

# Etude expérimentale et numérique du comportement anisotrope de l'argile de Boom

---

Travail de fin d'étude réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur  
Civil des Constructions par MINY Laurent.

## JURY

Dr. Ir. F. COLLIN, Chargé de Cours à l'Université de Liège, Promoteur  
Dr. Ir. L. COURARD, Professeur à l'Université de Liège  
Dr. Ir. R. CHARLIER, Professeur Ordinaire à l'Université de Liège, Doyen de la  
Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège  
Dr. Ir. X.L. LI, Directrice Scientifique du Groupe d'experts EURIDICE

Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Année académique 2012-2013



---

## Remerciements

---

Ce travail n'aurait pu présenter le même intérêt sans le soutien et les conseils de nombreuses personnes. Ces quelques lignes sont pour moi l'occasion de leur exprimer toute ma gratitude.

Je tiens, avant tout, à remercier particulièrement mon promoteur académique Monsieur Frédéric COLLIN pour son implication dans l'élaboration de cet exposé.

De plus, il m'importe de remercier ceux qui m'ont également soutenus dans ma tâche :

Le Professeur Luc COURARD, pour la mise à disposition des locaux du Laboratoire des Matériaux de Construction, Jean-Pol RADU et Benjamin CERFONTAINE pour leur assistance régulière et leur disponibilité, Anne-Catherine DIEUDONNÉ pour son aimabilité.

Je remercie Pierre ILLING, René VANDEZANDE et Arnaud LOUIS pour leur contribution aux expériences menées dans le cadre de mes recherches.

J'adresse toute ma reconnaissance à Séverine LEVASSEUR, Xavier MINY et Michel MINY pour leur relecture éclairante et leurs commentaires judicieux.

Enfin, mes pensées vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la rédaction de ce travail de fin d'études.

---

## Enoncé

---

L'objet du présent travail de fin d'études, présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Ingénieur Civil des Constructions, est consacré à l'étude expérimentale et numérique du comportement anisotrope de l'argile de Boom.

Ces recherches s'intègrent dans le cadre de la gestion des déchets nucléaires de haute activité à longue durée de vie, dont la solution actuellement préconisée est le stockage en couches géologiques profondes faiblement perméables. Ces formations ont pour objectif de constituer une barrière naturelle ultime face à toute migration accidentelle de radionucléides vers la biosphère. En Belgique, le choix géologique s'oriente sur la formation argileuse de Boom.

Afin de démontrer la faisabilité et la fiabilité à long terme de la technique d'enfouissement, il convient de caractériser le matériau à l'échelle du laboratoire et de développer des modèles de prédictions comportementales. La validation de ces développements est obtenue par leur confrontation aux résultats d'expérimentations in situ réalisées au sein du laboratoire souterrain HADES situé à une profondeur de 225 m sur le site de Mol (Belgique).

Dans cette optique, le mémoire se concentre sur la modélisation en couplage hydromécanique de l'excavation de la galerie de liaison réalisée lors de l'extension du laboratoire HADES. Ce creusement fortement instrumenté en termes de déplacements, pressions de pores et contraintes, a déjà été modélisé par divers groupes d'études. Néanmoins, notre approche vise à compléter ces simulations en intégrant le comportement anisotrope de l'argile de Boom, moins étudié jusqu'à présent. Le rapport s'accompagne d'un descriptif du développement de la modélisation, en plus d'une introduction au contexte global du nucléaire et de la gestion de déchets radioactifs. Par ailleurs, afin d'alimenter les modèles de manière générale, il est nécessaire d'exploiter les résultats d'essais de laboratoire pour caractériser le matériau. Il est dès lors proposé une phase expérimentale destinée à établir des courbes de rétention en eau de l'argile de Boom, caractéristiques du comportement hydro-mécanique. Nous profiterons de ces manipulations pour tenter de mettre en évidence l'anisotropie du matériau.

Dr. Ir. Frédéric COLLIN,  
Chargé de Cours à l'Université de Liège, Promoteur.

Dr. Ir. Luc COURARD,  
Professeur à l'Université de Liège.

Dr. Ir. Robert CHARLIER,  
Professeur Ordinaire à l'Université de Liège, Doyen de la  
Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège.

Dr. Ir. Xiang Ling LI,  
Directrice Scientifique du Groupe  
d'experts EURIDICE.

---

## Résumé

---

La solution actuellement préconisée en Belgique pour la gestion des déchets nucléaires de haute activité à longue durée de vie est le stockage en couches géologiques profondes faiblement perméables. Le choix de la géologie du site de stockage vise à former une barrière ultime face à toute migration accidentelle de radionucléides vers la biosphère.

Afin de démontrer la faisabilité et la fiabilité à long terme de la technique d'enfouissement, il convient de caractériser le matériau à l'échelle du laboratoire et de développer des modèles prédictifs de comportement. La validation de ces développements est obtenue par leur confrontation aux résultats d'expérimentations in situ.

L'exposé comporte deux parties distinctes destinées à explorer deux aspects des recherches menées. La première partie a pour objectif d'étudier expérimentalement le comportement hydro-mécanique de la roche hôte par la réalisation d'une courbe de rétention en eau du matériau, l'argile de Boom dans le cas présent. Le rapport propose une brève présentation du matériau, la méthode expérimentale mise en œuvre, l'élaboration de la courbe de rétention, et une étude de l'anisotropie du matériau réalisée en parallèle sur base de l'évolution des mesures dimensionnelles.

La seconde partie comporte une approche numérique, avec la modélisation hydro-mécanique de l'excavation de la galerie de liaison, réalisée et instrumentée lors de l'extension du laboratoire souterrain HADES à Mol. Le mémoire s'intéresse plus particulièrement aux aspects anisotropes des propriétés du matériau et des contraintes. L'exposé présente une synthèse des recherches existantes, un descriptif du cheminement suivi pour le développement du modèle final, les résultats des simulations, et une comparaison de ceux-ci en terme de pression d'eau face aux données in situ.

Le tout est précédé d'une introduction destinée à établir le cadre général dans lequel le mémoire prend place.

---

## Abstract

---

Nowadays, the solution chosen in Belgium for the management of high activity and long life nuclear waste is the storage in weakly permeable geological layers. The choice of the storage site's geology is made in order to form a barrier against accidental migration of radionuclides to the biosphere.

To demonstrate the feasibility and the long-term reliability of the burial technique, the material is characterized at the laboratory scale and predictive behavior models are developed. The validation of these developments is obtained by comparing them to in situ experiments.

The Master thesis consists of two distinct parts designed to explore two research aspects. The first part aims to study experimentally the hydro-mechanical behavior of the host rock with generation of a water retention curve of the studied material, the Boom Clay. The report provides a presentation of the material, the experimental method, the retention curve and a study of the material anisotropy based on measurements evolution.

The second part aims to study the hydro-mechanical modeling of the connecting gallery excavation by numerical approach. It was instrumented during its building at the extension of the underground laboratory HADES, at Mol. The Master thesis studies the anisotropic aspects of stresses and material properties. The report provides a summary of existing research, the followed path for the final model development, the results, and a comparison between numerical water pressure and in situ data.

The whole is preceded by an introduction which establishes the general framework in which the Master thesis takes place.

---

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Enoncé</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>Table des matières</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Plan du travail . . . . .	1
1.2 Situation générale . . . . .	2
1.3 Production électrique . . . . .	2
1.3.1 Situation mondiale . . . . .	2
1.3.2 Situation belge . . . . .	4
1.4 Combustibles et ressources - Cycle amont . . . . .	7
1.5 Déchets nucléaires - Cycle aval . . . . .	9
1.5.1 Problématique générale . . . . .	9
1.5.2 Stratégies envisagées . . . . .	10
1.5.3 Stratégies envisagées en Belgique . . . . .	11
1.6 Conclusion . . . . .	19
<b>2 Etude expérimentale de l'argile de Boom</b>	<b>20</b>
2.1 Argile de Boom . . . . .	20
2.1.1 Origines géologiques . . . . .	20
2.1.2 Composition et stratigraphie . . . . .	21
2.1.3 Paramètres géotechniques . . . . .	22
2.1.4 Etat de fracturation . . . . .	23
2.1.5 Conclusion . . . . .	26
2.2 Expériences réalisées dans le cadre du mémoire . . . . .	27
2.2.1 Problématiques et notions physiques des phénomènes . . . . .	27
2.2.2 Méthode expérimentale . . . . .	28
2.2.3 Protocole expérimental appliqué . . . . .	30
2.2.4 Courbe de rétention . . . . .	37
2.2.5 Mise en évidence du comportement anisotrope . . . . .	41
2.2.6 Conclusion . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Etude numérique du comportement anisotrope de l'argile de Boom</b>	<b>52</b>
3.1	Programmes de recherches liés à l'altération du massif lors de l'excavation . . . . .	52
3.1.1	Modélisations réalisées par le programme CLIPEX . . . . .	53
3.1.2	Conclusion . . . . .	57
3.2	Modèles réalisés dans le cadre du mémoire . . . . .	58
3.2.1	Description des modélisations . . . . .	59
3.2.2	Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie sans soutènement . . . . .	66
3.2.3	Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement . . . . .	84
3.2.4	Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement hydro-mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement . . . . .	86
3.2.5	Modélisations finales 3-D - Analyse du comportement hydro-mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement . . . . .	91
3.2.6	Confrontation des résultats numériques aux données in situ . . . . .	96
3.3	Conclusion . . . . .	102
<b>4</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>103</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>110</b>
	<b>Table des tableaux</b>	<b>112</b>
	<b>Liste des abréviations</b>	<b>113</b>
<b>5</b>	<b>Annexes</b>	<b>119</b>
5.1	Introduction . . . . .	119
5.1.1	Expériences menées à travers le monde . . . . .	119
5.1.2	Principe de stockage catégories B & C . . . . .	119
5.1.3	Localisation des capteurs du programme CLIPEX . . . . .	120
5.2	Etude expérimentale . . . . .	121
5.2.1	Agés géologiques . . . . .	121
5.2.2	Laboratoire . . . . .	121
5.2.3	Calcul des paramètres expérimentaux . . . . .	122
5.2.4	Résultats expérimentaux . . . . .	125
5.3	Etude numérique . . . . .	126
5.3.1	Cas tests réalisés préliminaires - Programme CLIPEX . . . . .	126
5.3.2	Développement analytique de la méthode de convergence/confinement en contraintes isotropes . . . . .	127
5.3.3	Développement analytique de la méthode de convergence/confinement en contraintes anisotropes . . . . .	131
5.3.4	Compléments graphiques des simulations . . . . .	134

---

# Introduction générale

---

L'objet du présent travail de fin d'études, présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Ingénieur Civil des Constructions, est consacré à l'étude expérimentale et numérique du comportement anisotrope de l'argile de Boom. Cette recherche s'intègre dans le cadre de la gestion des déchets nucléaires de haute activité à longue durée de vie, dont le traitement envisagé en Belgique, est l'enfouissement en couches géologiques profondes.

## 1.1 Plan du travail

Dans l'optique de l'étude de la faisabilité de la technique d'enfouissement, le mémoire se concentre sur la modélisation hydro-mécanique de l'excavation de la galerie de liaison réalisée lors de l'extension du laboratoire HADES. Ce creusement fortement instrumenté en termes de déplacements, pressions de pore et contraintes, a déjà été modélisé par divers groupes d'études. Néanmoins, notre approche vise à compléter ces simulations en intégrant le comportement anisotrope de l'argile de Boom, moins étudié jusqu'à présent.

