflement tridirectionnel en fonction des contraintes a été étudiée aux moyens des essais de déchargement de la contrainte axiale en mesurant simultanément le gonflement axial et horizontal des échantillons mis en contact avec de l'eau.

Kiehl [69] a effectué des essais de gonflement tridirectionnel sur des roches argileuses. Il a montré, à partir des résultats, que le gonflement dans une direction principale i , induit par un déchargement, dépend uniquement de la contrainte normale suivant cette direction. La formulation analytique de la loi du gonflement s'écrit de la manière suivante :

$$\dot{\varepsilon}_{gi} = \frac{1}{n_g} \cdot [f(\sigma_i) - \varepsilon_{gi}] \quad (3.41)$$

Avec ;

$$f(\sigma_i) = \begin{cases} 0 & \sigma_i > \sigma_{gi} \\ K_i \cdot \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{gi}}\right) & \sigma_c < \sigma_i < \sigma_{gi} \\ K_i \cdot \log\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{gi}}\right) & \sigma_i \leq \sigma_c \end{cases} \quad (3.42)$$

Suivant une direction i , on distingue le gonflement ε_{gi} , la pression de gonflement σ_{gi} et l'indice de gonflement K_i .

Lo et Lee ^[76] ont développé un modèle pour tenir compte de l'évolution du gonflement des roches argileuses anisotropes en fonction du temps.

D'après ce modèle : *l'application de la contrainte dans une direction principale non seulement supprime le gonflement dans cette direction mais réduit aussi le gonflement dans les autres directions orthogonales.*

Dans le cas uniaxial et pour des matériaux orthotropes, le modèle peut s'écrire de la forme suivante :

$$\varepsilon_v(t) = \left[D_v - S_v \cdot \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-t}{n_g} \right) \right] \quad (3.43)$$

$$\varepsilon_h(t) = \left[D_h - S_h \cdot \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-t}{n_g} \right) \right] \quad (3.44)$$

σ_a et σ_0 sont respectivement la contrainte axiale et la contrainte de référence (généralement égale à 1 KPa).

D_v et S_v sont respectivement le gonflement axial (D_h étant le gonflement radial) pour une contrainte axiale de 1 KPa et l'indice de gonflement axial (S_h est l'indice du gonflement radial). La cinétique du gonflement est décrite par le coefficient n_g . Plus S_h diminue, plus le gonflement radial devient indépendant de la pression axiale.

Hawladar et al. ^[53] ont amélioré le modèle de Lo et al. ^[76] par introduction d'un pseudo coefficient de Poisson. D'après les auteurs : *l'application de la contrainte suivant une direction principale réduit le gonflement suivant les trois directions.*

Le modèle consiste à passer d'une situation triaxiale à une situation uniaxiale par ajout de contraintes virtuelles.

A titre d'exemple, pour calculer le gonflement, suivant la direction x , d'un échantillon soumis à des contraintes principales $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, il suffit d'ajouter à la contrainte σ_x deux autres contraintes virtuelles σ_{xy}^* et σ_{xz}^* . Le vecteur des contraintes virtuelles devient $(\sigma_x^{TS}, 0, 0)$.

En général, la contrainte à appliquer suivant une direction i nécessaire à éliminer les effets des autres contraintes peut être écrite sous la forme :

$$\sigma_i^{TS} = \sigma_i + (1 - \delta_{ij}) \cdot \sigma_{ij}^* \quad (3.45)$$

avec,

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_c \cdot 10^{[R_{ij} \cdot \log(\sigma_g/\sigma_c)]} \quad (3.46)$$

et,

$$R_{ij} = \mu_{ij} \cdot \frac{\log \left(\frac{\sigma_j}{\sigma_c} \right)}{\log \left(\frac{\sigma_g}{\sigma_c} \right)} \quad (3.47)$$

Le gonflement généré est alors égal :

$$m_i = (1 - R_i^{TS}) \cdot m_{i(0)} \quad (3.48)$$

$m_{i(0)}$ est le gonflement pour une contrainte égale à σ_c et R_i^{TS} est le coefficient de réduction du gonflement suivant une direction i qui peut s'écrire de la manière suivante :

$$R_i^{TS} = \frac{\log\left(\frac{\sigma_i^{TS}}{\sigma_c}\right)}{\log\left(\frac{\sigma_g}{\sigma_c}\right)} \quad (3.49)$$

σ_c est une pression de référence, R_{ij} est le coefficient de réduction du gonflement suivant la direction i due à une contrainte suivant la direction j et σ_{ij}^* est la contrainte virtuelle appliquée suivant la direction i .

Pour une direction principale i , l'évolution du gonflement en fonction du temps suit une loi logarithmique :

$$\varepsilon_i(t) = m_i \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (3.50)$$

t_0 est un temps de référence et m_i est le potentiel de gonflement.

Ce modèle suppose que les pressions de gonflement suivant les trois directions sont identiques et valent σ_g . Cependant, l'anisotropie du gonflement est introduite par $m_{i(0)}$.

3.4.3 Modèles basés sur l'humidité relative ou l'activité

Huang et Azar ^[57] ont développé un modèle empirique pour prédire la pression de gonflement maximale des échantillons d'argilites immergés dans l'eau dans des conditions uniaxiales.

Les auteurs ont développé un coefficient d'activité I_{Hr} égal à la variation relative de masse d'un échantillon (initialement séché dans l'étuve) mis en équilibre avec une humidité relative de 20 % puis de 100 %.

D'après les essais effectués sur des roches possédant différentes humidités initiales, les auteurs ont déduit que le coefficient I_{Hr} est un bon indicateur du comportement des argilites immergées dans l'eau. Ils ont distingué trois cas :

- $I_{Hr} < 1$ \Rightarrow la roche est stable (pas d'influence de l'eau),
- $1 < I_{Hr} < 4$ \Rightarrow la roche est susceptible d'agir avec le changement du degré hygrométrique,
- $4 < I_{Hr} < 7$ \Rightarrow la roche se détériore complètement lors de son immersion dans l'eau.

La pression du gonflement maximale P_{\max} des échantillons immergés dans l'eau augmente avec l'augmentation du coefficient d'activité I_{Hr} et avec la diminution de l'humidité relative initiale Hr (%) :

$$P_{\max} (MPa) = 0.0686.Hr - 0.0008.Hr^2 + 1.7473.I_{Hr} + 0.0132.I_{Hr}^2 - 0.0145.Hr.I_{Hr} + 0.9594 \quad (3.51)$$

Les effets de la température T ($^{\circ}C$) et de l'humidité sur le gonflement libre maximal S_{\max} et la pression du gonflement maximale P_{\max} ont été étudiés par Wang et al. ^[127] et Huang et al. ^[58] à partir d'une série d'essais expérimentaux réalisés en laboratoire sur des échantillons de roches argileuses. Ces deux grandeurs sont décrites par les équations suivantes :

$$P_{\max} (MPa) = 1.146.Hr + 0.006.T + 0.0148.T^2 - 1.7529.I_{Hr} + 0.275.I_{Hr}^2 - 0.3865.Hr.I_{Hr} + 4.0946 \quad (3.52)$$

$$S_{\max} (\%) = 1.4372.Hr - 0.047 + 0.0021.T^2 - 1.2335.I_{Hr} + 0.216.I_{Hr}^2 - 0.4682.Hr.I_{Hr} + 2.1004 \quad (3.53)$$

La pression de gonflement maximale ainsi que le gonflement maximal correspondent à une enveloppe des mesures des différentes roches testées.

La prise en compte de l'activité chimique de l'eau des pores a_p et du fluide hydratant a_s a été adoptée par Yew et al. ^[138] afin de modéliser le gonflement ε_g et le retrait ε_r des argilites sans contraintes. Leur modèle est basé sur la notion d'activité relative a_r définie comme suit :

$$a_r = \frac{a_p}{a_s} \quad (3.54)$$

Selon ce rapport, trois cas sont à considérer :

1. $a_r < 1 \Rightarrow$ l'argilite absorbe l'eau et gonfle. Le gonflement est alors décrit par l'équation suivante :

$$\varepsilon_g = K_{ad} \cdot (1 - a_r) \quad (3.55)$$

2. $a_r > 1 \Rightarrow$ l'argilite désorbe l'eau et se contracte. Le retrait est alors écrit de la manière suivante :

$$\varepsilon_r = K_{ds} \cdot (a_r - 1) \quad (3.56)$$

3. $a_r = 1 \Rightarrow$ l'argilite ne réagit pas.

K_{ad} et K_{ds} sont respectivement les coefficients d'adsorption et de désorption et sont déterminés expérimentalement.

3.5 Conclusion

L'amplitude du gonflement est strictement influencée par des propriétés microscopiques (structure, texture, minéralogie des argiles, nature et concentration d'ions de la solution hydratante, ...) et macroscopiques (contraintes appliquées, anisotropie, humidité, teneur en eau initiale, ...). Ces différents facteurs montrent qu'il est difficile de corrélérer un comportement macroscopique à des observations microscopiques.

Le modèle de la double couche est un modèle de base, il explique les phénomènes à l'échelle microscopique. L'application de ce modèle semble être favorable pour les sols argileux dans le cas où l'on maîtrise bien les caractéristiques des minéraux argileux. Ce modèle nous montre également que la pression de gonflement dépend de la porosité, au contraire de ceux basés sur la pression osmotique. Néanmoins, dans le cas d'une roche argileuse, où la texture et la structure ne sont pas homogènes, ce modèle est inapplicable.

Les approches phénoménologiques, sont souvent utilisables pour les matériaux non gonflants au sens physico-chimique. Ces approches supposent que la pression des pores est isotrope en négligeant de cette façon l'organisation des feuillets argileux qui est à l'origine d'une pression anisotrope. L'utilisation de tels modèles sur les argilites contenant un pourcentage élevé de minéraux gonflants comme les smectites n'est pas réaliste.

Les approches basées sur des modèles de gonflement sont reliées directement aux expérimentations réalisées en laboratoire. Elles intègrent des processus microscopiques sans aucune véritable justification. Ces approches sont les plus naturelles dans la mesure où elles peuvent se baser sur des résultats expérimentaux.

Deuxième partie
Analyse expérimentale

Chapitre 4

Dispositifs expérimentaux et roches étudiées

4.1 Introduction

La plupart des essais adoptés par les comités internationaux (AFNOR, ISRM, CEBTP, ...) se sont basés sur des essais de gonflement œdométrique. Ces essais, qui ont pour objectif de déterminer deux principales grandeurs qui sont le gonflement et la pression de gonflement, sont répertoriés en différentes méthodes ¹ : méthode de prégonflement, méthode de gonflement en parallèle, méthode de double œdomètre, méthodes de gonflement empêché et méthode de gonflement sous différentes charges.

Ces méthodes sont applicables pour différentes conditions d'humidification (eau, solutions salines et humidité).

Ces essais classiques imposent une déformation radiale nulle qui n'est pas toujours représentative des conditions in situ.

Afin d'étudier le comportement d'une roche argileuse en laboratoire en imposant des conditions radiales différentes (gonflement radial empêché et gonflement radial libre), nous avons mis au point, au sein de notre laboratoire, différents dispositifs expérimentaux qui sont :

- la cellule de mesure des déformations libres,
- la cellule de mesure de la pression de gonflement,
- la cellule œdométrique,
- la cellule triaxiale,
- les cellules uniaxiales.

La cellule de mesure des déformations libres nous permet de mesurer le gonflement tridimensionnel anisotrope d'un échantillon libre de gonfler radialement et axialement alors que la cellule œdométrique sert uniquement à étudier le gonflement axial lorsque le gonflement radial est empêché. L'utilisation de la cellule uniaxiale nous permet, quant à elle, d'étudier le gonflement axial et le gonflement radial lorsque l'échantillon est soumis à une contrainte axiale et qu'il est libre de gonfler radialement. Pour rendre compte de l'effet du confinement sur le gonflement axial, il est nécessaire d'avoir recours à une cellule triaxiale.

Il est important de remarquer que ces dispositifs permettent clairement d'étudier le gonflement tridimensionnel d'une roche argileuse anisotrope afin de pallier le manque d'essais tridimensionnels qui freine le développement de modèles de comportement.

¹Ces méthodes sont détaillées dans l'annexe B

Les liens entre le gonflement et la masse retenue par l'échantillon d'une part, et entre le gonflement l'échange chimique entre l'eau des pores et la solution d'hydratation d'autre part, constituent également des aspects intéressants à étudier. Pour cette raison, des essais spécifiques ont été mis au point.

Les essais, réalisés à la température ambiante de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ont été effectués sur des échantillons d'argilite présentant une forme cylindrique dont les faces sont rectifiées de telle manière à ce qu'elles soient parfaitement planes, parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de l'échantillon.

Les échantillons sont carottés et découpés à l'air comprimé puis sont correctement conservés sous vide dans des sacs hermétiques de manière à préserver leur état hydrique initial jusqu'à la phase de réalisation des essais.

Avant chaque essai, on mesure, pour chaque échantillon, ses dimensions (hauteur et diamètre) à l'aide d'un pied à coulisse ainsi que la vitesse des ondes de compression P et sa masse.

La teneur en eau massique est déterminée par passage à l'étuve à une température de $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 24 heures.

4.2 Dispositifs expérimentaux

4.2.1 Cellule de mesure des déplacements libres

Ce dispositif expérimental a pour objectif de mesurer en continu les déplacements axial et radial d'une éprouvette mise en contact avec l'humidité ou avec une solution aqueuse.

La variation du diamètre de l'éprouvette est mesurée, uniquement dans le cas où l'échantillon présente une stratification horizontale, au moyen d'un ruban en laiton encerclant l'échantillon et légèrement mis en tension et relié à un capteur de déplacement. La variation de la hauteur est mesurée par un capteur de déplacement disposé au centre de la face supérieure de l'échantillon (Fig. 4.1). Les deux capteurs de déplacement, de type LVDT (Linear Variable Displacement Transducers), sont reliés à l'ordinateur au moyen d'une carte d'acquisition.

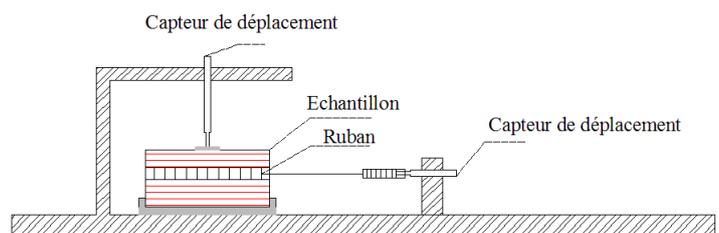


FIG. 4.1 – Dispositif expérimental permettant de mesurer les déplacements axial et radial

Pour imposer l'humidité, on a utilisé une enceinte thermohygro-métrique de Type Votsch VCN100 qui présente des avantages par rapport à d'autres techniques (la technique de surpression d'air, la technique osmotique et la technique de la solution saline) : une large plage d'humidité et une facilité de programmation de l'historique de la variation de l'humidité ainsi que de la température en fonction du temps.

La figure 4.2 présente la plage d'humidité relative acquise en fonction de la température avec une précision de $\pm 2\%$.

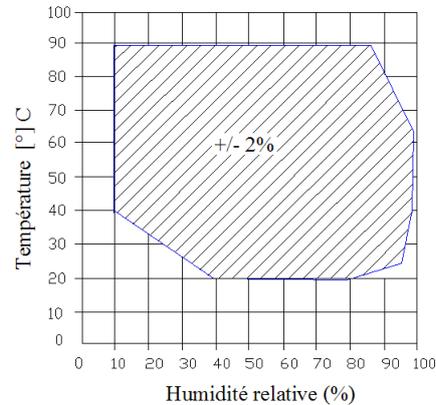


FIG. 4.2 – *Température et humidité relative de l'enceinte*

4.2.2 Cellule de mesure de la pression de gonflement

Cette cellule, conçue au CGI (Centre de Géologie de l'Ingénieur) par Daupley [28], permet de mesurer la pression de gonflement axiale d'un échantillon empêché de gonfler axialement et radialement (Fig. 4.3).

Le dispositif est constitué d'une bague métallique indéformable de diamètre intérieur 63.1 mm et d'un piston axial fixe interdisant le gonflement axial. La pression de gonflement est mesurée par l'intermédiaire de l'augmentation de la contrainte développée sur la membrane en inox située à la base de l'échantillon et qui met en pression l'eau du réservoir située entre la membrane et le capteur de pression. Ce dernier présente une limite de mesure de 2 MPa.

L'étanchéité du réservoir de mesure est assurée par un joint torique situé dans l'embase.

La saturation est effectuée par un réservoir d'eau situé en haut de l'échantillon et séparé de celui-ci par une pierre poreuse.

La hauteur des échantillons peut varier de 10 mm à 20 mm.

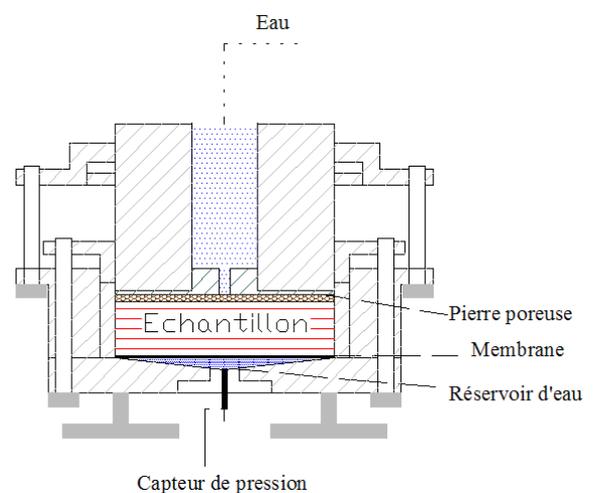


FIG. 4.3 – *Dispositif expérimental permettant de mesurer la pression de gonflement axiale*

4.2.3 Cellule œdométrique

La cellule œdométrique a pour objectif de déterminer, en fonction de la contrainte axiale appliquée, le gonflement axial d'un échantillon empêché de gonfler radialement.

Le bâti de la cellule est composé de deux plateaux reliés par deux tiges filetées de forte rigidité. Des mesures de précaution par peinture ont été prises afin d'éviter la corrosion des différentes pièces métalliques.

Cette cellule est composée d'un anneau métallique de forte rigidité permettant d'accueillir un échantillon de diamètre 36 mm et de hauteur 25 mm (Fig. 4.4).

Le déplacement axial est mesuré par deux capteurs de type LVDT diamétralement opposés. Ces capteurs sont caractérisés par une étendue de mesure de 10 mm et une précision de mesure de 0.01 mm.

La contrainte axiale est appliquée par un vérin qui la transmet à l'échantillon à travers un système de ressorts de forte raideur. Cette contrainte est mesurée par un capteur de force qui possède une étendue de mesure de $2 \cdot 10^4$ N et une non-linéarité de 0.1 %.

La saturation de l'échantillon est assurée par un réservoir d'eau qui transmet le fluide au travers d'une pierre poreuse et une membrane en inox percée encerclant l'échantillon. La circonférence de l'échantillon ainsi que celle de la membrane en inox ont été graissées afin de réduire le plus possible le frottement latéral.

Le déplacement axial et la contrainte axiale appliquée sont enregistrés en continu via une carte d'acquisition et un ordinateur.

Malgré le raccourcissement du ressort dû au gonflement de l'échantillon, la contrainte axiale appliquée reste quasiment invariable durant l'essai.

Les essais ont été réalisés avec un seul palier de contrainte axiale et cela afin d'éviter les perturbations dues au frottement latéral.

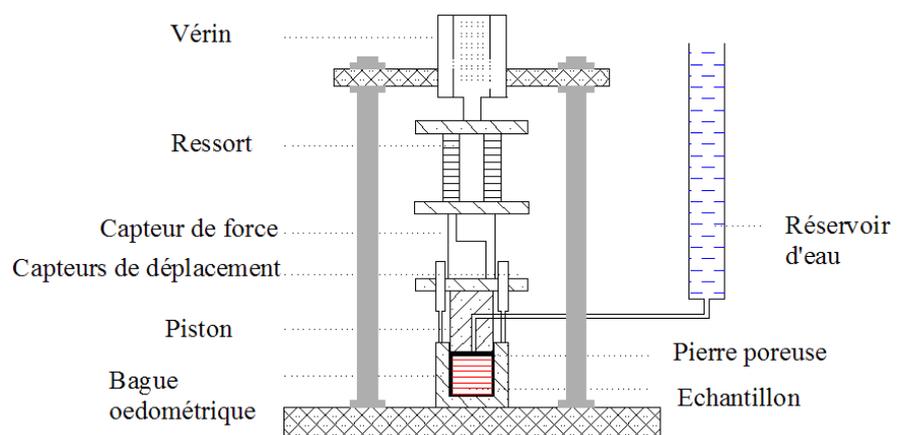


FIG. 4.4 – Dispositif expérimental permettant de réaliser des essais œdométriques

4.2.4 Cellule triaxiale

L'utilisation de la cellule triaxiale pour étudier le gonflement des sols argileux et en particulier des roches argileuses est novatrice. La cellule développée est compatible avec la presse de type MTS (Mechanics Testing System) et a nécessité un important travail de mise au point (Fig. 4.5).

Elle nous permet d'appliquer différents chemins de contraintes axiales et radiales et de suivre le gonflement ou la pression de gonflement axiale générée pour un blocage partiel ou total du déplacement axial.

Les échantillons sont carottés et découpés de façon à avoir un diamètre de 50 mm et une hauteur de 25 mm.

La contrainte axiale est appliquée par un piston hydraulique avec une vitesse de déformation de 120 *micron/m/min* et la pression de confinement par un injecteur d'huile. Cette dernière est transmise à l'échantillon au moyen d'une gaine de silicone imperméable enrobant l'échantillon.

La saturation de l'échantillon est assurée par l'injection d'eau de bas en haut à travers les talons poreux déposés de part et d'autre de l'échantillon. Le tuyau de sortie débouche dans un récipient externe.

Cependant, pour tous les essais, l'eau n'a pu traverser l'échantillon et ce à cause de la faible perméabilité des matériaux testés.

Malgré ce constat, les échantillons sont complètement saturés et leur teneur en eau finale est proche de celle d'un échantillon immergé sans contraintes dans l'eau.

Pour éviter les fuites d'eau entre l'échantillon et la gaine de silicone, la pression d'injection d'eau doit être inférieure à la moitié de la pression de confinement. Pour les essais réalisés, cette pression a été fixée à 0.3 MPa.

La cellule triaxiale est pilotée par ordinateur, l'acquisition des différentes grandeurs est réalisée par pas de temps, de déformation ou de contrainte.

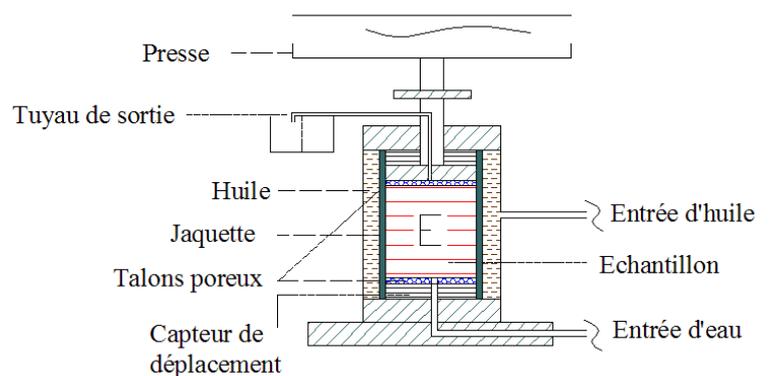
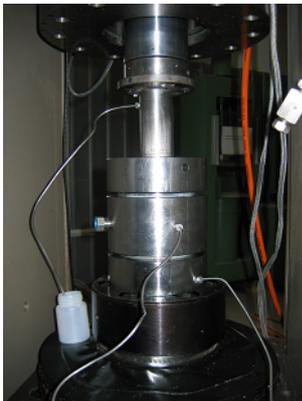


FIG. 4.5 – Dispositif expérimental permettant de réaliser des essais triaxiaux

La procédure expérimentale adoptée inclut plusieurs étapes :

- application d'une contrainte isotrope,
- augmentation de la contrainte axiale jusqu'à la contrainte voulue. Cette dernière est maintenue constante jusqu'au palier suivant,
- injection de l'eau,
- mesure du gonflement généré puis déchargement de la contrainte axiale.

Tout d'abord, on a essayé de déterminer le gonflement radial par l'intermédiaire de la variation du volume d'huile expulsé de la cellule. La compressibilité de l'huile, la variation de température et le volume de l'air emprisonné autour de la jaquette ont rendu cette méthode de mesure non valide. Il faut aussi noter que l'utilisation de jauges de déformation collées directement à l'échantillon n'est pas fiable car les jauges se décollent au contact de l'eau.

Pour s'assurer de la validité des mesures, deux essais de répétabilité ont été réalisés sur l'argilite de Lorraine présentant une isotropie transverse. La contrainte axiale appliquée est de 1.2 MPa et la pression de confinement est de 1 MPa.

Ces essais, illustrés sur la figure 4.6, concernent uniquement le gonflement, les déformations élastiques initiales avant injection de l'eau sont exclues.

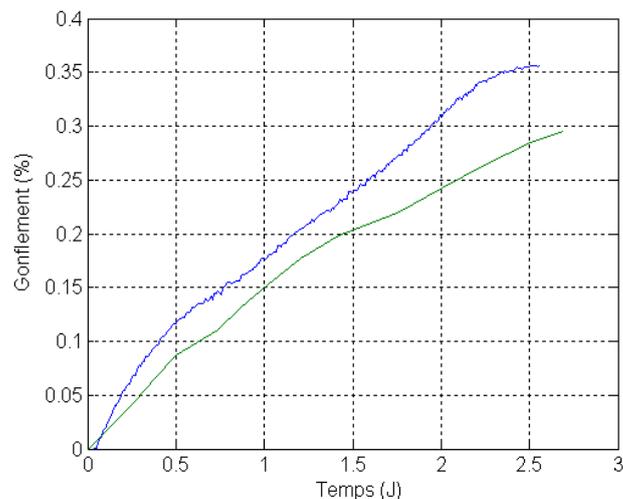


FIG. 4.6 – Essai de répétabilité sur l'argilite de Lorraine pour une contrainte axiale de 1.2 MPa et pour une pression de confinement de 1 MPa

On note que l'écart entre les déformations pour une durée de 2.5 jours est de 13.8 %. Cet écart est une valeur acceptable.

L'absence de mesures radiales nous a amené à élaborer des essais uniaxiaux avec des mesures radiales.

4.2.5 Cellules uniaxiales

Pour étudier l'influence de la contrainte axiale sur le gonflement radial, deux dispositifs ont été développés :

Le premier dispositif sert à déterminer le gonflement axial et le gonflement radial d'un échantillon subissant différents chemins de contrainte axiale (Fig. 4.7).

Les échantillons d'argilite testés présentent une isotropie transverse. Le diamètre des échantillons est de 50 mm et la hauteur est de 35 mm.

Le déplacement axial est mesuré par deux capteurs de type LVDT tandis que le gonflement radial est mesuré par un ruban en inox entourant diamétralement l'échantillon et relié à un capteur de déplacement par une poulie et un ressort.

L'imbibition est assurée par immersion de la base jusqu'au plus haut niveau de l'échantillon dans un récipient contenant de l'eau.

Le déplacement axial, le déplacement radial et la contrainte axiale appliquée sont enregistrés en continu par une carte d'acquisition et un ordinateur.

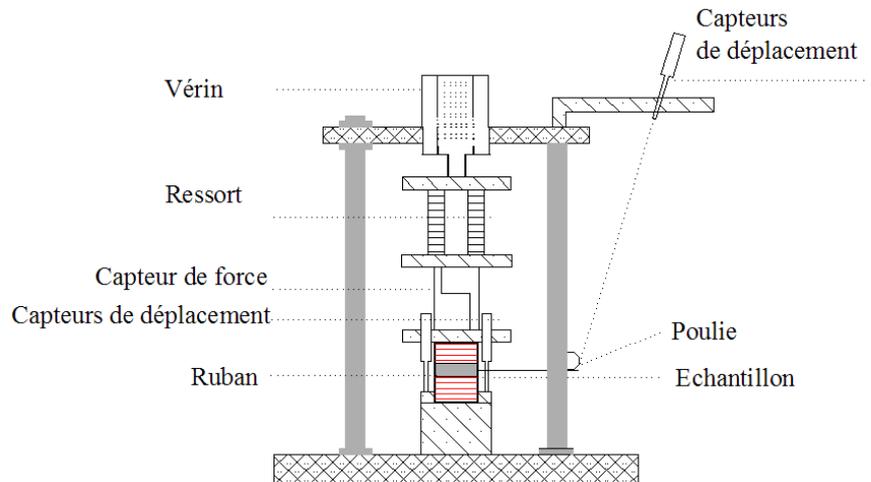
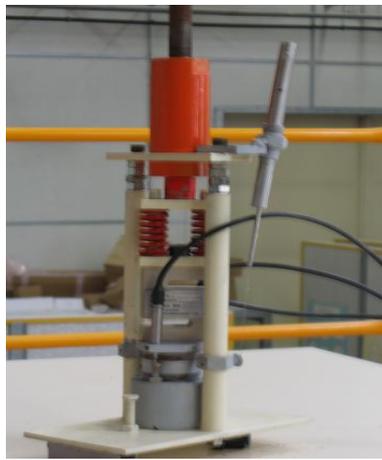


FIG. 4.7 – Dispositif expérimental permettant de réaliser des essais uniaxiaux

Les modes opératoires suivis sont :

- montée rapide en contrainte axiale,
- immersion de l'échantillon dans l'eau,
- mesure des déplacements axial et radial,
- déchargement de la contrainte axiale et mesure pour chaque palier de contrainte des déplacements engendrés.

Afin de s'assurer du bon fonctionnement du dispositif, un essai de répétabilité a été réalisé sur deux échantillons d'argilite soumis à une contrainte axiale de 0.7 MPa. Cet essai est présenté sur la figure 4.8.

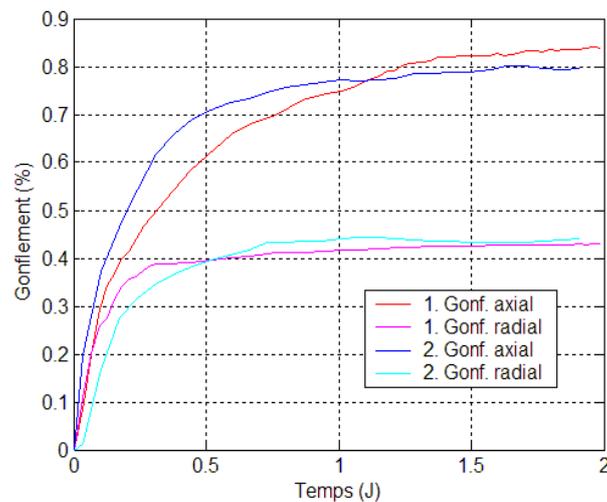


FIG. 4.8 – Essai de répétabilité sur l'argilite de Lorraine pour une contrainte axiale de 0.7 MPa

A la stabilisation, on note que l'écart entre les valeurs des déformations axiales est de 5.88 % tandis qu'il est de 3.75 % pour les déformations radiales.

Le deuxième dispositif a été conçu afin de mesurer le changement des dimensions, selon les trois directions, d'une éprouvette soumise à une contrainte axiale (Fig. 4.9). Les échantillons utilisés possèdent un diamètre de 65 mm et une hauteur de 130 mm et présentent une stratification verticale.

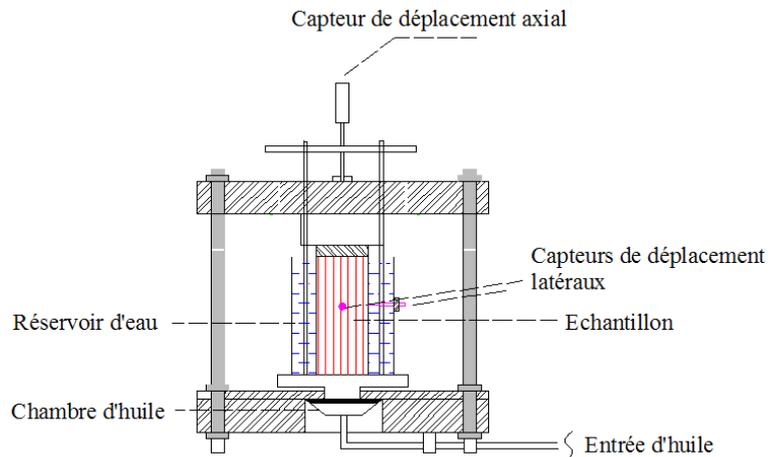


FIG. 4.9 – Dispositif expérimental permettant de mesurer les déplacements suivant les trois directions

Les déplacements ont été mesurés par trois capteurs de type LVDT : le premier est disposé axialement et les deux autres perpendiculairement dans le plan horizontal parallèle à la base de l'échantillon.

La difficulté réside dans l'emplacement des deux capteurs horizontaux : l'un perpendiculairement et l'autre parallèlement aux strates.

La contrainte axiale est appliquée grâce à des accumulateurs de pression utilisant de l'huile et de l'azote qui la transmettent à la base de l'échantillon. Cette technique nous permet d'appliquer des contraintes axiales élevées par rapport à celles appliquées au moyen des ressorts. La contrainte axiale est pilotée manuellement et n'est pas enregistrée.

Les déplacements des capteurs sont enregistrés en continu aux moyens d'une carte d'acquisition et d'un ordinateur.

La saturation est assurée par l'immersion totale de l'échantillon dans l'eau.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de ces capteurs, des essais de chargement-déchargement ont été effectués sur l'argilite de Tournemire. Dans la plage des contraintes faibles, pour ne pas dépasser la limite élastique, ces essais ont montré une bonne réversibilité des mesures.

4.2.6 Dispositifs d'échanges massique et chimique

Le principe de ces dispositifs est de comprendre comment la masse de l'échantillon évolue avec le gonflement volumique lorsque l'échantillon est mis en contact avec l'eau ou avec l'air humide et comment le pH de la solution d'hydratation varie avec le gonflement.

Le premier dispositif a pour objectif de mesurer en permanence le déplacement axial et la masse d'un échantillon disposé dans l'enceinte hygrométrique. Ce dispositif est composé d'un capteur de

déplacement et d'un capteur de force placé en bas de l'échantillon (Fig. 4.10).

Le capteur de force de type Kyowa a une capacité de 20 N, une non-linéarité de 1 % de l'étendue de mesure et un hystérésis de 1 %.

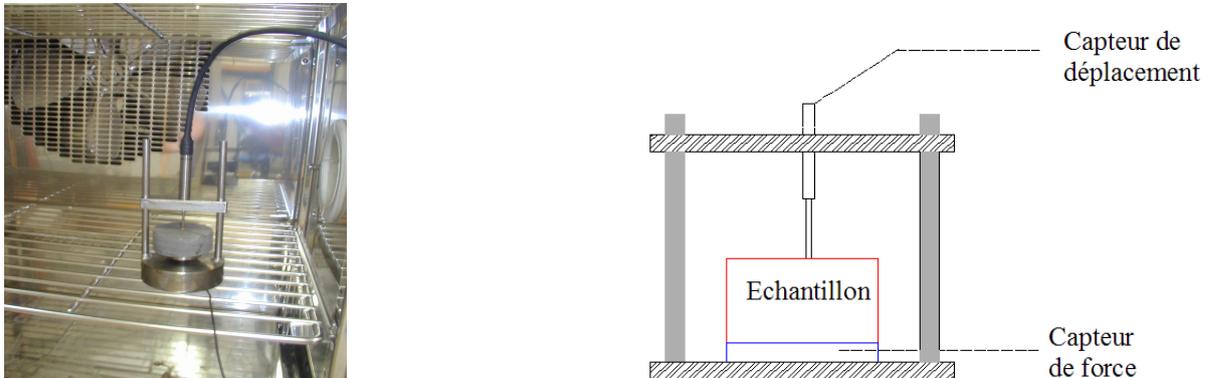


FIG. 4.10 – Cellule de mesure de la masse de l'échantillon et du déplacement axial

Afin de vérifier le bon fonctionnement du capteur de force, on l'a déposé seul dans l'enceinte pour subir le chemin hydrique suivant :

Par rapport à l'état initial, l'humidité relative est augmentée jusqu'à 60 % et est maintenue constante pendant 14 heures, ensuite, un cycle de 60 à 80 % a été appliqué avec une vitesse d'humidité relative de 0.2 j^{-1} pendant une période de 24 heures (Fig. 4.11).

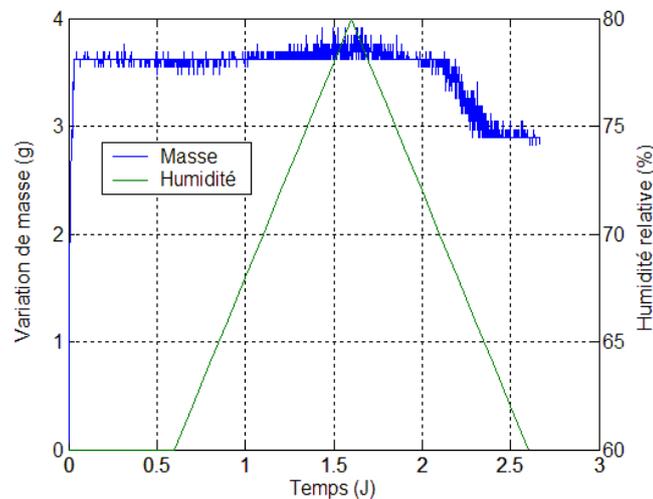


FIG. 4.11 – Évolution de la masse dans l'enceinte pour un chemin hydrique : $H_r = 60 \%$ – 14 heures et un cycle $H_r = 60 \%$ à $H_r = 80 \%$ pour une période de 24 heures

On constate une évolution rapide de la masse jusqu'à 3.7 g puis elle se stabilise durant 36 heures. L'augmentation rapide de la masse est due à la mise en marche de l'enceinte.

Ensuite, la diminution de l'humidité a réduit la masse. Malgré la forte précision du capteur de force, un écart de 1 g a été constaté, ce qui est une valeur assez élevée.

Par conséquent, cette technique n'a pas été exploitée car la réversibilité de mesure de la variation de la masse n'est pas assurée.

Le deuxième dispositif est uniquement conçu afin de mesurer en continu l'évolution de la masse d'un échantillon suspendu sous une balance et immergé dans l'eau.

Pareillement, ce dispositif n'a pas donné de résultats probants car la poussée d'Archimède agissant sur l'échantillon est quasiment comparable à la variation propre de sa masse.

Etant donné les difficultés de mesures continues de la masse de l'éprouvette, pour la suite du programme expérimental, des pesés discontinues au moyen d'une balance électronique ont été effectuées. Le temps nécessaire pour chaque mesure, depuis la sortie de l'échantillon du récipient d'eau ou de l'enceinte, n'excède pas une minute.

Le défaut de cette méthode est qu'elle nécessite deux échantillons, l'un destiné à la mesure des déplacements dus au gonflement et au retrait et l'autre à la variation de la masse.

L'échange chimique entre l'eau des pores et la solution qui immerge l'échantillon est effectué au moyen d'un pHmètre de type pHscan d'une précision de ± 0.01 pH. Les mesures sont réalisées pour des laps de temps définis.

4.3 Caractéristiques des roches

Les différentes roches argileuses anisotropes, qui ont été étudiées, sont les suivantes :

- les schistes en provenance des mines de charbon des Houillères du Bassin de Lorraine. Pour des raisons de cohérence au niveau de la terminologie nous appellerons ces schistes : **l'argilite de Lorraine**,
- **l'argilite de Tournemire**,
- **l'argilite de Bure**.

Les caractéristiques minéralogiques et mécaniques de l'argilite de Lorraine ont été déterminées au laboratoire du CGES par Hadj-Hassen et al. ^[50]. Celles des argilites de Tournemire et de Bure sont tirées respectivement des thèses de Ramambaso ^[98] et de Freissmuth ^[42].

Argilite de Lorraine

Les échantillons d'argilite de Lorraine ont été prélevés à une profondeur de 900 mètres dans la mine de la Houve aux Houillères du Bassin de Lorraine. La masse volumique de cette argilite est de 2.65 g/cm^3 . L'analyse minéralogique, par diffraction de rayons X, a montré que la roche est composée de 70 % de minéraux argileux dont (40/55 %) d'illite, (20/45 %) de chlorite et (5/35 %) de kaolinite, le pourcentage restant étant composé de quartz et de feldspath. La teneur en eau initiale est de 1.2 %, cette valeur correspond à des échantillons bien conservés après prélèvement. L'activité initiale de l'eau des pores est égale à 0.34 ce qui correspond à une humidité relative initiale de 34 %. La porosité est de l'ordre de 4.5 %.

D'un point de vue mécanique, la résistance à la compression simple est de l'ordre de 20 MPa et la résistance à la traction déterminée par un essai brésilien est de 3.7 MPa. Le module de Young normal aux strates est égal à 4000 MPa et celui normal aux strates est égal à 28000 MPa.

Le comportement mécanique de l'argilite de Lorraine est fortement influencée par la variation de la teneur en eau. Une diminution de 70 % de la résistance à la compression simple et de 80 % du module de Young a été observée lorsque la teneur en eau passe de 1.2 % (état initial) à 5 % (état saturé).

Pour des éprouvettes orthotropes, la figure 4.12 représente deux essais de compression simple correspondant aux teneurs en eau initiale et finale après saturation.

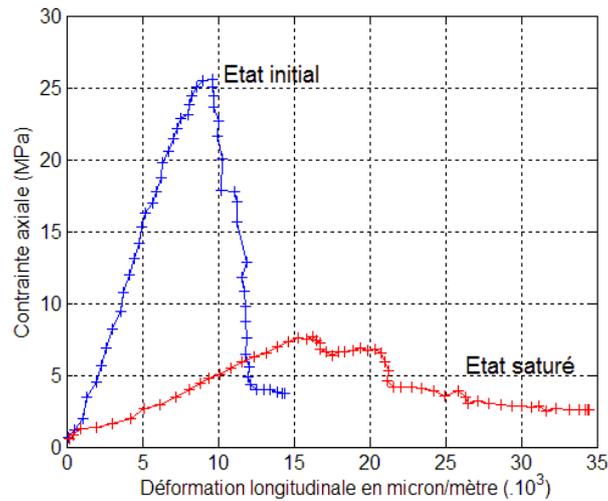


FIG. 4.12 – *Essais de compression simple pour deux différentes teneurs en eau*

La figure 4.13 illustre la diminution de la vitesse normalisée des ondes de compression V_p normales à la stratification avec l'augmentation de la teneur en eau des échantillons.