Par ailleurs, afin d'alimenter les modèles de manière générale, il est nécessaire d'exploiter les résultats d'essais de laboratoire pour caractériser le matériau. Le mémoire propose dès lors une phase expérimentale destinée à établir une courbe de rétention en eau de l'argile de Boom, caractéristique du comportement hydro-mécanique non saturé. Nous profiterons de ces manipulations pour tenter de mettre en évidence l'anisotropie du matériau.

De plus, afin d'établir le contexte général de ce travail de fin d'études, la situation actuelle du nucléaire dans le monde et en Belgique est brièvement présentée en introduction de ce mémoire.

Le plan du travail se résume en trois chapitres principaux :

- l'introduction présente la problématique générale du nucléaire, des déchets radioactifs et les recherches menées en Belgique sur le stockage ;
- la phase expérimentale du mémoire vise à caractériser par une courbe de rétention en eau le comportement hydro-mécanique non saturé de l'argile de Boom tout en mettant en évidence le comportement anisotrope du matériau ;
- la phase numérique du mémoire propose d'intégrer le comportement anisotrope de l'argile de Boom dans une modélisation numérique de l'excavation de la galerie de liaison ;

## 1.2 Situation générale

L'énergie nucléaire est présente dans divers secteurs tels que la médecine<sup>1</sup>, l'agriculture<sup>2</sup>, la recherche scientifique et industrielle<sup>3</sup>, l'armement<sup>4</sup> et la production énergétique<sup>5</sup> [IAEA, 2012]. Ce dernier représente près de 80% du volume de déchets radioactifs incluant les combustibles usés ou retraités, les résidus de fabrication, ainsi que les installations annexes contaminées. Par conséquent, l'introduction s'intéresse particulièrement à la filière électrique à base de combustible nucléaire fissile.

## 1.3 Production électrique

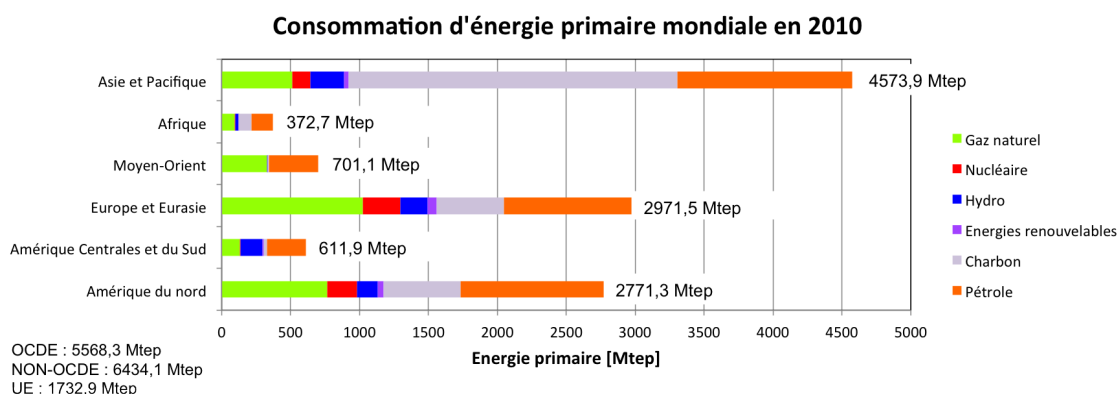
### 1.3.1 Situation mondiale

La production d'énergie primaire<sup>6</sup> mondiale a cru de 5,5% en 2010 pour s'établir à 12 717,2 Mtep<sup>7</sup>, dont 5 405,9 Mtep dans l'OCDE<sup>8</sup>. Elle a par ailleurs augmenté de 66% entre 1980 et 2007 et l'on table sur une progression de 40% d'ici à 2030, avec un accroissement de 70% pour la part de l'électricité entre 2010 et 2035 [IEA, 2012]. Le développement économique des pays dits "émergents" et la croissance démographique<sup>9</sup> ne font qu'alimenter le phénomène.

Toutefois les modes de production varient géographiquement. La figure 1.1 met en évidence ces disparités en décrivant la répartition<sup>10</sup> de consommation d'énergie primaire dans le monde en 2010 [ONU, Février 2012]. On y observe la présence du nucléaire principalement en Amérique du Nord et en Europe-Eurasie. L'accroissement de la consommation énergétique et la part substantielle du nucléaire dans la production actuelle et future de certains pays, laissent présager une augmentation du volume de déchets radioactifs.

Le coût financier et environnemental des combustibles fossiles ainsi que la difficulté de gestion et le coût des énergies renouvelables, font de l'énergie nucléaire une solution alternative pour la production massive et stable d'électricité de nombreux pays. Néanmoins, la dangerosité de l'énergie issue de l'atome, tant du point de vue de l'exploitation que vis-à-vis de la gestion de ses déchets extrêmement nocifs, font de cette option un risque environnemental et social majeur. L'utilisation militaire et les divers accidents<sup>11</sup> survenus dans les installations civiles, ne font que confirmer et alimenter les craintes émises à l'encontre de ce type d'installations et plus généralement envers les radioéléments.

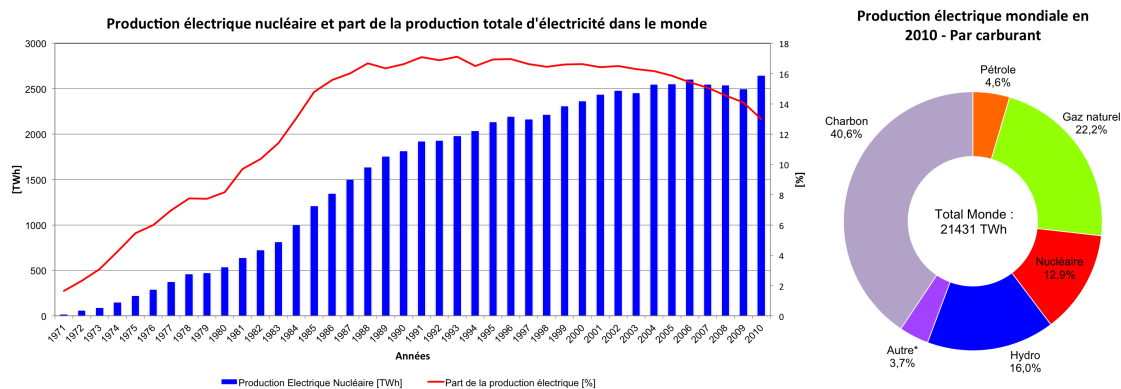
- 
1. Médecine nucléaire ; Imagerie nucléaire ; Thérapie par rayons ; etc.
  2. Lutte contre les infections ; Traçage des animaux ; Stérilisation d'insectes ; Optimisation de l'exploitation d'eau ; etc.
  3. Datation ; Techniques d'analyses et identification de substances ; Exploration spatiale ; etc.
  4. Ogives nucléaires ; etc.
  5. Centrales électriques à base de combustible fissile ; Projet de recherche pour combustible fusible - ITER ; Propulsion de navires et sous-marins.
  6. Énergie directement produite avant stockage, transport et consommation finale.
  7. Méga tonne équivalent pétrole.
  8. L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques créée en 1960, regroupe en 2013, 34 pays membres à travers le monde pour une population de 1.245.198.487 individus en 2011 [OCDE, 2013].
  9. Les Nations-Unies estiment la progression de la population mondiale de 6,8 milliards d'individus en 2009 à plus de 9 milliards en 2050 [ONU, 2013].
  10. Les pourcentages mentionnés sont établis à partir des données exprimées en Mtep (Million de tonnes équivalent pétrole).
  11. Echelle INES (International Nuclear Event Scale) - Echelle de gravité des accidents de huit niveaux. 0 - Événement hors échelle ; 7 - Accident majeur [AFCN, 2013b].



**Figure 1.1** – Consommation d'énergie primaire dans le monde en 2010 [BP, 2011].

Récemment, l'accident survenu à la centrale de Fukushima Dai-ichi le 11 mars 2011 au Japon, a eu un impact direct sur la politique énergétique des Etats, dont la Belgique. Ainsi, en 2011, 13 réacteurs ont été mis à l'arrêt, ce qui représente le plus grand nombre de fermetures simultanées depuis l'accident de Tchernobyl (Ukraine) en 1986 [WNA, 2013b].

**Energie électrique** La production d'électricité à base de combustible nucléaire fissile à des fins civiles remonte à 1954, par la mise en service du premier réacteur<sup>12</sup> en Union Soviétique. Dès lors, le nombre, la puissance et l'efficacité des installations n'ont fait que croître au cours des années. La figure 1.4 illustre cette croissance de production électrique nucléaire et la part tenue par cette ressource énergétique dans la production totale d'électricité.

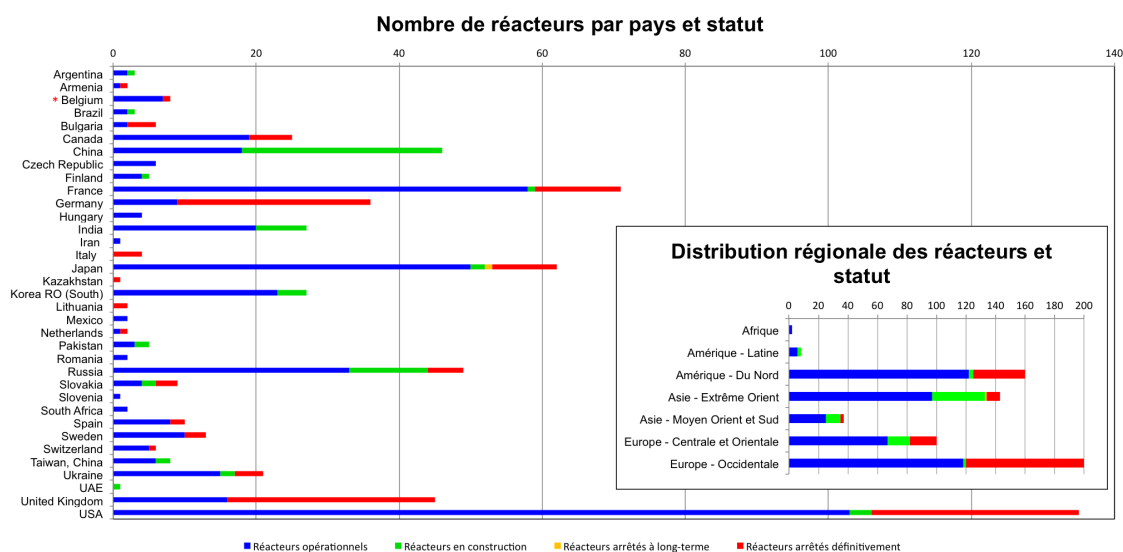


**Figure 1.2** – Evolution de la production électrique nucléaire dans le monde de 1971-2010 et production électrique mondiale en 2010 par carburant [IEA, 2012].