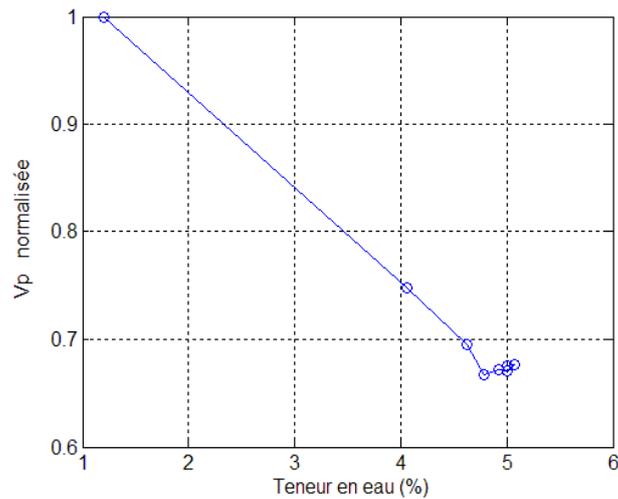


FIG. 4.13 – *Variation de la vitesse normalisée des ondes de compression V_p en fonction de la teneur en eau*

On constate que la roche se fissure avec le temps d'immersion et la vitesse normalisée diminue linéairement avec la teneur en eau.

Pour les essais à effectuer, les contraintes axiales ont été choisies de manière à ce que la roche reste dans le domaine élastique avant et après saturation. Pour respecter cette condition, la surface de charge $F(\sigma_{ij})$ doit être négative.

En adoptant le modèle de Mohr-Coulomb, dans le cas critique qui correspond à la saturation, l'inégalité suivante doit être assurée :

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 - (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin(\phi_{sat}) - 2 \cdot C_{sat} \cdot \cos(\phi_{sat}) < 0$$

A la saturation, l'angle de frottement ϕ_{sat} est égal à 7° et la cohésion C_{sat} est égale à 3.7 MPa. Dans le cas uniaxial, la contrainte axiale à appliquer doit être inférieure à la résistance à la compression simple qui est égale à 8.5 MPa.

En ce qui concerne la perméabilité, un essai de mesure de la perméabilité axiale dans des conditions triaxiales de contrainte a été effectué sur une éprouvette orthotrope de diamètre 36 mm et d'élanement 2. La contrainte axiale appliquée est égale à 4.5 MPa et la pression de confinement est de 1.5 MPa.

En adoptant la méthode en régime permanent, la pression d'injection de l'eau est constante et est choisie égale à 0.5 MPa. Cette pression est imposée sur la base inférieure de l'éprouvette.

Bien que l'essai ait duré toute une année, on n'est pas arrivé à récupérer l'eau de sortie.

Cet essai nous montre que, bien qu'il n'y ait pas de résultat quantitatif, il est possible d'en déduire que la perméabilité est très faible.

Cette faible perméabilité n'empêche pas la saturation de l'échantillon. Cela a été vérifié sur deux échantillons d'argilite de diamètre extérieur 47.5 mm, partiellement immergés dans un récipient d'eau, dont l'un est creux de diamètre intérieur 27 mm (Fig. 4.14).

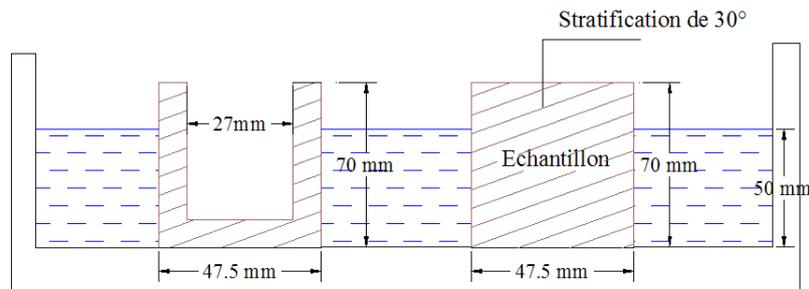


FIG. 4.14 – Immersion de deux échantillons dans l'eau

Après 72 heures d'immersion, la teneur en eau finale est presque identique pour les deux échantillons. Il est aisé d'en conclure que l'eau ne forme pas un film pelliculaire autour de la surface de contact de l'échantillon mais elle se distribue de façon homogène dans l'échantillon.

Argilite de Tournemire

L'argilite de Tournemire se situe à une profondeur de 200 mètres et est traversée par un tunnel ferroviaire de 1850 mètres de long.

La densité de l'argilite de Tournemire est de 2.6. Cette argilite contient 40 à 50 % de minéraux argileux dont 10 % des interstratifiés illite/smectite. Cette argilite est constituée de 10 à 30 % de carbonates (calcite), dolomite et siderite sont présents dans des faibles proportions. Le quartz occupe de 10 à 20 %, muscovite, biotite, albite et feldspars sont des minéraux secondaires.

La capacité d'échange cationique totale de la roche est de 10 meq/100 g. Pour la fraction argileuse, elle est égale à 20 meq/100 g.

La teneur en eau est de 3 à 4 %, l'activité initiale de l'eau des pores est d'environ 0.85, la porosité est d'environ 8 à 9 %, le diamètre des pores est de l'ordre de 28 \AA estimé par l'analyse des isothermes d'adsorption BET (méthode de Brunauer, Emmett et Teller).

La perméabilité mesurée en laboratoire est faible, elle est d'environ 10^{-15} m/s . In situ, elle est légèrement plus élevée et est d'environ 10^{-13} m/s .

Mécaniquement, pour une éprouvette présentant un comportement isotrope transverse, le module

de Young E_1 est égal à 27680 MPa et E_2 est égal 9720 MPa, le coefficient de Poisson ν_{12} est de 0.17 et ν_{23} est de 0.2. Le module de cisaillement G_{12} est égal à 3940 MPa. La résistance à la traction, déterminée par un essai brésilien est de 3.6 MPa.

Argilite de Bure

Les carottes d'argilite de Bure disponibles au CGES ont été prélevées du puits 205 à des profondeurs de 445 et 482 mètres et sont respectivement numérotées 05514 et 05664.

Le comportement de ces deux carottes face à l'eau est totalement différent. Un échantillon issu de la carotte (05514) fortement carbonatée ne se disperse pas dans l'eau alors qu'un autre issu de la carotte 05664 se scinde complètement dans l'eau au bout de quelques minutes d'immersion (Fig. 4.15).

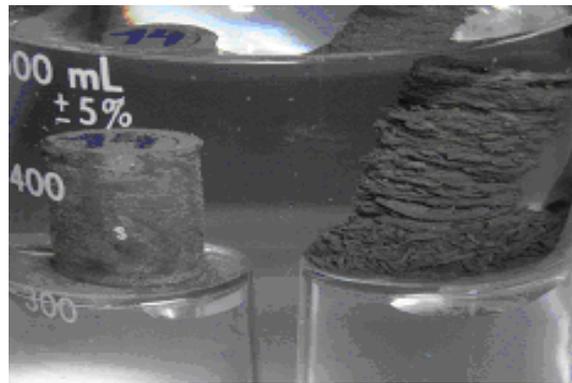


FIG. 4.15 – Dislocation totale d'un échantillon issu de la carotte de numéro 05664 après immersion dans l'eau ^[42]

Le tableau suivant illustre, pour ces deux carottes, les informations disponibles :

Carotte	05114	05664
Illite (%)	7	9
Illite/Smectite (%)	13	31
Quartz (%)	30	25
Calcite (%)	51	22
Dolomite (%)	3	4
Teneur en eau (%)	3.1	8.2
Densité sèche	2.5	2.4
Vitesse des ondes P normales aux strates (m/s)	3800	2300

TAB. 4.1 – Caractéristiques des carottes n° 05514 et n° 05664

4.3.1 Capacité au gonflement des roches

Pour illustrer l'effet de l'eau sur ces trois types d'argilite (Lorraine, Tournemire et Bure 05514), des essais de gonflement libre, avec mesure du déplacement normal aux strates, ont été effectués (Fig. 4.16).

L'argilite de Lorraine gonfle plus car elle est initialement non saturé avec une activité de l'eau des pores égale à 0.34 et contient également 50 % d'illite.

L'argilite de Tournemire et celle de Bure présentent le même degré de saturation initial et quasiment le même pourcentage d'illite/smectite.

Cependant, le gonflement d'un échantillon de la carotte 05514 est le moins significatif et cela est dû à la présence d'un pourcentage élevé de calcite de 51 % qui contribue au freinage du gonflement contre 20 % pour l'argilite de Tournemire. Par conséquent, cette carotte n'a pas été prise en compte par la suite dans le programme expérimental.

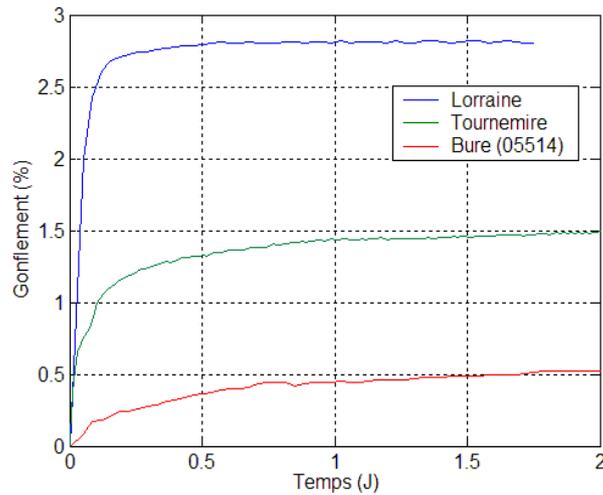


FIG. 4.16 – *Évolution du gonflement en fonction du temps pour les trois argilites*

Par la suite, les expérimentations à mener s'articulent autour des thèmes suivants :

1. comportement tridimensionnel des argilites de Lorraine et de Tournemire face à l'eau,
2. comportement chimico-mécanique de l'argilite de Tournemire.

Concernant l'argilite de Lorraine, on n'a pas pu étendre l'étude à l'effet du chimisme de la solution d'hydratation sur le gonflement. Cela est dû à la fermeture de la mine qui a posé un handicap de prélever des échantillons.

L'influence de l'humidité sur le comportement de l'argilite de Bure (05664) est présentée dans l'annexe C.

Chapitre 5

Étude mécanique

5.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier le gonflement tridimensionnel anisotrope d'une roche argileuse soumise à des contraintes axiale et radiale.

Etant donné que l'argilite de Lorraine présente une anisotropie structurale, il s'agit de définir les coefficients d'anisotropie du gonflement et de la pression de gonflement au moyen des essais de gonflement libre et de gonflement empêché. Ces essais nous permettent de comprendre la réponse de la roche pour les deux conditions extrêmes de gonflement.

Si l'anisotropie du gonflement est omniprésente dans les recherches, l'anisotropie de la pression de gonflement pose un problème ambigu pour les approches basées sur les milieux non saturés.

Les essais de gonflement libre et de gonflement empêché ne nous permettent pas d'identifier complètement le comportement de la roche. Il est alors nécessaire de comparer la réponse axiale de la roche que ce soit en termes de pression ou de déplacement pour deux conditions de gonflement radial : œdométrique et libre. Dans ce contexte, Windal ^[130] a montré, au moyen de la cellule flexible, que le fait d'empêcher le gonflement radial a pour effet d'augmenter le gonflement axial. Cependant, Grob ^[49] a constaté que, lorsque le gonflement radial est libre, le gonflement axial est deux fois supérieur à celui obtenu en cas de gonflement radial empêché. Devant ces controverses, l'opportunité de réaliser de tels essais est justifiée.

Une fois l'influence du confinement latéral sur le gonflement axial définie, il s'agit d'appréhender l'effet de la contrainte axiale sur le gonflement radial. Pour cela, la réalisation des essais uniaxiaux, avec mesures simultanées du gonflement radial et du gonflement axial, est satisfaisante. Ces essais, effectués pour différents chemins de déchargement de la contrainte axiale, permettent de ne pas étudier uniquement l'influence de la contrainte initialement appliquée mais de mettre également en évidence l'influence de l'historique de déchargement de la contrainte axiale.

Dans le même esprit, la cellule triaxiale permet de déterminer l'influence de la pression de confinement latéral sur le gonflement axial ainsi que l'influence de la contrainte déviatorique sur le gonflement axial.

A ce niveau, les essais cernent toutes les possibilités de gonflement et nous permettent de choisir le comportement le plus convenable parmi ceux contradictoires existants dans la bibliographie :

1. indépendance du gonflement dans une direction i avec les contraintes suivant les autres directions ^[44, 69, 141],
2. augmentation du gonflement dans une direction i avec les contraintes suivant les autres directions ^[130, 137],

3. diminution du gonflement dans une direction i avec les contraintes suivant les autres directions [53, 76, 136].

Après avoir déterminé tous les paramètres influençant le gonflement, on s'intéressera à l'étude de la pression de gonflement sur laquelle existent des opinions divergentes sur la définition de sa valeur. Les méthodes à comparer, les plus fréquemment rencontrées dans la bibliographie, sont les suivantes :

- la méthode de gonflement empêché,
- la méthode de prégonflement qui consiste à laisser l'échantillon gonfler puis à le charger par paliers de contraintes croissantes de telle manière à rattraper le gonflement généré,
- la méthode d'Huder et Amberg qui consiste à appliquer initialement sur un échantillon une contrainte initiale élevée, à le décharger par paliers de contraintes décroissantes en attendant la stabilisation du gonflement pour chaque palier. La pression de gonflement correspond à l'intersection de la droite d'Huder et Amberg avec l'axe des contraintes (Éq. 3.32, page 42).

Ces différentes méthodes nous permettent de choisir un ordre de grandeur de la pression de gonflement le plus réaliste qui ne contredit pas les résultats des essais effectués sous chargement.

5.2 Procédure expérimentale

Le procédure expérimentale suivie a pour but d'étudier :

- le gonflement libre,
- l'anisotropie du gonflement et de la pression de gonflement,
- l'influence du confinement latéral sur le gonflement et la pression de gonflement,
- l'influence de la contrainte axiale sur le gonflement latéral,
- l'influence de la contrainte déviatorique sur le gonflement axial,
- l'influence de l'historique du déchargement sur le gonflement axial,
- l'effet de la contrainte sur l'anisotropie du gonflement,
- la pression de gonflement.

Les essais effectués sont récapitulés dans le tableau 5.1 où l'indice * représente l'essai effectué sur l'argilite de Tournemire tandis que les autres ont été réalisés sur l'argilite de Lorraine.

P.a. est la pression de gonflement axial, et G.a. et G.r sont respectivement le gonflement axial et le gonflement radial. L'orientation α correspond à l'angle entre le plan de stratification et le plan horizontal.

Pour tous les essais, la solution d'hydratation utilisée est l'eau du robinet.

Pour la convention de signes, il est important de noter que lorsque la déformation augmente, il s'agit d'un gonflement. Les contraintes de compression ainsi que la pression de gonflement sont positives.

La fourchette des contraintes axiales est fixée de telle manière à rester dans le domaine élastique et à être également inférieure à la pression de gonflement (cf. paragraphe 5.3.8).

N :	Type d'essai	H et D (mm)	α ($^{\circ}$)	Mesure	Contrainte axiale (MPa)	Pression de confinement (MPa)
1	Libre	20,5, 50	0	G.a. et G.r.	0	0
2		33, 50	0	G.a. et G.r.		
3		55, 50	0	G.a. et G.r.		
4*		20, 65	0	G.a.		
5*		20, 24	0	G.a.		
6		20, 50	30	G.a.		
7		20, 50	45	G.a.		
8	Gonflement empêché	20, 63.1	0	P.a.	0	inconnue
9		20, 61	0	P.a.		
10		20, 63.1	90	P.a.		
11	Gonflement œdométrique	25, 36	0	G.a.	0.1	inconnue
12				G.a.	0.6	
13				G.a.	1.2	
14	Triaxial	25, 50	0	G.a.	1	1
15				G.a.	4.5 - 3.5 - 2.5	
16				G.a.	3.5 - 2.5 - 1.5	
17				G.a.	1.3 - 2.5 - 3.3 - 5.9	
18	Uniaxial	35, 50	0	G.a. et G.r.	0.7 - 0.4 - 0.2 - 0.1	0
19			0	G.a. et G.r.	1.02 - 0.7 - 0.5	
20			90	G.a.	0.7 - 0.4 - 0.2 - 0.1	
21*			0	G.a. et G.r.	0.72 - 0.32 - 0.12	
22*	Uniaxial	130, 65	90	G.a. et G.r.	1	0
23*			90	G.a. et G.r.	5	

TAB. 5.1 – Récapitulatif des essais réalisés

5.3 Résultats obtenus

5.3.1 Gonflement libre

Cette étude débute par une analyse du gonflement libre tridimensionnel où l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte axiale et radiale. Dans cette partie, on caractérise l'effet de la taille de l'échantillon sur le gonflement et le lien entre le gonflement volumique et la masse d'eau retenue par l'échantillon, étant donné que le gonflement ne peut pas s'opérer sans l'existence d'un fluide hydratant.

Effet de la taille de l'échantillon

Cette analyse nous permet de déterminer si la taille de l'échantillon influe sur les valeurs mesurées. Comme en mécanique, on se réfère au Volume Élémentaire Représentative (VER) à partir duquel la valeur à mesurer (déplacement ou contrainte) est invariante. Dans ce cas, la valeur qui nous intéresse est le déplacement mesuré par des essais de gonflement libre.

Au chapitre 2 (page 26), on a mentionné l'effet de la hauteur de l'éprouvette sur le gonflement d'une argile plastique. A ce stade, il est important de démontrer les effets de la hauteur et du diamètre de l'éprouvette sur le gonflement d'un matériaux argileux induré.

L'influence de la hauteur de l'éprouvette sur le gonflement axial et le gonflement radial a été étudiée sur des éprouvettes d'argilite de Lorraine de stratification horizontale. Les essais ont été réalisés pour des hauteurs de 20.5, 33 et 55 mm et sont présentés sur les figures 5.1 et 5.2.

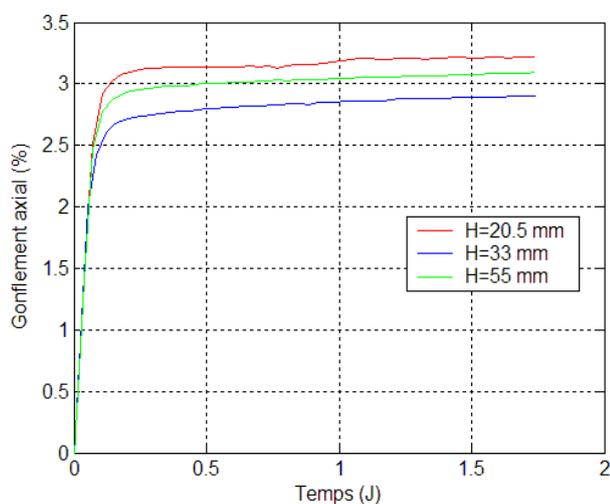


FIG. 5.1 – *Gonflement axial de l'argilite de Lorraine pour trois hauteurs différentes*

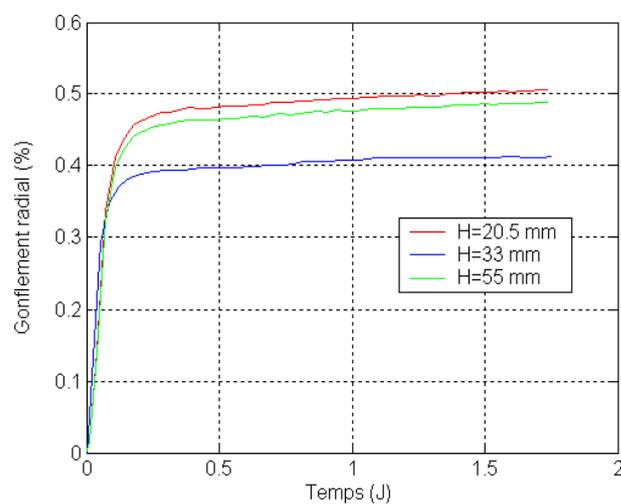


FIG. 5.2 – *Gonflement radial de l'argilite de Lorraine pour trois hauteurs différentes*

On constate que l'éprouvette augmente de volume à la fois axialement et radialement et présente une anisotropie du gonflement. Ce dernier est plus marqué pour une direction normale aux strates. Suivant les deux directions axiale et radiale, et quelle que soit la hauteur de l'éprouvette, trois phases de gonflement sont à distinguer.

La première phase présente la vitesse de gonflement la plus rapide. La deuxième phase est nettement plus lente jusqu'à atteindre la stabilisation du gonflement dans la troisième phase.

Pour une hauteur de 20.5 mm, le gonflement axial et le gonflement radial sont les plus élevés alors

que, pour une hauteur de 33 mm, ils sont les plus faibles. On peut donc déduire que la hauteur n'a pas d'influence sur le gonflement étant donné que, pour une hauteur de 55 mm, le gonflement est intermédiaire. Cette différence de mesure peut être imputée à l'hétérogénéité des éprouvettes.

De même, le diamètre de l'échantillon n'a pas de conséquence sur le gonflement libre axial et cela a été vérifié pour quatre essais, dont deux de répétabilité, sur l'argilite de Tournemire présentant une stratification horizontale (Fig. 5.3).

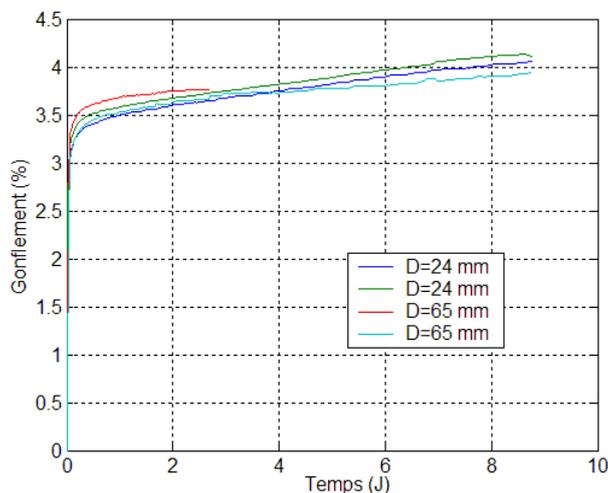


FIG. 5.3 – *Gonflement axial de l'argilite de Tournemire pour deux diamètres différents*

On remarque que ces quatre essais sont dépourvus de phase de stabilisation et que le gonflement et la cinétique du gonflement sont presque identiques pour des diamètres de 24 et 65 mm.

Bien que le chemin préférentiel de diffusion de l'eau soit radial, dû au fait que la perméabilité axiale est inférieure à la perméabilité radiale, l'eau attaque le cœur de l'échantillon sans qu'aucun écart de gonflement pour deux diamètres différents ne soit constaté.

Ces résultats prouvent, à l'échelle mésoscopique, que le lien entre la diffusion et le gonflement n'est pas confirmé.

Gonflement volumique et échange massique

Après avoir étudié le gonflement libre, il s'agit à présent d'analyser l'effet de la masse retenue par la roche sur le gonflement volumique durant l'hydratation.

La plupart des recherches menées dans ce domaine s'appuient sur la courbe de retrait qui relie, au temps de stabilisation, l'indice des vides (V_v/V_s) à l'indice d'eau (V_w/V_s) en cours de drainage.

Lorsque l'échantillon est initialement saturé, les variations volumiques sont égales à la variation du volume d'eau extrait de l'échantillon jusqu'à la limite du point d'entrée d'air.

A partir de cette limite, le volume de l'échantillon ne varie plus mais la désaturation se poursuit.

Dans le cas d'une humidification par phase vapeur, les essais effectués par Loiseau ^[77] sur l'argile de Kunigel montrent que le rapport entre la variation de volume de l'échantillon Δv et la variation de volume d'eau adsorbée Δv_w est indépendant de l'humidité relative et est aussi supérieur à 1 (1.375).

Pour l'argilite de Lorraine, l'échange de masse a été étudiée sur des échantillons libres de gonfler axialement et radialement par imposition de deux types d'hydratation : hydratation par phase liquide et hydratation par phase vapeur.

Le gonflement volumique est déterminé par un essai de gonflement libre et par la relation suivante :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta v}{v_0} = \varepsilon_a + 2 \cdot \varepsilon_r$$

v_0 est le volume initial de l'échantillon.

Chaque type d'hydratation nécessite deux échantillons, l'un pour la mesure du gonflement et l'autre pour déterminer l'évolution de la masse de l'échantillon.

Hydratation par phase liquide : la figure 5.4 présente l'évolution du gonflement volumique et de la variation unitaire du volume d'eau $\frac{\Delta v_w}{v_0}$ en fonction du temps. L'évolution du rapport $\frac{\Delta v}{\Delta v_w}$ est illustrée sur la figure 5.5.

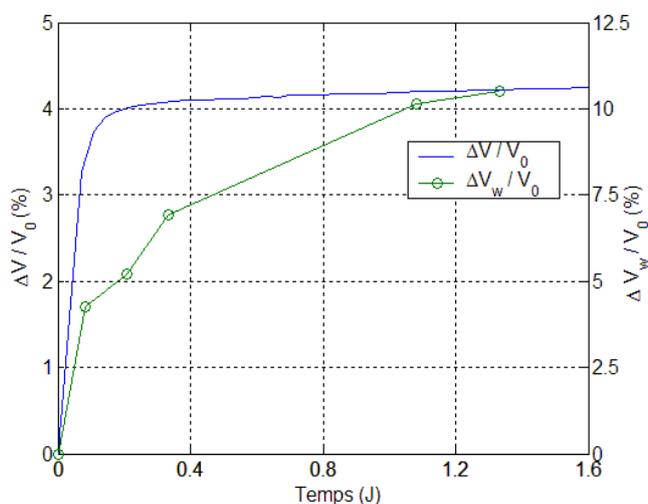


FIG. 5.4 – Variation de $\frac{\Delta v}{v_0}$ et de $\frac{\Delta v_w}{v_0}$ de l'argilite de Lorraine en fonction du temps dans le cas de l'hydratation par phase liquide

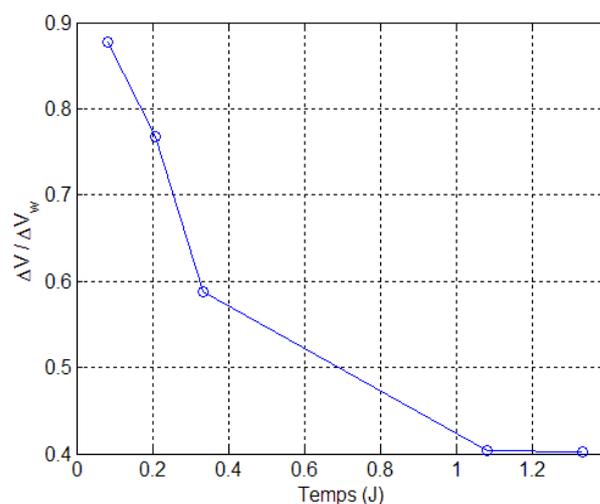


FIG. 5.5 – Variation de $\frac{\Delta v}{\Delta v_w}$ de l'argilite de Lorraine en fonction du temps dans le cas de l'hydratation par phase liquide

On peut constater que le gonflement volumique ne dépend pas directement de la quantité d'eau retenue par l'échantillon. Ce gonflement est inférieur à la masse d'eau retenue par l'échantillon. En effet, la moitié de cette quantité est responsable du gonflement maximal.

Au temps égal à 0.4 jours, on atteint la phase ultime qui conduit au remplissage des pores sans augmentation notable du volume.

Les résultats montrent également que la cinétique du gonflement est plus rapide que l'échange en masse et que le rapport $\frac{\Delta v}{\Delta v_w}$ est inférieur à 1 et diminue avec le temps d'hydratation.

La figure 5.6 présente le mécanisme d'hydratation permettant d'expliquer le gonflement.

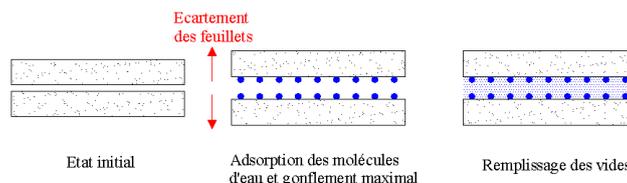


FIG. 5.6 – Gonflement et hydratation du matériau argileux

Hydratation par phase vapeur : un essai d'humidification a été effectué pour différents paliers d'humidité relative (50, 70, 90 et 99 %) et est présenté sur les figures 5.7 et 5.8.

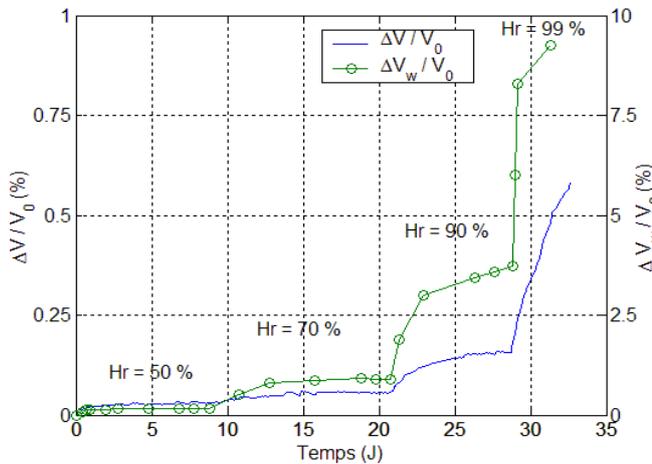


FIG. 5.7 – Variation de $\frac{\Delta v}{v_0}$ et de $\frac{\Delta v_w}{v_0}$ de l'argilite de Lorraine en fonction du temps dans le cas de l'hydratation par phase vapeur

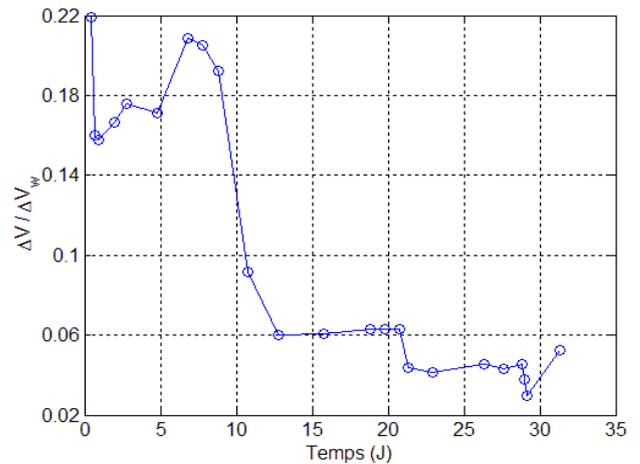


FIG. 5.8 – Variation de $\frac{\Delta v}{\Delta v_w}$ de l'argilite de Lorraine en fonction du temps dans le cas de l'hydratation par phase vapeur

Bien que le gonflement et la masse de l'échantillon augmentent avec l'humidité relative, le rapport $\frac{\Delta v}{\Delta v_w}$ diminue avec le temps d'hydratation.

Ces deux essais, effectués pour différents types d'hydratation, confirment que le gonflement volumique de l'argilite de Lorraine n'est pas relié à la quantité d'eau retenue par l'échantillon. Cela est dû à la non saturation initiale de l'argilite de Lorraine présentant une activité initiale de 0.34.

5.3.2 Anisotropies du gonflement libre et de la pression de gonflement

L'influence de l'anisotropie du gonflement a été étudiée, à partir des mesures du déplacement axial, sur quatre éprouvettes orientées à 0, 30, 45 et 90° (Fig. 5.9).

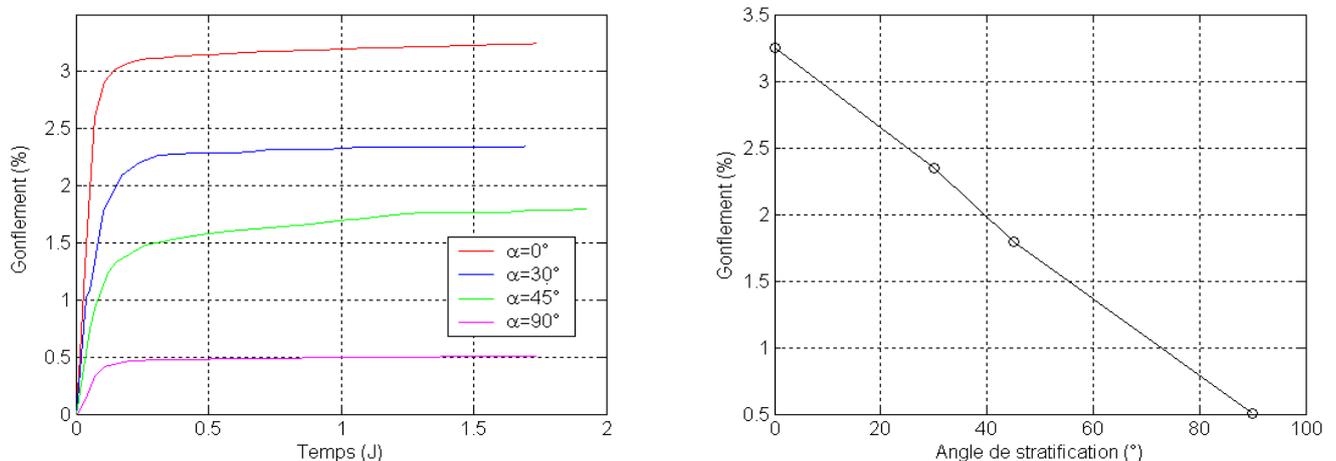


FIG. 5.9 – a) Gonflement axial pour différentes orientations. b) Gonflement final pour différentes orientations (argilite de lorraine)

L'accroissement de l'orientation a pour effet de réduire le gonflement axial. A la stabilisation, le gonflement parallèle aux strates est le plus faible et le gonflement normal à celles-ci est le plus élevé. Le coefficient d'anisotropie est égale à 6.5.

Pour une orientation de 45^0 , le gonflement est proche de la moyenne des gonflements principaux.

L'anisotropie du gonflement peut être expliquée de deux façons contradictoires :

1. puisque la roche présente des propriétés mécaniques anisotropes, une pression de gonflement isotrope se manifeste par un gonflement anisotrope.
Cette pression isotrope correspond, selon la loi de Kelvin, à la valeur absolue de la succion initiale de l'argilite. Elle est égale à 145 MPa et est déterminée en utilisant l'humidité relative initiale de l'argilite qui est égale à 34.6 % (Fig. 2.8, page 18).
2. l'organisation des feuillets argileux est responsable de la formation de la double couche diffuse plus épaisse suivant la direction normale aux strates.

Afin de caractériser l'isotropie de la pression de gonflement, des essais de mesure de la pression de gonflement axiale ont été réalisés sur deux échantillons à différentes orientations (0^0 et 90^0). Ces essais ont été effectués dans le cas où le gonflement radial et le gonflement axial sont bloqués ($\varepsilon_a = 0$, $\varepsilon_r = 0$). Ils sont présentés sur la figure 5.10.

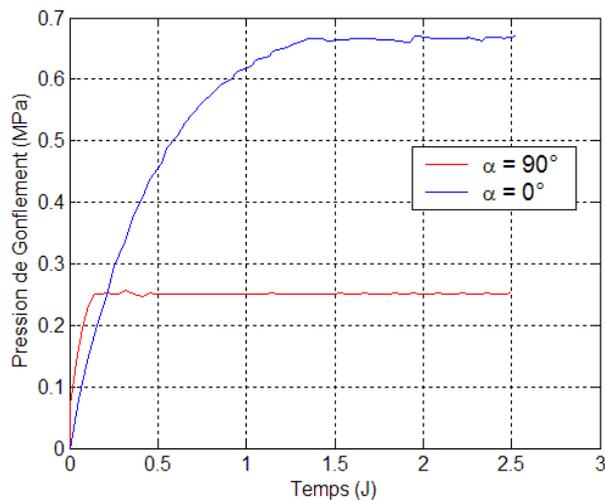


FIG. 5.10 – Pression de gonflement axiale de l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^0$ et pour $\alpha = 90^0$

Au temps de stabilisation, pour un échantillon de stratification horizontale, la pression de gonflement est de 0.66 MPa. Cette valeur est approximativement semblable à celle de l'argilite de Tournemire qui est de 0.6 MPa [28].

Pour une stratification verticale, la pression de gonflement obtenue est de 0.25 MPa.

On constate que la pression de gonflement, mesurée par la méthode de gonflement empêché, n'est pas isotrope. Le coefficient d'anisotropie de la pression de gonflement est de l'ordre de 2.64 et, en même temps, est inférieur au coefficient d'anisotropie du gonflement libre.

5.3.3 Influence du confinement latéral

Pour étudier l'influence du confinement latéral sur le gonflement et la pression de gonflement, deux séries d'essais ont été effectués :

1. La première série consiste à effectuer deux essais de gonflement empêché pour deux diamètres différents,
2. La deuxième série consiste à comparer le gonflement libre au gonflement œdométrique.

Pour étudier l'influence du blocage du gonflement radial sur la pression de gonflement axiale, un échantillon de diamètre 61 mm inférieur au diamètre de la bague œdométrique de 63.1 mm a été utilisé. Le gonflement radial toléré est largement plus élevé que le gonflement radial libre et cela a été justifié après le démontage de la cellule où la circonférence de l'échantillon n'a pas été mise en contact avec l'anneau œdométrique.

Les deux courbes présentées sur la figure 5.11 représentent deux essais : l'un correspond au blocage total du gonflement axial et du gonflement radial et l'autre correspond uniquement au blocage du gonflement axial.

On peut constater que les pressions de gonflement dans le cas où on libère ou pas le gonflement radial sont presque comparables.

L'influence du blocage du gonflement radial sur le gonflement axial a été étudiée sur deux éprouvettes, l'une empêchée de gonfler latéralement et l'autre libre de gonfler latéralement.

Sur la figure 5.12, on remarque que, quel que soit le confinement latéral, le gonflement axial normal aux strates est presque identique pour les deux essais.

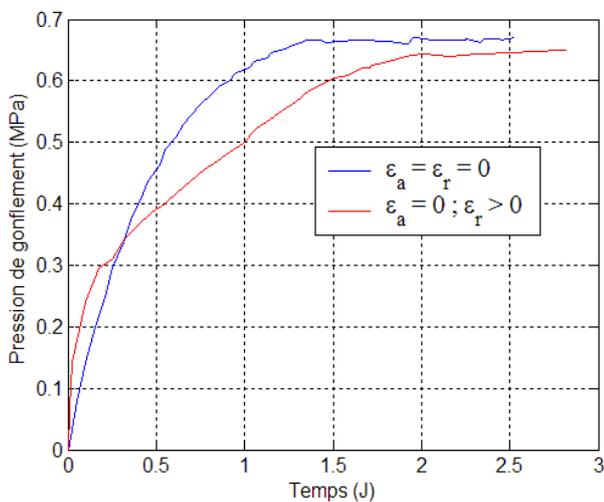


FIG. 5.11 – Pression de gonflement axiale de l'argilite de lorraine pour deux conditions de confinement radial

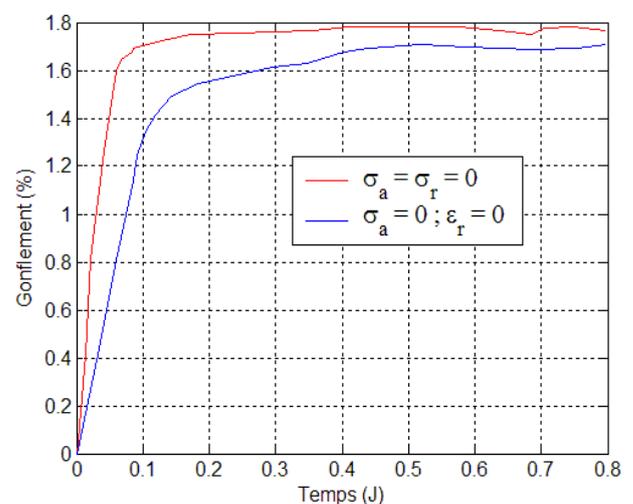


FIG. 5.12 – Gonflement libre axial de l'argilite de lorraine pour deux conditions de confinement radial

Ces deux séries d'essais montrent que le gonflement axial ainsi que la pression de gonflement axiale ne dépendent pas du gonflement radial. Il s'agit à présent de s'intéresser à l'étude de l'influence de la contrainte axiale sur le gonflement radial.

5.3.4 Influence de la contrainte axiale sur le gonflement radial

Pour étudier l'influence de la contrainte axiale sur le gonflement latéral, deux types d'essais ont été effectués :

1. le premier sert à mesurer le gonflement radial au moyen d'un ruban (Fig. 5.13). Cette technique est applicable uniquement dans le cas où la stratification de l'échantillon est horizontale et ce à cause de l'uniformité du gonflement suivant toutes les directions horizontales.
2. le deuxième sert à mesurer le gonflement latéral d'un échantillon de stratification verticale au moyen de deux capteurs ponctuels situés dans le plan horizontal (Fig. 5.14).

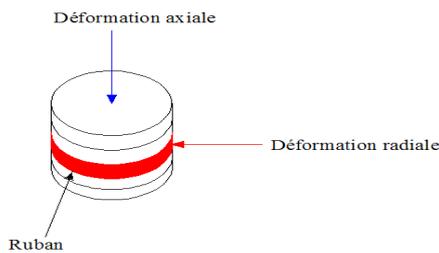


FIG. 5.13 – Présentation du gonflement axial et du gonflement radial

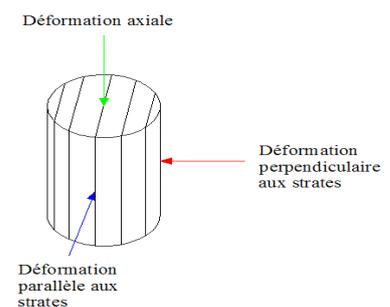


FIG. 5.14 – Présentation des déformations suivant les trois directions

Dans le cas où l'échantillon présente une stratification horizontale, deux essais ont été effectués pour différents chemins de déchargement de la contrainte axiale :

1. 1, 0.7 et 0.5 MPa (Fig. 5.15)
2. 0.7, 0.4, 0.2 et 0.1 MPa (Fig. 5.16)

Sur les figures suivantes, les déformations élastiques instantanées dues au déchargement ne sont pas représentés. On ne s'intéresse qu'au gonflement.

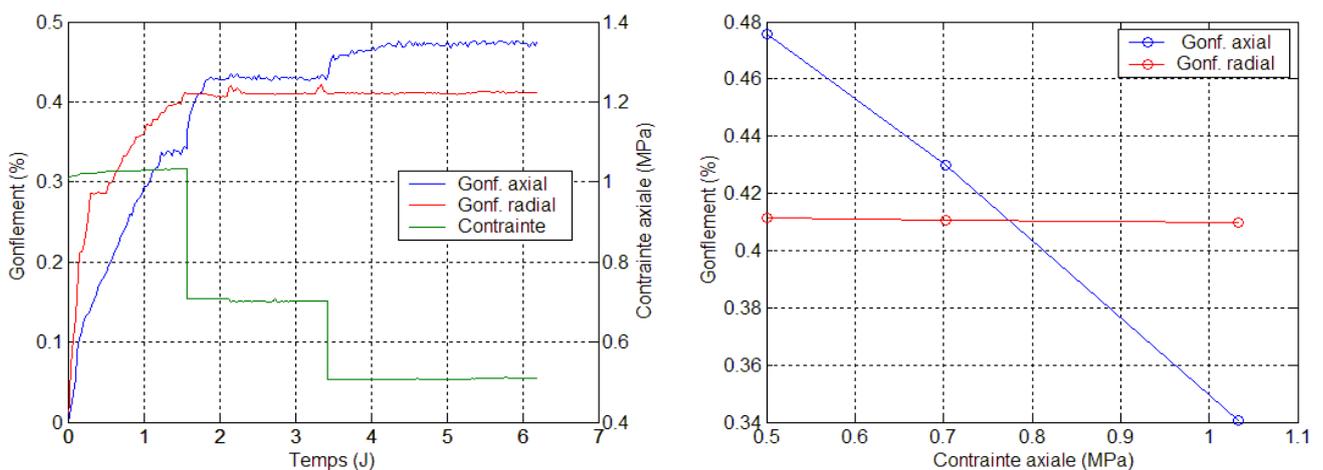


FIG. 5.15 – a) Gonflement axial et gonflement radial pour un chemin de déchargement de 1, 0.7 et 0.5 MPa et pour un confinement nul. b) Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)

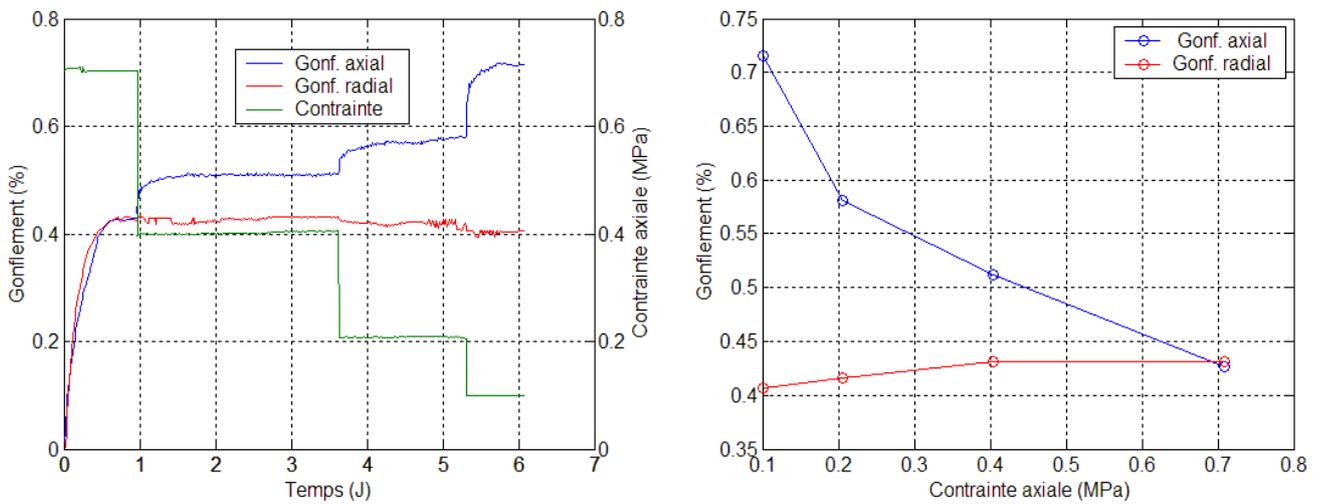


FIG. 5.16 – a) Gonflement axial et gonflement radial pour un chemin de déchargement de 0.7, 0.4, 0.2 et 0.1 MPa et pour un confinement nul. b) Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)

Pour ces deux essais, bien que le gonflement axial augmente avec la diminution de la contrainte axiale, le déchargement de la contrainte axiale n'induit pas de nouveau gonflement radial. Aucune différence notable de gonflement radial n'a été observée malgré les différents chemins de contraintes parcourus par les échantillons d'argilite de Lorraine. On peut en déduire que le gonflement latéral n'est influencé ni par la contrainte axiale initialement appliquée ni par le chemin de déchargement. Cette étude a été complétée par un essai effectué sur un échantillon d'argilite de Tournemire, où l'on en déduit également que la contrainte axiale n'influe pas sur le gonflement radial. Le gonflement radial garde une valeur constante de 0.35 %.

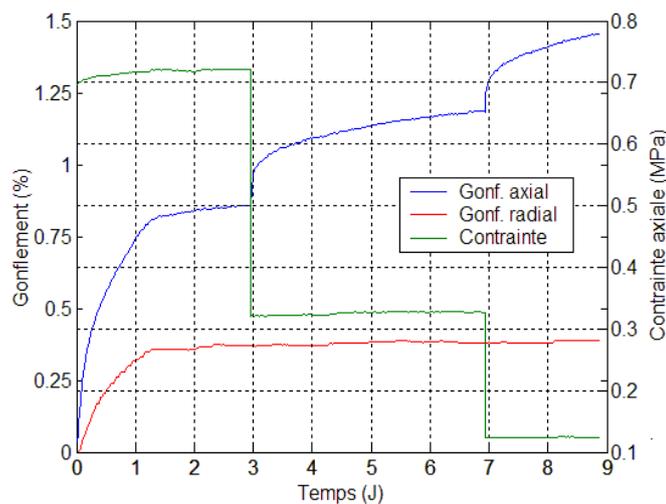


FIG. 5.17 – Gonflement axial et gonflement radial pour un chemin de déchargement de 0.72, 0.32 et 0.12 MPa et pour un confinement nul (argilite de tournemire)

Dans le cas où l'échantillon présente une stratification verticale, les essais ont été effectués sur l'argilite de Tournemire, étant donné que les roches d'argilite de Lorraine en notre possession n'étaient pas de taille suffisante pour être acceptées par le dispositif qui requiert des roches de hauteur de 130 mm et de diamètre de 65 mm.

Ces essais monopaliers sont réalisés pour deux contraintes axiales de 1 MPa et 5 MPa (Fig. 5.18 et Fig. 5.19).

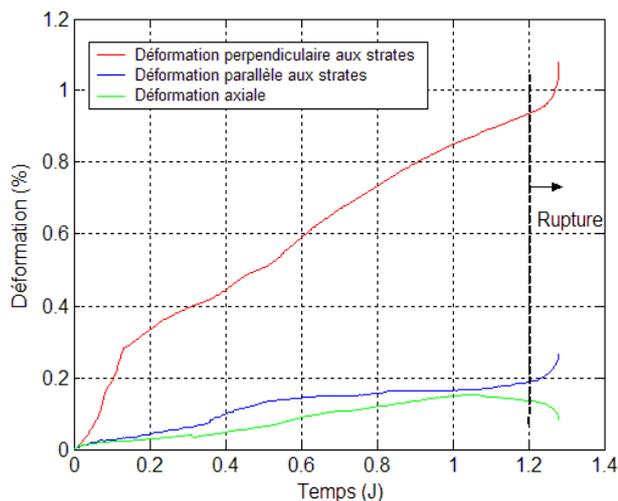


FIG. 5.18 – Déformations suivant les trois directions de l'argilite de Tournemire pour une contrainte axiale de 1 MPa

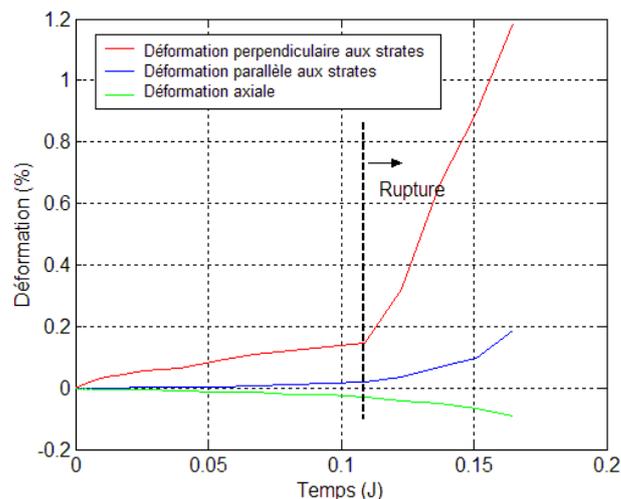


FIG. 5.19 – Déformations suivant les trois directions de l'argilite de Tournemire pour une contrainte axiale de 5 MPa

Pour une contrainte axiale de 1 MPa, deux comportements sont observés : le gonflement et la rupture.

Avant la rupture qui correspond à $t = 1.25$ jours, on observe un gonflement suivant les trois directions. Le gonflement radial perpendiculaire à la stratification est le plus élevé du fait de l'orientation des feuillets argileux. L'application de la contrainte axiale a réduit le gonflement axial qui est le plus faible par rapport aux deux autres.

Pour une contrainte de 5 MPa, on constate un fluage suivant la direction axiale et un gonflement suivant les deux autres directions.

Dans ce cas, la rupture est survenue au temps $t = 0.11$ jours. Le temps de rupture dépend alors de la contrainte axiale appliquée. Lorsque la contrainte axiale augmente, le matériau a tendance à se tasser jusqu'à la rupture du fait de la réduction des caractéristiques mécaniques dépendant des liens cimentés.

La figure 5.20 présente les déformations transversales des deux essais jusqu'au temps de rupture de l'éprouvette soumise à une contrainte axiale de 5 MPa.

A partir de cette figure, on constate que le gonflement suivant les deux directions transversales pour une contrainte axiale de 1 MPa est légèrement supérieur au gonflement pour une contrainte de 5 MPa. On en déduit que le gonflement suivant les deux directions horizontales est quasi indépendant de la contrainte axiale, ce qui permet de justifier et de compléter les résultats des essais uniaxiaux effectués sur des échantillons de stratification horizontale. De surcroît, les coefficients d'anisotropie du gonflement dans le plan horizontal sont presque identiques pour les deux essais et sont de l'ordre de 7.3.

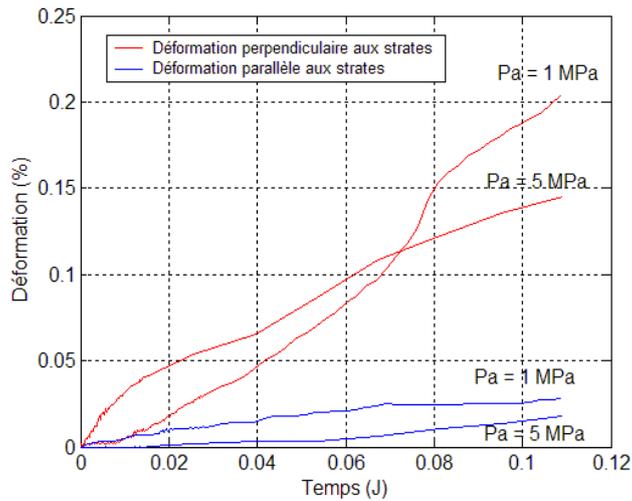


FIG. 5.20 – Comparaison du gonflement transversal avant la rupture

Les figures 5.21 et 5.22 présentent la rupture des deux échantillons soumis à des contraintes de 1 MPa et 5 MPa. Les plans de rupture sont verticaux à cause de la stratification verticale des échantillons. La rupture de l'échantillon est totale pour une contrainte de 5 MPa et partielle pour une contrainte de 1 MPa.



FIG. 5.21 – Rupture de l'éprouvette pour une contrainte axiale de 1 MPa



FIG. 5.22 – Rupture de l'éprouvette pour une contrainte axiale de 5 MPa

La rupture des échantillons fait apparaître la limite du concept de contrainte effective. Lors de la saturation, la succion décroît vers zéro. Ainsi, la contrainte effective diminue et, par conséquent, le gonflement devrait augmenter. Il n'en est rien, puisqu'on a observé un effondrement.

5.3.5 Influence de la contrainte déviatorique

Pour les essais de gonflement libre, effectués sur l'argilite de Lorraine avec un déviateur de contraintes ($Q = \sigma_1 - \sigma_3$) égal à zéro, le gonflement axial normal aux strates est de 3 %. Dans des conditions de confinement isotrope de 1 MPa ($\sigma_1 = \sigma_3 = 1 \text{ MPa}$) qui correspond à un déviateur égal à zéro, le gonflement est de 0.3 %. Alors, pour le même déviateur de contraintes, le gonflement axial n'est pas le même. Par ailleurs, pour un déviateur égal à 1 MPa ($\sigma_1 = 1 \text{ MPa}$ et $\sigma_3 = 0 \text{ MPa}$), le gonflement axial est égal à 0.34 % et est en même temps proche de celui déterminé dans des conditions de confinement isotrope (1 MPa). Ces constatations prouvent que le déviateur de contrainte n'a pas d'effet sur le gonflement axial et que la pression de confinement n'influe pas sur le gonflement axial.

5.3.6 Influence de l'historique du déchargement

L'influence de l'historique du déchargement a été étudiée, d'une part, aux moyens des essais effectués sur la cellule triaxiale en comparant pour des paliers de contraintes identiques les potentiels de gonflement de deux échantillons subissant différents chemins de déchargement de la contrainte axiale pour un confinement de 1 MPa, et d'autre part, par comparaison des résultats des essais oedométriques et uniaxiaux pour des paliers de contraintes identiques.

Etude sur la cellule triaxiale

Après avoir appliqué une contrainte axiale initiale, on procède à l'imbibition de l'échantillon. Une fois la stabilisation de gonflement atteinte, on procède aux déchargements par pas de 1 MPa.

Pour le premier essai, les contraintes axiales appliquées sont : 3.5, 2.5 et 1.5 MPa.

La figure 5.23 illustre d'un côté l'évolution du gonflement axial en fonction du temps (déformations élastiques exclues) et de l'autre côté le gonflement final après stabilisation.

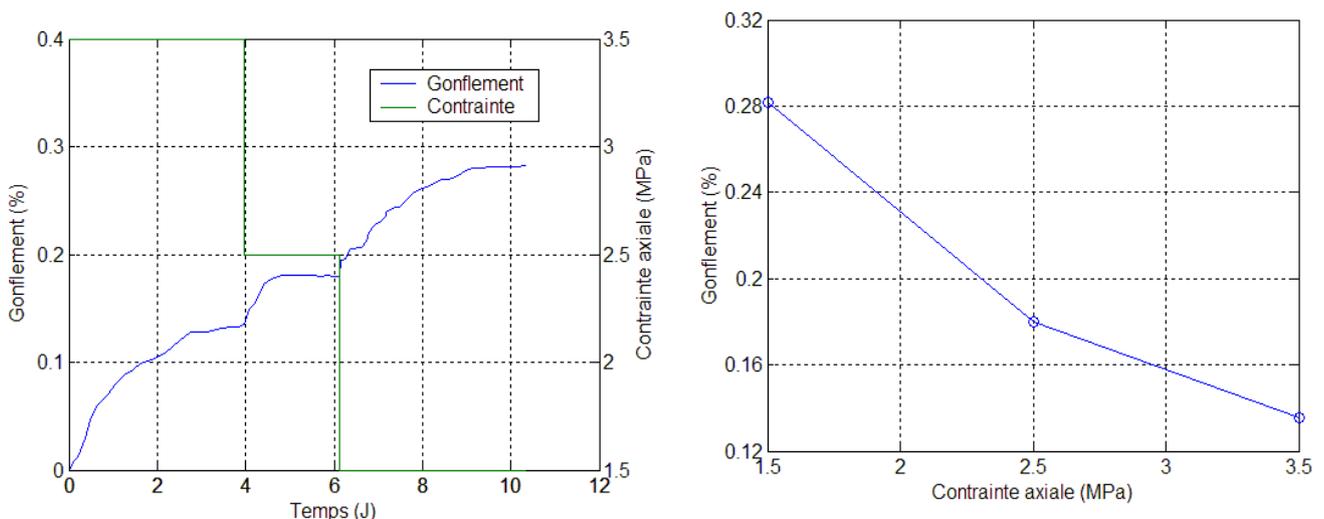


FIG. 5.23 – a) Gonflement axial pour un chemin de déchargement de 3.5, 2.5 et 1.5 MPa et pour un confinement de 1 MPa. b) Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)

On constate une augmentation du gonflement avec la diminution de la contrainte axiale appliquée. Cette augmentation est d'autant plus faible que les contraintes sont élevées.

Pour une contrainte axiale de 1.5 MPa, le gonflement est de 0.28 %. Dans les conditions de confinement œdométriques, et pour une contrainte de 1.2 MPa, le gonflement est de 0.31 %. Malgré cette faible différence de contrainte, on peut en tirer comme résultat que le confinement latéral n'a pas d'effet sur le gonflement axial.

Pour le deuxième essai, le chemin de déchargement de la contrainte axiale est : 4.5, 3.5 et 2.5 MPa (Fig. 5.24).

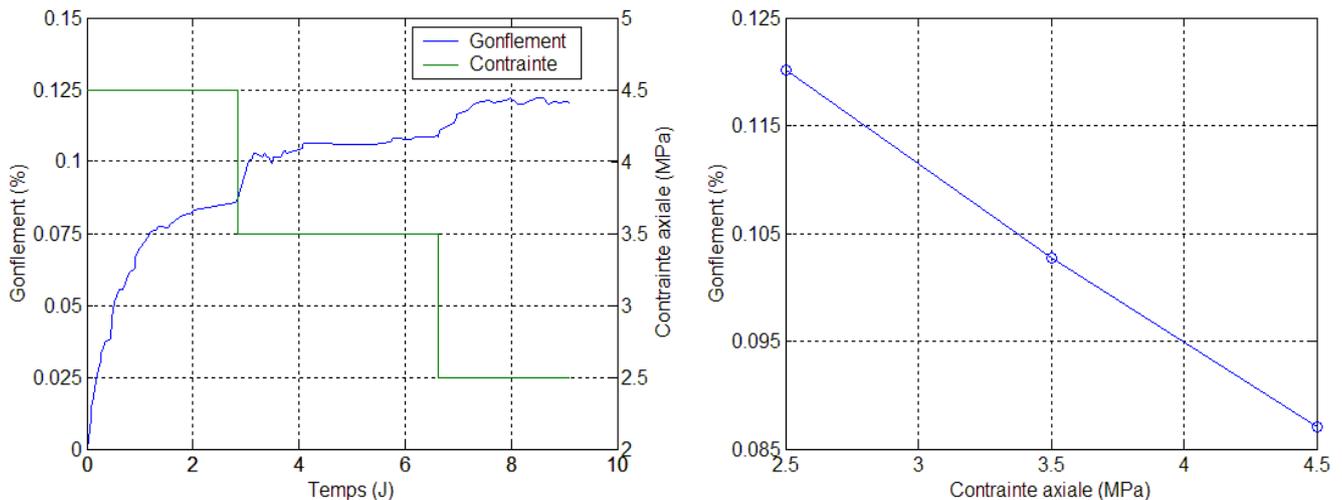


FIG. 5.24 – a) *Gonflement axial pour un chemin de déchargement de 4.5, 3.5 et 2.5 MPa et pour un confinement de 1 MPa.* b) *Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)*

Afin de caractériser l'influence de l'historique du déchargement de la contrainte axiale sur le gonflement, il est intéressant de comparer les ordres de grandeur des déplacements pour des paliers identiques de chargement (Tab. 5.2).

Contrainte axiale (MPa)	Gonflement axial (%)	Déplacement axial (mm)
3.5	0.135	0.039
2.5	0.18	0.045
1.5	0.28	0.074
4.5	0.087	0.021
3.5	0.103	0.026
2.5	0.123	0.031

TAB. 5.2 – *Comparaison des déplacements axiaux, de l'argilite de Lorraine, dus au gonflement*

Pour des contraintes axiales de 3.5 et 2.5 MPa, la différence entre les déplacements des deux essais est identique et est de l'ordre de 0.0135 mm. Il faut tenir compte du fait que la précision de l'appareil est du même ordre de grandeur que cette différence. On peut supposer que le gonflement ne dépend pas du chemin de contraintes suivi par l'échantillon.

Ce constat est dû au gonflement au niveau des feuillets argileux qui n'est pas affecté par la variation du volume poral induite par le déchargement.

Gonflement uniaxial et gonflement œdométrique

L'influence de l'historique du déchargement a été étudiée en comparant, pour un palier de contrainte de 0.7 MPa, deux essais uniaxiaux présentés sur les figures 5.15 et 5.16. On remarque, sur la figure 5.25, que les deux courbes de gonflement tendent vers la même asymptote.

En plus, pour une contrainte axiale de 0.1 MPa, le gonflement œdométrique est égal à 0.68 %. Pour la même contrainte, le gonflement uniaxial du quatrième palier est de 0.71 %. Cela confirme bien que le gonflement est indépendant du chemin de déchargement et également indépendant des conditions de confinement latéral (Fig. 5.26)..

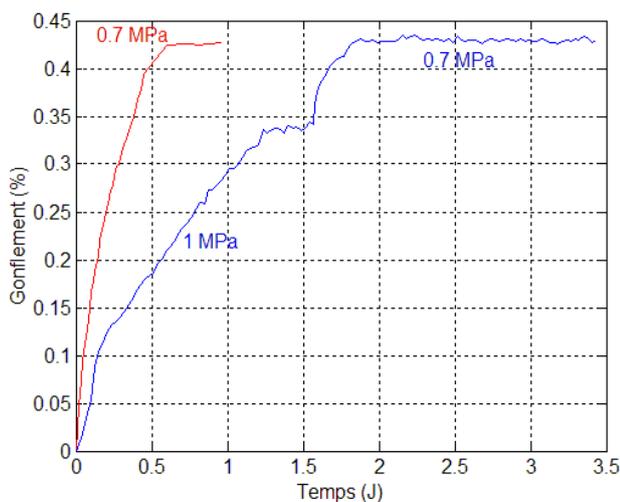


FIG. 5.25 – Gonflement axial de l'argilite de Lorraine pour deux différents chemins de déchargement de la contrainte axiale

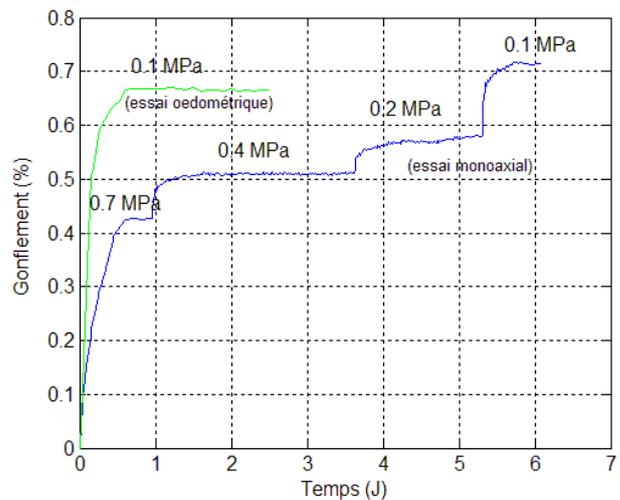


FIG. 5.26 – Comparaison entre le gonflement œdométrique et le gonflement uniaxial de l'argilite de Lorraine pour une contrainte axiale de 0.1 MPa

En raisonnant en élasticité afin de déterminer la déformation axiale due à la pression de gonflement latérale (0.26 MPa) qui se génère lorsque l'échantillon est empêché de gonfler radialement, on obtient une déformation de $1.6 \cdot 10^{-3}$ %. Cette déformation est négligeable devant le gonflement mesuré. Pour cette raison, le gonflement axial œdométrique est quasi égal au gonflement uniaxial.

Finalement, les résultats des essais sont cohérents avec l'hypothèse de réversibilité du phénomène de gonflement formulée par Madsen ^[79].

5.3.7 Influence de la contrainte sur l'anisotropie du gonflement

L'influence de la contrainte axiale sur l'anisotropie du gonflement a été analysée en comparant les résultats de l'essai uniaxial effectué sur l'argilite de Lorraine à stratification horizontale (Fig. 5.16) avec un autre essai réalisé sur la même roche subissant un chemin de déchargement identique (0.7, 0.4, 0.2 et 0.1 MPa) mais possédant une stratification verticale.

Sur la figure 5.27, on constate que, quelle que soit l'orientation, le gonflement croît lorsque la contrainte décroît.

De plus, cet essai montre que les trois phases de gonflement sont présentes. Les temps de stabilisation pour chaque palier sont presque identiques et sont de l'ordre d'un jour. Cela confirme que le gonflement est affecté par le même phénomène pour les différents paliers de contraintes.

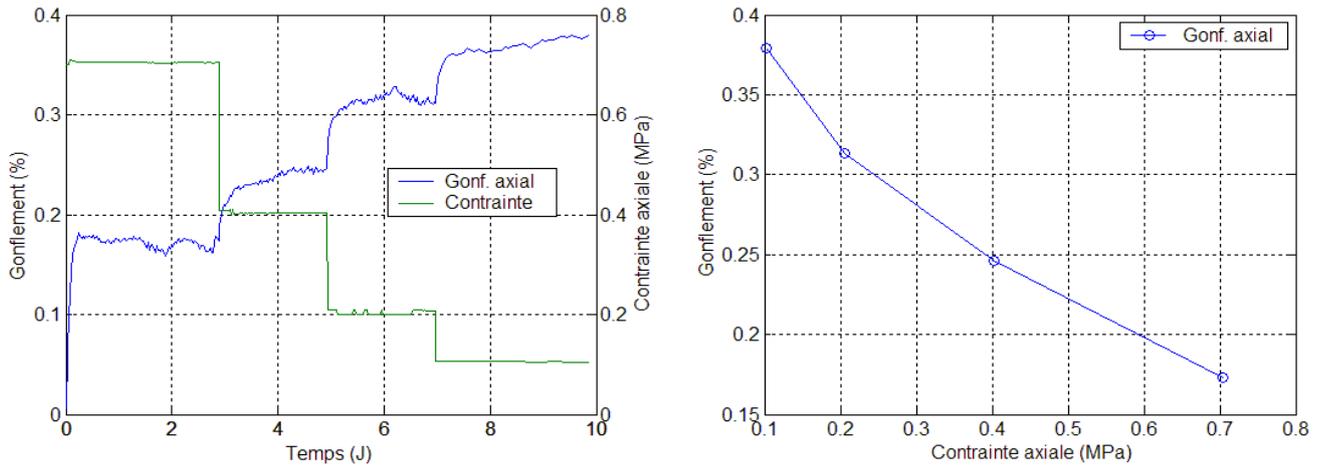


FIG. 5.27 – a) Gonflement axial ($\alpha = 90^0$) pour un chemin de déchargement de 0.7, 0.4, 0.2 et 0.1 MPa et pour un confinement nul. b) Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)

La figure 5.28 représente la variation du rapport $\frac{\varepsilon(\alpha=0^0)}{\varepsilon(\alpha=90^0)}$ en fonction de la contrainte appliquée. Ce rapport est donc supérieur à 1 et est plus faible pour une contrainte de 0.1 MPa. Cela est dû au fait que le gonflement, suivant la direction normale aux strates, est très sensible à la contrainte appliquée.

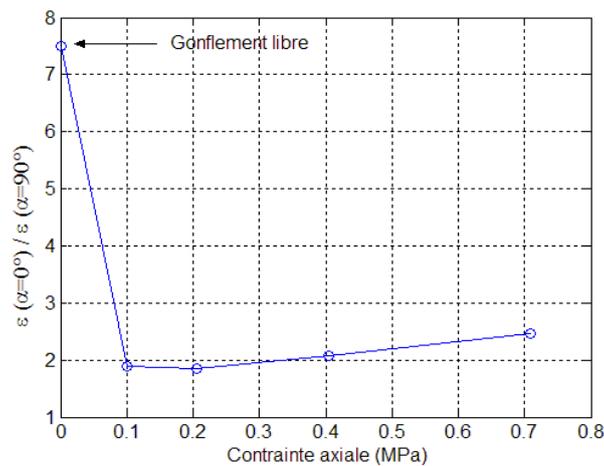


FIG. 5.28 – Variation de $\frac{\varepsilon(\alpha=0^0)}{\varepsilon(\alpha=90^0)}$ de l'argilite de Lorraine en fonction la contrainte axiale

Le tableau 5.3 fait apparaître que la différence entre les valeurs de gonflement ($\varepsilon(\alpha = 0^0) - \varepsilon(\alpha = 90^0)$) pour les deux directions privilégiées et pour des contraintes différentes est très prononcée dans le cas du gonflement libre.

Contrainte axiale (MPa)	0	0.1	0.2	0.4	0.72
$\varepsilon(\alpha = 0^0) - \varepsilon(\alpha = 90^0)$ (%)	2.6	0.3358	0.2683	0.2660	0.2538

TAB. 5.3 – Différences de gonflement axial de l'argilite de Lorraine pour deux directions privilégiées

5.3.8 Pression de gonflement

Les essais de gonflement empêché ont montré que la pression de gonflement est égale à 0.67 MPa. Dans un premier temps, une série d'essais composée de trois essais de gonflement œdométriques monopaliers ont été réalisés pour des contraintes axiales de 1.2, 0.6 et 0.1 MPa normales aux strates. D'après la figure 5.29, on remarque que le gonflement est maximal pour de faibles contraintes et diminue avec la contrainte appliquée.

D'après ces essais, l'application d'une contrainte de 1.2 MPa a pour effet de réduire sensiblement le gonflement. Une nette diminution de 72 % du potentiel de gonflement est observée lorsque la contrainte axiale varie de 0.1 MPa à 1.2 MPa.

Par ailleurs, cette contrainte, qui est presque deux fois supérieure à la pression de gonflement (0.67 MPa), engendre un gonflement de 0.3 %.

Ce constat peut être expliqué par le fait que, lorsque l'échantillon garde sa forme initiale, il génère un gonflement interne qui par conséquent a pour effet de réduire sensiblement la pression de gonflement. Donc, la pression de gonflement mesurée par la méthode du gonflement empêché ne correspond pas alors à la contrainte qu'il faut appliquer pour empêcher le gonflement. Il sera alors intéressant par la suite d'estimer cette contrainte.

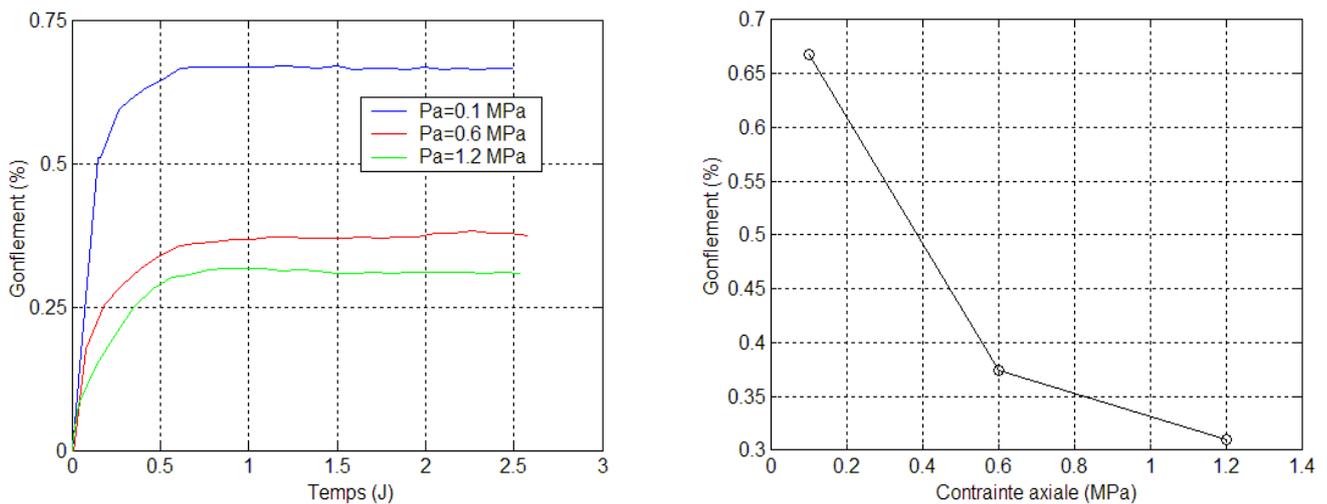


FIG. 5.29 – a) Gonflement œdométrique en fonction du temps pour différentes contraintes axiales. b) Gonflement final en fonction de la contrainte axiale (argilite de Lorraine)

Comportement de la roche en chargement

La procédure expérimentale suivie consiste à charger axialement l'échantillon disposé dans la cellule triaxiale par paliers de contraintes croissantes de telle manière à rattraper le gonflement généré. La pression de gonflement, déterminée par cette procédure, correspond à la pression finale appliquée où l'on n'observe plus de gonflement.

La contrainte initiale appliquée est égale à 1.3 MPa, le chemin de chargement par paliers correspond à 2.5, 3.3 et 5.9 MPa et la pression de confinement est égale à 1 MPa (Fig. 5.30).

La contrainte à appliquer, nécessaire pour revenir à l'état initial avant imbibition, est égale à 5.9 MPa.

Cette contrainte est largement supérieure à la pression de gonflement mesurée par la méthode du gonflement empêché mais ne contredit pas les résultats des essais de gonflement sous contraintes.

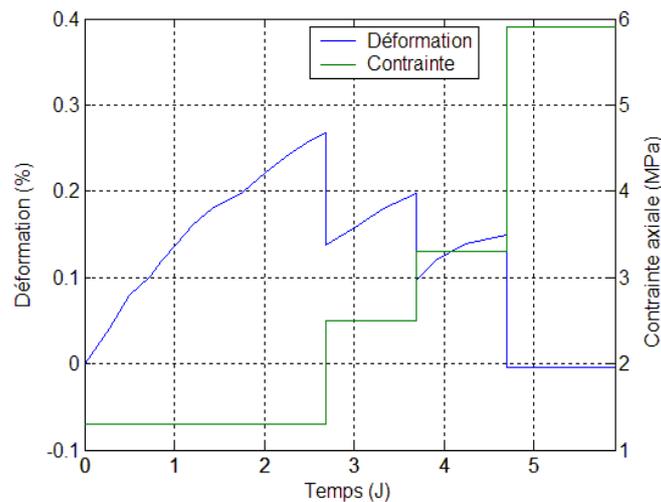


FIG. 5.30 – Déformation axiale de l'argilite de Lorraine pour un chemin de chargement de 1.3, 2.5, 3.3 et 5.9 MPa et un confinement de 1 MPa

Droite d'Huder et Amberg

La méthode à appliquer est semblable à celle déterminée par les formulations logarithmiques comme de type Huder et Amberg et consiste à présenter le gonflement final de tous les essais dans un repère semi-logarithmique.

Sur la figure 5.31, on observe que le gonflement suit une fonction logarithmique pour des contraintes supérieures à 0.1 MPa.

L'intersection de la droite d'Huder et Amberg avec l'axe des contraintes correspond à la pression de gonflement déterminée par cette méthode qui est égale à 6.7 MPa. L'indice de gonflement K qui correspond à la pente de la droite est égal à -0.39% .

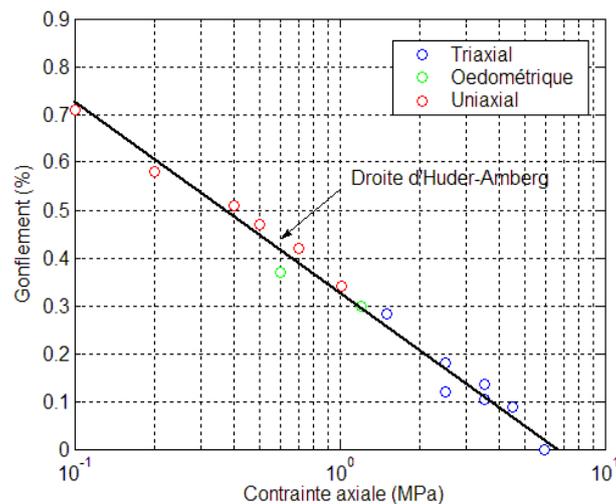


FIG. 5.31 – Droite d'Huder et Amberg de l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^0$

La pression de gonflement déterminée par la méthode de chargement par palier est légèrement inférieure à celle déterminée par la méthode d'Huder et Amberg et cela est dû à la réduction des

caractéristiques mécaniques de la roche.

Pour déterminer la pression de gonflement d'un échantillon de stratification verticale, deux méthodes sont envisageables :

La première méthode serait d'utiliser l'approche de Basma et Al-Hamoud ^[11] qui révèle que la contrainte à appliquer pour annuler le gonflement P_{gp} est liée à la pression de gonflement dans le cas du gonflement empêché P_g via cette approximation :

$$P_{gp} = \beta_g (P_g) \text{ où } \beta_g \text{ est un paramètre expérimental.}$$

Pour une stratification horizontale, P_{gp} est égale 5.9 MPa et P_g est égale à 0.67 MPa, β_g est alors égal à 8.8.

Si on suppose que le paramètre β_g est indépendant de l'orientation de l'échantillon, la pression à appliquer, pour annuler le gonflement suivant une direction parallèle aux strates, est égale à 2.28 MPa.

La deuxième méthode consiste à déterminer la pression de gonflement en utilisant la droite d'Huder et Amberg pour une contrainte axiale supérieure à 0.1 MPa. La figure 5.32 montre que la pression de gonflement est égale à 3.3 MPa et l'indice de gonflement est égal à -0.26 %.

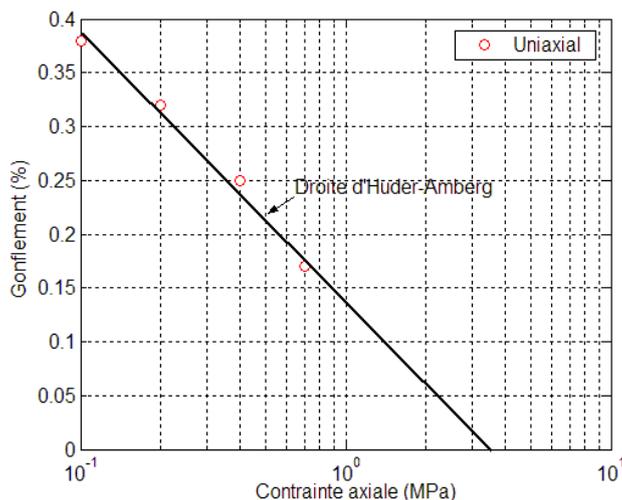


FIG. 5.32 – Droite d'Huder-Amberg de l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 90^\circ$

5.4 Conclusion

L'analyse mécanique décrite dans ce chapitre a permis de mieux comprendre le gonflement tridimensionnel d'une roche argileuse anisotrope soumise à un régime de contraintes et mise en contact avec l'eau.

On a pu déduire des essais de gonflement libre que le gonflement est indépendant des dimensions de l'éprouvette et présente une direction privilégiée normale aux strates. Les essais de gonflement ont démontré que l'application d'une contrainte a pour effet de réduire le gonflement selon la même direction du chargement. Cette observation peut être expliquée par le fait que lorsque la roche gonfle, elle exerce une pression interne pour équilibrer la contrainte axiale appliquée. Cette pression n'est pas constante et varie avec le gonflement. Par exemple, dans le cas d'un gonflement libre, elle atteint zéro à la stabilisation.

Les essais ont fait apparaître que le gonflement axial normal aux strates pour des contraintes supérieures à 0.1 MPa ne dépend pas du chemin de déchargement. En outre, le gonflement suivant la direction privilégiée est indépendant du confinement latéral.

Pareillement, le gonflement parallèle aux strates est indépendant de la contrainte axiale et du chemin de déchargement.

Ces différentes constatations ne s'appliquent pas aux argiles plastiques pour lesquelles l'orientation des feuillets varie avec l'imbibition et les contraintes appliquées.

La plupart des essais ont abouti à un gonflement, à l'exception des essais uniaxiaux effectués sur des échantillons d'argilite de Tournemire de stratification verticale où un fluage ainsi qu'une rupture ont été détectés.

La pression de gonflement mesurée par la méthode du gonflement empêché est très faible par rapport à celles déterminées par la méthode de chargement par paliers et par la droite d'Huder et Amberg.

Cette droite reste la plus raisonnable du fait qu'elle ne prend pas directement en compte les caractéristiques mécaniques de la roche.

La méthode qui nous semble la plus judicieuse est d'effectuer au minimum deux essais de déchargement par paliers en partant de contraintes initiales élevées et en déterminant par ajustement la pression de gonflement au moyen d'un modèle de gonflement (chapitre 7).

Cet éventail d'essais a prouvé que les essais uniaxiaux sont suffisants pour décrire le gonflement de la roche.

Par la suite, en se basant sur ce constat, on pourra analyser l'influence de la nature de la solution d'hydratation sur le gonflement et le retrait.

Chapitre 6

Étude chimique

6.1 Introduction

La plupart des recherches ont mentionné l'influence de la nature de la solution d'hydratation sur le gonflement des matériaux argileux.