En 2013, on dénombre 437 réacteurs nucléaires commerciaux opérationnels dans 30 pays (+ Taiwan) avec une capacité totale de 373 156 MWh, ce qui correspond à 13,5% de la production électrique mondiale, 24% de la production électrique de l'OCDE et 34% de la production électrique de l'Union Européenne. On compte également 240 réacteurs de

12. Le premier réacteur artificiel expérimental conçu par l'équipe d'Enrico Fermi à l'Université de Chicago (Chicago Pile-1) date quant à lui de 1942.

recherche exploités par 56 pays et 180 réacteurs nucléaires présents sur 150 navires et sous-marins. 68 réacteurs sont également en cours de construction pour une puissance totale de 65 486 MWh (dont 28 en Chine, 11 en Russie et 7 en Inde). La figure 1.3 indique le nombre et le statut des réacteurs à travers le monde [IAEA/PRIS, 2013] [WNA, 2013b]. Ce dernier traduit l'augmentation de capacité électrique de la part des pays émergents, notamment la Chine. Inversement, on constate une réduction de l'offre nucléaire en Occident, en particulier en Europe occidentale. Notons que l'Autriche, la Suède, l'Italie, la Belgique et l'Allemagne ont, ou vont renoncer à l'utilisation du combustible nucléaire.



**Figure 1.3** – Nombre de réacteurs et leur statut dans le monde en 2013 [IAEA/PRIS, 2013].

### 1.3.2 Situation belge

**Installations et production électrique** La Belgique compte sept réacteurs nucléaires opérationnels détaillés à la table 1.1. Leur production totale est de 38 464,46 GWh en 2012, soit 51,02% de la production électrique totale du pays [IAEA/PRIS, 2013].

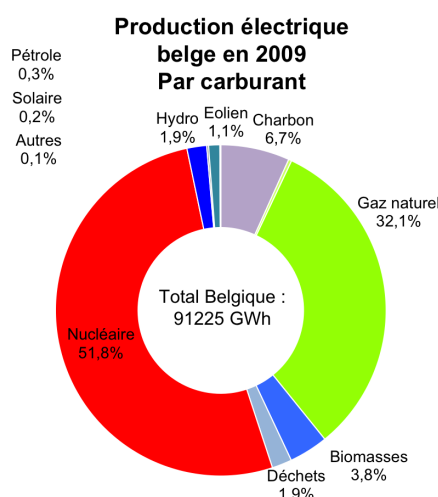
En juin 2012, l'inspection décennale des installations de Doel-3, a mis à jour la présence de micro-fissures dans la cuve du réacteur évalué en incident de catégorie INES-1. Après l'analyse de l'ensemble du parc belge, les mêmes dommages ont été détectés sur la cuve de Tihange-2, probablement liés au mode de fabrication et à l'alliage utilisé. Ces deux réacteurs ont été temporairement mis à l'arrêt ([AFCN, 2013a]) et n'ont reçu l'autorisation de redémarrage de l'AFCN que le 17 mai 2013 [Stroobants et Cosnard, 2013].

**Politique et sécurité nucléaire** En Belgique, la loi du 31 janvier 2003<sup>13</sup>, interdit la construction de nouvelles centrales électriques exploitant la fission de combustible nucléaire et a limité la durée de vie des centrales existantes à 40 ans [MB, 2003] [SPFEconomie, 2013]. Notons qu'entre temps, divers rapports ("commission 2030" de 2007 et rapport externe

13. Bien que contraire aux recommandations de la commission AMPERE (Commission d'Analyse des Modes de Production d'Electricité et de redéploiement des Energies) de 1999, recommandant le développement de ce type d'énergie.

Nom	Type	Localisation	Puissance Unitaire de Référence [MW]	Connexion au réseau	Mise à l'arrêt
BR-3	PWR	Mol	10	1962-10-10	1987-06-30
DOEL-1	PWR	Doel-Beveren	433	1974-08-28	2015-02-15
DOEL-2	PWR	Doel-Beveren	433	1975-08-21	2015-12-01
DOEL-3	PWR	Doel-Beveren	1006	1982-06-23	2022-10-01
DOEL-4	PWR	Doel-Beveren	1039	1985-05-08	2025-07-01
TIHANGE-1	PWR	Tihange	962	1975-03-07	2025-10-01
TIHANGE-2	PWR	Tihange	1008	1982-10-13	2023-02-01
TIHANGE-3	PWR	Tihange	1046	1985-06-15	2025-08-01

**Table 1.1** – Liste des réacteurs nucléaires belges actifs et arrêtés en 2012 [WNA, 2013a] [SPFEconomie, 2013].



**Figure 1.4** – Répartition de la production électrique belge en 2009 par carburant [WNA, 2013a].

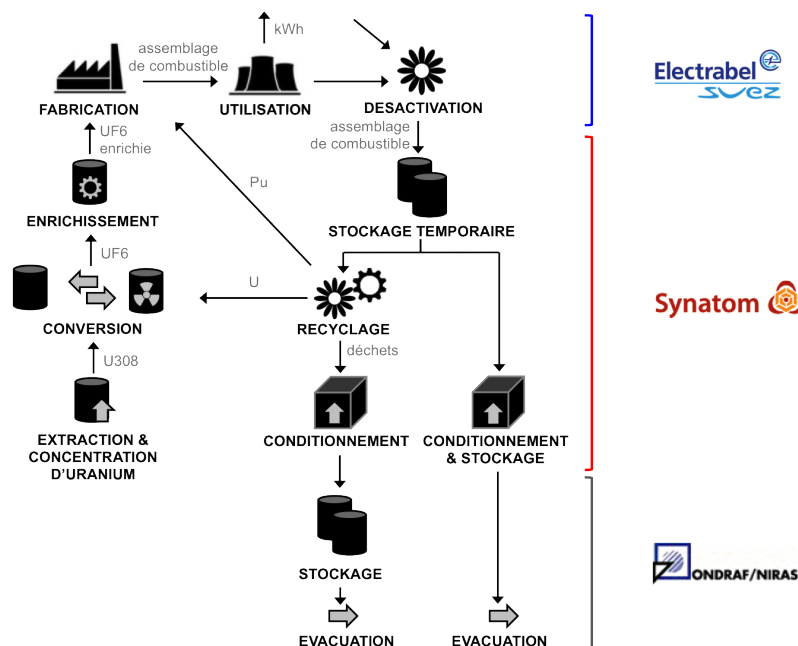
d'octobre 2009) ont pointé les faiblesses de la législation en termes de sécurité d'approvisionnement, de stabilité du prix de l'énergie et du respect des limitations d'émissions de gaz à effet de serre en vertu des accords post-Kyoto [CE2030, 2007]. Jusqu'aux élections anticipées d'avril 2010, des discussions de prolongation de durée de vie des centrales avec compensations financières et subventions du secteur renouvelable étaient en discussion avec les gestionnaires des centrales nucléaires. L'accord gouvernemental d'octobre 2011, a conclu sur le maintien de la loi de 2003, suite, entre autres, à la catastrophe japonaise. Néanmoins, afin de garantir l'approvisionnement énergétique, l'exploitation de la centrale de Tihange-1 sera prolongée de 10 ans malgré son âge, ceci s'accompagnera des investissements nécessaires pour garantir la sécurité de l'exploitation selon l'AFCN [WNA, 2013a].

L'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN) dépend du Ministère de l'Intérieur, elle est chargée du contrôle des installations nucléaires avec le rôle de garantir la radioprotection du personnel et du public. L'agence classe par ailleurs les différents sites accueillant des substances radioactives. Selon le rapport de 2013 des passifs nucléaires de l'ONDRAF, on dénombre en Belgique au 31 décembre 2010, 635 sites de classe I, II et III détaillés à la table 1.2, et 32 sites dépourvus d'autorisation nucléaire [InventaireDéchets, 2013].

Classe	Nombre	Description
I	10	2 centrales nucléaires, 2 usines de fabrication de combustibles, 3 sites de recherche et 2 sites de traitement, conditionnement et entreposage de déchets radioactifs.
II	433	Sites comportant des sources scellées de faible ou haute activité utilisés pour des mesures ou applications médicales (cyclotron, sites industriels, hospitaliers, universitaires, laboratoires et site d'Umicore).
III	210	Sites comportant des sources scellées de faible activité pour mesures ou détecteurs de fumée ionisants (sites industriels et laboratoires).

**Table 1.2** – Classification des sites accueillant des substances radioactives selon l'ONDRAF [InventaireDéchets, 2013].

**Cycle du combustible** Le cycle du combustible regroupe l'ensemble des étapes qui jalonnent la vie du combustible nucléaire, de la production à l'élimination. En Belgique, la tâche incombe à l'entreprise Synatom, détenue par Electrabel avec "Golden share" de l'Etat belge. La figure 1.5 détaille l'organisation et les diverses étapes du cycle. On distingue d'une part, l'amont du circuit, développé à la section 1.4, qui correspond à l'approvisionnement en matière première, son enrichissement et la fabrication du combustible exploitable. D'autre part, l'aval du cycle détaillé à la section 1.5, est quant à lui destiné à la gestion du combustible utilisé après son déchargement de centrale [Synatom, 2013b].



**Figure 1.5** – Organisation du cycle du combustible nucléaire en Belgique [Synatom, 2013c].

La fabrication du combustible (700t/an) est confiée à AREVA / FBFC (Franco-Belgian Fuel Fabrication) sur le site de Dessel (Belgique). Celui-ci est en effet spécialisé dans l'assemblage de combustible et la fabrication de pellets pour PWR<sup>14</sup> et BWR<sup>15</sup>, ainsi que dans l'assemblage des composants des combustibles MOX (200t/an).

14. Pressurized Water Reactor

15. Bowled Water Reactor

La gestion des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies est attribuée à l'ON-DRAF/NIRAS, responsable du transport, du traitement, du conditionnement, du stockage et de l'élimination des produits radioactifs du pays. Les installations situées à Mol-Dessel, sont gérées par la filiale Belgoprocess. Le coût de la gestion des déchets gérée par Synatom est répercuté sur les producteurs de déchets nucléaires. Précisons que le retraitement (AREVA - La Hague - France) des déchets est depuis 1993 légalement interdit. Ils sont par conséquent entreposés dans les centrales ou sur le site de Dessel en attente de la solution définitive. Les solutions détaillées à la section 1.5 sont étudiées par l'agence de recherche nucléaire belge, SCK•CEN [Synatom, 2013a].

A titre indicatif, voici les principales activités de déclasserement en cours :

- Réacteur BR-3 (prototype PWR américain installé à Mol en 1962) : en cours de déclasserement par SCK•CEN
- Réacteur Chooz A (réacteur Franco-Belge arrêté en 1991) : en cours de déclasserement par EDF
- Eurochemics (Ancienne usine de retraitement belge-OCDE à Mol arrêtée en 1974) : en cours de déclasserement par Belgoprocess
- Belgonucléaire (Ancienne usine de combustible MOX belge à Mol) : en cours de déclasserement

**Recherche et développement** L'activité de recherches et développements est gérée par l'agence de recherche nucléaire belge, SCK•CEN. Cette dernière dispose d'un réacteur expérimental (BR-2)<sup>16</sup> de 1961, modifié entre-temps, ainsi que de deux petites unités. La Belgique a également participé à plusieurs expériences internationales telles que les prototypes de Kalkar en Allemagne, ou le Superphénix (Réacteur à neutrons rapides) en France.

Actuellement, le SCK•CEN envisage la construction du Myrrha (réacteur multifonction de recherche hybride pour des applications de haute technologie) à Mol, suite aux résultats concluants du prototype de démonstration de puissance réduite, Guinevere, en 2010. Plusieurs accords internationaux ont par ailleurs été signés avec la Chine et le Kazakhstan pour l'exploitation du Myrrha. En outre, le SCK•CEN a acquis une expertise en démantèlement d'installations nucléaires par le déclasserement du BR-3 [WNA, 2013a].