Pour les roches argileuses telles que l'argilite, les pétroliers ont mis en évidence l'influence de la chimie uniquement sur la pression de gonflement déterminée par la méthode du gonflement empêché, étant donné qu'ils la considèrent comme la pression osmotique. Leurs résultats sont classiques : diminution de la pression de gonflement avec l'augmentation de la concentration en sel dans la solution.

Daupley ^[28] a effectué, sur des échantillons d'argilite de Tournemire immergés dans différentes solutions salines, des essais de gonflement libre suivant une direction normale à la stratification. Dans ce cas également, les résultats précédents se confirment : diminution du gonflement avec l'augmentation de la concentration en sel.

Cependant, Daupley n'a pas mis en relief l'influence de la nature du sel (KCl, NaCl et CaCl₂) sur le gonflement. Il a imputé le gonflement au seul phénomène osmotique, autrement dit à la différence de concentration entre la solution d'immersion et l'eau des pores.

Ces essais monochimiques, c'est-à-dire effectués sur un seul échantillon immergé dans une seule solution chimique, ne nous permettent pas clairement de différencier le gonflement pour différents échantillons immergés dans différentes solutions salines de même normalité ou de même activité.

Ces essais ne montrent pas non plus nettement l'effet du chemin chimique bien que Daupley ait effectué des essais de gonflement empêché pour différents chemins chimiques. Ces résultats se sont avérés contradictoires et incomplets du fait des problèmes techniques.

L'idée par la suite est de faire apparaître si le gonflement dépend du chemin chimique ou non.

Les résultats des essais du gonflement libre ou du gonflement empêché qui montrent l'effet de la chimie sur le gonflement se contredisent par rapport aux essais effectués par Barbier ^[46] sur l'argilite de Bure au moyen de l'appareil triaxial sous contraintes isotropes de 12 MPa à partir desquels il a montré que le gonflement est indépendant de la nature et de la concentration en sel.

De ce fait, il est intéressant de ne pas se satisfaire de l'analyse de l'effet de la chimie sur les déformations libres (gonflement libre ou retrait libre) mais d'illustrer également l'effet de la contrainte.

L'anisotropie du gonflement libre d'un échantillon subissant différentes solutions chimiques bénéficie d'une attention particulière dans ce chapitre du fait que la plupart des études dans ce domaine et à notre connaissance ont été effectuées suivant une direction normale aux strates.

Dans la dernière partie du chapitre, on présente l'évolution du pH de la solution en fonction du

temps pour des échantillons immergés dans différentes solutions où l'on met en évidence la cinétique du gonflement et la cinétique des échanges chimiques.

6.2 Procédure expérimentale

La première étape dans notre programme expérimental a été consacrée à la vérification de la sensibilité de l'argilite de Tournemire à la nature de la solution saline.

Un essai de gonflement libre avec mesure du déplacement normal aux strates a été réalisé pour un chemin chimique composé de trois paliers : 1 M NaCl, eau déminéralisée et également eau déminéralisée (Fig. 6.1).

Le passage d'un palier à l'autre nécessite d'atteindre la stabilisation du gonflement du palier actuel. Pour le premier palier, l'échantillon fixe les cations Na^+ sur les feuillets argileux par effet électrochimique et gonfle. Pour le deuxième palier, la substitution de la solution saline par l'eau déminéralisée entraîne de nouveau un gonflement dû à la différence de concentration en sel entre la solution externe et l'eau des pores et entre l'eau des pores et la double couche diffuse.

Le troisième palier confirme que le gonflement dépend uniquement de la solution d'hydratation. Aucun changement de la cinétique de gonflement n'a été observé.

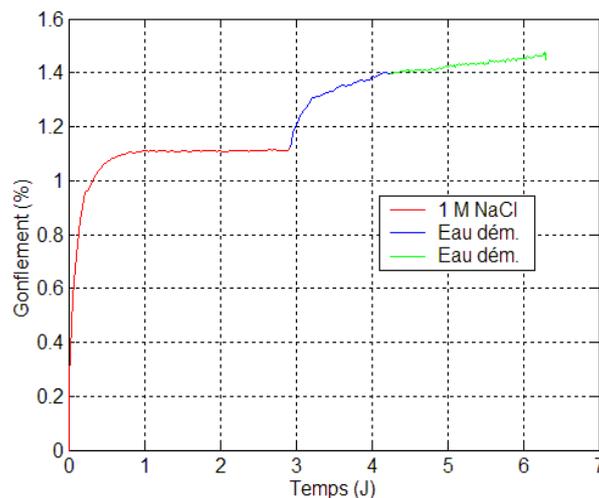


FIG. 6.1 – *Gonflement axial pour un chemin chimique de NaCl – eau déminéralisée – eau déminéralisée*

A la lumière de ce résultat, un programme expérimental a été lancé afin de rendre compte de l'effet des sollicitations chimiques et mécaniques sur le gonflement ou le retrait de **l'argilite de Tournemire** en termes de réponses mesurables.

Les solutions salines ont été préparées par dissolution de sels dans l'eau déminéralisée. La liste des sels monovalents et du sel divalent utilisés à différentes concentrations est :

- Chlorure de potassium KCl
- Chlorure de sodium NaCl
- Chlorure de calcium CaCl_2

Ces sels ont été choisis du fait qu'ils sont fréquents dans la composition de l'eau interstitielle des formations argileuses.

Les essais choisis sont des essais de déformation libre (sans contraintes) et des essais uniaxiaux

(uniquement une contrainte axiale est appliquée). Le choix de ces essais a été guidé par les résultats des expérimentations obtenus au chapitre 5.

Le tableau suivant récapitule les essais effectués pour différentes orientations de l'échantillon et pour différentes contraintes axiales.

Ce tableau est divisé en sept séries d'essais où chaque série est effectuée sur une même carotte et cela afin de s'affranchir de la variabilité des carottes d'argilite de Tournemire et de la sensibilité des mesures.

Les valeurs entre parenthèses correspondent à la normalité (N) de la solution saline.

N :	Type d'essai	Solution chimique	α (°)	Contrainte axiale (MPa)
24	Déformation libre	Eau dém.	0	0
25		NaCl(1)-Eau dém.		
26		NaCl(4)- NaCl(1)		
27		KCl(1)-CaCl ₂ (1)- NaCl(1)-eau dém.	90	0
28		Eau dém.		
29		NaCl(1)-Eau dém.		
30		KCl(1)-Eau dém.	0	0
31		NaCl(4)		
32		NaCl(5)-NaCl(3)- NaCl(1)-Eau dém.		
33		NaCl(5)-NaCl(3)- NaCl(1)-Eau dém.	45	0
34		NaCl(5)-NaCl(3)- NaCl(1)-Eau dém.	90	
35		Eau robinet	0	
36		NaCl(1)		
37		KCl(1)		
38		CaCl ₂ (1)		
39	CaCl ₂ (0.5)			
40	Uniaxial	NaCl(5)-NaCl(3)- NaCl(1)-Eau dém.	0	0
41		NaCl(5)-NaCl(3)- NaCl(1)-Eau dém.		1
42		NaCl(5)		2
43		Eau dém.-NaCl(4)	0	0.7
44		NaCl(1)-Eau dém.- NaCl(4)		
45		Eau dém.-NaCl(4)- Eau dém.-NaCl(4)		
46		Eau dém.-NaCl(4)- Eau dém.-NaCl(4)	0	0.5
47		Eau dém.-NaCl(4)- Eau dém.-NaCl(4)		1.5
48		Eau dém.-NaCl(4)- Eau dém.-NaCl(4)		2.5

TAB. 6.1 – *Essais effectués*

Les échantillons ont tous une hauteur de 25 mm et un diamètre de 50 mm.

Toutes les cellules utilisées ont été correctement emballées et déposées dans une armoire thermostatée réglée à la température ambiante de 20 °C afin d'éviter les perturbations climatiques et de préserver la solution saline de toute attaque extérieure.

Pour les essais de différents chemins chimiques, la remise d'une nouvelle solution oblige à nettoyer, pendant un laps de temps réduit, le réservoir contenant l'échantillon et ce pour éviter les résidus de la première solution.

Le volume de la solution d'immersion est égal à 1 l pour les essais de déformations libres. Ce volume est égal à 0.25 l pour les essais uniaxiaux.

6.3 Résultats obtenus

6.3.1 Influence de l'activité de la solution

Les activités des différentes solutions salines (NaCl , KCl et CaCl_2), présentées sur la figure 6.2, ont été déterminées en utilisant les équations empiriques présentées au chapitre 2 (Éq. 2.2, Éq. 2.3 et Éq. 2.4, page 17).

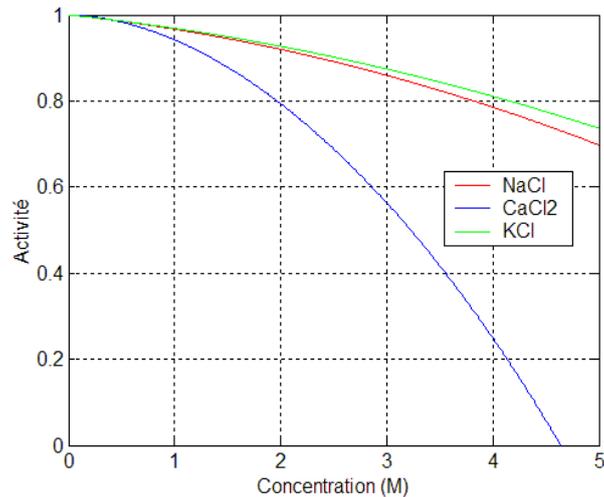


FIG. 6.2 – Variation de l'activité en fonction de la concentration des trois solutions : NaCl , KCl et CaCl_2

Pour clairement montrer l'effet de l'activité de la solution, il est plus aisé de comparer les potentiels de gonflement libre normaux aux strates qui présentent des valeurs significatives.

Initialement, les essais ont été effectués sur trois échantillons saturés par des solutions de NaCl , de KCl et de CaCl_2 de normalité 1 chacune (Fig. 6.3).

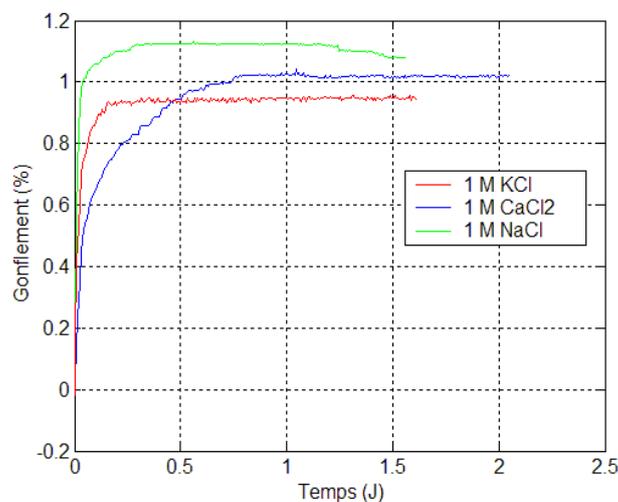


FIG. 6.3 – Gonflement axial pour des solutions : NaCl , KCl et CaCl_2 de normalité 1

Ces essais révèlent que le gonflement pour une solution de NaCl est le plus élevé et que celui pour une solution de KCl est le plus faible.

En raisonnant en activité, pour une normalité de 1, l'activité de la solution de KCl est supérieure à celle de NaCl et en même temps supérieure à l'activité d'une solution de CaCl_2 , ce qui ne coïncide pas avec les résultats.

Afin de confirmer un tel résultat et d'éviter dans un même temps l'utilisation de plusieurs échantillons, un essai de gonflement a été effectué sur un seul échantillon en substituant successivement la solution saline. Le chemin chimique est composé des solutions de KCl, CaCl_2 et NaCl de normalité 1 chacune.

Sur la figure 6.4, la hiérarchie du gonflement est similaire aux essais précédents. Le gonflement pour une solution de KCl est le plus faible bien qu'il présente, pour une normalité égale à 1, l'activité la plus élevée.

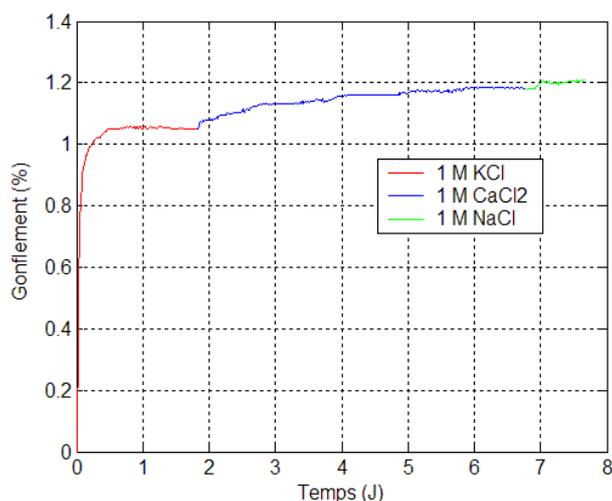


FIG. 6.4 – Gonflement axial pour un seul échantillon immergé successivement dans trois solutions : NaCl, KCl et CaCl_2 de normalité 1 chacune

Le tableau suivant présente, pour le dernier essai, l'activité et le gonflement correspondant.

Solution saline	Δ gonflement (%)	Activité
1 M KCl	1.05	0.9688
1 M CaCl_2	0.13	0.9422
1 M NaCl	0.028	0.9668

TAB. 6.2 – Activité et gonflement pour des solutions salines de normalité 1

Etant donné que l'activité n'a pas d'effet direct sur le gonflement, il s'agit de trouver d'autres paramètres expliquant de tels résultats :

Influence du rayon du cation hydraté : Le rayon ionique du Ca^{2+} est de 9.6 \AA , il est le plus élevé par rapport aux rayons des ions de Na^+ et K^+ qui valent respectivement 5.6 \AA et 3.8 \AA . Donc, on ne peut pas attribuer en totalité l'effet du rayon des cations sur le gonflement.

Influence de la valence des cations : Selon la théorie de Gouy-Chapman, lorsque la valence des cations augmente, le gonflement diminue. Bien que cette théorie suppose que les ions monovalents se manifestent par le même gonflement, ce qui n'est pas le cas ici, une solution de CaCl_2 (0.5 M), possédant en solution le même nombre de cations que les solutions de KCl (1 M) et de NaCl (1 M), présente le gonflement le plus élevé (Fig. 6.5).

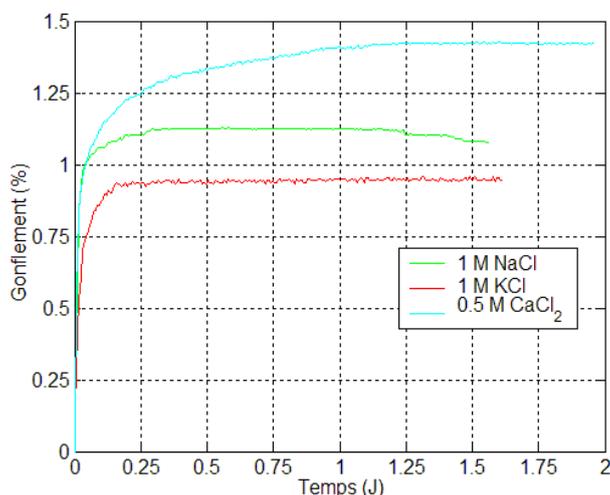


FIG. 6.5 – Influence de la valence des cations sur le gonflement

Efficacité de l'argilite : Étant donné que les interprétations précédentes ne nous permettent pas d'expliquer ce phénomène, l'explication repose sur l'efficacité de l'argilite, en supposant, comme le suggèrent différents auteurs, qu'elle dépende de la nature de la solution d'hydratation et des caractéristiques minéralogiques de la roche.

6.3.2 Influence du chemin chimique

Les essais à effectuer ont pour objectif de montrer, d'une part, si les déformations dues au gonflement ou au retrait dépendent du chemin chimique parcouru par l'échantillon ou non, et d'autre part, l'influence de la contrainte axiale appliquée sur le gonflement ou le retrait.

Gonflement libre

Afin de déterminer si le gonflement libre normal aux strates ($\alpha = 0^0$) est influencé par l'historique du chemin chimique, différents essais, multipaliers en concentrations décroissantes en sel, ont été effectués pour différents chemins chimiques. Ces essais peuvent être divisés en deux séries.

La première série d'essais, présentée sur la figure 6.6, s'achève par l'eau déminéralisée et est composée des chemins suivants :

- eau déminéralisée,
- 1 M NaCl – eau déminéralisée,
- 1 M KCl – 1 M CaCl_2 – 1 M NaCl – eau déminéralisée.

La deuxième série d'essais, présentée sur la figure 6.7, s'achève par 1 M NaCl et est composée des chemins suivants :

- 1 M NaCl,
- 4 M NaCl - 1 M NaCl.

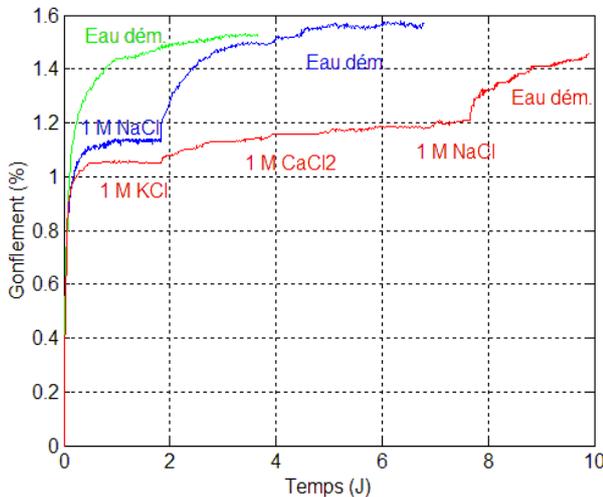


FIG. 6.6 – *Chemin chimique pour l'eau déminéralisée ($\alpha = 0^0$)*

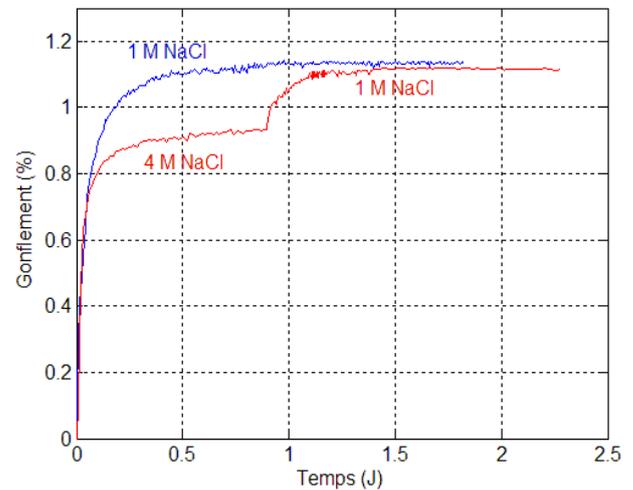


FIG. 6.7 – *Chemin chimique pour 1 M de NaCl ($\alpha = 0^0$)*

D'après ces essais, l'eau déminéralisée présente le plus grand pouvoir de gonflement parce qu'elle exclut les substances chimiques présentes dans l'eau des pores.

Dans le même sens, le gonflement augmente avec la diminution de la molarité. Une augmentation de 18 % du gonflement a été mesurée lorsque la concentration en NaCl passe de 4 à 1 M. Ce phénomène peut être expliqué par la théorie de Gouy-Chapman qui suppose que l'épaisseur de la couche diffuse diminue avec l'augmentation de la concentration en sel.

Les différents essais indiquent que le gonflement ne dépend pas du chemin chimique. Le même comportement a été trouvé pour NaCl (1 M) et pour l'eau déminéralisée.

Pour une stratification verticale ($\alpha = 90^0$), l'influence du chemin chimique a été analysé par les essais suivants :

- eau déminéralisée,
- 1 M NaCl - eau déminéralisée,
- 1 M KCl - eau déminéralisée.

Sur la figure 6.8, on présente à côté des essais précédents, un essai monochimique pour une solution de NaCl (4 M).

On constate que le gonflement pour une solution de KCl est plus faible que celui pour une solution de NaCl et en même temps il diminue avec la concentration en sel, ce qui va dans le même sens que les essais sur des échantillons à stratification horizontale.

Le gonflement est indépendant du chemin chimique pour l'essai débutant par une solution de NaCl (1 M). Cependant, pour une solution de KCl (1 M), un léger décalage est observé.

Entre autre, les essais réalisés confirment que le gonflement est anisotrope et dépend de l'orientation de l'échantillon.

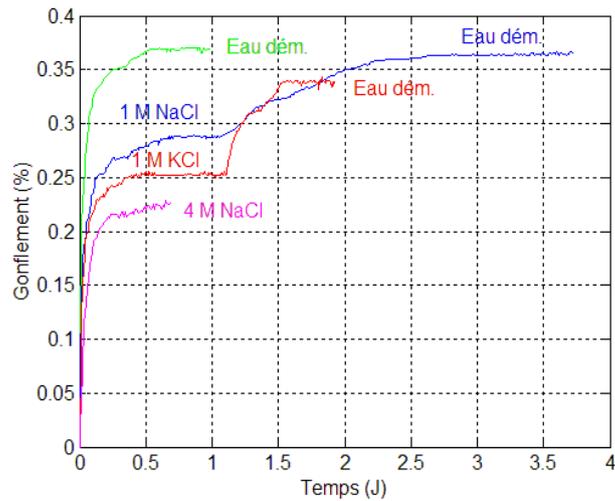


FIG. 6.8 – Gonflement axial pour différents chemins chimiques ($\alpha = 90^0$)

Le tableau suivant illustre le gonflement normalisé, correspondant au rapport du gonflement libre obtenu pour une concentration donnée en sel au gonflement libre mesuré avec l'eau, pour différentes solutions et pour les deux directions principales de gonflement :

Solution	Gonflement normalisé $\alpha = 0^0$	Gonflement normalisé $\alpha = 90^0$
Eau déminéralisée	1	1
1 M NaCl	0.72	0.78
1 M KCl	0.68	0.69
4 M NaCl	0.59	0.61

TAB. 6.3 – Gonflement normalisé pour $\alpha = 0^0$ et $\alpha = 90^0$ et pour différentes solutions salines

On peut déduire que le gonflement normalisé, pour une solution donnée, ne dépend pas des directions normale et parallèle aux strates.

Déformation sous une contrainte axiale

L'étude suivante, composée de trois séries d'essais, est uniquement consacrée à l'analyse de l'effet d'une solution de NaCl sur le gonflement et le retrait d'un échantillon soumis à une contrainte axiale maintenue constante durant l'essai et à un chemin chimique en concentration croissante ou décroissante en sel.

Le choix d'une solution de NaCl a été fixé parce qu'elle provoque le gonflement le plus élevé par rapport aux autres solutions (KCl et CaCl_2).

La première série d'essais, présentée sur la figure 6.9, est menée pour une contrainte axiale de 0.7 MPa et pour les deux chemins chimiques suivants :

1. eau déminéralisée – 4 M NaCl,
2. 1 M NaCl – eau déminéralisée – 4 M NaCl.

Cette série d'essais montre que les déformations axiales dépendent de la concentration en NaCl. Le gonflement est maximal pour l'eau déminéralisée et diminue avec la concentration en NaCl.

Lorsqu'on remplace l'eau déminéralisée par une solution plus concentrée, on observe un retrait de l'échantillon du fait de la différence de concentration entre la solution externe et l'eau des pores. Pour une concentration de 1 M de NaCl, le gonflement est identique quelle que soit la solution initiale.

Cependant, pour une concentration de 4 M de NaCl, l'essai qui a débuté par l'eau déminéralisée se stabilise rapidement. Pour l'autre essai, la stabilisation n'a pas été atteinte durant la période de l'essai mais les deux courbes semblent avoir le même palier de déformation.

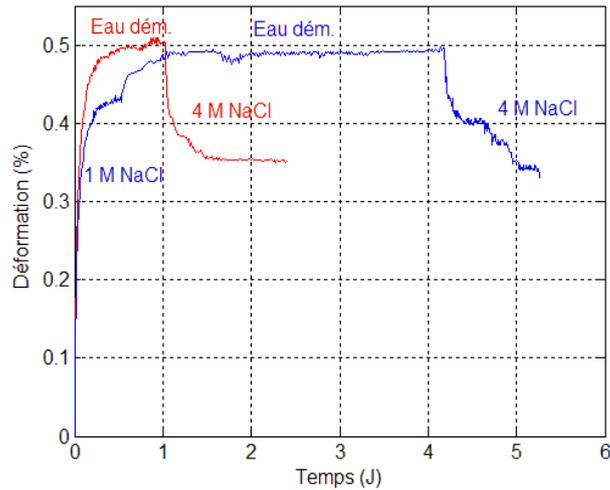


FIG. 6.9 – Déformation axiale pour une contrainte axiale de 0.7 MPa et pour différents chemins chimiques

La deuxième série, illustrée sur la figure 6.10, est effectuée pour quatre contraintes axiales (0, 0.5, 1.5 et 2.5 MPa) et pour le chemin chimique composé de quatre paliers :

- eau déminéralisée – 4 M NaCl – eau déminéralisée – 4 M NaCl

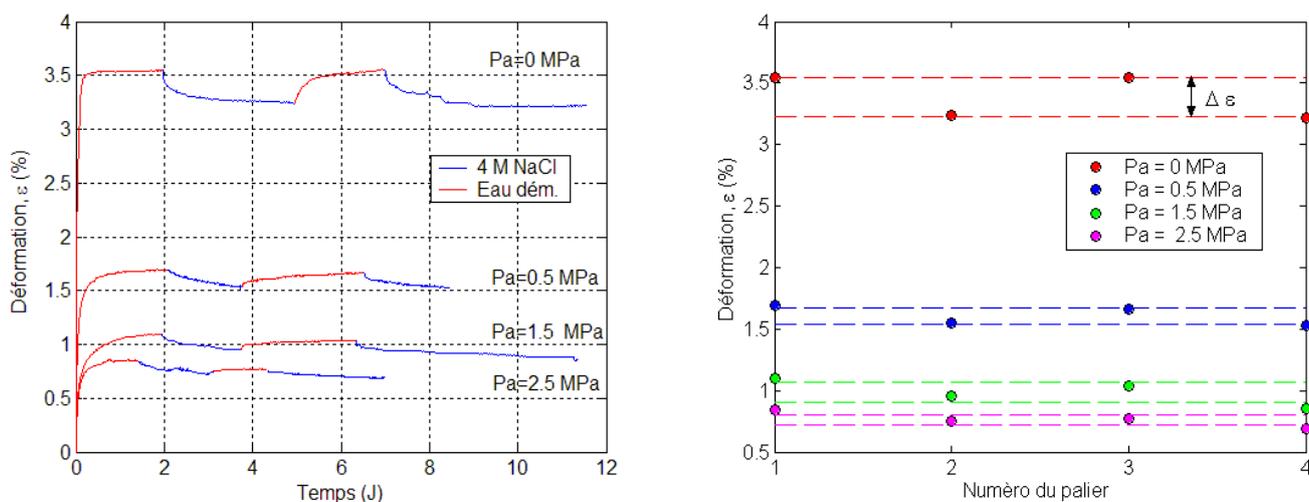


FIG. 6.10 – a) Variation de la déformation axiale avec la concentration et pour quatre contraintes axiales. b) Déformation finale en fonction du numéro du palier

Le gonflement libre, obtenu par cette carotte, est deux fois plus élevé que pour les autres essais bien que la carotte ait été correctement conservée avant les essais. Cela est probablement due à la diversité de l'argilite de Tournemire.

Toutefois, le gonflement diminue avec la contrainte axiale et cela est constaté pour les premiers paliers avec l'eau déminéralisée. Par contre, pour le retrait, on s'attendait à ce qu'il augmente avec la contrainte appliquée, ce qui n'est pas le cas. On observe que le gonflement et le retrait sont plus prononcés pour une contrainte nulle.

En ce qui concerne la réversibilité des déformations, elle est assurée pour des contraintes de 0 et 0.5 MPa. Néanmoins, une légère irréversibilité est remarquée pour des contraintes de 1.5 et 2.5 MPa. Pour une contrainte de 2.5 MPa, la substitution de l'eau déminéralisée par une solution de NaCl (4 M) et inversement, induit des déformations de l'ordre de 0.05 % qui sont faibles par rapport aux déformations libres qui sont égales à 0.3 %. On peut constater que l'effet de la contrainte réduit l'effet de la nature de la solution d'immersion. Cela a été traduit sur la figure 6.11 où la moyenne de la différence des déformations finales successives $\Delta\varepsilon$ tend à diminuer avec la contrainte axiale.

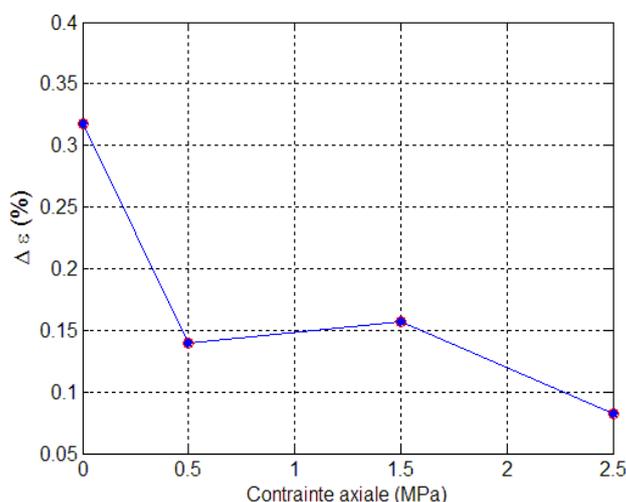


FIG. 6.11 – Variation de $\Delta\varepsilon$ avec la contrainte

Précédemment, au chapitre 3 (page 35), cette même diminution a été illustrée lors de l'application de la théorie de la double couche pour prédire le gonflement de la bentonite.

Pour mieux comprendre l'effet de la contrainte et de la concentration en NaCl sur la déformation axiale, on trace, pour les deux premiers paliers, la variation du coefficient ξ en fonction de la contrainte axiale (Fig. 6.12).

$$\xi = \frac{\varepsilon(\sigma)}{\varepsilon(\sigma = 0)}$$

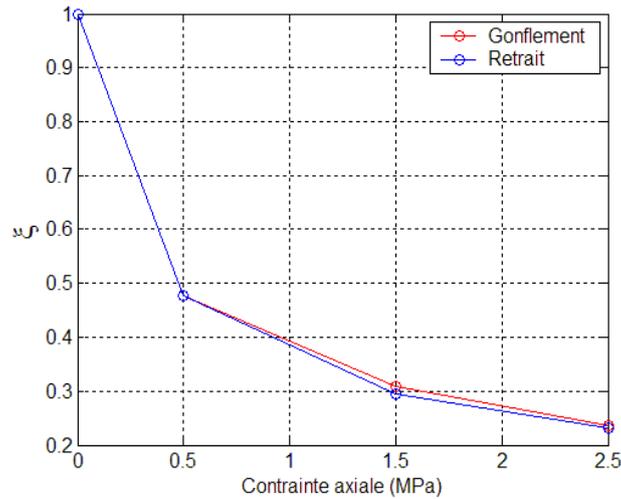


FIG. 6.12 – Variation de ξ avec la contrainte axiale pour les deux premiers paliers

Pour le premier palier correspondant au gonflement, ξ diminue avec l'augmentation de la contrainte axiale. Une diminution du gonflement de l'ordre de 75 % est obtenue pour une contrainte axiale de 2.5 MPa. Toutefois, pour l'argilite de Lorraine et pour la même contrainte axiale, elle est de 96 %. De surcroît, les deux courbes correspondant au gonflement du premier palier et au retrait du deuxième palier, sont très proches ce qui justifie que ξ soit indépendant du chimisme de la solution d'hydratation.

Pour confirmer ce constat, deux essais ont été effectués pour le même chemin chimique en concentration décroissante en NaCl (5 M – 3 M – 1 M – Eau déminéralisée) mais pour deux contraintes axiales différentes (0 et 1 MPa) (Fig. 6.13). A la stabilisation, la figure 6.14 présente la variation de ξ avec la concentration.

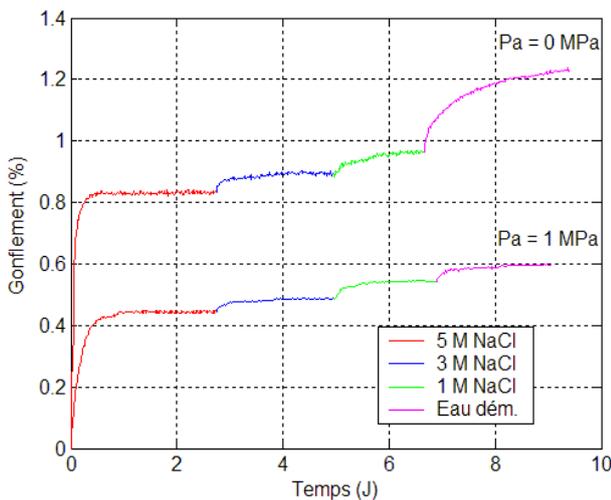


FIG. 6.13 – Variation de la déformation axiale avec la concentration et pour deux contraintes axiales

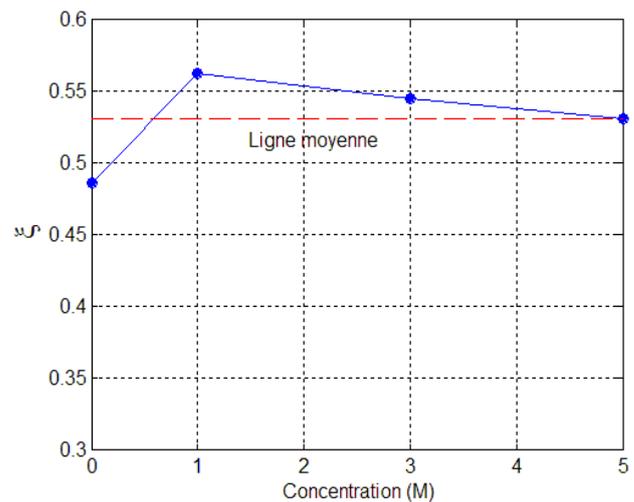


FIG. 6.14 – Variation de ξ avec la concentration

On remarque que ξ augmente légèrement lorsqu'on passe d'une concentration de 5 M à une concentration de 1 M puis diminue pour l'eau déminéralisée mais garde approximativement une moyenne de 0.53.

6.3.3 Anisotropie sous l'effet du chimisme de la solution d'hydratation

Dans le paragraphe précédent, il a été démontré que le gonflement axial normalisé est indépendant de la stratification de l'échantillon. Pour valider ce résultat, trois essais, de mesure du gonflement libre axial, ont été effectués sur des échantillons à différentes orientations ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$) et pour le même chemin chimique en concentration décroissante en NaCl (5 M – 3 M – 1 M – Eau déminéralisée). Ces essais sont présentés sur la figure 6.15.

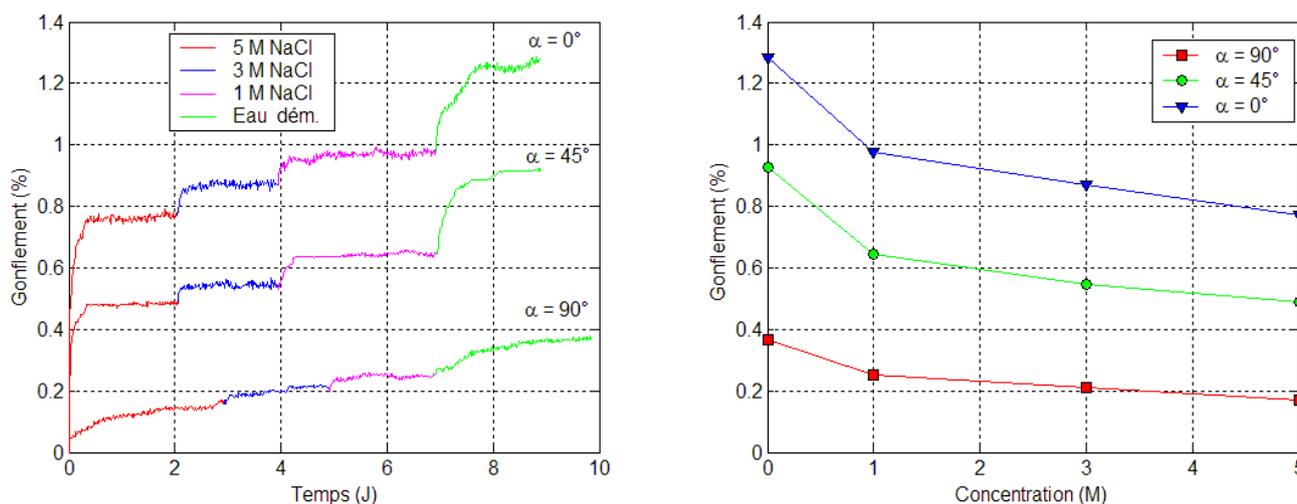


FIG. 6.15 – a) Variation du gonflement en fonction de la concentration en NaCl et pour trois orientations (0° , 45° et 90°). b) Variation du gonflement final avec la concentration

Le gonflement est bien marqué pour une direction normale aux strates et son amplitude est plus élevée pour les différents paliers. En outre, la cinétique de gonflement est presque identique pour tous les paliers, ce qui confirme que le même phénomène se répète. La figure 6.16 présente la variation des gonflements principaux. Pour une orientation de 45° , le gonflement normal et le gonflement parallèle aux strates sont obtenus par une transformation géométrique.

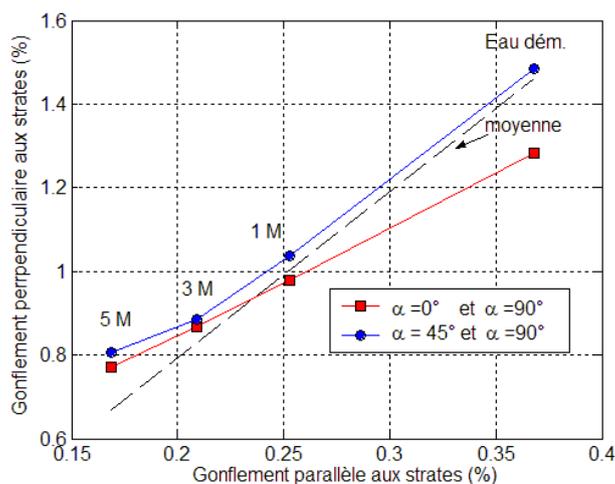


FIG. 6.16 – Gonflement perpendiculaire et gonflement parallèle aux strates pour différentes concentrations en NaCl

En traçant la ligne moyenne passant par l'origine, on peut en déduire que le gonflement, suivant les deux directions principales, est indépendant de la concentration de la solution saline. Le coefficient d'anisotropie moyen est de 4.

6.3.4 Similitude entre l'anisotropie sous l'effet de la chimie et l'anisotropie sous l'effet de l'humidité

Le paragraphe précédent a montré que le coefficient d'anisotropie est indépendant de la concentration en NaCl. Il s'agit de confirmer si ce constat se vérifie également pour les argilites par imposition d'un chemin hydrique au lieu d'un chemin chimique.

Pour l'argilite de Lorraine, le chemin d'humidification est composé de quatre paliers d'humidité relative (50, 70, 90, 99 %). La figure 6.17 présente les déformations finales.

Pour l'argilite de Bure (Fig. 6.18), un chemin d'humidification-dessiccation a été imposé (80, 90, 80 %).

Pour l'argilite de Tournemire, Valès et al. ^[122] ont effectué un essai d'humidification avec mesure des déplacements parallèles et perpendiculaires aux strates au moyen des jauges. Cet essai est présenté sur la figure 6.19.

Les figures suivantes montrent que les déformations perpendiculaires aux strates varient linéairement avec les déformations parallèles aux strates selon une droite qui passe par l'origine du repère, ce qui confirme que le coefficient d'anisotropie ne dépend pas aussi de l'humidité relative. Par ailleurs, pour l'argilite de Tournemire, le coefficient d'anisotropie est égal à 3.7 ce qui est quasiment semblable au coefficient d'anisotropie (égal à 4) déterminé dans le paragraphe précédent au moyen des solutions à différentes concentrations en NaCl.