## 1.4 Combustibles et ressources - Cycle amont

**Electricité** Le combustible de réacteurs est l'uranium, un métal légèrement radioactif présent dans la croûte terrestre, plus abondant que l'argent. Il est exploité en mines où la concentration est suffisante pour une valorisation économique (minerai). Ces exploitations se font par excavations souterraines, en surface ou par lixiviation (méthode ISL - In Situ Leach) (Kazakhstan). Cette dernière consiste à dissoudre l'oxyde d'uranium et le ramener en surface par les écoulements d'eau oxygénée internes au massif poreux, avec ajout d'acides ou de solutions alcalines. Le minerai extrait est concassé et broyé en une boue fine qui est lessivée dans l'acide sulfurique, ou en solution alcaline, pour permettre la séparation de l'uranium. La solution obtenue est ensuite précipitée sous forme d'oxyde d'uranium concentré ( $U_3O_8$ ), séché et conditionné en fûts ("yellowcake"). Les résidus du

16. BR-2 produit 16% de Mo-99/Tc-99 à usage médical, du monde

processus sont isolés de l'environnement dans des puits *ad hoc*.

La figure 1.6 illustre l'évolution de la demande, de l'offre et du prix de l'oxyde d'uranium dans le monde. En 2011, le Kazakhstan en est le principal producteur avec 35,6% de parts de marché (ISL). En 2010, 75% de la demande d'uranium est approvisionnée par les mines, le reste provient du recyclage des armes nucléaires héritées de la guerre froide ou du recyclage de combustible usé. En 2013, la demande en uranium est de 66 512 tU, soit 78 438 t de  $U_3O_8$  selon la WNA.

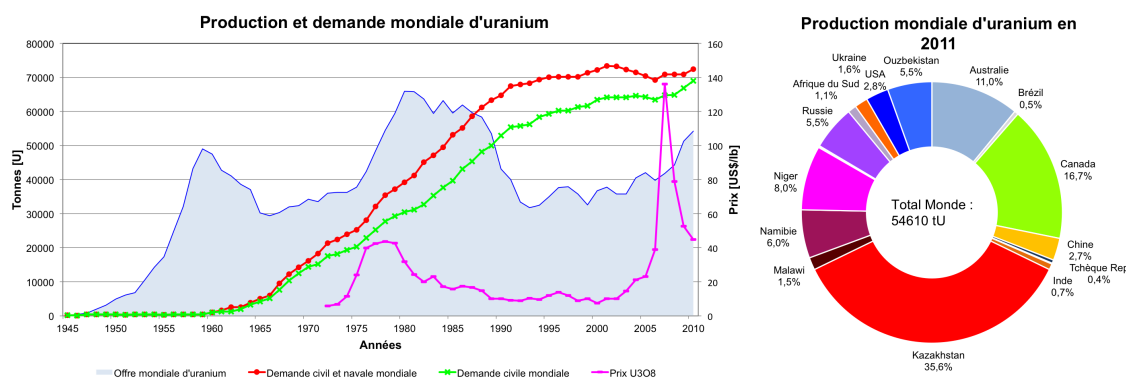


Figure 1.6 – Production mondiale d'uranium en 2011 [WNA, 2012].

L'oxyde d'uranium brut doit subir plusieurs étapes avant d'être exploité en centrales, de manière à augmenter la concentration naturelle en isotope fissile (isotope 235) (0,7%), à 3,5-5%. Le produit affiné en dioxyde d'uranium ensuite converti en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ), gazeux à température relativement basse, subit un enrichissement (nécessaire pour la plupart des réacteurs). Cette étape est réalisée le plus souvent à l'aide de centrifugeuses, où suite à la différence massique des isotopes présents, se créent deux courants de matière au sein du gaz. Au terme de l'opération, nous obtenons donc un volume plus concentré, l'uranium enrichi, et un volume moins concentré, l'uranium appauvri. Le résidu enrichi est reconverti en oxyde d'uranium enrichi. Le produit est finalement compressé à haute température (supérieure à  $1400^{\circ}C$ ) sous forme de pastilles qui sont empilées au sein de tubes eux-mêmes regroupés au sein d'assemblages qui seront introduits par centaines dans le réacteur.

En guise d'information, un réacteur de 1000MW exige en moyenne 27 tonnes d'uranium neuf chaque année.

La réaction nucléaire active au sein du réacteur va convertir une fraction de l'uranium-238 en plutonium-239 radioactif, ce dernier contribue à hauteur d'un tiers de la production énergétique. La chaleur produite est utilisée à la formation de vapeur qui actionnera les turbines de la centrale par l'intermédiaire de plusieurs circuits de fluides caloporteurs.

On maintient l'efficacité du réacteur en remplaçant tous les ans ou dix-huit mois, un tiers du combustible. On décharge alors les assemblages concernés dans un bassin (à proximité) afin de dissiper une partie de la chaleur et rayonnements résiduels pendant plusieurs mois ou années. Le combustible usé est soit récupéré et recyclé, soit stocké à long terme sans traitement. Le déchet contient encore près de 96% de son uranium original, dont le contenu

fissile a été réduit à moins de 1%.

Dès lors, le retraitement des déchets sépare l'uranium et le plutonium en coupant les barres de combustible et les dissolvant dans de l'acide pour séparer les différents matériaux. On peut alors les réintroduire dans le cycle de conversion et enrichissement pour la création de combustible neuf. Les 3% restants peuvent être stockés sous forme liquide ensuite solidifiée. L'oxyde de plutonium peut quant à lui être combiné à de l'oxyde d'uranium et ainsi former en combustible à oxydes mixtes (MOX), utilisable dans certains réacteurs.

Précisons l'arrivée d'une source de combustible complémentaire depuis les années 90 provenant du démantèlement d'une partie des armes atomiques américaines et soviétiques à la suite du traité de désarmement de 1987, dont l'objectif est de réduire de 80% les stocks d'armement nucléaire. Ce matériau est néanmoins concentré en moyenne à plus de 90% d'uranium-235, et doit donc être dilué à l'aide d'uranium appauvri pour atteindre les concentrations de 3,5-5% de matière fissile. On peut également combiner le plutonium de ces armes à de l'uranium et ainsi former du MOX [WNA, 2012].

**Autres** Les radioéléments à des fins médicales, agricoles ou autres à l'exception de l'armement, sont généralement produits à l'aide de réacteurs expérimentaux et de cyclotrons (accélérateurs de particules). On notera la présence de l'Institut des Radio-Elément de Fleurus (IRE)<sup>17</sup> en Belgique [IRE, 2013].

## 1.5 Déchets nucléaires - Cycle aval

### 1.5.1 Problématique générale

Les déchets radioactifs émettent des rayonnements ionisants énergétiques nocifs pour la flore et la faune, dont l'Homme. Cette émissivité décroît de manière logarithmique avec le temps en fonction du matériau radioactif, ce que l'on caractérise par sa durée de demi-vie. L'activité radioactive du composé est également variable selon la substance. Il convient donc de traiter différemment le déchet en fonction des deux paramètres, temporel et d'activité [laradioactivite.com, 2013]. Pour ce faire, l'ONDRAF, en conformité avec l'AIEA, classe les déchets en trois catégories détaillées à la table 1.3 [ONDRAF/NIRAS, 2013a].

	Faible activité	Moyenne activité	Forte activité
<b>Courte période de demi-vie</b>	A	A	C
<b>Longue période de demi-vie</b>	B	B	C

**Table 1.3** – Classification des déchets radioactifs selon l'ONDRAF [ONDRAF/NIRAS, 2013a].

L'audit réalisé par l'ONDRAF fin 2008, estime les volumes des diverses catégories conditionnées d'ici 2075 de la manière suivante [ONDRAF/NIRAS, 2013b] :

- Catégorie A :  $69900m^3$ , représente 0,5% de l'activité de l'ensemble des déchets radioactifs et 80% de leur volume.
- Catégorie B :  $11100m^3$  en tenant compte du retraitement, sinon  $10430m^3$ , représente 2% de l'activité de l'ensemble des déchets radioactifs et 19% de leur volume.

17. Fondation d'utilité publique fondée en 1971 à Fleurus, active dans la production de radioéléments, tels que le molybdène-99 et le technétium-99 métastable, utilisés dans les diagnostics médicaux [IRE, 2013].

- Catégorie C :  $600m^3$  en tenant compte du retraitement, sinon  $4500m^3$ , représente 97,5% de l'activité de l'ensemble des déchets radioactifs et 1% de leur volume.

La prolongation de vie de Tihange-1 de dix ans impactera le volume de déchets de la manière suivante :

- Catégories A et B :  $+330m^3$  avec retraitement des déchets, sinon  $+300m^3$ .
- Catégorie C :  $+30m^3$  avec retraitement de l'ensemble des combustibles irradiés, sinon  $+150m^3$ .

### 1.5.2 Stratégies envisagées

Le combustible usé déchargé de centrale peut soit être traité en cycle fermé, avec retraitement du matériau à hauteur de 97%, soit être directement considéré comme déchet dans le cycle ouvert.

Depuis le moratoire de 1993, seul le cycle ouvert est autorisé en Belgique. Cette décision a augmenté considérablement le volume de déchets. Toutefois, l'option cycle fermé a été appliquée dans les années 70 pour 671,5 tonnes de combustible usé, traité sur le site de la Hague (AREVA) en France. Par conséquent, Synatom, gestionnaire belge du cycle aval du combustible depuis 1976, continue à gérer ces contrats pour le stockage définitif par l'ONDRAF et sa filiale Belgoprocess. Notons qu'un système de surveillance avancé des déchets est nécessaire conformément au Traité de non-prolifération des armes nucléaires, ratifié par la Belgique [Synatom, 2013c].

Une fois qu'il ne reste que le déchet, différentes solutions sont possibles [laradioactivite.com, 2013].

**Isolement/Confinement** Une des solutions est le confinement en milieu hermétique pour une durée suffisamment longue au terme de laquelle la dégradation naturelle du composé fournira un élément d'une radioactivité admissible. Il est ainsi possible d'entreposer des colis de déchets radioactifs vitrifiés en zones protégées et surveillées. Il est néanmoins primordial de garantir la séparation entre le déchet et la biosphère, par conséquent une série de barrières est nécessaire pour se prémunir de toute altération du confinement. Toute défaillance d'une barrière doit influencer au minimum le fonctionnement des autres barrières.

Précisons qu'avant tout entreposage, on réduit en partie l'émission de chaleur résiduelle du déchet qui endommagerait les barrières directes. Une fois apte au stockage, on procède à l'isolement par exemple en couches géologiques profondes (quelques centaines de mètres à quelques kilomètres). Le choix de la géologie permet de constituer une barrière naturelle face à une éventuelle migration de radionucléides.

**Retraitement** Comme déjà annoncé à la section 1.3.2, il s'agit du retraitement par séparation des combustibles usés. On les réintroduit ensuite dans le cycle du combustible, soit pour être mélangés à d'autres oxydes (MOX) soit pour former avec ajouts, du combustible neuf, ce procédé réduit considérablement le volume de déchets mais présente de sérieux risques environnementaux.

**Dilution/Dispersion** Ce procédé vise à réduire la concentration en matières toxiques dans l'eau ou l'air et ainsi répondre aux exigences environnementales. A l'heure actuelle, la méthode est tolérée pour les éléments radioactifs très peu toxiques et extrêmement difficiles à piéger. Ainsi, l'usine française d'AREVA de La Hague, est autorisée à rejeter du tritium dans la Manche et du krypton-85 dans l'atmosphère.