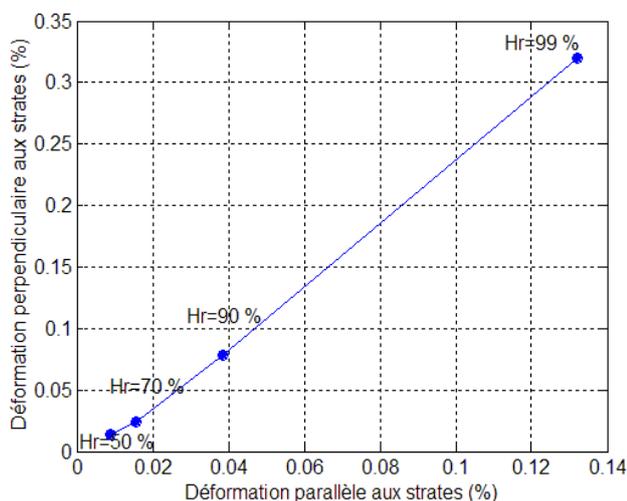


FIG. 6.17 – Anisotropie de l'argilite de Lorraine

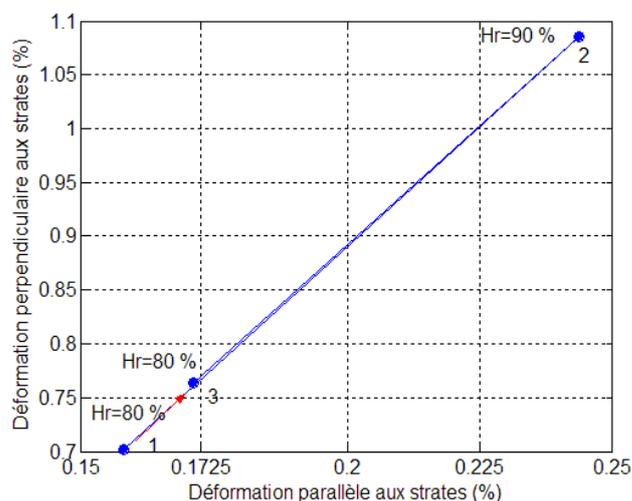
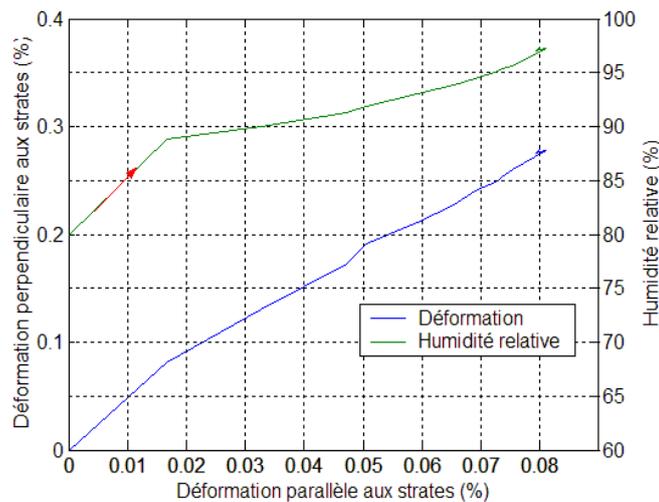


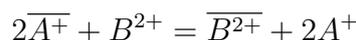
FIG. 6.18 – Anisotropie de l'argilite de Bure

FIG. 6.19 – Anisotropie de l'argilite de Tournemire ^[122]

6.4 Gonflement et échange ionique

6.4.1 Rappel sur les échanges ioniques

L'échange ionique est un processus physico-chimique prépondérant pour les minéraux argileux gonflants comme la famille des smectites. Le déficit de charges positives, résultant de la substitution des ions Al^{3+} et Si^{4+} du réseau cristallin par des ions de charges formelles moindres (Fe^{2+} , Mg^{2+} , etc.), est compensé par la présence de cations dans l'espace interfoliaire localisé entre les feuillets argileux. Ces ions, mobiles et plus moins solvatés par des molécules d'eau, peuvent s'échanger rapidement avec les ions d'une solution externe en contact avec le matériau argileux. La réaction d'échange entre un ion en solution et deux ions échangeables d'une argile s'écrit comme suit (cf. par exemple De Windt et al. ^[131]) :

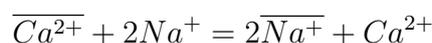


Cette réaction peut être décrite par une équation classique de bilan de masse associée à une constante d'équilibre K :

$$K = \frac{(\overline{B^{2+}}) (A^+)^2}{(A^+)^2 (B^{2+})}$$

où les parenthèses représentent l'activité des espèces en solution et dans l'espace interfoliaire. La détermination de cette constante d'échange permet de prédire la distribution des espèces cationiques entre la solution et l'argile.

Le mécanisme d'échange est également associé à la capacité d'échange cationique (CEC), paramètre exprimant la quantité d'ions potentiellement échangeables (unités en meq/100 g de solide). Comme mentionné ci-dessus, une argile a donc toujours une population d'ions échangeables pour des raisons d'électroneutralité. Cette population dépend de l'historique du matériau argileux (dominance des ions Ca^{2+} dans l'argilite de Tournemire ou des ions Na^+ dans une bentonite sodique par exemple). Ainsi, si un échantillon d'argilite de Tournemire est immergé dans une solution saline de NaCl , il se produira des échanges ioniques de la forme suivante :



Le gonflement plus ou moins important des argiles va dépendre de la nature du cation interfoliaire, ou plus précisément de son énergie d'hydratation. Les ions de sodium restent ainsi plus hydratés que les ions de potassium, en solution, mais aussi au sein même de l'espace interfoliaire. Les molécules d'eau occupant un certain volume, les argiles sodiques présentent généralement un gonflement plus prononcé. A contrario, une augmentation de la population échangeable en ions K^+ aura souvent pour effet de réduire le gonflement.

Le gonflement tire aussi son origine de la répulsion électrostatique entre les surfaces chargées des feuillets d'argile. Ce processus est sensible à la force ionique de la solution interstitielle (différente de l'espace interfoliaire). Une force ionique élevée (une charge en sel importante) réduira les forces électrostatiques et favorisera le retrait du matériau. Au contraire, une dilution de cette solution interstitielle induira du gonflement.

Enfin, il faut mentionner que les échanges ioniques qui sont de nature réversible peuvent évoluer dans le temps en fonction de la diffusion des ions et/ou de réactions chimiques de dissolution et de précipitation de cinétiques plus lentes.

6.4.2 Expérimentations

Les interactions physico-chimiques entre la roche et la solution qui l'immerge ont pour conséquence d'échanger des ions. Les mécanismes d'échange sont dus à la diffusion et à l'électro-chimie. Hadj-Hassen et al. ^[50] ont immergé des échantillons d'argilite de Lorraine dans l'eau ultra-pure en mesurant sa concentration en ions à différents moments. L'eau des pores de l'argilite de Lorraine est sensée être semblable à celle de l'eau des mines qui est riche en sodium. L'apparition des ions tels que Na^+ dans l'eau confirme que l'argilite de Lorraine n'agit pas comme une membrane semi-perméable idéale. Ce résultat confirme que le phénomène osmotique est amoindri.

Rabe et al. ^[97] ont trouvé des résultats semblables de diffusion d'ions et sont allés au-delà en approfondissant ces résultats par des analyses minéralogiques de l'argilite avant et après immersion pendant trois jours dans l'eau déminéralisée. Leurs résultats montrent que la roche n'a subi aucune altération chimique ce qui revient à dire que les ions apparaissant dans l'eau déminéralisée ne sont dus qu'à l'échange ionique entre l'eau des pores et l'eau entre les couches et la solution externe.

Dans cette partie, six essais ont été effectués :

le premier essai consiste à mesurer l'évolution du pH et de la conductivité de l'eau déminéralisée immergeant un échantillon d'argilite de Tournemire en fonction du temps.

L'eau déminéralisée présente initialement un pH égal à 5 et une conductivité nulle. Le pH indique si la solution est acide ($pH < 7$) ou basique ($pH > 7$) et est relié à l'activité des ions d'hydrogène H^+ par une fonction logarithmique : $pH = -\log [H^+]$.

La conductivité d'une solution dépend de la mobilité des ions et de leur concentration. Ces ions ont la propriété de conduire l'électricité lorsqu'ils sont placés dans un champ électrique entre deux électrodes maintenues à des potentiels différents.

Les évolutions de la conductivité électrique et du pH de la solution hydratante sont présentées sur la figure 6.20.

Cet essai montre que le fluide entourant l'échantillon passe d'un état acide à un état basique par diminution de la concentration en ions H^+ . L'augmentation de la conductivité est imputée à l'augmentation de la salinité de la solution. Ce résultat confirme celui obtenu sur l'argilite de Lorraine : il y a donc échange d'ions entre la roche et la solution.

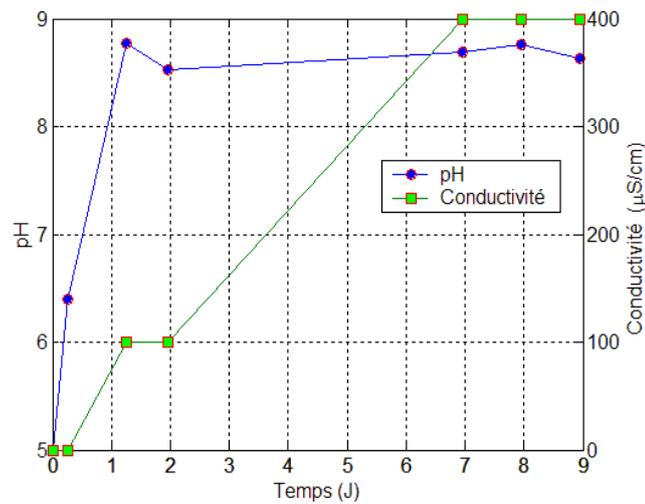


FIG. 6.20 – Conductivité et pH

Les cinq autres essais ont été effectués avec mesure du gonflement axial normal aux strates et du pH. Les solutions utilisées sont :

- 1 M NaCl
- 1 M KCl
- 1 M CaCl_2
- eau du robinet
- 1 M NaCl – eau déminéralisée

Les essais illustrés sur les figures suivantes montrent que le gonflement est plus rapide que l'échange ionique, il se stabilise tandis que le pH continue à évoluer. Cela est dû à l'ouverture des fissures qui facilite l'accès du fluide et sa diffusion dans l'échantillon. Par ailleurs, la cinétique d'échange ionique n'est pas reliée à la cinétique de gonflement ce qui va dans le même sens que les essais d'échange massique effectués sur l'argilite de Lorraine.

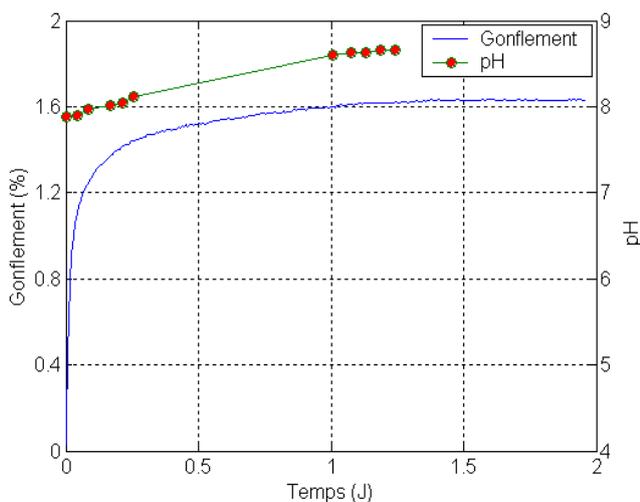


FIG. 6.21 – Gonflement et pH pour l'eau du robinet

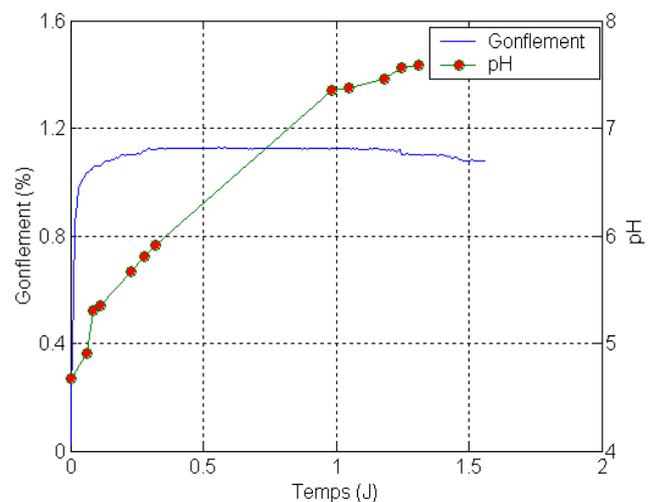


FIG. 6.22 – Gonflement et pH pour une solution de 1 M NaCl

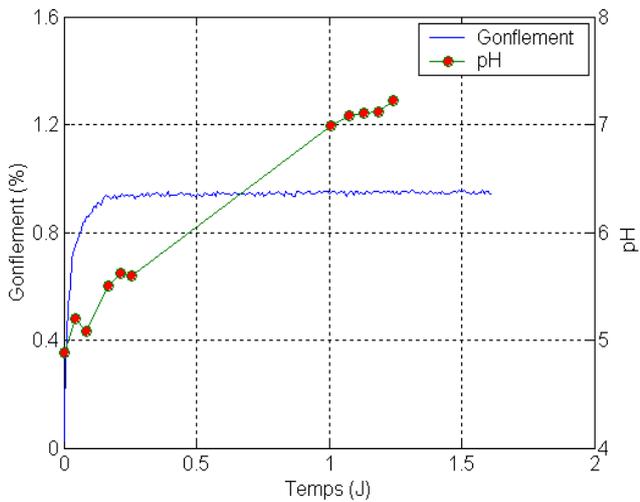


FIG. 6.23 – Gonflement et pH pour une solution de 1 M KCl

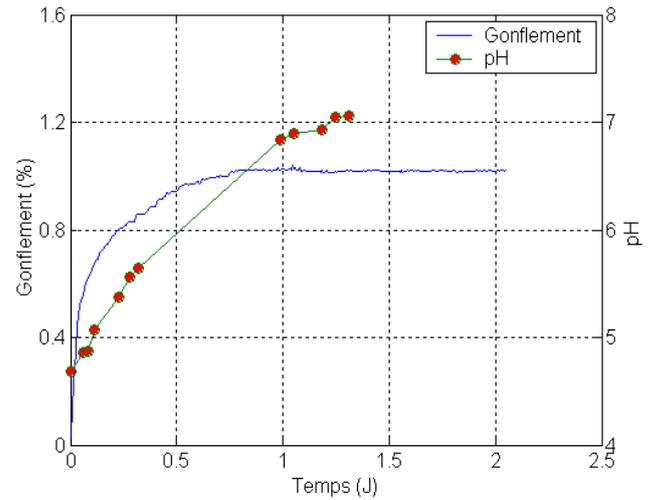


FIG. 6.24 – Gonflement et pH pour une solution de 1 M CaCl_2

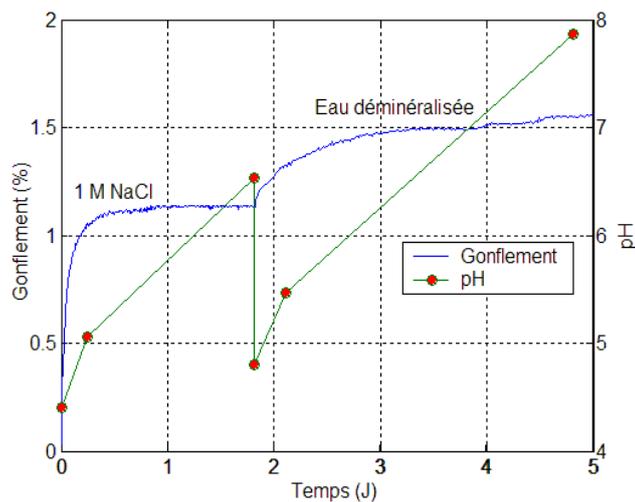


FIG. 6.25 – Gonflement et pH pour un chemin chimique 1 M NaCl – eau déminéralisée

Bien que le pH soit un bon indicateur des évolutions chimiques de la solution, il n'a pas d'effet sur le gonflement. Cela se traduit sur la figure 6.26 où l'on montre que, pour les solutions de NaCl, KCl et CaCl_2 de normalité 1 chacune, les variations du pH en fonction du temps sont presque similaires pour les 12 premières heures d'immersion. Au bout de 24 heures, le $\text{pH}_{\text{NaCl}} > \text{pH}_{\text{KCl}} > \text{pH}_{\text{CaCl}_2}$. Malgré le fait que le pH d'une solution de KCl est plus élevé que celui d'une solution de CaCl_2 , le gonflement engendré par une solution de KCl est le plus faible.

En effet, dans les argiles, il existe une interaction des ions avec la surface argileuse, faisant intervenir la capacité d'échange cationique mais sous une forme indépendante du pH. Il s'agit des ions compensant la charge structurale permanente de l'argile. Cette adsorption, indépendante du pH, est généralement attribuée à l'échange d'ions dans les interfeuillets, et résulte d'interactions électrostatiques entre les ions et la charge structurale permanente de l'argile.

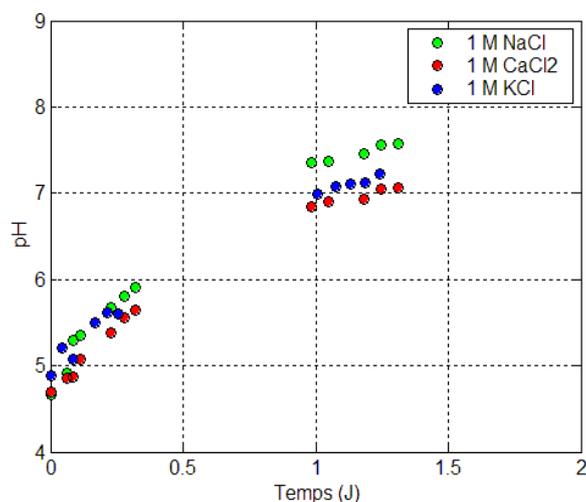


FIG. 6.26 – Variation du pH en fonction du temps pour des solutions de NaCl, KCl et CaCl₂

6.5 Conclusion

Les essais, effectués sur l'argilite de Tournemire, ont montré que les déformations dues au gonflement et au retrait sont influencées par la nature et la concentration en sel dissout dans l'eau déminéralisée. Le gonflement libre est plus élevé pour une solution de NaCl, plus faible pour une solution de KCl et intermédiaire pour une solution de CaCl₂. Ces déformations sont significatives et ne dépendent pas du chemin chimique suivi par l'échantillon pour des essais effectués sous faibles contraintes.

L'activité de la solution n'a pas d'influence directe sur le gonflement. L'utilisation de l'efficacité de l'argilite semble mieux convenir pour expliquer l'influence du type des cations présents dans la solution sur le gonflement.

Les essais effectués avec des solutions de NaCl ont également montré que le coefficient ξ , qui exprime le rapport entre la déformation axiale sous contrainte et la déformation libre, permet de réduire le nombre d'essais, étant donné qu'il dépend uniquement de la contrainte appliquée et non de la concentration en sel.

En outre, on a observé que le gonflement normalisé ne dépend pas de l'orientation de l'échantillon, ce qui signifie que l'anisotropie du gonflement est indépendante de la nature et de la concentration en sel et est égale à 4.

Les essais complémentaires réalisés au moyen de l'enceinte hygrométrique ont permis également d'affirmer ce constat.

Les essais de mesure de l'évolution du pH ont prouvé que le gonflement se stabilise avant la stabilisation du pH.

Troisième partie

Modélisation

Chapitre 7

Modélisation

7.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle de gonflement qui permet de reproduire les essais effectués sur l'argilite lorsqu'elle est mise en contact avec l'eau (gonflement triaxial, gonflement œdométrique, gonflement uniaxial et gonflement libre).

Les deux points importants qui guident le développement de la modélisation sont l'effet des contraintes et l'effet de l'anisotropie sur le gonflement.

Une fois ce modèle validé sur les essais, il est étendu pour rendre compte de l'effet du chimisme de la solution d'hydratation.

7.2 Modèle proposé

Le modèle proposé a été inspiré de l'étude bibliographique mais a été largement amélioré après une analyse détaillée des résultats des essais de laboratoire présentés précédemment. Les caractéristiques du modèle proviennent des principales remarques suivantes :

- Les résultats des essais réalisés sur des matériaux isotropes transverses ont clairement montré que le tenseur de déformation de gonflement libre ε^g est diagonal dans le repère d'orthotropie et que les deux valeurs propres ($\varepsilon_1^g, \varepsilon_2^g$), dans le plan de la schistosité, sont égales. Par ailleurs, le rapport ($\varepsilon_3^g/\varepsilon_1^g$) est constant durant toute la phase d'hydratation.
- Les essais de gonflement réalisés sous contraintes montrent indéniablement que le gonflement parallèle aux strates ε_1^g ne dépend que de la contrainte σ_1 et que le gonflement normal aux strates ε_3^g ne dépend que de la contrainte σ_3 . Cependant, les essais sous contraintes n'ont été réalisés que pour une stratification soit horizontale soit verticale, c'est-à-dire dans des configurations où le tenseur des contraintes $\underline{\sigma}$ est diagonal dans le repère d'orthotropie. On n'a pas la possibilité de généraliser le modèle au cas tridimensionnel.
- Dans tous les essais où la contrainte σ_3 est constante par palier, le gonflement ε_3^g à tout instant ne dépend que de la dernière valeur de la contrainte.
- Durant les essais de gonflement sous contraintes par palier, on remarque que, dans chaque palier, la déformation $\varepsilon^g(t)$ peut être représentée correctement par une fonction exponentielle.
- Cette dernière remarque est aussi valable lorsque la sollicitation chimique est constante par palier.

En accord avec l'expérimentation, à la stabilisation, l'équation 7.1 inspirée du modèle de la double couche ^[136] décrit la relation entre le gonflement et la contrainte suivant une direction principale i .

$$\varepsilon_i^{g\infty} = A_i \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^g} \right)^{c_i} \right] \cdot He(\sigma_i^g - \sigma_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7.1)$$

$\varepsilon_i^{g\infty}$ est le gonflement au temps infini (∞), A_i est le gonflement libre, σ_i est la contrainte appliquée, σ_i^g est la pression de gonflement et c_i est un facteur puissance des contraintes.

$He(x)$ est la fonction de Heaviside qui vaut 0 pour $x < 0$ et 1 pour $x > 0$.

7.2.1 Intégration du temps

La saturation des matériaux argileux induit des phénomènes physico-chimiques caractéristiques des minéraux argileux. Ces phénomènes se stabilisent lorsque l'équilibre physico-chimique est atteint.

La vitesse de gonflement, dans le repère d'orthotropie, est exprimée de la manière suivante :

$$\dot{\varepsilon}^g = \frac{1}{n_g} [\varepsilon^{g\infty} - \varepsilon^g] \quad (7.2)$$

n_g est un paramètre qui décrit la cinétique du gonflement.

Concernant la cinétique du gonflement n_g , elle est identique suivant la direction normale aux strates et suivant la direction parallèle à celles ci (Fig. 7.1 et Fig 7.2).

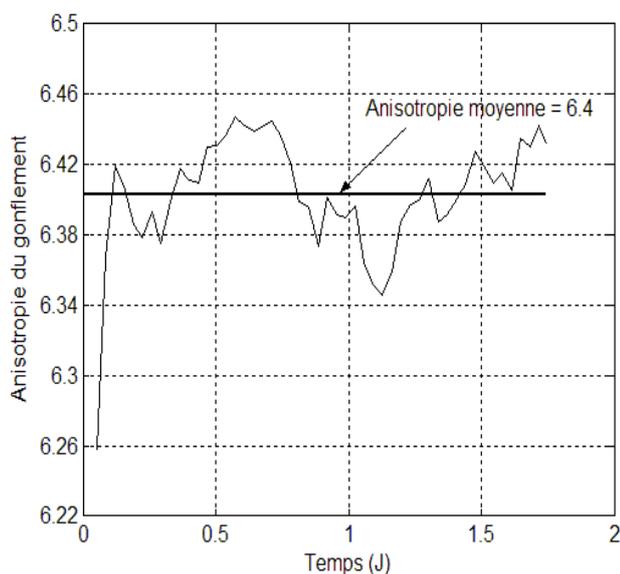


FIG. 7.1 – Évolution du coefficient d'anisotropie de l'argilite de Lorraine en fonction du temps

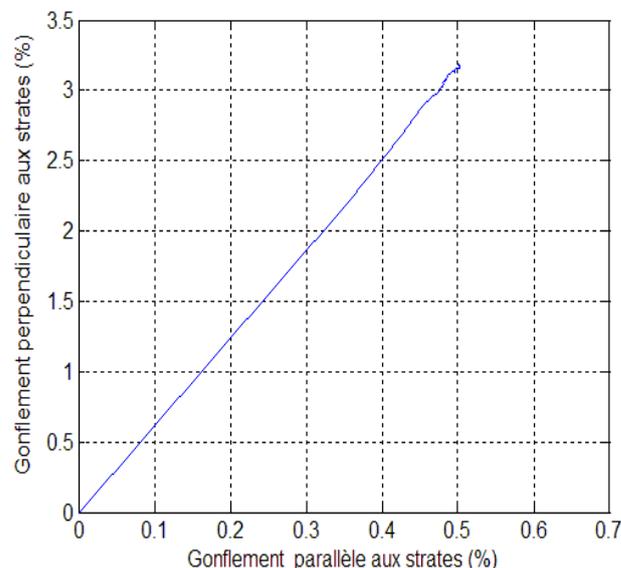


FIG. 7.2 – Variation du gonflement perpendiculaire aux strates avec le gonflement parallèle aux strates pour l'argilite de Lorraine

On constate que l'anisotropie du gonflement libre ne dépend pas du temps d'hydratation et conserve une valeur moyenne égale à 6.4. Alors, le gonflement suivant les deux directions principales a la même évolution dans le temps.

Dans la suite, on utilisera l'équation 7.2 pour modéliser les différents types d'essais réalisés.

7.2.2 Cas particuliers

Essais uniaxiaux et triaxiaux

Lorsque la roche présente une isotropie transverse, le gonflement dans le repère global est traité pour un seul ou pour plusieurs paliers de chargement.

Afin de faciliter la lisibilité des équations, on supposera que $\{H\} = \{\varepsilon^{g\infty}\}$ avec $H_{i,j}$ est le gonflement pour une direction i et pour le palier de contrainte j .

Pour un seul palier de chargement, en utilisant les équations 7.1 et 7.2, on peut déduire le gonflement pour une direction principale i :

$$\varepsilon_{i,1}^g(t) = H_{i,1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{n_g}\right) \right] \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7.3)$$

La cinétique du gonflement n_g correspond au temps lorsque :

$$\varepsilon_{i,1}^g(n_g) = 0.63.H_{i,1} \quad (7.4)$$

Pour plusieurs paliers de déchargement, le gonflement correspondant au palier j ($\varepsilon_{i,j}^g(t)$), au temps t et à une direction principale i , peut être écrit de la forme suivante :

$$\varepsilon_{i,j}^g(t) = \varepsilon_{i,1}^g(t) + \sum_{j=2}^n (H_{i,j} - H_{i,j-1}) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{t_{j-1} - t}{n_g}\right) \right] \cdot H_e(t - t_{j-1}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7.5)$$

t_{j-1} est le temps du début du palier j , et n est le nombre total de paliers de contraintes.

Essais œdométriques

Lorsque l'échantillon présentant une stratification horizontale est empêché de gonfler radialement, une déformation élastique, due à la pression de gonflement radial $\sigma_r(t)$ mesurée dans le cas du gonflement empêché, s'ajoute au gonflement axial ($\varepsilon_3^g(t)$) :

$$\varepsilon_3^{gO}(t) = \varepsilon_3^g(t) + \frac{\sigma_1(r)}{E} \cdot (1 - \nu) \quad (7.6)$$

Le gonflement additionnel, au temps de stabilisation, dû à la pression de gonflement radiale (0.26 MPa), est égal à $1.6 \cdot 10^{-3} \%$. Ce gonflement est faible par rapport au gonflement déterminé à l'aide des expérimentations. Dans la suite, cette pression radiale sera négligée.

Gonflement libre

Lorsque l'échantillon présentant une orientation α est libre de gonfler suivant toutes les directions, le gonflement axial ($\varepsilon_z^g(t)$), au centre de l'échantillon (lieu de l'emplacement du capteur de déplacement), déduit à partir de l'équation 7.2 et au moyen de la matrice du passage, est le suivant :

$$\varepsilon_z^g(t) = \varepsilon_3^g(t) \cdot \cos^2(\alpha) + \varepsilon_1^g(t) \cdot \sin^2(\alpha) \quad (7.7)$$

ε_3^g et ε_1^g sont respectivement le gonflement normal et le gonflement parallèle aux strates.

Anisotropie du gonflement

Pour un échantillon cylindrique subissant une contrainte axiale σ_a et une pression de confinement σ_r , l'anisotropie du gonflement est la suivante :

$$a_g(t) = \frac{\varepsilon_3^g}{\varepsilon_1^g} \quad (7.8)$$

En utilisant l'équation 7.3, on aboutit au coefficient d'anisotropie qui est constant et indépendant du temps d'hydratation :

$$a_g(t) = \frac{H_3(\sigma_a)}{H_1(\sigma_r)} \quad (7.9)$$

Dans le cas où $\sigma_a = \sigma_r = 0$, l'équation 7.7 peut être écrite de la forme suivante :

$$\varepsilon_z^g(t) = \varepsilon_3^g(t) \cdot \left[\cos^2(\alpha) + \frac{1}{a_g} \cdot \sin^2(\alpha) \right] \quad (7.10)$$

7.2.3 Ajustement du modèle

L'ajustement global du modèle sur l'ensemble des essais effectués a été réalisé par la méthode des moindres carrés au moyen d'un programme sous Matlab.

Le modèle proposé est composé de six paramètres caractérisant le gonflement final et un autre décrivant la cinétique du gonflement n_g .

Les six paramètres du gonflement final se décomposent en trois paramètres principaux ; chacun pour $\alpha = 0^0$ et $\alpha = 90^0$:

- gonflement libre,
- pression de gonflement,
- facteur puissance des contraintes.

En ce qui concerne la cinétique du gonflement, elle n'est pas unique pour tous les essais à cause de la manière de saturer l'échantillon qui dépend d'un dispositif à un autre. Par exemple, pour un essai de gonflement libre, le gonflement se stabilise en 5 heures, le gonflement œdométrique et le gonflement uniaxial se stabilisent en 12 heures. Le gonflement par la cellule triaxiale se stabilise en 48 heures.

Le modèle a été ajusté sur :

- quatre essais dont chacun dépend du chemin de déchargement de la contrainte axiale et pour $\alpha = 0^0$ (Fig. 7.3) :
 1. $\sigma_a = 0.7 - 0.4 - 0.2 - 0.1$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa,
 2. $\sigma_a = 1 - 0.7 - 0.5$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa,
 3. $\sigma_a = 3.5 - 2.5 - 1.5$ MPa et $\sigma_r = 1$ MPa,
 4. $\sigma_a = 4.5 - 3.5 - 2.5$ MPa et $\sigma_r = 1$ MPa.
- un essai de gonflement uniaxial pour $\alpha = 90^0$ et $\sigma_a = 0.7 - 0.4 - 0.2 - 0.1$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa (Fig. 7.4),
- trois essais de gonflement œdométrique (1.2, 0.6 et 0.1 MPa) pour $\alpha = 0^0$ (Fig. 7.5),
- quatre essais de gonflement libre pour $\alpha = 0^0, 30^0, 45^0, 90^0$ (Fig. 7.6).

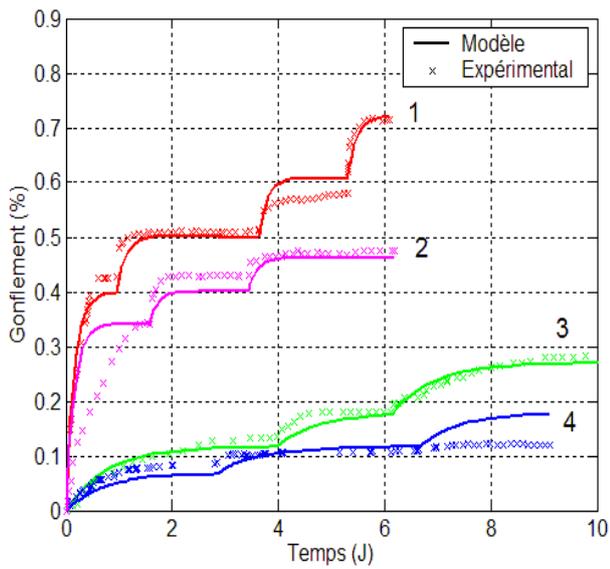


FIG. 7.3 – Ajustement des essais uniaxiaux et triaxiaux effectués sur l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^{\circ}$

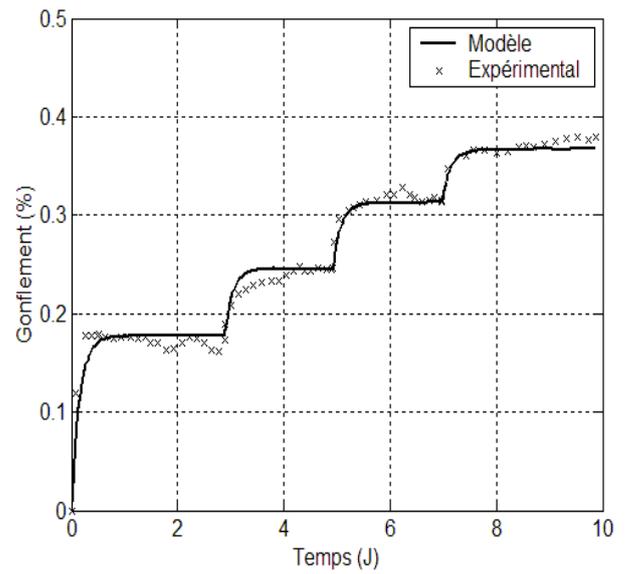


FIG. 7.4 – Ajustement d'un essai uniaxial effectué sur l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 90^{\circ}$

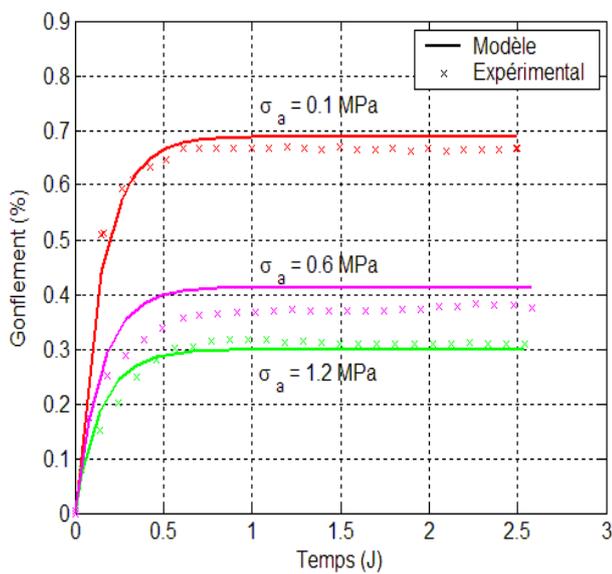


FIG. 7.5 – Ajustement des essais œdométriques effectués sur l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^{\circ}$

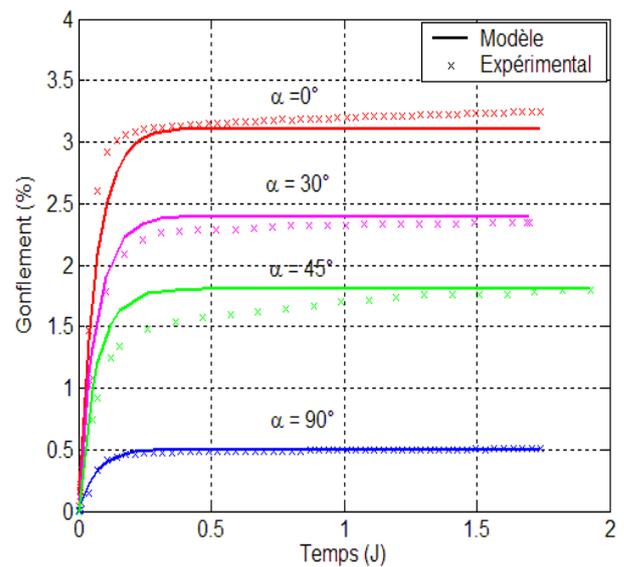


FIG. 7.6 – Ajustement des essais de gonflement libre effectués sur l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$

Au temps de stabilisation et pour deux orientations de l'échantillon ($\alpha = 0^0$ et $\alpha = 90^0$), les figures 7.7 et 7.8 représentent l'application du modèle sur tous les essais réalisés.

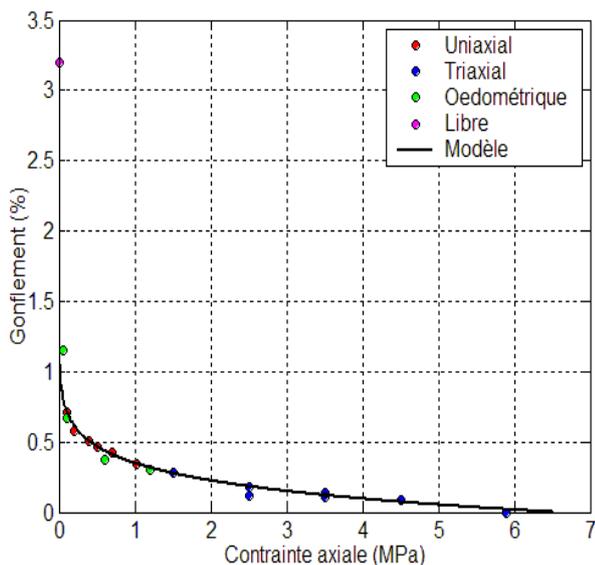


FIG. 7.7 – Ajustement du gonflement final de l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^0$

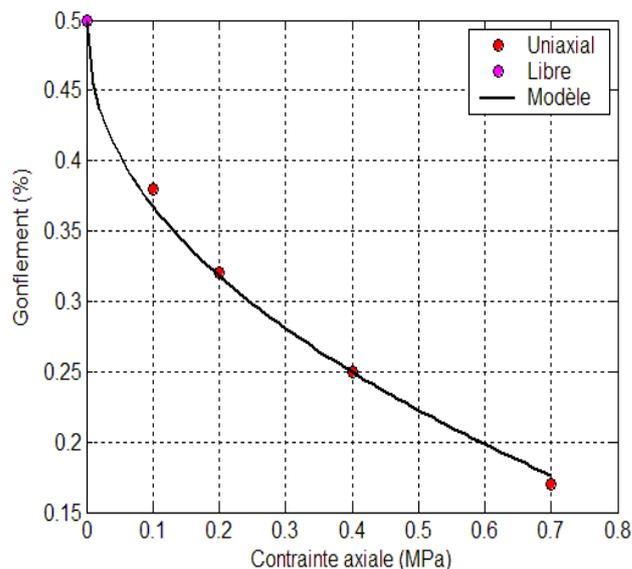


FIG. 7.8 – Ajustement du gonflement final de l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 90^0$

Paramètres du modèle

Les paramètres du modèle déduits par l'ajustement sont illustrés, pour les deux directions principales, dans le tableau suivant :

Paramètres	$\alpha = 0^0$	$\alpha = 90^0$
Pression de gonflement (MPa)	6.5	1.8
Gonflement libre (%)	3.2	0.5
Facteur puissance des contraintes c	0.06	0.46

TAB. 7.1 – Paramètres du modèle

L'anisotropie du gonflement a_g est égale à 6.4 et l'anisotropie de la pression de gonflement a_{pg} est égale à 3.6.

Le facteur puissance des contraintes pour $\alpha = 0^0$ est inférieur à celui pour $\alpha = 90^0$. Ce qui vérifie que l'application d'une faible contrainte suivant la direction normale aux strates réduit fortement le gonflement tout en restant supérieure au gonflement parallèle aux strates.

la méthodologie prévue pour limiter le nombre d'essais qui détermineraient les six paramètres du modèle est la suivante :

- réalisation d'un essai de gonflement libre sur un échantillon avec mesure du déplacement axial et radial,
- réalisation de deux essais uniaxiaux avec déchargement de la contrainte axiale.

Chaque série d'essais doit être effectuée pour une stratification horizontale et une stratification verticale.

La contrainte initialement appliquée ne doit pas être trop éloignée de la pression de gonflement

obtenue par ajustement et ce au moins pour un seul essai.

La cinétique du gonflement n_g dépendant de chaque type d'essai est présentée dans le tableau suivant :

Cinétique du gonflement	n_g (J)
Essai uniaxial et essai oedométrique	0.15
Essai de gonflement libre	0.06
Essai triaxial	0.7

TAB. 7.2 – Cinétique du gonflement n_g

Validation du modèle pour un essai de fluage-gonflement

Le modèle développé nous permet également de prédire le gonflement à la suite d'une phase de fluage. Hadj-Hassen et al. [50] ont effectué un essai uniaxial sur un échantillon d'argilite de Lorraine de stratification horizontale. Cet essai comprend trois phases :

- phase d'élasticité,
- phase de fluage,
- phase de gonflement suite à l'immersion de l'échantillon dans l'eau.

La contrainte axiale appliquée est maintenue constante durant l'essai et est égale à 1.2 MPa. Après 9 jours de fluage ($t_s=9$), l'échantillon est immergé dans l'eau.

Pour tenir compte des trois phases de déformation, la forme globale du modèle consiste à séparer chaque déformation de la façon suivante :

$$\varepsilon(t) = [\varepsilon^e + \varepsilon^f(t)] \cdot He(t_s - t) + \varepsilon^g(t) \cdot He(t - t_s) \quad (7.11)$$

ε^e , ε^f et ε^g sont respectivement la déformation élastique instantanée, le fluage et le gonflement, t_s est le temps d'immersion de l'échantillon dans l'eau.

Le fluage de l'éprouvette est déterminé au moyen du modèle visco-plastique de Lemaître mais généralisée aux matériaux anisotropes par Tijani [118]. Suivant la direction axiale, le modèle s'écrit de la forme suivante :

$$\varepsilon_3^f(t) = -\sqrt{A} \cdot \left(\frac{\sigma_a - \sigma_r}{k_\alpha} \right)^\beta \cdot t^\delta \quad (7.12)$$

Avec,

$$k_\alpha = \frac{k}{A^{(1+\frac{1}{\beta}) \cdot \frac{1}{2}}} \quad \text{et} \quad A = 1 + \frac{w}{4} \cdot \sin^2(2\alpha) \quad (7.13)$$

β , δ et k sont les paramètres classiques de Lemaître, w est un paramètre qui traduit l'anisotropie du fluage, il est égal à zéro dans le cas où le matériau présente un comportement isotrope.

Lorsque la stratification de l'échantillon est horizontale ($\alpha = 0^0$) et la pression de confinement est nulle, la déformation axiale est la suivante :

$$\varepsilon(t) = - \left[\frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{k} \right)^\beta \cdot t^\delta \right] \cdot He(t_s - t) + \left[A_3 \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_g} \right)^{c_3} \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-t}{n_g} \right) \right] \right] \cdot He(t - t_s) \quad (7.14)$$

Afin de justifier la validité du modèle de gonflement, on retient les mêmes paramètres du gonflement qui figurent dans le tableau 7.1.

La figure 7.9 illustre la confrontation du modèle avec les résultats expérimentaux. On en déduit que le modèle décrit d'une manière satisfaisante le gonflement après fluage.

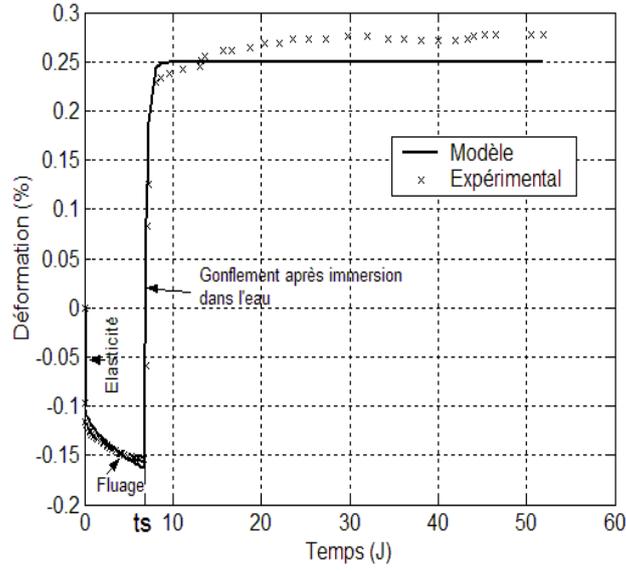


FIG. 7.9 – Application du modèle sur un essai de fluage-gonflement effectué sur l'argilite de Lorraine pour $\alpha = 0^0$

Lorsque le temps est exprimé en jour, les paramètres du modèle de fluage sont : $\beta = 1.23$, $\delta = 0.49$ et $k = 1.573 \cdot 10^3$.

7.3 Extension du modèle vers la chimie

Le modèle développé précédemment et appliqué uniquement dans le cas où la solution d'immersion est l'eau ($a_s = 1$) est étendu de telle manière à intégrer la nature du cation dans la solution (K^+ , Na^+ et Ca^{2+}) et la concentration en sel.

La forme générale du modèle garde la même structure que celle présentée par l'équation 7.1 mais l'effet du chimisme de la solution d'hydratation est incorporé dans le gonflement libre et la pression de gonflement.

$$\varepsilon_i^\infty(chimie) = A_i(chimie) \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^g(chimie)} \right)^{c_i} \right] \cdot He(\sigma_i^g(chimie) - \sigma_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7.15)$$

Le modèle est basé sur les résultats expérimentaux qui sont les suivants :

- un coefficient d'anisotropie a_g constant et indépendant du type et de la concentration en sel dans la solution,
- la réversibilité des déformations.

La concentration en sel a été introduite dans le modèle au moyen de l'activité de la solution qui peut être exprimée en fonction de la concentration en $NaCl$, KCl ou $CaCl_2$ par les équations : 2.2, 2.3 et 2.4 (page 17).

Deux cas sont à étudier :

1. déformations libres,
2. déformations sous contraintes.

7.3.1 Déformations libres

L'expression de la déformation libre (gonflement ou retrait) est inspirée du modèle de Chenevert ^[22] (Éq. 2.7, page 21) exprimant la pression de gonflement dans le cas du gonflement empêché en fonction du logarithme de l'activité de la solution à l'aide du coefficient de réflexion σ :

$$p_g = p_g^{eau} + \sigma \cdot \frac{R \cdot T}{V_m} \cdot [Ln(a_s)] \quad (7.16)$$

Le modèle proposé ressemble à l'équation 7.16 mais utilise la déformation normale aux strates au lieu de la pression de gonflement :

$$\varepsilon_3^\infty = A_3 - \alpha_s \cdot [-Ln(a_s)]^\beta \quad (7.17)$$

A_3 est le gonflement libre d'un échantillon immergé dans l'eau, a_s est l'activité de la solution saline. β et α_s sont des paramètres expérimentaux positifs.

β ne dépend pas de la solution saline. α_s est l'indice des déformations libres dépendant du type de cation dans la solution et de la réaction de la roche face à cette cation.

A partir de l'équation 7.17, on observe que ce n'est pas uniquement la contrainte qui annule le gonflement mais également une solution saline possédant une activité a_{sf} :

$$a_{sf} = \exp \left[- \left(\frac{A_3}{\alpha_s} \right)^{1/\beta} \right] \quad (7.18)$$

Connaissant a_{sf} , on peut en déduire la concentration C_f en sel (NaCl, KCl ou CaCl₂) nécessaire à dissoudre dans l'eau pour éliminer le gonflement.

En se basant sur l'hypothèse de réversibilité des déformations libres et sur les équations 7.2 et 7.17, le temps et les différents chemins chimiques sont intégrés pour des essais composés d'un seul chemin chimique ou de plusieurs.

Pour un essai monochimique effectué avec une solution d'activité $a_{s,1}$, la déformation normale aux strates est la suivante :

$$\varepsilon_{3,1}(t) = \left[A_3 - \alpha_{s,1} [-Ln(a_{s,1})]^\beta \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-t}{n_g} \right) \right] \quad (7.19)$$

Pour plusieurs chemins chimiques, la déformation normale aux strates pour un palier j ($\varepsilon_{3,j}$) et pour une solution caractérisée par une activité $a_{s,j}$ et par un coefficient $\alpha_{s,j}$ est la suivante :

$$\varepsilon_{3,j}(t) = \varepsilon_{3,1}(t) + \sum_{j=2}^n \left[\alpha_{s,j-1} \cdot [-Ln(a_{s,j-1})]^\beta - \alpha_{s,j} \cdot [-Ln(a_{s,j})]^\beta \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{t_{j-1} - t}{n_g} \right) \right] \cdot H_e(t - t_{j-1}) \quad (7.20)$$

Trois cas sont à envisager :

1. lorsque $\alpha_{s,j-1} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j-1})]^\beta - \alpha_{s,j} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j})]^\beta = 0$, la roche ne réagit pas,
2. lorsque $\alpha_{s,j-1} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j-1})]^\beta - \alpha_{s,j} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j})]^\beta > 0$, la roche gonfle,
3. lorsque $\alpha_{s,j-1} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j-1})]^\beta - \alpha_{s,j} \cdot [-\text{Ln}(a_{s,j})]^\beta < 0$, la roche se rétrécit.

Lorsque le chemin chimique est constitué de la même solution saline, $\alpha_{s,j-1} = \alpha_{s,j}$.

La déformation parallèle aux strates est déduite à partir du coefficient d'anisotropie a_g et de la déformation normale aux strates :

$$\varepsilon_{1,j}(t) = \frac{\varepsilon_{3,j}(t)}{a_g} \quad (7.21)$$

Pour un échantillon possédant une stratification inclinée, la déformation axiale est déterminée à l'aide de l'équation 7.10 et du coefficient d'anisotropie a_g .

Validation

Dans un premier temps, le modèle a été validé sur deux séries d'essais tirées des recherches bibliographiques afin d'appuyer notre argumentation qui est de démontrer que l'indice des déformations libres α_s joue un rôle primordial. Ces deux séries d'essais monochimiques, réalisées avec des solutions de NaCl, KCl et CaCl₂ à différentes concentrations, sont les suivants :

1. essais de gonflement libre effectués par Daupley ^[28] sur l'argilite de Tournemire pour $\alpha = 0^0$ (Fig. 7.10),
2. essais de gonflement libre effectués par Aboubeker et Mamoune ^[1] sur des échantillons de bentonite compactée (Fig. 7.11).

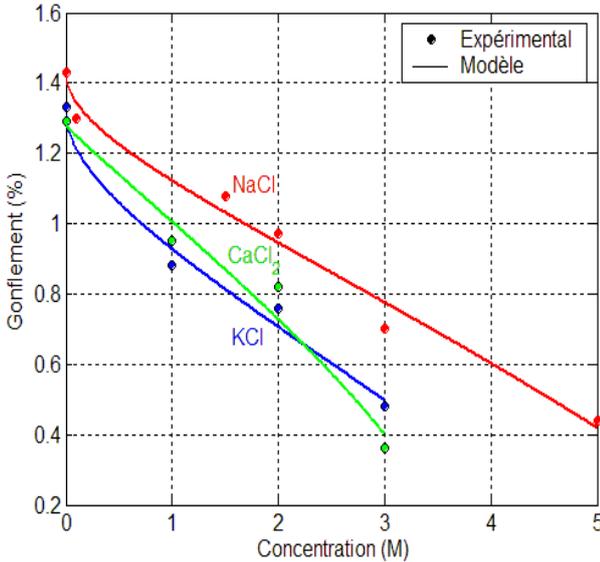


FIG. 7.10 – Ajustement des essais de gonflement libre de Daupley ^[28] pour $\alpha = 0^0$

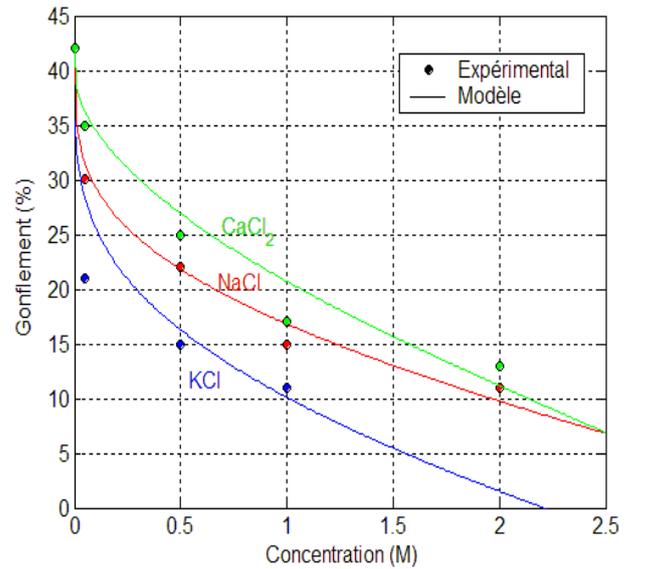


FIG. 7.11 – Ajustement des essais de gonflement libre d'Aboubeker et Mamoune ^[1]

Les tableaux 7.3 et 7.4 présentent les paramètres du modèle ainsi que l'activité de la solution a_{sf} et sa concentration molale C_f nécessaires pour éliminer le gonflement.

Solution	A_3 (%)	α_s (%)	β	a_{sf}	C_f (M)
NaCl	1.43	1.68	0.5	0.48	6.9
KCl	1.33	2.27	0.5	0.7	5.75
CaCl ₂	1.29	1.17	0.5	0.29	3.8

TAB. 7.3 – Paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f pour les essais de Daupley ^[28]

Pour l'argilite de Tournemire, on a besoin de dissoudre en moyenne 430 g de sel (NaCl, KCl et CaCl₂) dans un litre d'eau pour annuler le gonflement. Cette quantité est impossible à dissoudre.

Solution	A_3 (%)	α_s (%)	β	a_{sf}	C_f (M)
NaCl	42	63.42	0.27	0.8	3.7
KCl	42	81.72	0.27	0.91	2.043
CaCl ₂	42	45.96	0.27	0.48	3.13

TAB. 7.4 – Paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f pour les essais d'Aboubeker et Mamoune ^[1]

Dans un deuxième temps, le modèle a été validé sur des essais de gonflement libre effectués sur des échantillons d'argilite de Tournemire pour différentes orientations (0°, 45° et 90°) et pour un chemin chimique en concentration décroissante en NaCl (5, 3, 1 et 0 M). Le résultat de l'ajustement est présenté par la figure 7.12.

La procédure du calage adoptée s'appuie sur des valeurs du gonflement libre pour $a_s = 1$ de manière à déterminer le gonflement normal aux strates (A_3) et le coefficient d'anisotropie du gonflement (a_g). Connaissant a_g et A_3 , les seuls paramètres à ajuster sont : α_s , unique pour tous les chemins chimiques, et la cinétique du gonflement n_g .

Cette procédure a l'avantage de donner des résultats satisfaisants afin d'éviter de multiplier les essais.

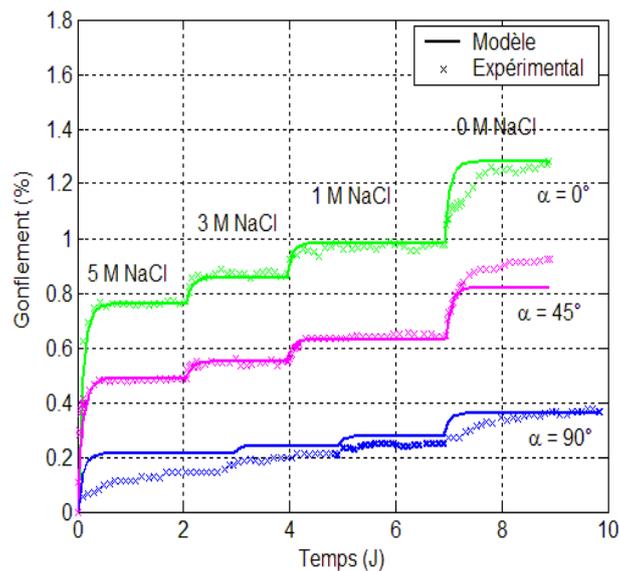


FIG. 7.12 – Ajustement des essais de gonflement libre effectués sur l'argilite de Tournemire pour un chemin chimique en concentration décroissante en NaCl et pour trois orientations de l'échantillon

Le tableau 7.5 illustre les paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f et montre qu'on a besoin de dissoudre 602 g de NaCl dans un litre d'eau afin d'éliminer le gonflement.

n_g (J)	a_g	A_3 (%)	α_s (%)	β	a_{sf}	C_f (M)
0.1	4	1.28	0.66	0.23	$1.8 \cdot 10^{-8}$	10.3

TAB. 7.5 – Paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f

7.3.2 Déformations sous contraintes

Lorsque l'échantillon présentant une stratification horizontale est soumis à une contrainte axiale et à une pression de confinement, les déformations suivant les directions principales peuvent être déduites au moyen des équations 7.3 et 7.5 en supposant que :

$$\{H\} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{a_g} \cdot [A_3 - \alpha_s [-Ln(a_s)]^\beta] \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_g^1 - \alpha_p [-Ln(a_s)]^\beta} \right)^{c_1} \right] \\ \frac{1}{a_g} \cdot [A_3 - \alpha_s [-Ln(a_s)]^\beta] \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_g^1 - \alpha_p [-Ln(a_s)]^\beta} \right)^{c_1} \right] \\ [A_3 - \alpha_s [-Ln(a_s)]^\beta] \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_g^3 - \alpha_p [-Ln(a_s)]^\beta} \right)^{c_3} \right] \end{array} \right\} \quad (7.22)$$

σ_g^i ($i=1, 3$) est la pression de gonflement à l'eau.

Le modèle contient, à côté des quatre paramètres identifiant les déformations libres ($A_3, a_g, \alpha_s, \beta$), cinq autres qui caractérisent l'effet de la contrainte sur le gonflement ($c_1, c_3, \sigma_g^1, \sigma_g^3, \alpha_p$).

Dans ce paragraphe, le modèle a été validé sur des essais uniaxiaux effectués par Wong ^[135] sur des échantillons de marne de Labiche de stratification horizontale immergés dans l'eau et dans des solutions de NaCl de normalité 0.17 et 0.5. Ces essais ont été considérés comme complets car ils s'étendent du gonflement nul au gonflement maximal.

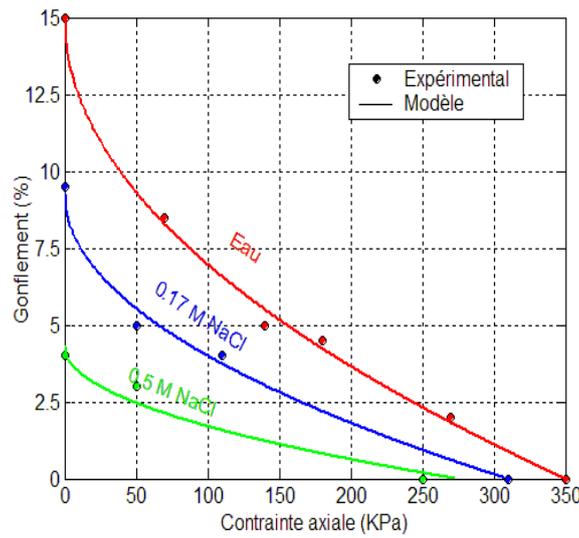


FIG. 7.13 – Ajustement des essais uniaxiaux de Wong ^[135]

Le tableau suivant illustre les paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f .

A_3 (%)	α_s (%)	β	a_{sf}	C_f (M)	α_p	c_3	σ_g^{eau} (MPa)
15	96.48	0.52	0.97	1	691	0.49	0.35

TAB. 7.6 – Paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f pour les essais uniaxiaux de Wong ^[135]

Pour différents chemins chimiques, les essais uniaxiaux, effectués dans le chapitre 6 sur des échantillons d'argilite de Tournemire de stratification horizontale, ont montré que pour une solution de NaCl le coefficient adimensionnel ξ est indépendant de la concentration en sel.

$$\xi = \frac{\varepsilon(\sigma)}{\varepsilon(\sigma = 0)} \quad (7.23)$$

En utilisant l'équation 7.22, ξ peut être écrit de la forme suivante :

$$\xi = \frac{H_3(\sigma_3 = 0)}{H_3(\sigma_3 = \sigma_a)} \quad (7.24)$$

Pour que ξ soit indépendant de la concentration en sel, il faut que α_p soit égal à zéro. Ce qui vaut à dire que la contrainte à appliquer pour annuler le gonflement est la même lorsque l'échantillon est mis en contact avec l'eau ou avec une solution de NaCl. Ce constat reste toujours à vérifier, étant donné que les contraintes appliquées durant les essais ne dépassent pas le 2.5 MPa.

Si on admet cette hypothèse, la réponse du modèle, sur des essais de gonflement-retrait pour quatre contraintes axiales (0, 0.5, 1.5 et 2.5 MPa) et pour un chemin chimique composé de : 0, 4, 0 et 4 M de NaCl, est présentée sur la figure 7.14.

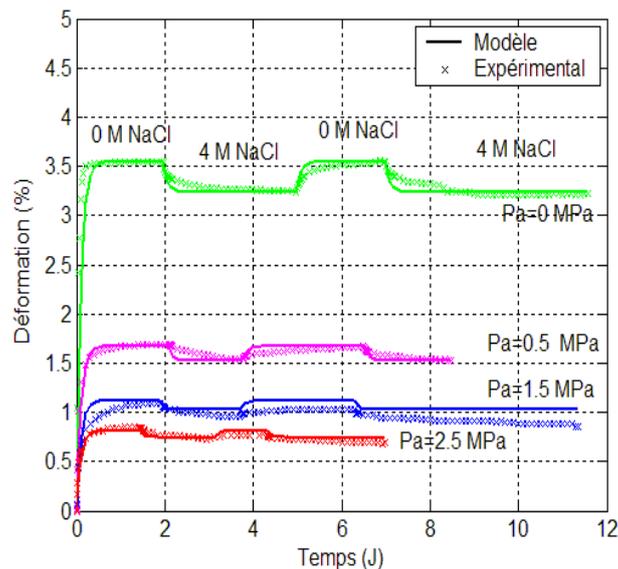


FIG. 7.14 – Ajustement des essais uniaxiaux effectués sur l'argilite de Tournemire, pour un chemin chimique en NaCl, pour quatre contraintes axiales et pour $\alpha = 0^0$

Les paramètres du modèle pour cette série d'essais figurent dans le tableau suivant :

n_g (J)	A_3 (%)	α_s (%)	β	a_{sf}	C_f (M)	α_p	c_3	σ_g^{eau} (MPa)
0.1	3.54	1.85	1.24	0.18	9	0	0.23	7.6

TAB. 7.7 – Paramètres du modèle ainsi que a_{sf} et C_f pour les essais uniaxiaux

Le modèle a été également ajusté sur trois essais. Les deux premiers sont des essais de gonflement en concentrations décroissantes en NaCl (5, 3, 1 et 0 M) pour des contraintes axiales (0 et 1 MPa). Le troisième essai a été uniquement effectué pour une contrainte axiale de 2 MPa et pour une concentration de 5 M en NaCl. Ce dernier essai n'a pas été poursuivi pour les autres concentrations en NaCl du fait d'une fuite dans le réservoir contenant la solution saline.

L'ajustement a été réalisé en prenant comme point de départ l'essai de gonflement libre afin de déterminer les trois paramètres caractéristiques du gonflement normal aux strates (A_3 , α_s et β). Après avoir obtenu ces paramètres, le modèle a été ajusté de telle manière à déterminer la pression de gonflement et le facteur puissance des contraintes. La figure 7.15 présente la réponse du modèle pour les paramètres illustrés dans le tableau suivant :

n_g (J)	A_3 (%)	α_s (%)	β	C_f (M)	α_p	c_3	σ_g^{eau} (MPa)
0.1	1.2	0.47	0.22	10.33	0	0.35	7.6

TAB. 7.8 – Paramètres du modèle ainsi que C_f pour les essais uniaxiaux

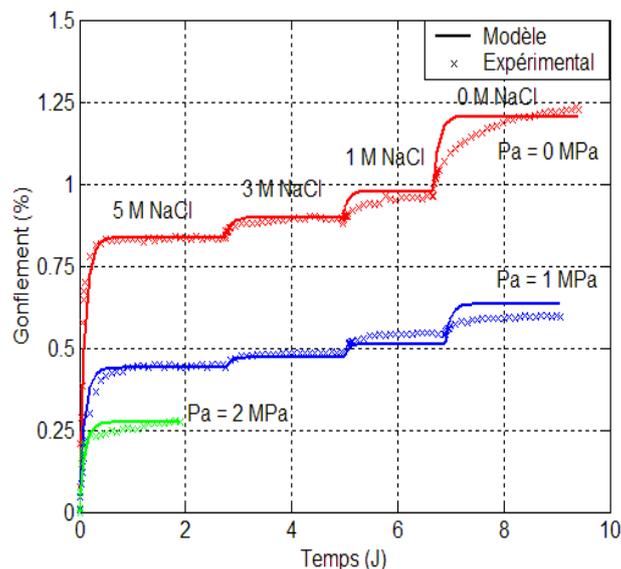


FIG. 7.15 – Ajustement des essais uniaxiaux effectués sur l'argilite de Tournemire, pour un chemin chimique en NaCl, pour trois contraintes axiales et pour $\alpha = 0^0$

Pour tous les essais effectués sur l'argilite de Tournemire, les paramètres du modèle ne sont pas identiques. La série d'essais présentée sur la figure 7.15 a des paramètres de gonflement libre proches

de ceux présentés sur la figure 7.12. Cependant, mis à part la pression de gonflement (7.6 MPa), les autres paramètres de la série d'essais de la figure 7.14 sont différents de ceux des autres séries.

Malgré l'insuffisance des essais en laboratoire, le modèle sous sa forme actuelle peut avoir une utilité pour les dimensionnements et l'étude des ouvrages creusés dans des formations argileuses (annexe D).

7.4 Conclusion

Le modèle présenté dans ce chapitre permet de décrire le gonflement d'une roche argileuse anisotrope lorsqu'elle est soumise à des sollicitations mécaniques et chimiques.

Dans un premier temps, le modèle a été formulé dans le cas particulier où la solution d'hydratation est l'eau naturelle. Ce modèle intégrant dans sa formulation théorique le temps permet de rendre compte des différentes phases de gonflement. Les essais effectués sur l'argilite de Lorraine nous ont permis de déterminer les sept paramètres du gonflement pour les deux directions principales. Pour différentes orientations de l'échantillon, la confrontation entre le modèle et les expérimentations est satisfaisante.

Dans un deuxième temps, l'influence du chimisme de la solution d'hydratation sur les déformations libres a été introduite par deux paramètres : la réactivité de la roche α_s par rapport au type de sel présent dans la solution et l'activité de la solution s qui permet de tenir compte de la concentration en sel.

Pour les essais de déformations libres (gonflement ou retrait), il faut déterminer quatre paramètres, pour une solution donnée, afin d'estimer suivant n'importe quelle direction le gonflement et aussi le retrait après gonflement (domaine saturée).

Par ailleurs, le modèle permet de déterminer la concentration en sel nécessaire pour annuler le gonflement. Pour les solutions salines utilisées (NaCl, KCl et CaCl₂), cette concentration est très élevée et est quasiment impossible à dissoudre dans l'eau.

En ce qui concerne les essais uniaxiaux, l'utilisation du coefficient ξ , considéré comme constant et indépendant de la concentration en sel, a permis de réduire le nombre de paramètres. Cependant, il est important de noter que l'utilisation de ce coefficient n'est pas significative sur des matériaux tendres (Fig. 7.13) présentant un potentiel de gonflement élevé et une pression de gonflement faible.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Cette recherche a permis de contribuer à une meilleure compréhension du comportement d'une roche argileuse anisotrope lorsqu'elle est confinée et mise en contact avec une solution aqueuse. L'intérêt a été particulièrement porté sur le gonflement et l'approche mise en oeuvre s'est appuyée sur une première phase d'expérimentation en laboratoire suivie d'une deuxième phase de modélisation.

Le travail bibliographique réalisé dans la première partie de cette thèse a mis en relief l'importance et les conséquences du gonflement sur la stabilité et le comportement des ouvrages creusés dans les matériaux argileux. Il a également permis de mettre en évidence la complexité de ce phénomène surtout à l'échelle microscopique en raison des nombreux mécanismes impliqués (adsorption, osmose, capillarité). Ces mécanismes ont été décrits et présentés d'un point de vue théorique et les approches de modélisation développées ont été analysées et discutées.

Notre recherche s'est intéressée en premier lieu à l'étude de l'aspect mécanique dans le but de comprendre et de modéliser le gonflement d'une roche argileuse anisotrope lorsqu'elle est au contact de l'eau. Les analyses effectuées et les résultats obtenus nous ont permis par la suite d'aborder plus facilement l'effet du chimisme de la solution d'hydratation sur le gonflement.

Pour parfaire cette recherche, plusieurs dispositifs expérimentaux ont été mis au point. Chacun de ces dispositifs avait un objectif bien précis. Afin d'étudier le gonflement et la pression de gonflement axial dans le cas d'un gonflement radial empêché, nous avons utilisé des cellules oedométriques. Dans le cas où l'échantillon gonfle radialement sans confinement, nous avons développé deux cellules uniaxiales. La première cellule nous a permis de mesurer le gonflement axial et le gonflement transversal lorsque l'échantillon présente une stratification horizontale. La deuxième, quant à elle, nous a permis d'évaluer le gonflement suivant les trois directions principales pour un échantillon à stratification verticale. L'utilisation de la cellule triaxiale a permis l'étude du gonflement axial d'un échantillon confiné latéralement.

Lorsque la solution d'hydratation est l'eau naturelle, nous avons montré que le gonflement libre et la pression de gonflement (déterminée par différentes méthodes) sont anisotropes et dominés par la direction normale aux strates. En effet, les essais ont montré que l'application d'une contrainte suivant une direction principale réduit le gonflement uniquement le long de cette direction. Le gonflement suivant les autres directions ne varie ni avec la contrainte appliquée ni avec le chemin de déchargement de la contrainte axiale. De même, le gonflement suivant une direction normale aux strates est plus sensible à la contrainte appliquée que le gonflement parallèle aux strates. Le confinement latéral n'a pas d'effet non plus sur le gonflement axial et cela a été vérifié en comparant le gonflement axial pour différents confinements.

Les résultats expérimentaux obtenus coïncident avec certains résultats existants dans la bibliographie.

Par ailleurs, en se basant sur ces résultats, nous avons pu conclure que l'essai uniaxial permet de décrire d'une façon très satisfaisante le gonflement d'une roche argileuse.

En ce qui concerne l'analyse chimique, les solutions d'hydratation utilisées étaient des solutions salines à différentes concentrations en sel (NaCl , KCl et CaCl_2) et les essais effectués étaient uniquement des essais uniaxiaux. Les résultats obtenus ont montré que l'activité de la solution saline justifie la diminution du gonflement avec la concentration pour un même type de sel mais reste insuffisante pour décrire le gonflement. Nous avons aussi observé que le gonflement ou le retrait sont quasi-indépendants du chemin chimique suivi par l'échantillon.

L'influence du chimisme de la solution d'hydratation est très prononcée dans le cas où l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte mécanique et diminue avec la contrainte appliquée. L'effet de la contrainte amoindrit l'effet de la nature de la solution d'hydratation. Le coefficient d'anisotropie du gonflement libre est quasi-indépendant de la concentration en sel dans la solution, autrement dit le gonflement normalisé pour n'importe quelle solution saline est identique que la stratification soit horizontale ou verticale. L'effet de la cinétique des échanges ioniques en terme de pH sur le gonflement a été aussi étudié et on a pu en déduire que le gonflement est plus rapide que les échanges ioniques.

Les analyses mécanique et chimique ont fait l'objet d'une étude théorique afin de modéliser le gonflement par une loi rhéologique. Cette loi a été validée, dans un premier temps, sur les essais effectués lorsque la solution d'hydratation est l'eau naturelle. Elle est caractérisée pour chaque direction principale par le gonflement libre, la pression de gonflement et le facteur puissance des contraintes. L'évolution du gonflement dans le temps est introduite par un terme exprimant la cinétique du gonflement.

Après avoir validé le modèle sur différents essais, le chimisme de la solution d'hydratation est introduit, tout d'abord en terme d'activité pour traduire l'effet de la concentration de la solution saline sur le gonflement, puis grâce à un autre terme qui est l'indice du gonflement libre qui permet d'illustrer la réactivité entre chaque type de cations avec la roche argileuse.

Ce travail de recherche a contribué à l'étude du phénomène de gonflement des argilites au contact d'une solution aqueuse. Evidemment, comme c'est le cas dans toute recherche, les résultats obtenus sont encore à affiner et à compléter.

Concernant l'influence de la contrainte appliquée sur le gonflement, nous recommandons la réalisation d'autres essais uniaxiaux et triaxiaux pour des échantillons à différentes orientations afin d'obtenir des informations plus précises et complètes sur le gonflement axial et si possible sur le gonflement radial au moyen de jauges résistantes à l'eau.

S'agissant de l'influence de la solution saline sur le gonflement, il serait nécessaire d'appliquer des contraintes axiales initiales élevées et de suivre un chemin de déchargement par palier. Cette méthodologie d'essais devrait être effectuée pour des solutions salines de différentes concentrations de telle manière à estimer pour chaque solution la pression nécessaire afin d'annuler le gonflement. Cette pression permettrait de vérifier si, lorsque la roche est soumise à de fortes contraintes, elle est influencée ou pas par le chimisme de la solution d'hydratation.

Nos essais ont été effectués dans le cas du gonflement libre pour décrire les échanges chimiques qui s'y opèrent. Ultérieurement, Il serait intéressant de soumettre l'échantillon à des contraintes axiales et de mesurer l'évolution du pH dans la solution d'hydratation. Ceci permettrait de mettre en évidence l'effet de la contrainte appliquée sur la cinétique de ces échanges.

Le facteur temps, intégré dans le modèle et traduisant l'idée que la roche se sature rapidement, ne peut pas refléter les cas les plus rencontrés in-situ où il existe une source d'eau bien localisée dans l'espace et alimentant progressivement le gonflement. Il faudrait donc mieux rendre compte de

la propagation de l'eau dans la roche argileuse stratifiée en choisissant la loi d'écoulement la plus appropriée.

Enfin, l'intégration de la chimie dans le modèle est limitée pour des solutions contenant un seul type de sel. Il faudrait par la suite développer un modèle plus global qui prend en compte la minéralogie de la roche, les forces électrostatiques et la nature de la solution d'hydratation.

Bibliographie

- [1] N. Aboubeker et S.M. Mamoune. Stabilisation des sols gonflants par des sels. *Colloque International de Géotechnique*, pages 415–422, Beyrouth, 2004.
- [2] M. Aboushook. *Contribution à l'étude quantitative du gonflement des sols argileux : Application à des sols intacts de la zone urbaine du Caire*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1984.
- [3] A.S. Al-Hamoud, A. Basma, A.I. Hussein, et M.A. Al Bashabsheh. Cyclique behavior of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(7), pages 562–565, 1995.
- [4] M. Al-Mukhtar, J.C. Touray, et F. Bergaya. Une argile modèle pour l'étude du gonflement des sols argileux : La Laponite-Na de synthèse. *Compte-Rendus à l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la terre et des planètes*, (329), pages 239–242, 1999.
- [5] A.M. Al-Shamarani et A.W. Dhonian. Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soil. *Engineering Geology*, 2133, pages 1–19, 2002.
- [6] E. E. Alonso, A. Gens, et A. Josa. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40(3), pages 405–430, 1990.
- [7] G. Anagnostou. A model for swelling rock in tunneling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26(4), pages 307–331, 1993.
- [8] F. Andy. Laboratory evaluation of lateral swelling pressure. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(10), pages 1481–1486, 1989.
- [9] C. Baeur-Plaindoux, D. Tessier, et M. Ghoreychi. Propriétés mécaniques des roches argileuses carbonatées : importance de la relation calcite-argile. *Compte-Rendus à l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la terre et des planètes*, (326), pages 231–237, 1998.
- [10] S.L. Barbour et D.G. Fredlund. Mechanism of osmotic flow and volume change in clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 26, pages 551–562, 1989.
- [11] A.A. Basma et A.S. Al-Hamoud. Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Applied Clay Sciences*, (9), pages 355–368, 1994.
- [12] K. Bediar. *Sur certains aspects des couplages dans les milieux poreux électrisés : Application à l'électro-osmose dans les argiles*. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2001. 212 pages.
- [13] T.H. Bennett et M.H. Hulbert. Clay microstructure. *Boston : IHRDC*.
- [14] M. Bilir et Y.V. Muftuoglu. A computer-controlled triaxial swelling test apparatus. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, (28), pages 269–280, 2004.
- [15] A.W. Bishop. The principle of effective stress. *Technisk Ukeblad*, 106(39), pages 859–863, 1959.
- [16] A.W. Bishop et G.E. Blight. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Géotechnique*, 13(3), pages 177–197, 1963.

- [17] J.A. Blatz, J. Graham, et N.A. Chandler. Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, pages 1005–1015, 2002.
- [18] M. Brignoli et F.J. Santarelli. Capillary effects in sedimentary rocks : application to reservoir water flooding. *Rock Mechanics*, 90(5), pages 619–625, 1995.
- [19] R.F. Bruzewski et N.B. Aughenbaugh. Effects of weather on mine ventilation. *Mining Congress Journal*, 63(9), pages 23–25, 1977.
- [20] F. Bultel. *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels*. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2001. 290 pages.
- [21] F.H. Chen. *Foundation on expansive clays*. Amsterdam, Elsevier edition, 1975.
- [22] M.E. Chenevert. Shale control with balanced activity oil continuous muds. *Journal of Petroleum Technology*, pages 1309–1316, 1973.
- [23] M.E. Chenevert et V. Pernot. Control of shale swelling pressures using inhibitive water-base muds. *Society of Petroleum Engineers*, (49263), 1998.
- [24] D. Croney, J.D. Coleman, et W.P.M. Black. The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. *Highway research Board special report*, (40), 1958.
- [25] Y.J. Cui, P. Delage, et P. Alzoghbi. *Étude du comportement des loess sur le trace du TGV Nord, rapport final*. 1997. 85 pages.
- [26] V. Dakshanamurthy. A new method to predict swelling using hyperbolic equation. *Geotechnical engineering*, 9, pages 29–38, 1978.
- [27] V. Dakshanamurthy. A stress controlled study of swelling characteristics of compacted expansive clays. *Geotechnical Testing Journal*, 2(1), pages 57–60, 1979.
- [28] X. Daupley. *Étude du potentiel de l'eau interstitielle d'une roche argileuse et de relations entre ses propriétés hydriques et mécaniques. Application aux argilites de Torcien de la région de Tournemire*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Géologie de l'Ingénieur, 1997. 172 pages.
- [29] R.W. Day. Swell-shrink behavior of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(3), pages 618–623, 1994.
- [30] P. Delage, G.P.R. Suraj De Silva, et E. De Laure. Un nouvel appareil triaxial pour les sols non saturés. *9ième ICSMFE*, volume 1, pages 26–28, Dubbin, 1987.
- [31] A.E. Dif et W.F. Bluemel. Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, 14(1), pages 96–102, 1991.
- [32] L. Dormieux, P. Barboux, O. Coussy, et P. Dangla. A macroscopic model for the swelling phenomenon of a saturated clay. *European Journal of Mechanics of solids*, 14(6), pages 981–1004, 1995.
- [33] M. Duilio. *Comportement hydromécanique et microstructural des matériaux de barrières ouvragées*. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, CERMES, France, 2003.
- [34] A. Dzialowski, A. Hale, et S. Mahajan. Lubricity and wear of shale : Effects of drilling fluids and mechanical parameters. *Society of Petroleum Engineers*, (25730), 1998.
- [35] E.M. Van Eeckhout. The mechanism of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (13) :, pages 61–67, 1976.

- [36] H. Einstein et N. Bischoff. Dimensionnement des tunnels en roche gonflante. *Tunnels et ouvrages en souterrains*, (15), pages 109–119, 1975.
- [37] R.T. Ewy et R.J. Stankovich. Pore pressure change due to shale fluid interactions : Measurements under simulated wellbore conditions. *Proceedings Pacific Rocks*, pages 147–154, Seattle, 2000.
- [38] C. Fonseca et M. Chenevert. The effect of total stress and temperature on water activity of shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(5), page 97, 1998.
- [39] J.C. Fooks et M.B. Dusseault. Strength of pierre shale as function of moisture content. *Eurock 96*, pages 77–82, 1996.
- [40] J.A. Franklin. A ring swell test for measuring swelling and shrinkage characteristics of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 21(3), pages 113–121, 1984.
- [41] D.G. Fredlund, N.R. Morgenstern, et R.A. Widger. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15, pages 313–321, 1978.
- [42] H. Freissmuth. *Influence de l'eau sur le comportement mécanique des roches argileuses*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, CGES, 2002. 121 pages.
- [43] S.J. Fritz et I.W. Marine. Experimental support for a predictive osmotic model of clay membranes. *Geochimica et Cosmochimica, Acta*, 47, pages 1515–1522, 1983.
- [44] J.A. Froehlich. Géologie et constructions des tunnels : gonflement des roches argileuses. *Rock at great depth*, pages 537–544. Maury & Fourmintaux edition, 1989.
- [45] H. El Gamali, M. Tabet, et A. El Hajjam. Détermination de la pression de gonflement à l'appareil triaxial. *Revue Marocaine de génie civil*, (52), pages 70–76, 1994.
- [46] M. Gasc-Barbier. *Étude des mécanismes de déformation de roches argileuses profondes : Apport de la microstructure et des analyses pétrophysiques*. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI, 2002. 212 pages.
- [47] A. Ghassemi et A. Diek. Linear chemo-poroelasticity for swelling shales : theory and application. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38, pages 199–212, 2003.
- [48] K.V.G.K. Gokhale et K.K. Jain. Anisotropic swelling in black cotton soil. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (5), pages 63–71, 2000.
- [49] H. Grob. Schwelldruck im belchentunnel. *Berichte International Symposium Untertagebau*, pages 99–119, Luzern.
- [50] F. Hadj-Hassen, D. Gordine, H. Accarie, et S. Huet-Taillanter. *Houillères du bassin de Lorraine. Étude en laboratoire du comportement des schistes sous l'influence de l'eau*. 2002. Rapport interne, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, CGES.
- [51] A.H. Hale et F.K. Mody. The influence of chemical potential on wellbore stability. *Society of Petroleum Engineers*, (23885), 1993.
- [52] A.B. Hawkins et B.J. McConnell. Sensibility of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 25, pages 115–130, 1992.
- [53] B.C. Hawlader, Y.N. Lee, et K.Y. Lo. Three-dimensional stress effects on time-dependent swelling behavior of shaly rocks. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pages 501–511, 2003.
- [54] R.M. Holt, E.F. Sonstebø, et R. Skaffestad. Fluid acoustic wave propagation in shales. *Eurock 96*, pages 83–90, 1996.

- [55] P. Horsud et E.F. Sonstebo. Interaction between shale and water-based drilling fluids : laboratory exposure tests give new insight into mechanisms and field consequences of KCl content. *Society of Petroleum Engineers*, (48986), 1998.
- [56] H. Huang et J.J. Azar. Numerical simulation and experimental studies of shale interaction with water-base drilling fluid. *Society of Petroleum Engineers*, (47796), 1998.
- [57] S.L. Huang, N.B. Aughenbaugh, et J.D. Rockaway. Swelling pressure studies of shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 23(5), pages 371–377, 1986.
- [58] S.L. Huang, R.C. Speck, et Z. Wang. The temperature effect on swelling of shales under cyclic wetting and drying. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 32(3), pages 227–236, 1995.
- [59] J. Huder et G. Amberg. Quellung in mergel, opalinuston und anhydrit. *Schweizerische Bauzeitung*, 45, pages 975–980, 1970.
- [60] T.A. Hueckel. Water-mineral interaction in hygromechanics of clays exposed to environmental loads : a mixture- theory approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, pages 1086–1071, 1992.
- [61] Y. Ichikawa, K. Kawamura, M. Nakano, K. Kitayama, et H. Kawamura. Unified molecular dynamics and homogenization analysis for bentonite behavior : current results and future possibilities. *Engineering Geology*, 54, pages 21–31, 1999.
- [62] M. Iltis. *Contribution à l'étude du traitement des argiles gonflantes en cours de forage*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1979. 110 pages.
- [63] J.E.B. Jennings et J.B. Burland. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. *Géotechnique*, 12(2), pages 125–144, 1962.
- [64] L.D. Johnson. Horizontal and vertical swell pressures from triaxial test : feasibility study. *Geotechnical Testing Journal*, 12(3), pages 117–124, 1989.
- [65] M. Kabbaj. *Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et du gonflement anisotrope d'une bentonite compactée*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1981. 105 pages.
- [66] R.D. Katti et V. Shanmugasundaram. Influence of swelling on the microstructure of expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, pages 175–182, 2000.
- [67] TH. J. S. Keijzer et J.P.G. Loch. Chemical osmosis in compacted dredging sludge. *Soil Sci. Soc. Am. journal*, 65, pages 1045–1055, 2001.
- [68] S. Khaddaj. *Étude en laboratoire du gonflement des argiles des Flandres*. Thèse de Doctorat, laboratoire de Mécanique de Lille, Université des Sciences et Technologie, 1992. 99 pages.
- [69] J.R. Kiehl. Ein dreidimensionales quellgesetz und seine anwendung auf den felshohlraum. *9th Natn. Felsmechanik Symp.*, pages 185–207, Aachen-Germany, 1990.
- [70] H. Komine et N. Ogata. Prediction for swelling characteristics of compacted bentonite. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pages 11–22, 1996.
- [71] A. Komornik et M. Livneh. The effect of anisotropy on swelling of a compacted clay. *Asian Conference*, pages 181–185, 1967.
- [72] M. Lal. Shale stability : drilling fluid interaction and shale strength. *Society of Petroleum Engineers*, (54356), 1999.
- [73] T.W. Lambe. A mechanistic picture of shear strength in clay. *ASCE Research Conference on shear strength of cohesive soils*, pages 555–580, University of Colorado, Boulder, Co., 1960.