**Transmutation** Il s'agit d'une modification du noyau par l'intermédiaire d'un retour en réacteur. L'objectif est la conversion de l'élément en une version plus stable et non radioactive. Néanmoins, cette opération coûteuse, difficile et à faible rendement n'est applicable que pour les éléments à courte durée de demi-vie et nécessite une séparation par nature des éléments présents. Il est également possible de transmuter un noyau lourd en noyau fortement radioactif à courte demi-vie, ce qui permet de s'en débarrasser plus rapidement (par exemple le technétium-99 d'une demi-vie de 210 000 ans peut être converti en technétium-100 par capture d'un neutron, dont la demi-vie est de quelques minutes).

**Stockage en mer** Cette technique essentiellement utilisée dans les années 50, visait à rejeter une partie des déchets de centrales européennes et américaines dans l'Atlantique et dans la Manche [Queneudec, 1965]. On évalue à plus de 100 000 tonnes, la quantité de déchets radioactifs stockée dans des conteneurs en béton déversés en mer (Royaume Uni 76,55% ; Suisse 6,94% ; USA 7,67% ; Belgique 4,63%). La convention internationale de Londres de 1972, dont la partie relative à l'immersion de déchets radioactifs en milieu marin est entrée en application en 1993, a interdit ce procédé, ce qui mis également fin aux rejets des liquides radioactifs des cuves de sous-marins nucléaires soviétiques en cours de démantèlement. Notons qu'une partie des conteneurs en béton n'a pas résisté au temps [IMO, 2013].

**Autres** Une évacuation de la biosphère de manière permanente serait d'envoyer ces produits dans l'espace, sur une orbite lointaine ou en direction du soleil. Toutefois, une telle solution présente plusieurs obstacles majeurs, tel que le coût d'envoi (i.g. Ariane V : 150 millions d'euros pour une charge utile de 10 tonnes). De plus, le risque en cas de décollage raté serait la dispersion dans l'atmosphère de produits hautement toxiques.

Une dernière solution est le stockage en zones de subduction, où les colis seraient enfouis dans une couche proche de la zone de subduction. Ce phénomène à haute température et pression, détruirait le déchet et l'emmèneraient en couches terrestres inférieures. La technologie complexe, le coût et le risque environnemental sont évidemment très élevés.

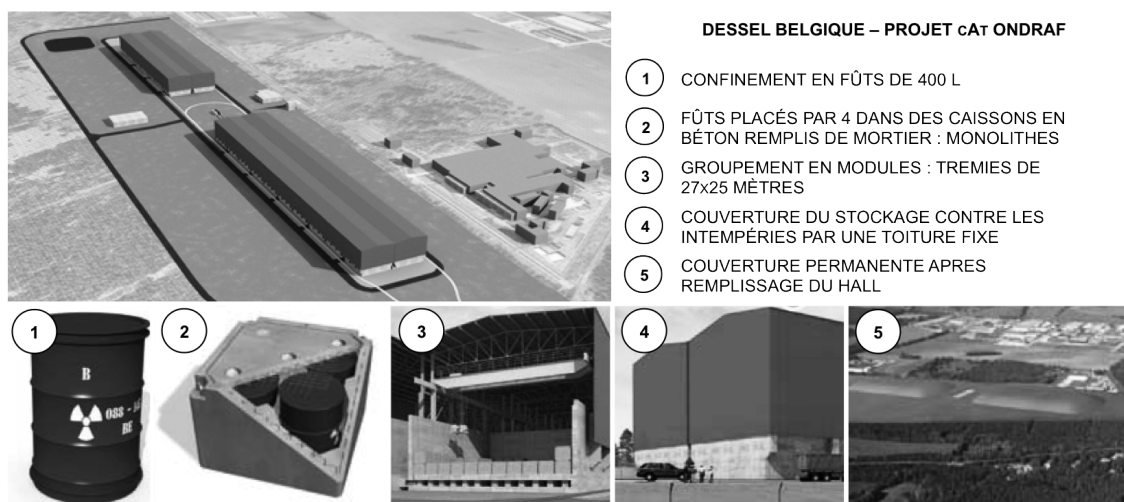
### 1.5.3 Stratégies envisagées en Belgique

La classification détaillée à la table 1.3 permet du point de vue pratique, un traitement différencié des déchets par l'ONDRAF/NIRAS. Ainsi, les éléments inclus dans la catégorie A englobant les déchets radioactifs médicaux, agro-alimentaires, d'applications industrielles et de certaines installations de centrales telles que les vitres et tuyauteries, seront isolés de l'environnement en les entreposant dans des installations de surface à faible blindage sur le site de Dessel. Les catégories B et C seront vraisemblablement placées en couches géologiques profondes où la perméabilité et la capacité de rétention de radionucléides sont suffisantes que pour garantir un isolement de la biosphère extérieure par barrière naturelle.

### 1.5.3.1 Stratégie de confinement de la catégorie A

La solution retenue vise à confiner et à entreposer les déchets de catégorie A en surface pour une durée minimale de 300 ans. Ces derniers sont actuellement stockés sur le site de Belgoprocess après leur traitement.

Le projet "cAt" géré par l'ONDRAF/NIRAS, lancé le 23 juin 2006 par le gouvernement fédéral après une phase d'études entamée en 1984, devrait être opérationnel au plus tôt en 2016. Celui-ci présente une capacité de stockage de 70.500  $m^3$  et garantit une sécurité par l'intermédiaire d'une redondance de barrières. La philosophie de base est la non-nécessité d'intervention des générations suivantes dans la zone d'entreposage. Néanmoins, la surveillance et la récupération des éléments reste possible mais non-obligatoire. Ce concept déjà employé en France, en Espagne et au Japon, suit un processus de mise en œuvre synthétisé à la figure 1.7. Notons la volonté de l'ONDRAF/NIRAS de garantir la qualité de l'intégration environnementale et sociale du complexe. Pour ce faire, de nombreuses démarches de communication, de consultations et de participations citoyennes sont organisées. De plus, le transport routier sera limité pour réduire au maximum les risques liés au transport (transport fluvial) [ONDRAF/NIRAS, 2010].



**Figure 1.7** – Confinement des déchets de catégorie A - Projet cAt ONDRAF - Dessel, Belgique [ONDRAF/NIRAS, 2010].

### 1.5.3.2 Stratégie de confinement des catégories B et C

En Belgique, la solution définitive de confinement des catégories B et C n'est pas encore désignée officiellement, bien que la définition d'une politique nationale de gestion de déchets radioactifs soit une exigence de la directive 2011/70/Euratom. Toutefois, diverses solutions sont en cours d'études dans le cadre du Plan Déchets orchestré par l'ONDRAF/NIRAS. Ce dernier vise à répondre aux exigences :

- de l'arrêté royal du 30 mars 1981 déterminant les missions et les modalités de fonctionnement de l'ONDRAF avec l'obligation de gestion des déchets de catégories B et C.
- et de la loi du 13 février 2006 relative aux incidences de plans et programmes sur l'environnement et la participation du public dans l'élaboration de ces plans.

Les deux solutions envisageables étant le stockage à long terme en surface ou l'enfouissement en couches géologiques profondes, l'option de dispersion/dilution étant proscrite. Le rapport de l'ONDRAF relatif au Plan Déchet préconise, en accord avec les recommandations internationales<sup>18</sup>, l'option d'enfouissement profond. Cela se justifie par la complexité et le nombre de facteurs à prendre en compte sur la durée considérée, soit plusieurs milliers d'années. Les évolutions sociales, économiques et géologiques, mais aussi les altérations et dommages accidentels ou volontaires des structures, se doivent d'être évalués de manière rigoureuse tant la responsabilité sur les générations suivantes est grande [PlanDéchets, 2011].

Il est admis que le rôle principal de telles installations est de garantir la sécurité de l'environnement face à la toxicité des déchets. L'ONDRAF synthétise ces missions en trois fonctions de sûreté :

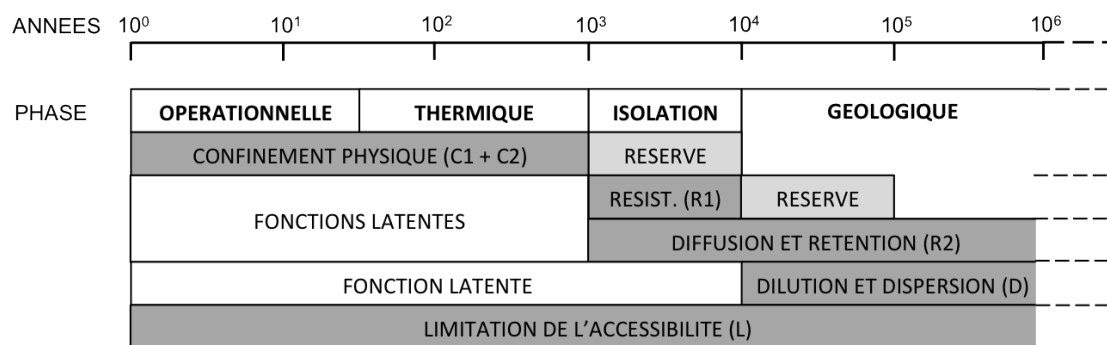
- Le confinement physique : isole l'environnement de toute contamination de radionucléides, via principalement l'eau. Ce confinement constitué d'une multitude de couches, devra résister à la phase "thermique", où le déchet chauffe l'installation suite à son rayonnement résiduel. Il y a donc deux sous-fonctions, l'étanchéité (C1) et la limitation des arrivées d'eau (C2). Cette dernière vise à retarder la pénétration de l'eau dans la zone initialement étanche.
- Le retard et l'étalement au relâchement : Ralenti la migration des radionucléides une fois le confinement rompu. Il y a donc deux sous-fonctions, la résistance à la lixiviation (R1) et la rétention/diffusion (R2) des éléments. Il convient donc de placer les colis dans des galeries bétonnées, comblées par des argiles, bentonites ou béton. Notons que le milieu hôte joue le rôle de barrière ultime en cas de dommage sévère aux installations. Il s'agit ici de choisir un massif géologique propice à la dispersion/diffusion (D). Précisons que cette fonction n'est pas garantie à long terme de part le caractère peu robuste de l'environnement. De plus, il convient de ne pas convertir le principe de confinement en diffusion/dispersion qui est proscrit.
- La limitation de l'accessibilité (L) : vise à limiter les intrusions humaines.

Le fonctionnement du système peut donc être résumé par la figure 1.8.

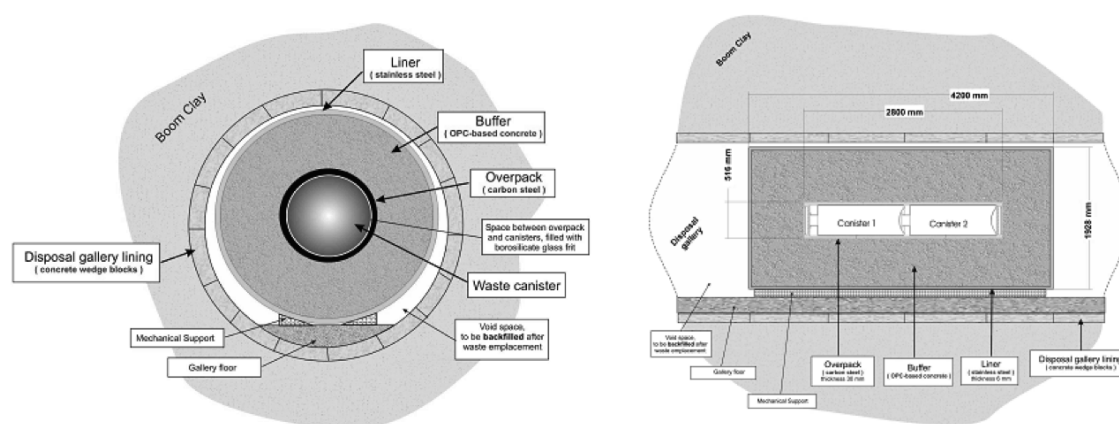
Concrètement, l'architecture choisie pour le stockage est illustrée à la figure 1.9 [EURIDICE, 2011] et appelée architecture du "superconteneur". Ce choix est basé sur les fonctions de sûreté précitées, ainsi que par les impératifs économiques, technologiques et sociétaux. L'installation d'ensemble consiste en un réseau de galeries horizontales construites à mi-hauteur de la couche argileuse et accessibles par puits tel qu'illustré à la figure 5.2, disponible en annexe 5.1.2 [ONDRAF/NIRAS, 2011].