- [74] I. Lefevbre et A. Lajudie. Détermination des capacités d'échange des argiles, corrélation avec certaines propriétés physico-chimiques, 1987. Note technique C.E.A, SESD/87.11.
- [75] D. Levêque. *Géologie Appliquée au Génie Civil, au Génie Nucléaire et à l'Environnement*. Paris, Lavoisier tec & do edition, 1984.
- [76] K.Y. Lo et Y.N. Lee. Time-dependent deformation behavior of queenston shale. *Canadian Geotechnical Journal*, 27, pages 461–471, 1990.
- [77] C. Loiseau. *Transfert d'eau et couplages hydromécaniques dans les barrières ouvragées*. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, CERMES.
- [78] R.F. Lomba, M.E. Chenevert, et M.M. Sharma. The ion selective membrane behavior of native shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, pages 9–23, 2000.
- [79] F.T. Madsen. Determination of the swelling pressure of claystones and marlstones using mineralogical data. *Congrès I.M.R.*, volume 1.
- [80] F.T. Madsen. Suggested methods for laboratory testing of swelling rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (36), pages 291–306, 1999.
- [81] F.T. Madsen et M. Muller-Vonmoos. Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a jurassic opalinum shale, switzerland. *Clays and Clay Minerals*, 33, pages 109–129, 1985.
- [82] R.T. Martin. A review of adsorbed water on clay. *9th National conference on clays and clay minerals*.
- [83] J.K. Mitchell. *Fundamentals of soil behavior*, pages 111–130. Number 2. New-York, John Wiley & Sons edition, 1993.
- [84] M.M. Molenaar et J.M. Huyghe. A constitutive model for swelling shales. *Society of Petroleum Engineers*, (47332), 1998.
- [85] H.G. Montes, X. Dauplay, L. Martinez, S. Escoffier, et D. Rousset. Structural modifications of callovo-oxfordian argilite under hydration/dehydration conditions. *Applied Clay Science*, 25, pages 187–194, 2004.
- [86] N.R. Morgenstern et B. Balasubramonran. Effects of pore fluid on the swelling of clay-shale. *4th International Conference on Expansive soils*, pages 190–205, Denver, 1980.
- [87] P. Mouroux, P. Magron, et J.C. Pinte. *La construction économique sur sols gonflants, Manuels et Méthodes*. Number 14. Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières edition, 1987.
- [88] S. Murayama et N. Yagi. Swelling of mudstone due to sucking of water. *First Congress of Rock Mechanics*, pages 495–498, Lisboan, 1966.
- [89] H.V. Olphen. *An introduction to clay colloid chemistry*, pages 251–279. John Wiley & Sons edition, 1963.
- [90] Van Olphen. Unit layer interaction in hydrous montmorillonite systems. *Journal Colloid Sci.*, (17), pages 660–667, 1963.
- [91] A. Onaisi, C. Durand, et A. Audibert. Role of hydration state of shales in borehole stability studies. *Eurock 94*, pages 275–284, 1994.
- [92] E. Van Oort. On the physical and chemical stability of shales. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1051, pages 1–23, 2003.

- [93] E. Van Oort, A.H. Hale, et F.K. Mody. Critical parameters in modeling the chemical aspects of borehole stability in shales and in designing improved water based shale drilling fluids. *Society of Petroleum Engineers*, (28309), 1994.
- [94] E. Van Oort, A.H. Hale, et F.K. Mody. Transport in shales and the design of improved water based shale drilling fluids. *SPE, Drilling and Completion*, pages 137–146, 1996.
- [95] Ph. Parcevaux. *Étude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1980. 266 pages.
- [96] ANDRA Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs. Est : Etat des connaissances et programme d'expérimentation. Janvier 1997.
- [97] C. Rabe, S.A. Barreto da Fantoura, et F.S. Antunes. Experimental study of interaction shale-fluid through immersion tests. *Engenharia Térmica, Edicao Especial*, pages 22–28, 2002.
- [98] N. Ramambasoa. *Étude du comportement hydromécanique des argilites. Application au site de Tournemire*. Thèse de Doctorat, École Polytechnique, Paris, 2001. 182 pages.
- [99] A. Robert. *Les tunnels en terrains gonflants, Formation continue*. Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées edition, 1990.
- [100] A. Robert et D. Fabre. *Rapport sur le gonflement*. 1987. Comité Français de Mécanique des Roches, Groupe de travail : Rupture en souterrain.
- [101] Z.H.E. Rogatkina. Effect of anisotropy of clay soils on their physico mechanical properties. *Fundamenty I Mechanika Gruntov*, number 1, pages 14–15. Osnovaniya, 1967.
- [102] D.J. Russel et A. Parker. Geotechnical, mineralogical and chemical interrelationships in weathering profiles of an overconsolidated clay. *Quarterly Journal Of Engineering Geology*, 12, pages 107–116, 1979.
- [103] M.R. Santos, A. Diek, et J.C. Roegiers. Capillary forces : how important are the effects on shale breakage in laboratory testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(4-5), pages 94, 1998.
- [104] M.R. Santos, A. Diek, J.C. Roegiers, et A.B. Fantoura. Investigation of the effects of sample handling procedures on shale properties. *Rock Mechanics*, pages 951–958. Hassan & Mitri edition, 1996.
- [105] R. Schlemmer, J.E. Friedheim, F.B. Growcock, J.A. Headley, et S.C. Polnaszek. Membrane efficiency in shale - an empirical evaluation of drilling fluid chemistries and implications of fluid design. *Society of Petroleum Engineers*, (74557), 2002.
- [106] L. Schmitt, T. Forsans, et J. Santarelli. Shale testing and capillary phenomena. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 31(5), pages 411–427, 1994.
- [107] H.B. Sedd, J.K. Mitchell, et C.K. Chan. Swell and swell pressure characteristics of compacted clay. *Highway Research Board Bulletin*, (313), pages 12–39, 1962.
- [108] N. Babu Shanker, A. Srirama Rao, et A.S.R. Swamy. Swelling behavior of undisturbed and remolded samples of black cotton clay. *Indian Geotechnical Journal*, 12(2), pages 152–159, 1982.
- [109] J.D. Sherwood. Ionic transport in swelling shale. *Advances in colloid and interface Science*, 61, pages 51–64, 1995.
- [110] H. Shimada, M. Ichinose, et K. Matsui. An experimental study of swelling strain in some argillaceous rocks by means of an improved unconfined swelling test. *Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction*. Jean & Moon edition. ISBN 89-953134-0-4, pages 227-234, 2002.

- [111] P.V. Sivapullaiach, A. Sridharan, et V.K. Stalin. Swelling behavior of soil-bentonite mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, pages 808–814, 1996.
- [112] E.F. Sonstebø. Effects of brines on mechanical properties of shales under different test conditions. *Eurock 96*.
- [113] A. Sridharan, A. Sreepada Rao, et P.V. Sivapullaich. Swelling pressure of clays. *Geotechnical Testing Journal*, 9(1), pages 24–33, 1986.
- [114] A. Sridharan et G. Venkatappa Rao. Shear strength behavior of saturated clays and the role of effective stress concept. *Géotechnique*, 29(2), pages 177–193, 1979.
- [115] R.P. Steiger. Advanced triaxial swelling tests on preserved shale cores. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30(7), pages 681–685, 1993.
- [116] R.K. Taylor. Coal measures mudrocks : composition, classification and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21, pages 85–99, 1988.
- [117] B.K.G. Theng. *Formation and properties of clay polymer complexes*. New-York, Elsevier edition, 1977.
- [118] M. Tijani. L’anisotropie transverse. *Rapport interne du CGES-ENSMP*.
- [119] M. Tijani. Notice d’utilisation du viplef. *École des Mines de Paris, CGES*.
- [120] T.R. Harper T.R., G. Appel, M.W. Pendleton, J.S. Szymanski, et R.K. Taylor. Swelling strain development in sedimentary rock in northern New-York. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16(5), pages 805–816, 1979.
- [121] M. Tuller et D. Or. Hydraulic functions for swelling soils : pore scale considerations. *Journal of hydrology*, 272, pages 50–71, 2003.
- [122] F. Valès, D. Nguyen Minh, H. Gharbi, et A. Rejeb. Experimental study of the influence of the degree of saturation on physical and mechanical properties in Tournemire shale. *Rapport, École Polytechnique, LMS*, 2004.
- [123] B. Vayssade. *Contribution à l’étude du gonflement interparticulaire des sols argileux*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1978.
- [124] T. Verdel. *Géotechnique et monuments historiques*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1993. 282 pages.
- [125] O. Vincké, P. Longuemare, M. Boutéca, et J.P. Delfandre. Investigation of the poromechanical behavior of shales in the elastic domain. *Society of Petroleum Engineers*, (47589), pages 515–520, 1998.
- [126] R.G. Wan, G. Achari, R. Schacter, R. Joshi, et P.J. McLellan. Effect of drilling fluids on shear strength properties of fernie shales. *Rock Mechanics*, pages 973–979. Hassan & Mitri edition, 1996.
- [127] Z.W. Wang, S.L. Huang, et R.C. Speck. Swelling behavior of shales in cold regions. *Journal of Cold Region Engineering*, 8(1), pages 21–34, 1994.
- [128] S.J. Wheeler et V. Sivakumar. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Géotechnique*, 45(1), pages 35–53, 1995.
- [129] B.N. Whittaker, R.N. Singh, et G. Sun. *Rock Fracture Mechanics : Principles, design and applications : Developments in Geotechnical Engineering*, volume 71. Elsevier edition, 1992.
- [130] T. Windal. *Étude en laboratoire du gonflement des sols : mise au point d’un œdomètre flexible et étude du gonflement tridimensionnel*. Thèse de Doctorat, laboratoire de Mécanique de Lille, Université des Sciences et Technologie, 2001. 128 pages.

-
- [131] L. De Windt, J. van der Lee, et J.M. Schmitt. Modélisation en géochimie des eaux. *Techniques de l'Ingénieur*, 2005.
- [132] W. Wittke. *Fundamentals for the design and construction of tunnels located in swelling rock and their use during construction of the turning loop of the subway Stuttgart*. Institute R.W.T.H University, Aachen, Germany, 1978.
- [133] W. Wittke. *Rocks Mechanics : Theory and Applications with case Histories*. Springer-Verlag edition, 1990.
- [134] W. Wittke et B. Pierau. Fundamentals for the design and construction of tunnels in swelling rock. *4th ICRM Montreux*, volume 2, pages 719–729, France, 1979.
- [135] R.C.K. Wong. Swelling and softening behavior of la biche shale. *Canadian Geotechnical Journal*, 35, pages 206–221, 1998.
- [136] R.C.K. Wong et E.Z. WANG. Three dimensional anisotropic swelling model for clay shale - a fabric approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(2), pages 187–198, 1997.
- [137] M.M. Yesil, A.G. Pasamehmetoglu, et T. Bozdog. Technical note, a triaxial swelling test apparatus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30(4), pages 443–450, 1993.
- [138] C.H. Yew, F.K. Mody, et A.H. Hale. A study of shale pore pressure change by the salinity of drilling fluid. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 30(7), pages 1201–1204, 1993.
- [139] R.N. Yong et A.M.O. Mohamed. A study of particle interaction energies in wetting of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, pages 1060–1070, 1992.
- [140] R.N. Yong et B.P. Warkentin. Soil properties and behaviour. *Elsevier Science, Amesterdam*.
- [141] Z.H.Zhou, R.Z.Huang, et Y.F.Chen. Constitutive equations of shale and clay swelling : Theoretical model and laboratory test under confining pressure. *Society of Petroleum Engineers*, (22382), 1992.

Quatrième partie

Annexes

Annexe A

Effet de la saturation ou de la désaturation sur les caractéristiques mécaniques des matériaux argileux

A.1 Introduction

Le gonflement ou le retrait des roches argileuses entraîne l'ouverture des fissures et la création d'autres fissures du fait de phénomène d'adsorption ou de désorption responsable de la rupture des minéraux silicatés jouant le rôle d'un ciment interparticulaire ^[102, 52].

En effet, l'hydratation des roches argileuses peut aboutir à une dégradation complète comme c'est le cas de l'argilite de Bure ^[42] ou à une dégradation locale.

Les réactions physico-chimiques liées à l'interaction entre l'eau et les minéraux argileux font apparaître un comportement ductile de la roche argileuse. Néanmoins, la désaturation rend la roche plus fragile ^[17].

La réduction des propriétés mécaniques des roches argileuses est reliée à la quantité d'eau adsorbée ^[19] et elle se manifeste par une diminution de la résistance à la compression simple et des propriétés élastiques et plastiques.

Van Eeckhout ^[35] a donné plusieurs interprétations concernant la dégradation des propriétés mécaniques des argilites due au changement de leur degré de saturation :

- l'adsorption de molécules d'eau réduit l'énergie de surface et favorise la propagation des fissures,
- l'interaction chimique entre la matrice solide et le fluide hydratant,
- l'augmentation de la pression des pores,
- la diminution du coefficient de frottement des microfissures,
- l'effet de la succion capillaire.

Hadj-Hassen et al. ^[50] ont effectué des essais de compression simple et triaxiale sur des éprouvettes d'argilite orthotrope de Lorraine. Leurs essais indiquent une diminution de 70 % de la résistance à la compression simple et de 80 % du module de Young lorsque la teneur en eau passe de 1.2 % à 5 %..

Wan et al. ^[126] ont utilisé l'appareil de Casagrande afin d'effectuer des essais de cisaillement simple sur des roches argileuses saturées dans différentes solutions chimiques. Les auteurs ont constaté une diminution de l'angle de frottement entre l'état initial et l'état de saturation et ont mis en évidence l'effet du chimisme de la solution d'hydratation sur cette diminution.

La température intervient également par l'accélération des réactions chimiques entre les minéraux argileux et l'eau interstitielle conduisant à une diminution des caractéristiques mécaniques [129].

A.2 Comparaison entre le comportement des sols argileux et des roches argileuses face à la désaturation

Lorsque les matériaux argileux sont exposés à une atmosphère sèche, ils réagissent par désorption des molécules d'eau ce qui entraîne des modifications chimiques à proximité de la surface des minéraux argileux. En effet, le comportement mécanique des sols argileux non saturés diffère de celui des roches argileuses non saturées.

Les essais à succion contrôlée de Delage et al. [30] effectués avec l'appareil triaxial osmotique montrent une augmentation du déviateur à la rupture, une augmentation de la cohésion et une diminution de l'angle de frottement avec l'augmentation de la succion pour un limon peu plastique.

Dans le plan de Mohr-Coulomb, en contraintes totales, un bon alignement des états de contraintes à la rupture est constaté pour des échantillons testés à la même succion (Fig. A.1).

Cependant, les essais triaxiaux à succion contrôlée effectués sur le Kaolin montre que l'angle de frottement reste intact avec la diminution de la succion. Il n'y a que la cohésion qui baisse [128].

L'argilite de Tournemire ne présente pas une telle augmentation de la résistance à la compression en fonction de la succion. Les essais de Valès et al. [122] en sont les meilleurs témoins. Pour une stratification horizontale qui correspond à $\theta = 90^\circ$, la résistance à la compression est plus élevée pour un échantillon de degré de saturation de 0.45 que pour un autre échantillon de degré de saturation de 0.2 (Fig. A.2).

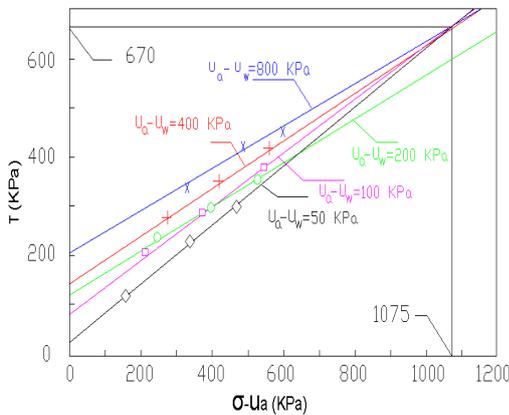


FIG. A.1 – Critère de Mohr-Coulomb pour différentes succions [30]

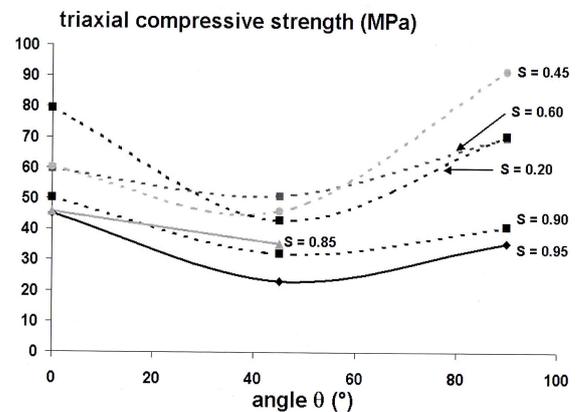


FIG. A.2 – Variation de la résistance à la compression pour un confinement de 2.5 MPa [122]

On peut conclure que la désaturation des sols argileux induit une rigidification du matériau par augmentation de ses caractéristiques mécaniques.

Cependant, pour les roches argileuses, la rigidification intervient jusqu'à un certain palier d'humidité. Au delà de ce palier, les caractéristiques mécaniques de la roche s'affaiblissent. L'augmentation suivie d'une diminution de la résistance mécanique peut s'expliquer par un changement de la microtexture du matériau dû à l'apparition de microfissures.

L'hydratation des matériaux argileux réduit alors leur résistance mécanique. Cependant, l'influence de la déshydratation reste le problème le plus ambigu.

A.3 Modèles de comportement

Les modèles de comportement, qui existent dans la littérature, concernent la partie élastique ou plastique. Ils essaient de relier la résistance à la compression, le module de Young et le coefficient du Poisson à la teneur en eau, au degré de saturation ou à la succion. Ces modèles ne prennent pas en compte les réactions physico-chimiques qui se génèrent au niveau des feuillets argileux et supposent que :

- la saturation dégrade le matériau argileux,
- la désaturation rigidifie le matériau argileux.

A.4 Résistance à la compression simple

La diminution de la résistance à la compression simple R_c avec l'augmentation du degré de saturation S_r a été étudiée par Schmitt et al. ^[106] et Brignoli et Santarelli ^[18]. Les auteurs ont mis l'accent sur l'influence de la géométrie des pores et du rayon capillaire sur la dégradation des propriétés mécaniques.

Leur formulation théorique est basée sur la succion capillaire et sur les contraintes effectives de Bishop.

Pour une pression d'air égale à la pression atmosphérique, la résistance à la compression simple peut être écrite de la manière suivante :

$$R_c = R_{c0} - \frac{2 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \cdot \chi \cdot u_w \quad (\text{A.1})$$

R_{c0} est la résistance à la compression simple pour $S_r = 1$, ϕ est l'angle de frottement, χ est un paramètre qui dépend du degré de saturation et u_w est la pression de l'eau à l'intérieur des pores. Avec :

$$\chi = \chi_1 + \chi_2 \cdot S_r, \quad \chi = 1 \text{ pour } S_r = 1.$$

D'après la loi de Jurin (Éq. 2.8, page 23), pour $u_a = 0$, on peut écrire :

$$-u_w = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta_c}{r_c} \quad (\text{A.2})$$

Hawkins et Mconnel ^[52] ont montré que les grès riches en minéraux argileux présentent une diminution de 32 % de la résistance à la compression simple entre l'état sec et l'état saturé. Les auteurs ont exprimé la variation de la résistance à la compression simple σ_c en fonction de la teneur en eau w par une expression exponentielle de la forme suivante :

$$\sigma_c = a \cdot e^{-b \cdot w} + c \quad (\text{A.3})$$

a, b, c sont les paramètres du modèle.

A.5 Compression triaxiale

Les critères de rupture existants sont structurés à partir du modèle de Mohr-Coulomb avec la prise en compte de la teneur en eau ou de la succion.

Des essais de compression simple et triaxiaux ont été réalisés par Fooks et Dusseault ^[39] sur des

roches argileuses à différentes teneurs en eau initiales. Ces essais montrent une diminution de la cohésion, de l'angle de frottement, de la résistance du pic et de la vitesse du son avec l'augmentation de la teneur en eau.

Les auteurs ont formulé une relation linéaire entre la vitesse du son v à la teneur en eau w et une relation polynomiale de la ligne de rupture de type Mohr-Coulomb :

$$V = -\alpha.w + \beta \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = (-\alpha_1.w + \alpha_2) \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \alpha_3.w + \alpha_4 \quad (\text{A.5})$$

σ_1 et σ_3 sont respectivement la contrainte axiale et la contrainte radiale, $\alpha, \beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ sont les paramètres du modèle.

En tenant compte de la succion ψ , Fredlund et al. ^[41] ont exprimé la ligne de rupture de Mohr-Coulomb de la manière suivante :

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c' \cdot \cos \phi' + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - u_a \right) \cdot \sin \phi' + (u_a - u_w) \cdot \left(\Theta^k \cdot \sin \phi' \right). \quad (\text{A.6})$$

Avec :

$$\Theta = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\ln \left(\exp(1) + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right)^m} \right] \quad (\text{A.7})$$

c' est la cohésion qui est invariable avec le changement de la succion, ϕ' est l'angle de frottement à l'état saturé, ψ_r est la succion à l'état résiduelle, et m, n, a, k sont les paramètres du modèle.

A.6 Module de Young et coefficient de Poisson

Seed et al. ^[107] ont considéré que la diminution de la cohésion et du module de Young est reliée au gonflement volumique de l'échantillon de la manière suivante :

$$c = c_i \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_{v0}} \right)^m \right] \quad (\text{A.8})$$

$$E = E_i \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_{v0}} \right)^k \right] \quad (\text{A.9})$$

c_i est la cohésion pour le matériau intact, ε_v est la déformation volumique, ε_{v0} est la déformation volumique normalisée, E_i est le module de Young pour le matériau intact, et m, k sont des constantes.

Grâce aux essais triaxiaux sur des argilites, Onaisi et al. ^[91] ont relié la cohésion à l'état saturé C , la cohésion apparente C_a et l'angle de frottement ϕ (supposé invariant avec la variation de la succion) à la succion matricielle p_s :

$$C_a = C + p_s \cdot \text{tg} \phi \quad (\text{A.10})$$

A.7 Cas de l'argilite de Lorraine

Le modèle de Fooks et Dusseault est appliqué sur des roches orthotropes d'argilite de Lorraine dont on dispose d'essais de mesure de la variation de vitesse du son en fonction de la teneur en eau ainsi que des essais à la rupture pour l'état initial et saturé.

La figure A.3 nous permet de conclure que la vitesse relative du son varie linéairement avec la teneur en eau, ce qui justifie l'utilité d'adopter l'approche de Fooks et Dusseault.

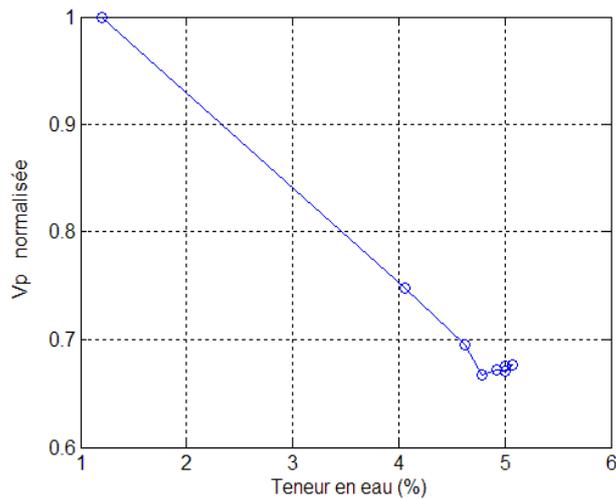


FIG. A.3 – Variation de la vitesse relative du son en fonction de la teneur en eau

Dans le plan de Mohr-Coulomb, la figure A.4 présente les deux droites de rupture pour une teneur en eau de 1.1 % correspondant à l'état initial et pour une teneur en eau de 5 % correspondant à l'état de saturation.

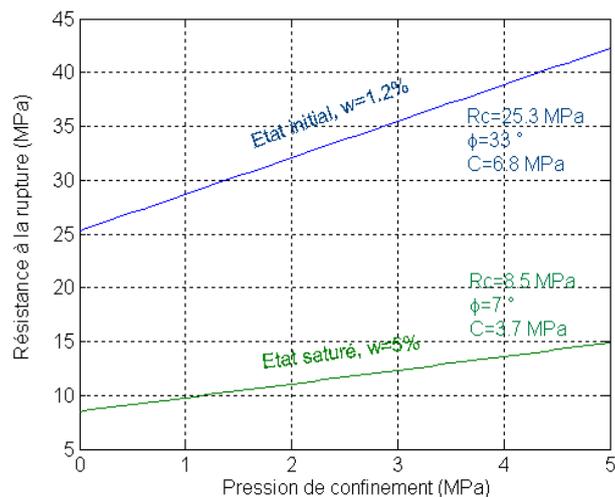


FIG. A.4 – Les droites de rupture de Mohr-Coulomb pour deux différentes teneurs en eau

En déterminant les paramètres du modèle par la résolution des équations à quatre inconnues pour deux teneurs en eau, on obtient :

$\alpha_1=11.12$, $\alpha_2=0.67$, $\alpha_3=53.3$ et $\alpha_4=6.4$.

A partir de ces paramètres, on peut estimer les variations de la cohésion, de l'angle de frottement et de la résistance à la compression avec la teneur en eau (Fig. A.5, Fig. A.6 et Fig. A.7).

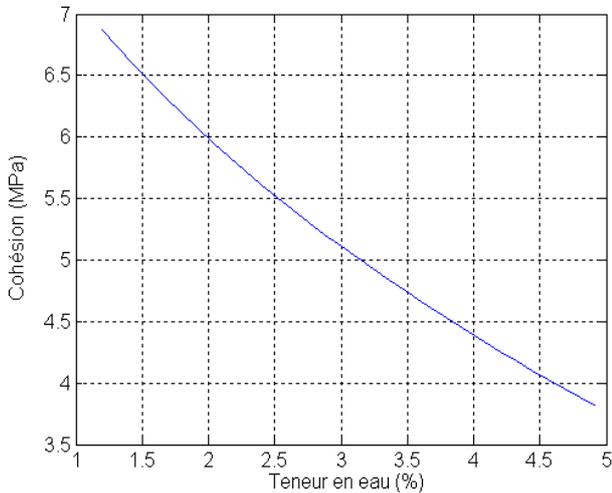


FIG. A.5 – Variation de la cohésion en fonction de la teneur en eau

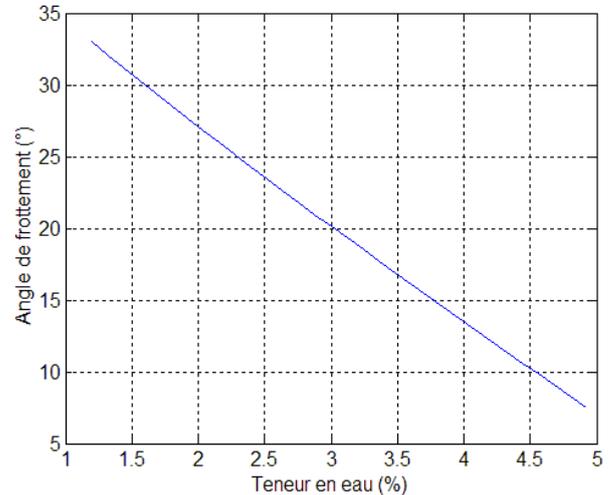


FIG. A.6 – Variation de l'angle de frottement en fonction de la teneur en eau

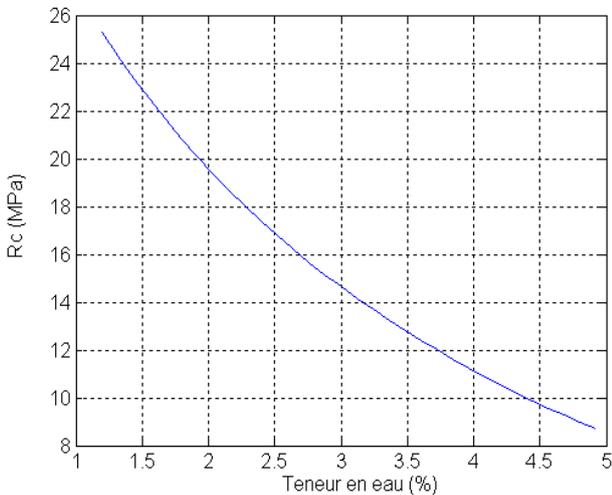


FIG. A.7 – Variation de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en eau

Il faut noter que ces variations sont uniquement valables dans le cas où l'essai de compression est effectué sur des échantillons préalablement hydratés sous contrainte nulle.

La contrainte initialement appliquée durant l'hydratation peut avoir une influence considérable sur le comportement des échantillons car le gonflement dégradant les liaisons cimentées diminue avec cette contrainte.

Annexe B

Essais unidimensionnels

B.1 Introduction

Les essais unidimensionnels de mesure du gonflement et de la pression de gonflement sont les plus utilisés car ils sont recommandés par des normes internationales et grâce à leur simplicité de mise en œuvre. Ces essais sont divisés en différentes méthodes :

La méthode du prégonflement est recommandée par le C.E.B.T.P. et consiste à laisser l'échantillon gonfler sous contrainte nulle jusqu'à ce qu'il atteigne la stabilisation. Une fois la stabilisation atteinte, on ramène l'échantillon à sa taille initiale par paliers de chargement croissant avec stabilisation des déformations sous chaque palier. La contrainte qu'il faut appliquer pour ramener l'échantillon à sa taille initiale est la pression de gonflement (Fig. B.1).

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne suit pas les chemins de contraintes in situ et entraîne la modification de la structure interne du matériau. Techniquement, son défaut consiste en des difficultés à maîtriser le frottement entre l'échantillon et la cellule œdométrique.

L'avantage de cet essai est l'utilisation d'une seule éprouvette et une possibilité de mesurer le gonflement libre et la pression de gonflement par un seul essai.

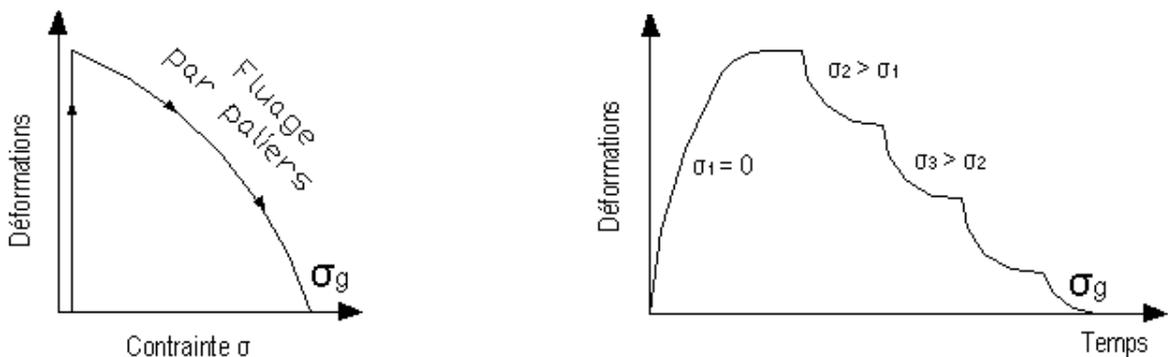


FIG. B.1 – Méthode du prégonflement

La méthode du gonflement en parallèle est recommandée par A.F.N.O.R. et nécessite quatre ou cinq essais de gonflement réalisés sur des échantillons identiques pour différentes pressions axiales. La pression de gonflement correspond à la contrainte axiale qu'il faut appliquer pour empêcher la génération du gonflement. Elle est souvent déterminée par extrapolation (Fig. B.2).

Cette méthode présente l'avantage de soumettre le matériau argileux à des conditions proches de celles in situ [11, 113].



FIG. B.2 – Méthode du gonflement en parallèle

La méthode de double œdomètre nécessite d'effectuer deux types d'essais sur deux échantillons identiques.

Le premier essai est un essai de gonflement libre par immersion de l'échantillon dans l'eau. Le deuxième est un essai de fluage multipaliers en contraintes croissantes.

La différence de la déformation entre chaque palier de fluage et le gonflement libre nous permet de déterminer le gonflement pour chaque contrainte appliquée. La pression de gonflement correspond alors à la contrainte où la différence de déformation est égale à zéro (Fig. B.3).

L'inconvénient de cette méthode est que les deux échantillons ne présentent pas la même teneur en eau durant l'évolution des déformations.

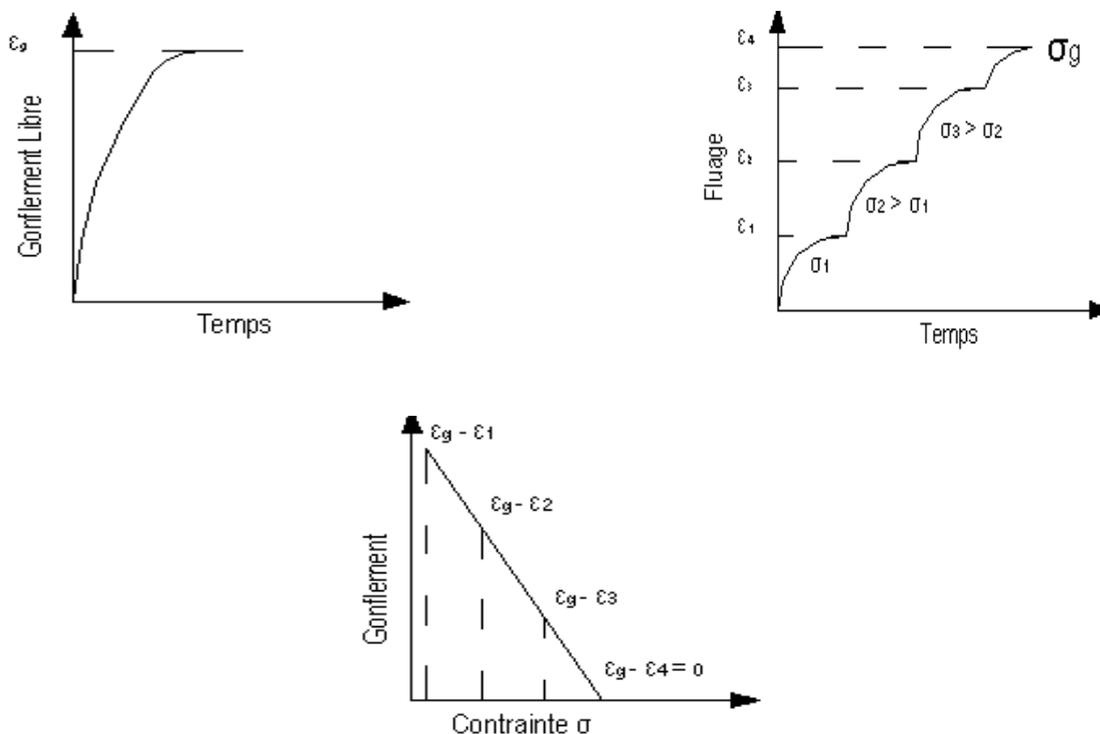


FIG. B.3 – Méthode de double œdomètre

Les méthodes du gonflement empêché sont divisées en deux.

La première méthode consiste à disposer l'échantillon dans un œdomètre de forte rigidité de telle manière à empêcher son gonflement. L'évolution de la pression de gonflement en fonction du temps est enregistrée en continu. Cette méthode est recommandée par D.T.U.11.1. Dans cette situation de gonflement empêché, la forme externe de l'échantillon est maintenue constante. Seule la structure interne de l'échantillon est affectée par la saturation [2]. Cette méthode est délicate du fait des difficultés à maintenir le volume constant.

La deuxième méthode consiste à charger axialement l'échantillon par de petits paliers de contraintes croissantes en autorisant des déplacements de faible ampleur de telle manière à rattraper le gonflement généré. La pression de gonflement correspond alors à la pression finale où il n'y a plus de gonflement.

La méthode du gonflement sous différentes charges est adoptée par I.S.R.M. [80] et est identique à celle d'Huder-Amberg. Elle consiste à appliquer initialement sur un échantillon placé dans un œdomètre une contrainte axiale proche à celle in situ. On procède par la suite à l'imbibition de l'échantillon. Une fois la stabilisation de gonflement atteinte, on procède aux déchargements par paliers réguliers de contraintes (Fig. B.4).

Si la cinétique de gonflement des minéraux argileux est lente, le gonflement sous chaque palier n'a pas le temps de se générer complètement. Une partie du gonflement est alors reportée au palier suivant.

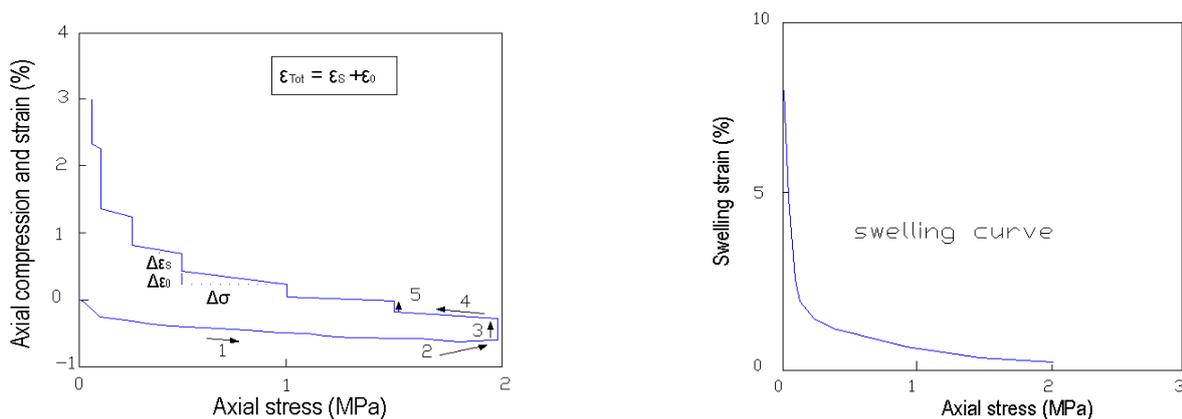


FIG. B.4 – Méthode du gonflement sous différentes charges

B.2 Comparaison entre les différentes méthodes

Les différentes méthodes mentionnées reflètent la difficulté de maîtriser le phénomène du gonflement. Les valeurs du gonflement et de la pression de gonflement déterminées par ces différentes méthodes sont influencées par la conception des dispositifs et par des paramètres expérimentaux. En particulier, les résultats sont affectés par le changement de la microstructure des échantillons provoqué par la procédure expérimentale.

Basma et al. [11] ont effectué des essais de mesures de la pression de gonflement sur des argiles d'Amman (Jordanie) en utilisant ces différentes méthodes expérimentales. Ils ont constaté que la pression de gonflement déterminée par la méthode du gonflement empêché est la plus faible tandis que celle déterminée par la méthode du prégonflement est la plus élevée. Les pressions de gonflement déterminées par la méthode du gonflement en parallèle et la méthode de double œdomètre prennent

des valeurs intermédiaires. Les auteurs ont mis en évidence l'influence du pourcentage des minéraux gonflants sur l'écart de ces mesures.

Selon les auteurs, la méthode du gonflement en parallèle est la plus réaliste et la plus proches des mesures in situ. Pour cette raison, ils ont formulé des relations empiriques afin de relier la pression de gonflement mesurée par cette méthode P_{gp} aux pressions de gonflement mesurées par les autres méthodes. Ces relations peuvent s'écrire de la forme généralisée suivante :

$$P_{gp} = \alpha_m (P_m) \quad (\text{B.1})$$

α_m est un paramètre expérimental, P_m est la pression de gonflement et l'indice m désigne la méthode expérimentale.

A partir des essais œdométriques et triaxiaux effectués sur des argiles remaniés et non remaniés, Khaddaj ^[68] et Babu Shanker et al. ^[108] ont montré que la pression de gonflement mesurée par la méthode du prégonflement est largement supérieure à celle mesurée par la méthode du gonflement empêché.

Par contre, les essais effectués par Sridharan et al. ^[113] et par Al-Shamarani et al. ^[5] sur des argiles intactes montrent que la pression de gonflement mesurée avec la méthode du gonflement en parallèle est la plus faible.

B.3 Influence du déplacement imposé

La pression de gonflement décroît avec l'augmentation du déplacement imposé avant blocage total. La plupart des essais ont été effectués au moyen de cellules flexibles en tolérant soit un gonflement radial soit un gonflement axial.

Pour étudier l'influence de la rigidité de la bague œdométrique sur le gonflement axial et la pression de gonflement latérale, Franklin ^[40] et Windal ^[130] ont utilisé la cellule flexible sur des argiles intacts et remaniés. Cet appareil est constitué d'un anneau de confinement flexible dont la rigidité peut être modifiée d'un essai à l'autre. La pression de gonflement latérale est mesurée à l'aide de jauges de déformations placées sur l'anneau flexible. En fonction de la rigidité de l'anneau, on peut déduire du gonflement latéral la pression de gonflement correspondante. Leurs essais montrent que même une faible autorisation du gonflement radial fait chuter sensiblement le gonflement axial et la pression de gonflement latérale.

Pour étudier l'influence de la rigidité axiale de la cellule œdométrique, Seed et al. ^[107] ont effectué des essais de gonflement empêché et semi-empêché au moyen d'une bague œdométrique dont la partie superficielle est reliée au capteur de force à travers une barre flexible de rigidité donnée. Selon l'épaisseur de cette barre, on peut tolérer un gonflement axial. La pression de gonflement axial diminue alors avec la baisse de la rigidité de la barre flexible. Elle est la plus élevée dans le cas du gonflement empêché (Fig. B.5).

Katti et Shanmugasundaram ^[66] se sont servis de la cellule œdométrique afin de mesurer la pression de gonflement des échantillons d'argile pour différents déplacements imposés. Initialement, l'échantillon est bloqué, on mesure alors la pression de gonflement dans le cas empêché. Après stabilisation, on procède au déchargement par palier de déformation imposée et on mesure pour chaque palier l'évolution de la pression de gonflement en fonction du temps (Fig. B.6).