**Programme de recherche** L'ONDRAF/NIRAS a entamé dans les années 70 un programme de recherche et développement avec pour objectif, l'étude de faisabilité d'un stockage de déchets radioactifs en couches géologiques profondes. L'ensemble des recherches menées en collaboration avec le SCK•CEN et le GIE EURIDICE dans divers laboratoires dont les installations d'HADES, un laboratoire souterrain situé à 230 mètres de profondeur

18. La solution d'enfouissement en galeries ou couches géologiques profondes est également étudiée ou employée dans d'autres pays (cf. annexe 5.1.1) : Allemagne (Gorleben - LHMA dans le sel) ; Canada (URL) ; Finlande (Forsmark & Olkiluoto - Dépôts futurs dans le granite) ; France (Bure & Tournemine - LHMA dans l'argile) ; Japon (Kamaishi) ; Suède (Äspö - LHMA dans le granite) ; Suisse (Grimsel - LHMA dans le granite & Mont Terri - LHMA dans l'argile) ; Etats-Unis (Wipp & Yucca Mountain) ;



**Figure 1.8** – Etapes caractéristiques du fonctionnement du système de dépôt et fonctions de sûreté associée [EURIDICE, 2011].



**Figure 1.9** – Architecture du superconteneur [EURIDICE, 2011].

dans l'argile peu indurée de Boom, ont permis d'atteindre selon l'ONDRAF, un "stade de maturité technique avancé" [PlanDéchets, 2011]. Des recherches sont également menées pour l'argile Yprésienne présente dans le nord-ouest de la Belgique.

L'ensemble des expériences in-situ, nécessaire à l'étude du comportement du massif argileux, est réalisé sous l'autorité de le GIE EURIDICE au sein du HADES (High-Activity Disposal Experimental Site) illustré à la figure 1.10. Précisons que le GIE EURIDICE est établi sur le site du SCK•CEN à Mol sur un terrain de plus de 10 ha. Son objectif est "la réalisation de tous les travaux intellectuels en matière de dépôt final souterrain de déchets radioactifs" [EURIDICE, 2012].

Brièvement, l'historique du laboratoire peut se résumer par une succession d'extensions liées à chaque nouvelle expérience menée. Ainsi, la phase de prospection débutée en 1974 s'est traduite par le creusement, par congélation du sol, du premier puits d'accès en 1980. S'en suivit le premier laboratoire (URF/URL) qui montra entre autre, le caractère néfaste de la congélation sur l'argile, et la construction de la galerie TEST achevée en 1987. Le creusement en 1997, d'un second puits nécessaire en vertu de la législation relative aux creusements de mines, conduit à l'excavation d'une galerie de LIAISON de 90 m par une méthode industrielle. Cette dernière accueille un nouveau creusement de 45 m, nommé PRACLAY, destiné à l'étude des effets de l'entreposage des déchets sur le massif. Chaque développement du laboratoire est toujours soumis à un grand nombre de mesures et d'ex-

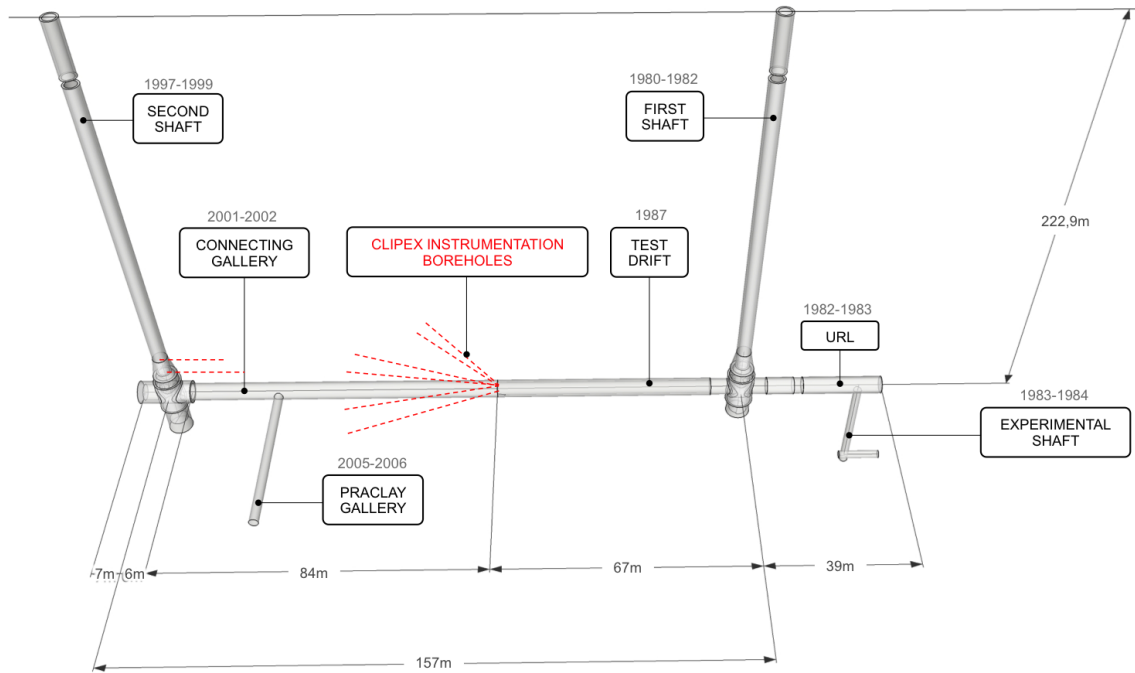


Figure 1.10 – Laboratoire souterrain HADES - Mol, Belgique.

périences telles que CLIPEX, PRETEL, SELFRAC, etc.

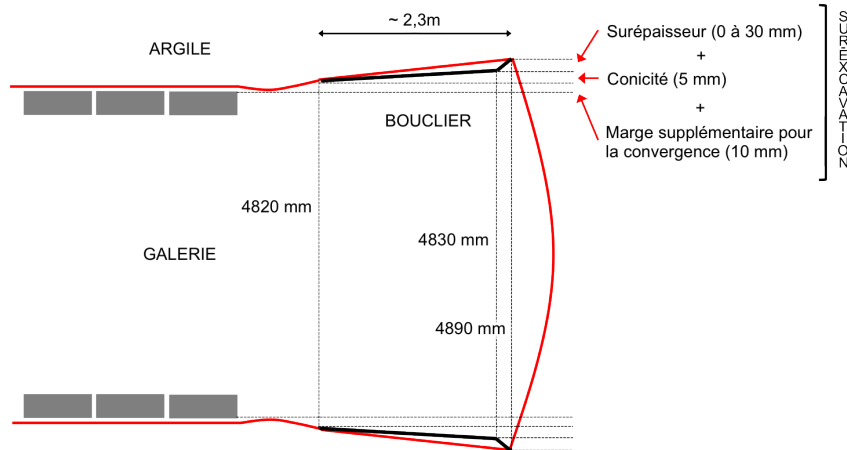
Ce mémoire prend place dans un vaste programme de recherche organisé autour de l'excavation de la galerie de liaison, du projet CLIPEX (CLay Instrumentation Programme for the EXTension of an underground research laboratory) et dans une moindre mesure dans le cadre du projet SELFRAC. Toujours afin de fixer le cadre d'étude du TFE, nous présentons brièvement ces trois éléments.

**La Galerie de Liaison - The Connecting Gallery** L'excavation réalisée à 223 m de profondeur entre 2001 et 2002, visait à relier le bas du deuxième puits au tunnel de TEST distant de 84 m. Les objectifs étaient, d'une part, étudier la technique de construction mise en œuvre et, d'autre part, caractériser l'argile de Boom. La figure 1.10 repère la galerie au sein du laboratoire HADES. Le projet de 6 M€, financé par l'ONDRAF/NIRAS et le SCK•CEN, se déroulait en collaboration entre le GEI EURIDICE, le SCK•CEN, l'ONDRAF/NIRAS et BELGATOM [Bastiaens et al., 2003] [EURIDICE, 2004b].

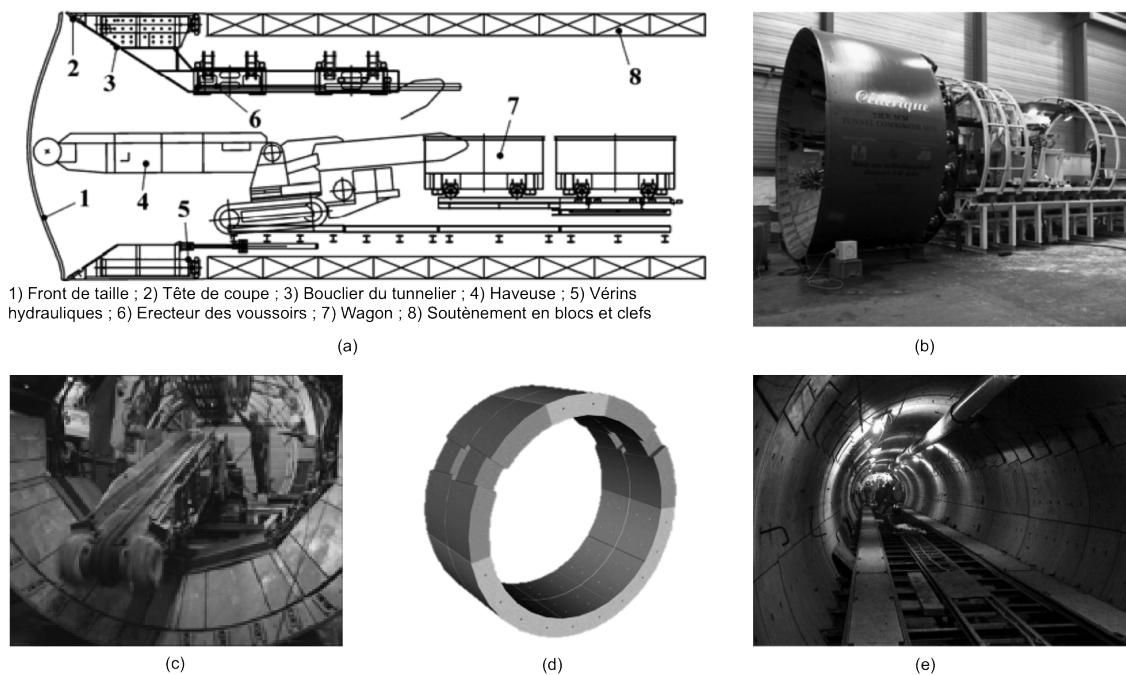
La réalisation s'est basée du rapport NIROND 92-03 mentionnant les exigences attendues de la technique de construction du point de vue économique, technique et qualitatif. Ainsi, le rapport exigeait que la technique soit reproductible, performante et qu'elle minimise la perturbation du massif afin de garantir l'intégrité de ce dernier en vue de sa fonction en tant que barrière naturelle [Bastiaens et al., 2003].