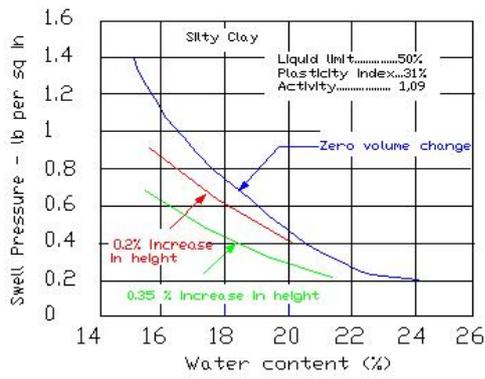


FIG. B.5 – Variation de la pression de gonflement axiale en fonction de la teneur en eau initiale pour différentes conditions de blocage axiale [107]

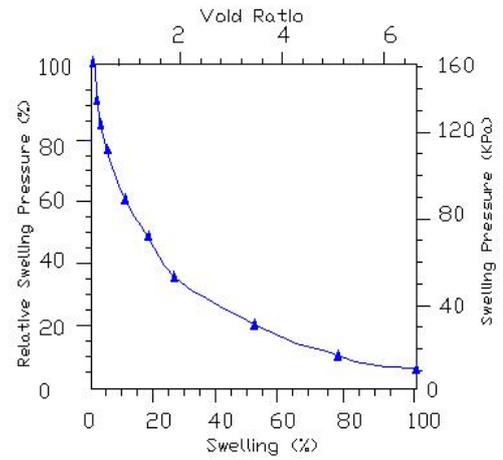


FIG. B.6 – Variation de la pression de gonflement en fonction de la déformation imposée [66]

Ces essais confirment que la pression de gonflement est plus élevée dans le cas où le gonflement est totalement empêché.

Annexe C

Comportement hydrique de l'argilite de Bure

C.1 Introduction

Le changement de l'humidité relative des matériaux argileux peut entraîner le gonflement ou le retrait. Si le matériau subit une humidité relative supérieure à sa propre humidité relative, il gonfle par adsorption d'eau. A contrario, il se rétrécit par désorption.

Cette annexe suit le même raisonnement que celui du chapitre 6 mais en soumettant l'échantillon à des sollicitations hydriques au lieu des sollicitations chimiques.

Deux types d'essais sont présentés :

1. essais de déformations libres,
2. essais uniaxiaux.

Cette étude a été complétée afin de déterminer l'influence de l'emplacement du capteur sur les déformations et pour spécifier l'irréversibilité des échanges massiques.

Les échantillons utilisés proviennent du puits 205 (05564) et présentent une humidité relative initiale égale à 47.5 % (Fig. 2.9, page 18).

Pour les essais de déformations libres, les échantillons possèdent un diamètre de 50 mm et une hauteur de 25 mm.

Pour les essais uniaxiaux effectués par Freissmuth ^[42] sur la même roche (05564), les échantillons ont un diamètre de 16 mm et une hauteur de 30 mm.

C.2 Résultats obtenus

C.2.1 Essais de déformations libres

Dans le cas où l'échantillon n'est soumis à aucune contrainte ($\sigma_a = \sigma_r = 0$), quatre essais ont été effectués, dont trois pour des échantillons à stratification horizontale et le dernier pour un échantillon à stratification verticale. Ces essais ont été effectués pour différents chemins hydriques :

1. Hr = 80 – 90 – 80 %, $\alpha = 0^0$,
2. Hr = 80 – 90 – 80 %, $\alpha = 90^0$,

3. Hr = 80 – 35 – 80 – 90 – 35 %, $\alpha = 0^0$,
4. Hr = 60 – 70 – 80 – 70 – 60 – 70 %, $\alpha = 0^0$.

Pour illustrer si les déformations sont réversibles ou non, il suffit de comparer les déformations pour des paliers identiques d'humidité relative.

La figure C.1 présente une comparaison entre les déformations de l'essai 1 et de l'essai 3. Pour ces essais, on observe une claire irréversibilité des déformations pour une humidité relative de 80 %. Cependant, les déformations au niveau du troisième palier de chaque essai pour une humidité relative de 80 % sont presque similaires. De même pour une humidité relative de 90 %, les déformations des deux essais sont proches.

A partir de la figure C.2, on en tire les interprétations suivantes :

- en comparant les déformations pour les paliers correspondant à une humidité relative de 70 %, on en déduit qu'au niveau du deuxième palier et du quatrième palier, elles ne sont pas identiques, ce qui confirme leur irréversibilité. Néanmoins, les déformations du quatrième palier et du sixième palier sont presque identiques,
- pour une humidité relative de 60 %, on observe une évidente irréversibilité des déformations.

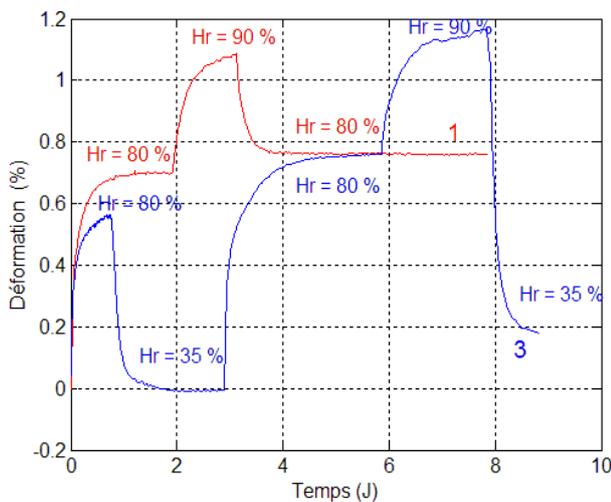


FIG. C.1 – Déformations axiales pour les essais 1 et 3

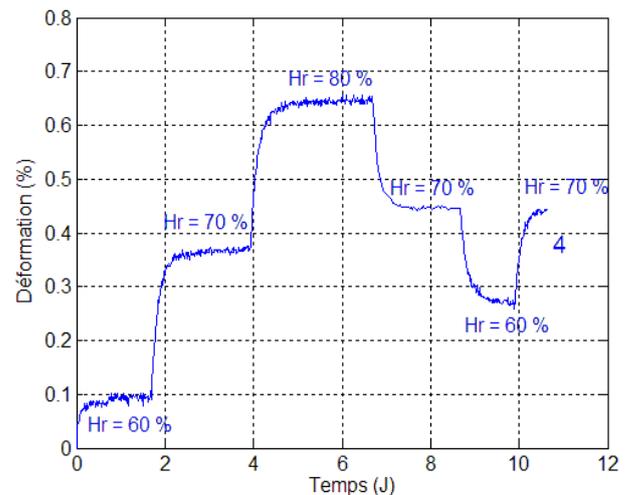


FIG. C.2 – Déformation axiale pour l'essai 4

L'anisotropie des déformations est présentée sur la figure C.3 pour les essais 1 et 2.

Les coefficients d'anisotropie des déformations libres, pour tous les paliers d'humidité relative, sont quasi identiques et valent 4.5.

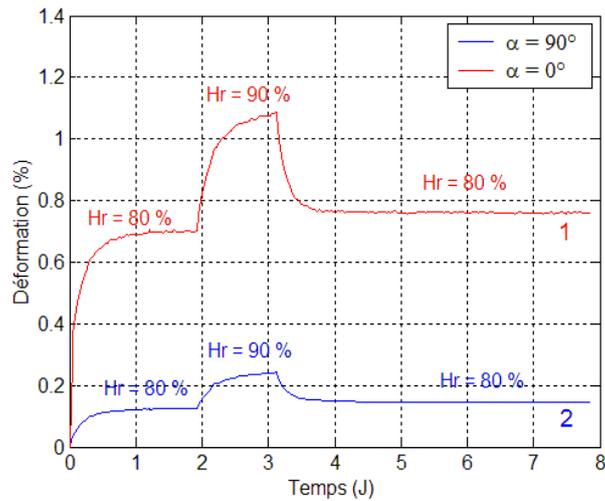


FIG. C.3 – Déformations axiales pour deux échantillons ($\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$)

C.2.2 Essais uniaxiaux

Les essais uniaxiaux effectués pour deux contraintes axiales (1.5 et 4 MPa) sont composés de 18 cycles pour des humidités relatives variant de 35 à 75 % (Fig. C.4).

L'enveloppe des pics correspondant au gonflement est tout à fait paradoxale. Pour une contrainte axiale de 1.5 MPa, les sollicitations cycliques ont pour effet d'augmenter le potentiel de gonflement. Par contre, on observe l'inverse pour une contrainte axiale de 4 MPa.

Pour les cinq premiers cycles, on observe une irréversibilité des déformations. Au-delà, les déformations sont presque réversibles.

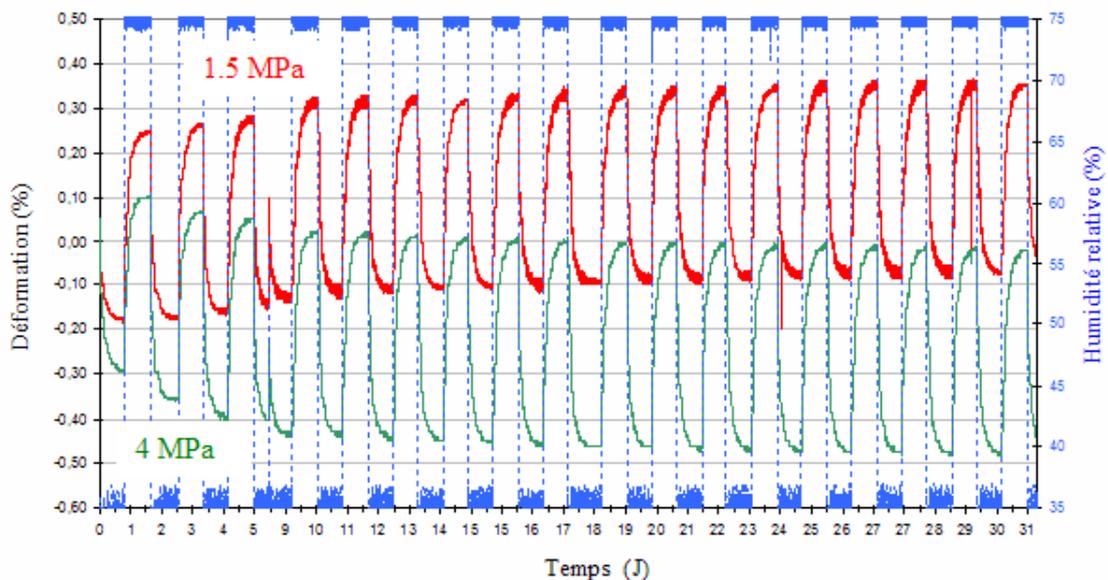


FIG. C.4 – Essais uniaxiaux pour des cycles d'humidité variant de 35 à 75 % [42]

Si l'on se réfère aux recherches bibliographiques, on se rend compte que les mécaniciens de sol qui ont largement étudié la réponse des sols argileux, compactés et sollicités par des cycles d'humidification-

dessiccation, ont été confrontés à des résultats contradictoires.

A partir des essais cycliques d'humidification-dessiccation effectués au moyen de l'œdomètre, Al-Hamoud et al. [3] ont constaté une forte baisse du potentiel de gonflement lors du premier cycle et l'équilibre est atteint après 5 cycles.

Dif et Bluemel [31] ont trouvé des résultats qui concordent avec ceux d'Al-Hamoud et al. mais ils ont mis l'accent sur l'influence de la contrainte appliquée. Plus la contrainte est élevée, plus le retrait est élevé. Les auteurs ont attribué ce phénomène au type d'argile présent dans le sol ainsi qu'à la fatigue du matériau se traduisant par la destruction de la structure interne de l'argile et par l'apparition des fissures.

Day [29] a observé une augmentation du potentiel de gonflement lorsque le matériau est compacté à une teneur en eau de 30 %. Cependant, lorsque il est compacté à une teneur en eau de 10 %, une baisse du potentiel de gonflement est constatée. Il a expliqué ce phénomène par un nouveau réarrangement des particules au sein de la matrice solide.

Pour en revenir aux essais de Freissmuth [42] (Fig. C.4), ils ne peuvent pas s'expliquer par la fatigue de l'argilite. Si c'était le cas, il faudrait, pour une contrainte de 1.5 MPa, observer la même tendance de diminution du potentiel de gonflement avec le nombre de cycles que celle qui s'opère pour une contrainte de 4 MPa.

Ces essais ne peuvent pas s'expliquer sans prise en compte du changement de l'orientation des feuillets lors des cycles. Pour mieux confirmer ce nouvel arrangement, il est nécessaire de passer à des observations microscopiques.

C.2.3 Influence de l'emplacement des capteurs

L'influence du positionnement des capteurs a été étudiée en imposant un chemin hydrique ($H_r = 80 - 35 - 80 - 90 - 35 \%$) et en mesurant les déformations par deux capteurs de déplacement : l'un est placé à l'extrémité et l'autre au centre de l'échantillon de diamètre 50 mm et de hauteur 25 mm (Fig. C.5).

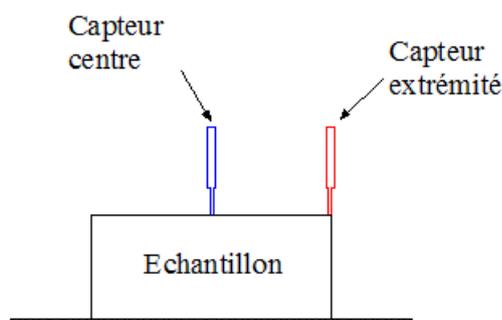


FIG. C.5 – *Présentation de l'emplacement des capteurs*

D'après le résultat expérimental présenté sur la figure C.6, les déformations et les cinétiques des déformations paraissent uniformes et ne dépendent pas de l'espace, sauf pour le dernier palier d'humidité où cette situation peut être expliquée par la non uniformité de la fissuration de l'échantillon. Après plusieurs paliers d'humidité, les liaisons cimentées peuvent se détruire induisant par conséquent une discontinuité dans la roche.

En principe pour les premiers paliers d'humidité, le capteur placé à l'extrémité de l'échantillon doit atteindre le plus rapidement possible les déformations maximales car la zone située à la base de

ce capteur réagit davantage avec l'humidité. Etant donné que ce n'est pas le cas, la similitude de déformations des capteurs peut être expliquée par un mouvement des plans d'anisotropie.

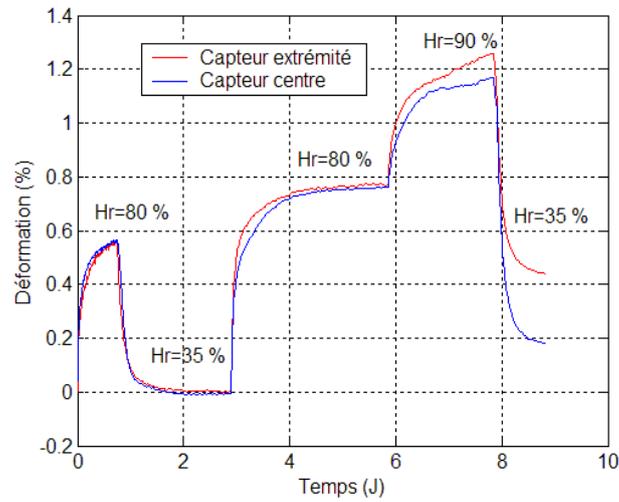


FIG. C.6 – Influence de la position du capteur sur la déformation pour le chemin hydrique suivant : Hr = 80 - 35 - 80 - 90 - 35 %

C.2.4 Courbe de rétention

Pour différents chemins hydriques, des essais de mesure de la variation de masse ont été effectués sur des échantillons d'argilites de Bure (Fig. C.7) et de Lorraine (Fig. C.8). Ces essais ont été réalisés par pesage régulier de l'échantillon pour chaque laps de temps. Les points illustrés sur les figures présentent, à la stabilisation, la masse relative finale (égale au rapport entre la variation de la masse et la masse initiale de l'échantillon).

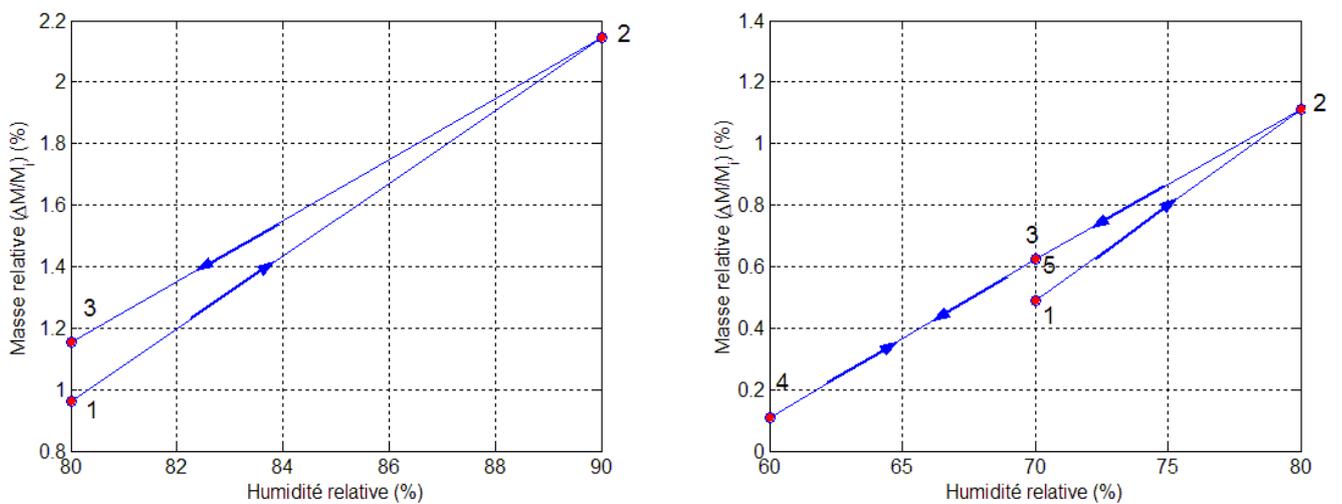


FIG. C.7 – Variation de la masse relative $\Delta M/M_i$ avec l'humidité relative pour l'argilite de Bure

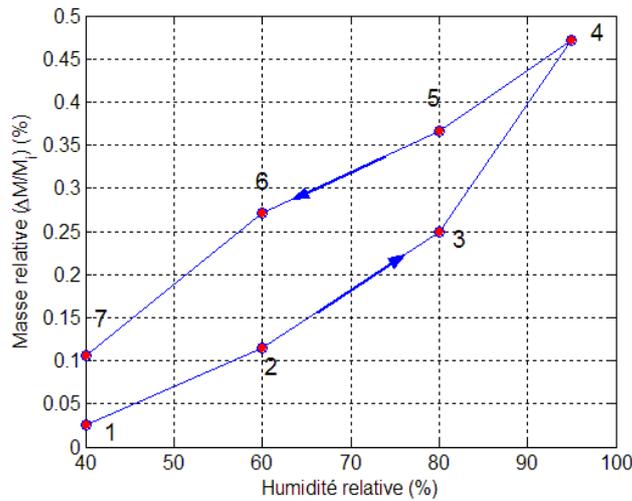


FIG. C.8 – Variation de la masse relative $\Delta M/M_i$ avec l'humidité relative pour l'argilite de Lorraine

Ces essais montrent que la relation entre l'humidité relative et la masse relative n'est pas univoque et que la roche argileuse est plus humide à la dessiccation qu'à l'humidification pour une même valeur d'humidité relative. Cette non unicité est liée au phénomène d'hystérésis qui signifie que les caractéristiques hydriques pour un matériau fin en saturation ou désaturation ne sont pas identiques. Yong et Warkentin ^[140] ont expliqué d'une manière simple l'hystérésis par le *phénomène de l'encrier* (Fig. C.9). Le diamètre d'un pore est généralement plus faible aux extrémités qu'au milieu du pore. Lorsque l'on désature un sol, l'eau ne s'évacue pas sauf si la pression capillaire est supérieure à la pression au plus petit rayon. Lors de la saturation, l'eau entre dans le réseau poreux dès que la pression capillaire est inférieure à la pression correspondant au plus grand rayon. D'après la loi de Jurin-Laplace, plus le rayon capillaire est faible, plus la pression capillaire est élevée. On peut en déduire que l'eau peut facilement être adsorbée par le matériau qu'être désorbée.

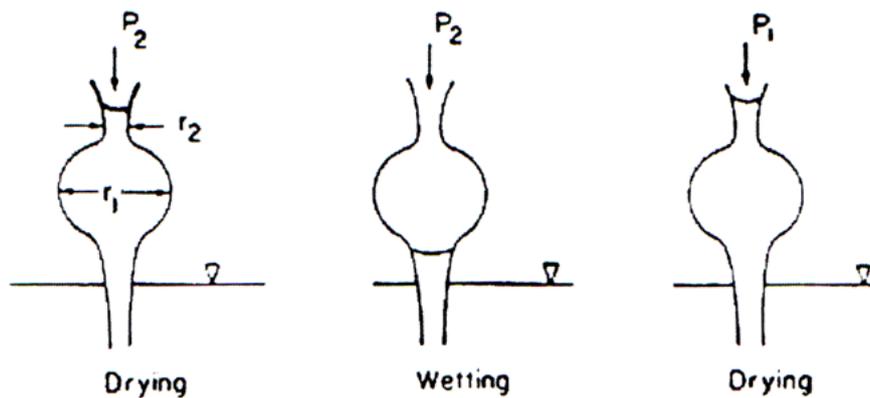


FIG. C.9 – Illustration du phénomène de l'encrier ^[140]

Il ne faut pas non plus ignorer l'influence des déformations irréversibles sur la rétention en masse. Lorsque le diamètre des pores n'est pas identique lors de la saturation-désaturation, la masse retenue n'est pas identique non plus. La figure C.10 confirme que le gonflement volumique varie linéairement avec la masse relative. Alors, l'hystérésis est quasiment absent.

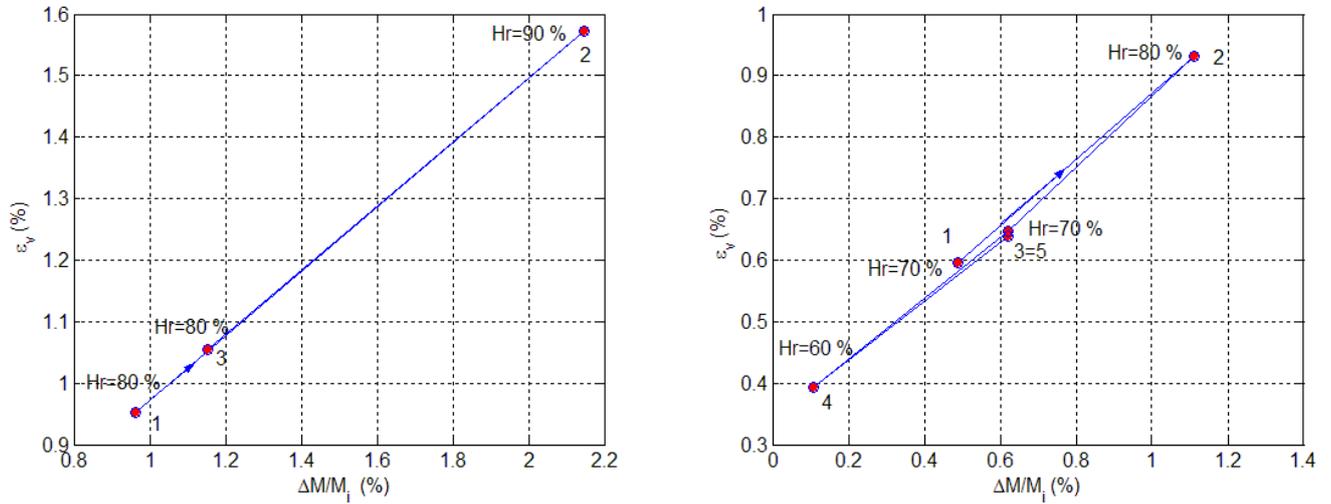


FIG. C.10 – Variation du gonflement volumique avec la masse relative $\Delta M/M_i$ pour l'argilite de Bure

Annexe D

Application du modèle développé sur un ouvrage souterrain

D.1 Introduction

Après la validation du modèle de gonflement sur les essais expérimentaux effectués en laboratoire, il était intéressant de montrer son utilité pour une application pratique sur un tunnel confronté à des difficultés liées au gonflement d'un matériau argileux au contact de l'eau.

Le tunnel choisi est le tunnel de Chamoise pour lequel on dispose des mesures in situ et des différentes caractéristiques du terrain ^[20]. La simulation numérique a été effectuée au moyen du code de calcul par éléments finis **VIPLEF** développé au CGES par Tijani ^[119] dans lequel notre modèle de gonflement a été intégré.

D.2 Description du tunnel

Le tunnel de Chamoise, long de 3300 mètres est un des maillons de la liaison Paris-Rome. Il traverse les monts d'Ain sous 400 mètres de couverture à une altitude moyenne de 600 mètres. Ce tunnel traverse une couche marneuse gonflante formant un angle de 20^0 entre la direction de pendage et le plan horizontal.

Le creusement du tunnel modifie l'état des contraintes autour de l'ouvrage induisant en conséquence la formation de microfissurations facilitant ensuite l'arrivée de l'eau jusqu'à la couche marneuse.

Durant la phase de creusement et de bétonnage, pour éviter l'apport d'eau, des précautions par drainage ont été prises dans la zone au-dessous du radier. Cette zone est la plus active avec la remontée d'eau après arrêt du drainage et la mise en service du tunnel.

Le cas le plus critique est d'étudier le gonflement au temps de stabilisation car il présente l'ampleur la plus élevée.

La figure D.1 présente une coupe géotechnique de l'ouvrage où la zone gonflante située sous le radier a été mise en évidence. L'étendue horizontale de l'ouvrage est de 160 m.

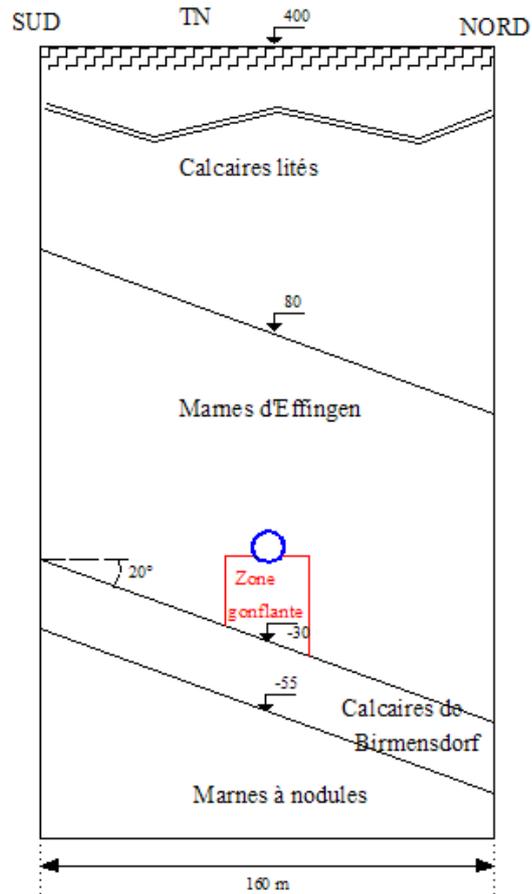


FIG. D.1 – Coupe géotechnique

Le tableau suivant présente les épaisseurs des différentes couches du terrain ayant un comportement élastique linéaire isotrope, leur densité et leurs caractéristiques géotechniques.

Terrain	Épaisseur (m)	Densité	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson ν
Calcaire lité	40	2.5	20000	0.3
Marnes d'Effingen	110	2.4	5000	0.3
Calcaires de Birmensdorf	25	2.5	20000	0.3
Marnes à nodules	45	2.35	3500	0.3

TAB. D.1 – Caractéristiques des différentes couches ^[20]

D.3 Mesures in situ

Les mesures in situ ont été effectuées par deux extensomètres à bases multiples : l'un situé à la base du radier et l'autre au piédroit nord du radier incliné à 45° .

Les extensomètres ont été placés après 300 jours à partir de la phase de creusement du tunnel et les mesures ont été effectuées pour quatre emplacements à 0.5, 3, 5.5 et 7 m à partir du radier et suivant la direction des extensomètres.

La figure suivante présente la section du tunnel et les positions des extensomètres.

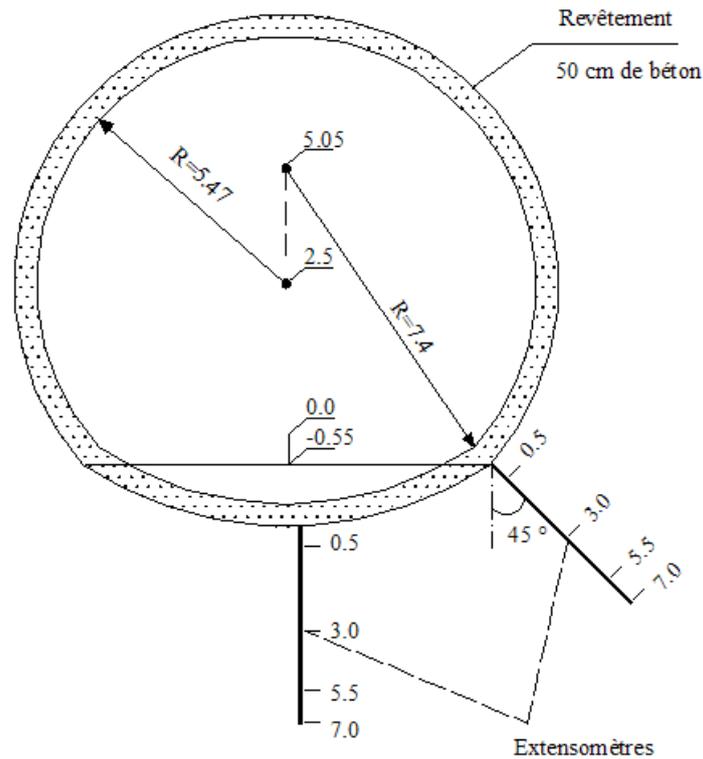


FIG. D.2 – Section du tunnel et emplacement des extensomètres

Les déplacements parallèles aux extensomètres, correspondant au gonflement après une longue durée (15 ans de mesure), sont répertoriés dans le tableau suivant :

	Profondeur (m)	In situ (mm)
Clé de radier	0.5	4.00
	3	0.66
	5.5	0.22
	7	0.00
Piédroit Nord	0.5	4.21
	3	3.95
	5.5	-0.31
	7	0.00

TAB. D.2 – Mesures *in situ*

D.4 Ajustement du modèle

Les essais effectués sur la marne de Chamoise ont été réalisés par le LRPC^[20] (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) au moyen de l'œdomètre modifié (permettant de mesurer à la fois le gonflement axial et la pression de gonflement latérale) par palier de déchargement de la contrainte axiale.

Les essais montrent une quasi indépendance de la pression de gonflement latérale avec la contrainte axiale appliquée, ce qui permet de justifier l'utilisation du modèle de gonflement proposé. Ils illustrent également le fait que la pression de gonflement latérale n'est pas influencée par la saturation ce qui réduit les six paramètres du modèle à trois uniquement qui correspondent au gonflement normal aux strates.

Bultel ^[20] a utilisé dans sa thèse le modèle d'Huder et Amberg pour estimer le gonflement de la marne de Chamoise :

$$\varepsilon_g = K \cdot \log \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_g} \right) \quad (D.1)$$

Avec : $K = -0.23 \%$ et $\sigma_g = 10 \text{ MPa}$.

Les paramètres de notre modèle ont été déterminés au moyen des résultats d'un essai de déchargement de la contrainte axiale effectué par le LRPC ^[20] sur un échantillon cylindrique de stratification horizontale. Les paliers de déchargement sont les suivants : 3.6 – 1.8 – 0.66 – 0.46 – 0.15 MPa.

La pression de gonflement est supposée égale à celle déterminée par Bultel ^[20] au moyen de la méthode d'Huder et Amberg car la plupart des essais disponibles ne nous donnent pas la possibilité de la déterminer par notre modèle du gonflement, étant donné que les valeurs disponibles sont la somme des déformations élastiques et du gonflement. Par ailleurs, la pression de gonflement déterminée par le modèle sur l'argilite de Lorraine (6.5 MPa) est proche de celle estimée par la méthode d'Huder et Amberg (6.7 MPa), ce qui prouve que l'utilisation de la pression de gonflement au sens d'Huder et Amberg est valide.

Les deux paramètres à ajuster sont le gonflement libre et le facteur puissance des contraintes (c). La figure suivante présente l'ajustement du modèle sur l'essai :

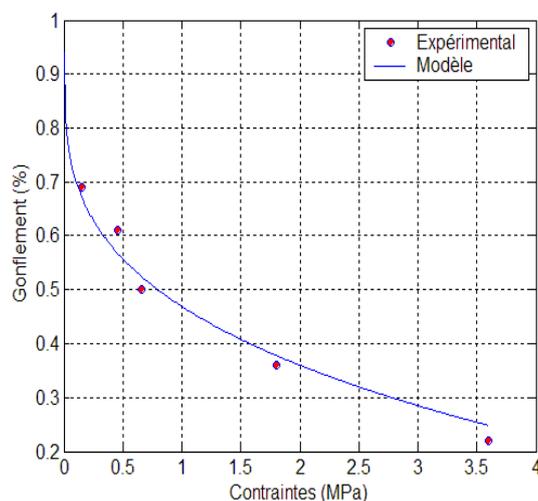


FIG. D.3 – Ajustement de l'essai

La marne de Chamoise présente alors les propriétés suivantes :

- gonflement libre égal à 0.93 %,
- pression de gonflement égale à 10 MPa,
- coefficient (c) égal à 0.3.

D.5 Méthode de calcul

Le calcul a été effectué à l'aide d'une modélisation bidimensionnelle avec l'hypothèse des déformations planes.

Les conditions aux limites retenues, sur les bords de l'ouvrage, sont les suivantes :

- déplacement horizontal nul sur les limites latérales,
- déplacement vertical nul sur la limite inférieure.

Le calcul est fait par différentes phases :

- calcul mécanique initial de manière à déterminer les contraintes in situ caractérisant le poids des différentes couches,
- creusement du tunnel,
- mise en place du revêtement en béton (module de Young égal à 20000 MPa),
- gonflement de la couche marneuse.

Pour les résultats numériques ultérieurs, on s'intéresse uniquement à la phase du gonflement.

La figure suivante présente une vue de maillage utilisée au voisinage du tunnel et également dans la zone gonflante.

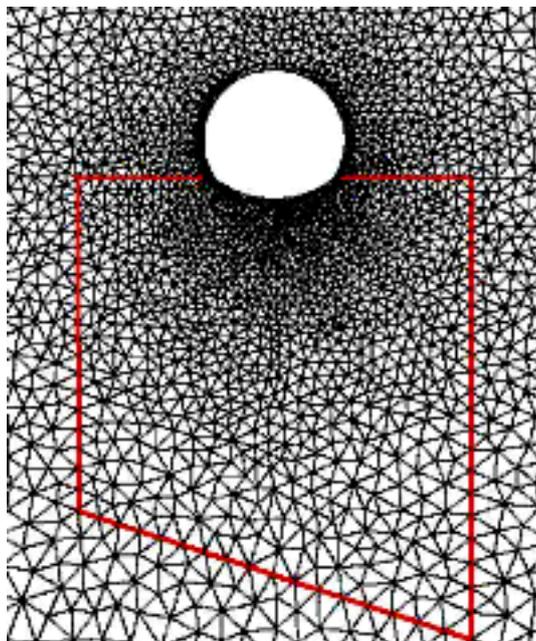


FIG. D.4 – *Détail du maillage*

D.6 Comparaison entre la modélisation et les mesures in situ

Suivant des directions parallèles aux extensomètres, la figure D.5 présente les déplacements obtenus par la modélisation et les mesures in situ.

Les déplacements mesurés in situ et obtenus par la modélisation sont presque similaires, sauf pour deux emplacements de 0.5 et 3 m de l'extensomètre du piedroit où l'on trouve une contraction

au lieu d'un gonflement. Cela peut être dû à la non prise en compte du gonflement parallèle au pendage.

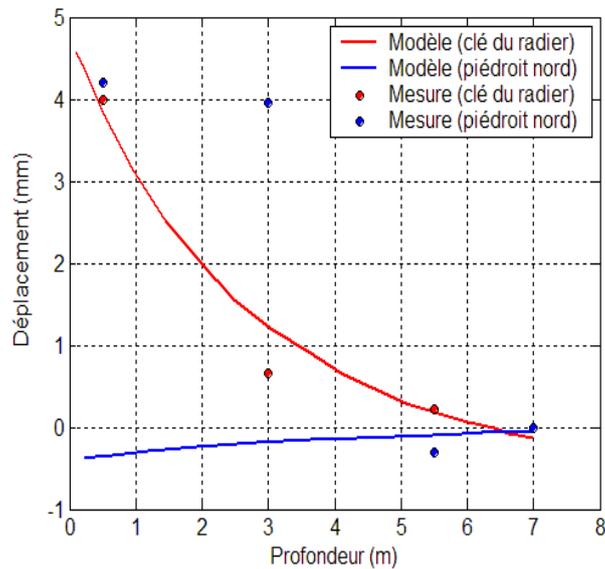


FIG. D.5 – *Déplacements in situ et résultats numériques*

Globalement, le modèle développé dans cette thèse permet de prédire, à long terme, le gonflement observé au laboratoire et in situ.

D.7 Comportement du radier

La contrainte moyenne dans le revêtement en béton est présentée sur la figure D.6. On constate que le gonflement influe sur la contrainte moyenne en la réduisant à proximité de la clé du radier et en l'augmentant aux extrémités du radier. Dans la zone à proximité de la clé du radier, on constate que la contrainte moyenne devient positive, ce qui met en évidence l'apparition d'une zone de traction dans le béton qui, par conséquent, peut influencer sur la durée de vie du revêtement. La dissymétrie de la contrainte moyenne dans le béton est due au pendage. De ce fait, le gonflement principal normal aux strates n'est pas vertical mais forme un angle de 20° avec l'axe vertical. La figure D.7 montre que le déplacement vertical du revêtement est dissymétrique et est le plus prononcé dans la zone en traction.

D.8 Conclusion

Les résultats numériques ont montré que le modèle de gonflement utilisé permet de reproduire l'essentiel du comportement observé in situ. Les résultats des essais ne nous permettent pas de prendre en compte le gonflement tridimensionnel car les essais ont été effectués sur des marnes de stratification horizontale. Malgré que la pression de gonflement latérale parallèle aux strates ait été négligée, il n'est pas raisonnable d'éliminer le gonflement parallèle aux strates. Il faut mentionner que la pression de gonflement latérale est mesurée dans le cas du gonflement empêché latéralement et ne correspond pas, comme déjà montré au chapitre 5, à la contrainte nécessaire pour annuler le

gonflement. La prise en compte du gonflement parallèle aux strates peut conduire à des résultats s'approchant mieux aux mesures in situ.

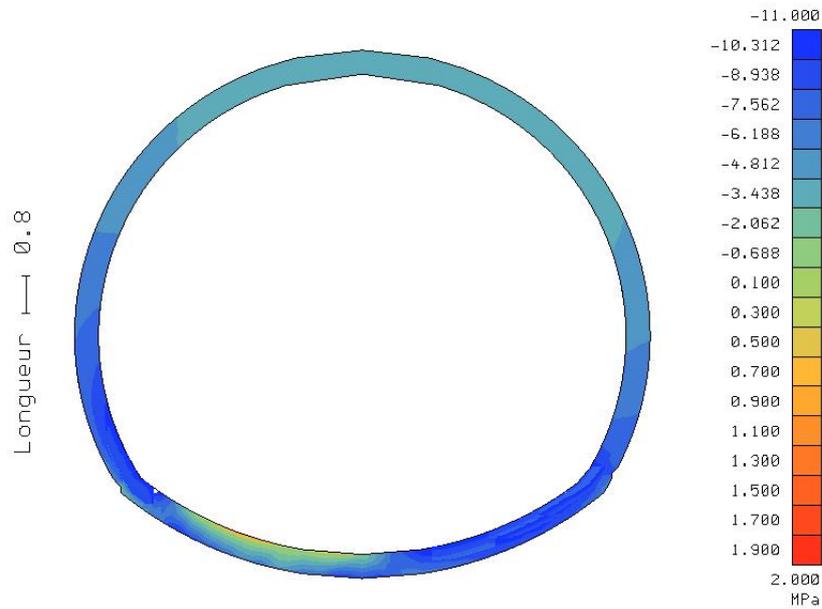


FIG. D.6 – *Contrainte moyenne dans le revêtement en béton*

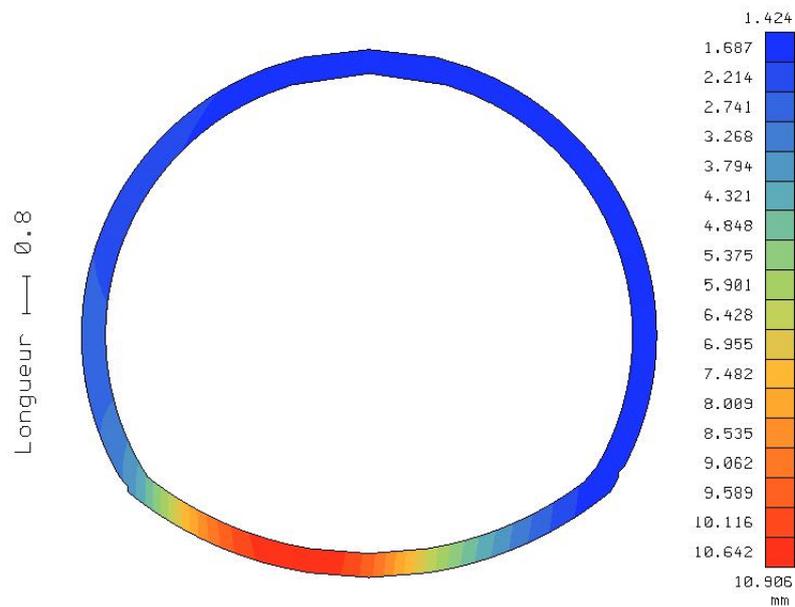


FIG. D.7 – *Déplacement vertical du revêtement en béton*