L'excavation a donc été réalisée à l'aide d'une méthode TBM (Tunnel Boring Method) à attaque ponctuelle disposant d'un bouclier long d'environ 2,3 m et d'un diamètre extérieur de 4,82 m, comme illustré à la figure 1.11. L'avancement à la vitesse de 2 mètres par jour, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, s'opérait à l'aide de vérins hydrauliques appuyés sur un soutènement constitué de 12 segments, représenté à la figure 1.12, ce qui minimisait la

convergence du massif (minimise la zone endommagée).



**Figure 1.11** – Coupe dans le bouclier du tunnelier, montrant sa forme conique, ses couteaux ajustables pour définir la sur-excavation et la sur-excavation totale (pas à l'échelle) [Bastiaens et al., 2003].

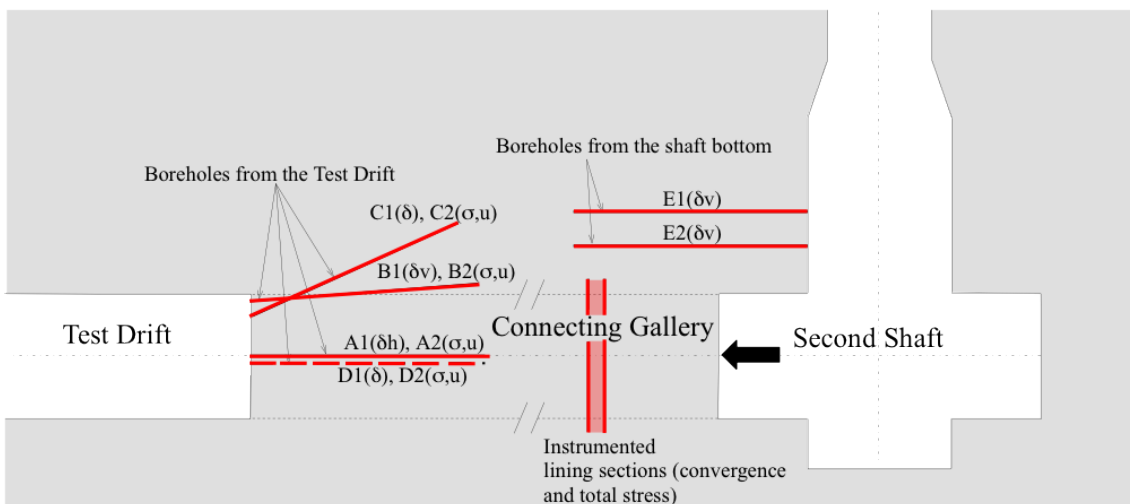


**Figure 1.12** – (a) Coupe montrant les infrastructures souterraines; (b) Tunnelier; (c) Haveuse; (d) Soutènement en blocs et clefs; (e) Galerie de liaison terminée [Bastiaens et al., 2003] [Bastiaens et Bernier, 2005].

En conclusion, la construction de la galerie de liaison a permis d'adapter le design et certains paramètres du procédé d'excavation tout en confirmant ou corrigeant légèrement les modèles numériques à la base du projet. Elle a en outre rendu possible la réalisation d'une série d'essais géotechniques, fondamental pour caractériser le comportement du massif à la suite de l'excavation et pour établir une base de calcul à l'évaluation du comportement à long terme de l'entreposage de déchets radioactifs de catégories B & C [Bastiaens et al., 2003]. Selon [Bastiaens et al., 2003], les recherches menées sur la galerie de liaison valident la technique d'excavation industrielle et le système de soutènement mis en œuvre.

**Programme CLIPEX** Le programme d'études in-situ et numériques CLIPEX réalisé sur la période 1997-2003, commandité par l'EC, l'ONDRAF/NIRAS, l'ANDRA et ENRESA, pour un budget de 1,2 M€, a été réalisé par la collaboration de l'ANDRA, ENRESA, G3S, GEOCONTROL et UPM. Les objectifs étaient d'évaluer la technique industrielle de construction des galeries, et la réponse hydro-mécanique de l'argile excavée lors de la phase opérationnelle d'excavation (court-terme<sup>19</sup>) [EURIDICE, 2004a].

Les instruments utilisés dans le cadre du projet CLIPEX, étaient placés au sein de forages accueillant entre 5 et 8 sondes indépendantes mais de même nature. Les forages étaient disposés à différents endroits du laboratoire HADES et selon diverses orientations tels qu'illustrés en rouge aux figures 1.10 et 1.13 (Une partie des instruments placée au niveau du second puits, d'où partait l'excavation de la galerie de liaison, une autre partie à partir du fond de la galerie TEST, et une dernière dans le soutènement de la galerie). Nous observons différents types de capteurs dont des extensomètres (E), des inclinomètres (I), des déflectomètres (I), et des piezomètres (W) couplés à des cellules de contraintes totales (K). La table 1.4 liste les diverses séries de capteurs, avec leur utilité<sup>20</sup>, localisés à la figure 1.13 au fond de la galerie TEST [Bernier et al., 2007]. Précisons que les résultats obtenus seront détaillés en cours de rapport, lorsque cela sera nécessaire, notamment pour l'aspect numérique du programme qui est détaillé à la section 3.1.1. Un plan plus précis, détaillant la position des capteurs, est disponible à la figure 5.3 de l'annexe 5.1.3.



**Figure 1.13** – CLIPEX, programme d'instrumentation [Bernier et al., 2007].

Finalement, les propriétés mesurées par le programme CLIPEX forment une base pour les calculs et simulations de nouveaux projets (PRACLAY). Elles ont également permis de monitorer le creusement de la galerie de liaison, ce qui a validé la technique d'excavation et jugé la précision des différentes modélisations de prédiction. En résumé, la comparaison

19. Les caractéristiques destinées à évaluer le comportement à long-terme sont menées dans d'autres expériences.

20. D'un point de vue pratique, la dénomination des forages et capteurs suit la convention suivante : La lettre indique le type d'orientation du forage (A : horizontal dans l'axe de la galerie ; B : légèrement incliné vers le haut dans l'axe de la galerie ; C : fortement incliné vers le haut dans l'axe de la galerie ; D : horizontal et orthogonal à l'axe de la galerie) ; le chiffre indique le type de mesures effectuées par les capteurs du forage (1 : les déplacements ; 2 : les contraintes et pressions d'eau) ; Le nom de capteur précise le type de mesures effectuées (E, I, W, K), le forage hôte (A, B, C, D), et sa place dans ce forage (x = 1-8).

Forages	A1	B1	C1	D1	A2		B2		C2		D2	
Mesures	u	u	u	u	$u_w$	$\sigma$	$u_w$	$\sigma$	$u_w$	$\sigma$	$u_w$	$\sigma$
Capteurs	EAx	IBx	ICx	IDx	WAx	KAx	WBx	KBx	WCx	KCx	WDx	KDx

**Table 1.4** – Liste des capteurs au fond de la galerie TEST dans le cadre du projet CLIPEX [Bernier et al., 2007].

entre les mesures in-situ et les résultats numériques, considérant des lois constitutives classiques telles que Mohr-Coulomb ou Cam-Clay, montre une bonne évaluation en termes de déplacements et d'équilibre de pression sur le soutènement, mais n'explique pas l'extension de la zone de perturbation hydraulique. Les recherches concluent sur les points suivants :

- Un modèle élasto-plastique classique ne peut représenter correctement le comportement de l'argile de Boom.
- Les phénomènes de fracturation, qui modifient la perméabilité du massif et donc les conditions limites hydromécaniques, devraient être pris en compte.
- Le comportement visqueux doit jouer un rôle dans la prédiction des pressions de pores.
- Le comportement hydromécanique non-saturé autour de la galerie dû à la désaturation du massif, devrait être considéré.

**Programme SELFRAC** Le programme de recherches SELFRAC mandaté par l'EC et l'ONDRAF/NIRAS pour un budget de 350 000 €, visait à étudier le comportement hydromécanique des argiles de Boom (Belgique) et à opaline (Mont Terri - Suisse), en particulier les phénomènes de fracturations induites par l'excavation de galeries. Le NAGRA, L3S, la KUL, l'EPFL et SOLEXPERS ont collaboré à ce projet entre 2001 et 2004 [EURIDICE, 2004d].

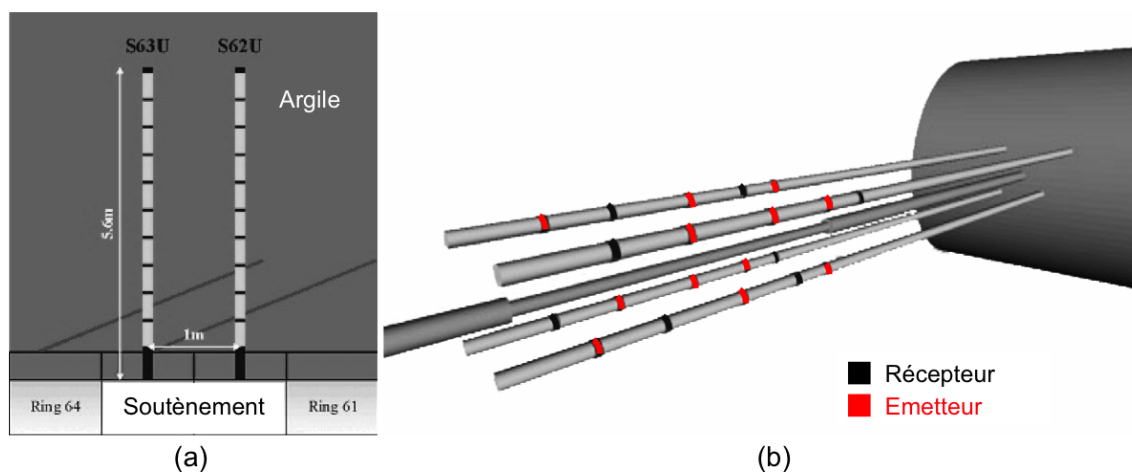
L'étude demande la définition de deux notions, internationalement admises<sup>21</sup> liées à l'état de fracturation du massif [Bernier et al., 2004] :

- La zone perturbée d'excavation - Excavation disturbed Zone (EdZ), définie comme zone ayant subi des modifications hydromécaniques et géochimiques sans changement profond des propriétés de transport et d'écoulement. Il y a peu d'impact négatif sur la sécurité à long-terme au sein de l'EdZ.
- La zone endommagée d'excavation - Excavation Damaged Zone (EDZ), définie comme zone ayant subi des modifications hydromécaniques et géochimiques profondes des propriétés de transport et d'écoulement avec augmentation significative de la perméabilité dans le massif.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons plus particulièrement aux essais réalisés à Mol sur l'argile de Boom au sein du laboratoire HADES. Ainsi, deux techniques de mesure y ont été utilisées (cf. figure 1.14), l'une à l'aide de deux piézomètres parallèles, l'autre par des techniques sismiques et acoustiques [EURIDICE, 2004d].

En conclusion, on a constaté au terme du programme SELFRAC que l'argile de Boom présente la faculté de cicatriser avec le temps sous contraintes de compression et permet même de gommer la trace de la fracture par réorganisation interne, ce qui signifie que

21. 3-5 novembre 2003 à Luxembourg [Bernier et al., 2004].



**Figure 1.14** – (a) Placement de deux piézomètres parallèles dans la galerie de liaison, (b) 4 forages instrumentés, 2 récepteurs et 3 émetteurs dans chacun et forage central [EURIDICE, 2004d].

l'étendue de l'EDZ diminue avec le temps. On appelle ces phénomènes respectivement le "Self-healing" et le "Self-sealing", tous deux présents dans l'argile de Boom [Bernier et al., 2004].

## 1.6 Conclusion

Au terme de ce chapitre introductif, nous constatons que le nucléaire contribue de manière significative à la production électrique de certains pays, plus de 50% en Belgique. La diversification des utilisations de radionucléides dans des domaines tels que la médecine ou l'agriculture s'ajoute à cette consommation de matières fissiles avec pour conséquence directe, une production de déchets radioactifs. Il en découle l'important problème de la gestion de ces produits, compte tenu de leur nature extrêmement toxique et de leur durée de vie considérable à l'échelle humaine.

La section 1.5 présente la distinction des déchets en trois classes selon le degré d'activité et la période de demi-vie des matériaux concernés. La section 1.5.3 détaille la stratégie envisagée en Belgique pour les catégories B & C. La solution en question consiste à enfouir ces déchets en couches géologiques profondes. La roche hôte est destinée à jouer le rôle de barrière naturelle ultime face à la migration des polluants vers la biosphère. Pour ce faire, la Belgique mène depuis les années 70, un programme de recherche et développement au sein d'un laboratoire souterrain HADES situé à Mol. L'objectif est d'y étudier la méthode de construction et la technique d'entreposage à long terme des colis au sein de la formation argileuse de Boom.

---

# Etude expérimentale de l'argile de Boom

---

Ce chapitre est dédié à la phase expérimentale du mémoire, dont l'objectif est de caractériser le comportement hydro-mécanique non saturé de l'argile de Boom par l'intermédiaire de courbes de rétention en eau.

Il convient de définir a priori l'argile en question sur base d'une brève revue bibliographique, ceci afin de cerner le sujet et le périmètre d'étude.

## 2.1 Argile de Boom

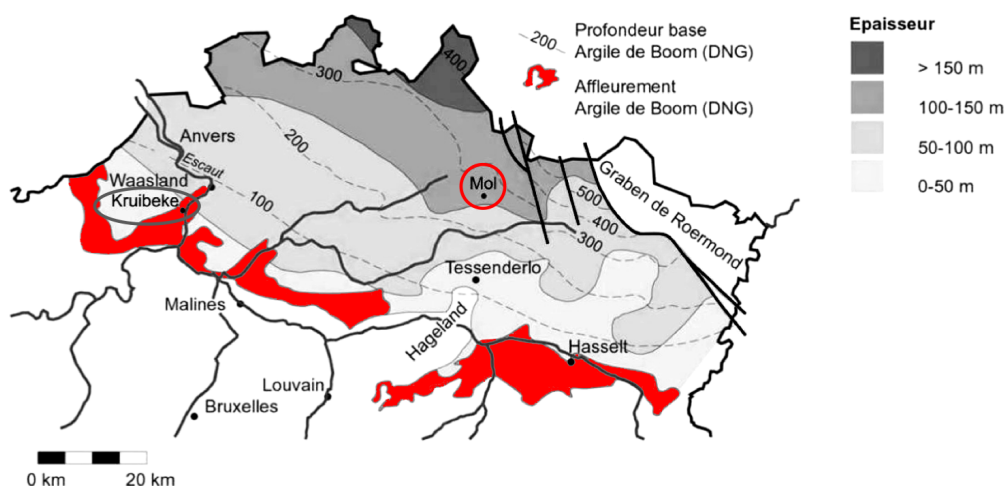
Comme énoncé à la section 1.5.3, la stratégie de gestion des déchets radioactifs de catégories B & C envisagée en Belgique, vise à enfouir ces derniers en couches géologiques profondes. Celles-ci joueraient le rôle de barrière ultime face à toute migration vers la biosphère de radionucléides dissous en cas de rupture de la matrice de confinement.

Il est dès lors nécessaire de sélectionner une géologie faiblement perméable et peu déstructurée pour répondre à cette mission. En Belgique, un des choix se porte sur l'argile de Boom dont il est primordial de connaître les propriétés géotechniques, structurelles et géologiques pour évaluer le comportement à long terme du massif et apprécier les impacts produits par l'excavation des galeries et l'entreposage des colis, toujours dans un souci d'étude comportementale à long terme.

### 2.1.1 Origines géologiques

L'argile de Boom s'est formée au Rupélien (Oligocène inférieur, 33,9 à 28,4 millions d'années (cf. annexe 5.2.1)), par un dépôt détritique produit dans une mer septentrionale peu profonde (de 50 à 100 m) en présence d'un climat subtropical [Wouters et Vandenberghe, 1994].

Actuellement, cette argile s'étend dans tout le nord-ouest de l'Europe, des Pays-Bas au Danemark à la Pologne. En Belgique, elle est principalement localisée dans le Bassin de la Campine et offre un affleurement le long de l'Escaut, du Rupel, de la Durme et en région d'Hasselt, tel qu'illustré à la figure 2.1. La couche argileuse présente un pendage de 1° à 2° vers le N-NE, avec une épaisseur variable de quelques mètres dans l'est de la Belgique à plus de 100 mètres dans le nord du pays [Wouters et Vandenberghe, 1994] [Simaeyts et Vandenberghe, 2006]. Ce phénomène est lié au soulèvement du Massif de l'Artois-Brabant et du Massif Ardennais-Rhénan, qui provoqua l'érosion en bordure du Bassin de la Campine à l'Oligocène supérieur à la transition Rupélien-Chattien (cf. annexe 5.2.1) [Dizier, 2011], d'après [Letsch et Sissing, 1983]. Divers théories existent quant à la différence de volume d'Argile de Boom observée entre la surface et en profondeur [Dizier, 2011].



**Figure 2.1** – Localisation des affleurements d'Argile de Boom et profondeur de la couche argileuse en Belgique [Baekelandt et al., 2001].

### 2.1.2 Composition et stratigraphie

L'argile de Boom se compose d'une succession de couches centimétriques à pluridécimétriques d'argiles silteuses et d'argiles argileuses mise en évidence par une variation de teintes grisâtres. On observe également des niveaux plus carbonatés et/ou plus organiques. La couleur évolue dès lors respectivement du gris pâle vers le gris foncé, voire le noir [Vandenberghe et al., 1997] [Wouters et Vandenberghe, 1994]. Cette alternance périodique d'environ un demi-mètre, offre également une variation granulométrique<sup>1</sup> et de contenu organique qui permet d'établir une subdivision de la formation en trois membres illustrés à la figure 2.2 et résumés ci-après [Vandenberghe et al., 1997] :

- Membre de **Belsele-Waas** : Partie inférieure de la formation, avec une granulométrie plus grossière et des couches plus épaisses.
- Membre de **Terhagen** : Partie intermédiaire, la moins silteuse.
- Membre de **Putte** : Partie supérieure, avec une densité importante de couches riches en contenu organique et une bordure supérieure plus sableuse correspondant à une zone de transition avec la géologie supérieure.

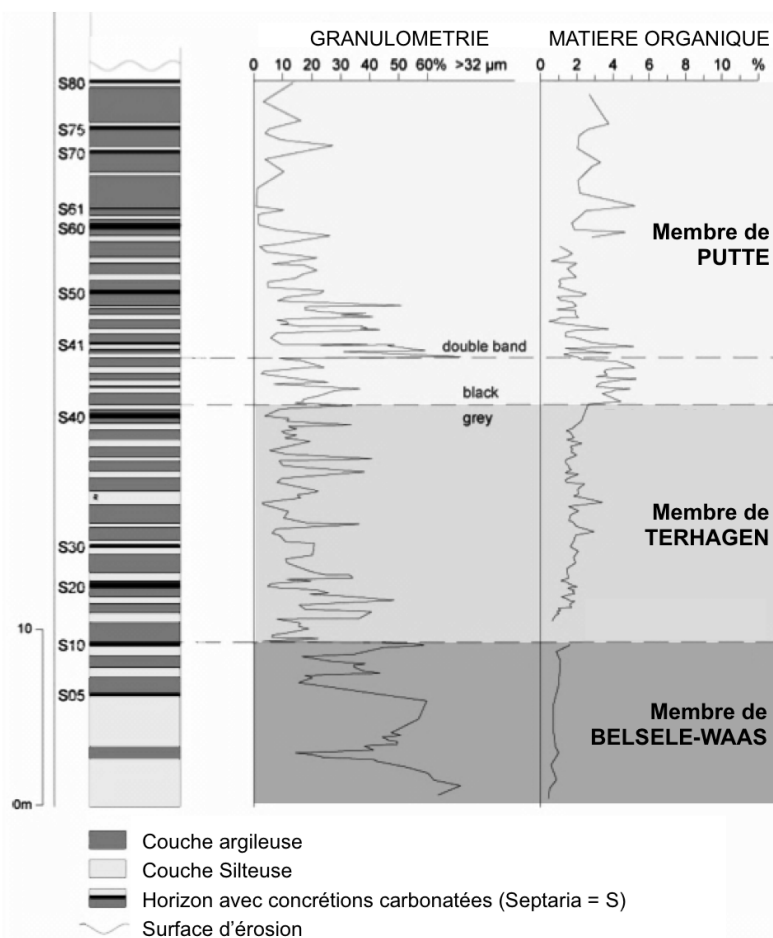
Notons que "cette rythmicité est imputée à des fluctuations astronomiques (l'obliquité et l'excentricité) qui modifient les périodes d'insolation et donc le climat ayant pour conséquence des variations du niveau marin" [Dizier, 2011] selon [Abels et al., 2007] [Vandenberghe et al., 1997] et [Echelpoel et Weedon, 1990].

Nous complétons l'analyse constitutive de l'argile de Boom en mentionnant la présence de septarias, concrétions calcaires ovales d'origine diagénétique d'épaisseurs variant de 10 à 30 cm et de diamètre pouvant atteindre 1 m [Craen et al., 1999].

Nous terminons cette section par détailler à la table 2.1 la composition minéralogique de la formation de Boom selon la synthèse de [Dizier, 2011] regroupant les études<sup>2</sup> de divers

1. 54% des particules  $d < 2\mu\text{m}$  et 80%  $< 20\mu\text{m}$  [Schittekat et al., 1983]

2. "Les analyses minéralogiques de [Decler et al., 1983] proviennent de 21 échantillons à travers différents affleurements pour couvrir l'entièreté de l'épaisseur de l'Argile de Boom. Les compositions chimiques



**Figure 2.2** – Profil lithostratigraphique de l'argile de Boom et variations lithologiques [Baekelandt et al., 2001].

auteurs précisés dans cette même table. En résumé, on constate que l'argile comporte majoritairement de l'illite, de la kaolinite, des interstratifiés illite-smectite, du quartz et de la matière organique.

### 2.1.3 Paramètres géotechniques

La table 2.2 regroupe les différents paramètres géotechniques déterminés par divers auteurs précisés dans cette même table. Nous y observons une porosité et une teneur en eau relativement importantes, respectivement  $\pm 35\%$  et  $\pm 25\%$ , ainsi qu'un module de Young drainé moyen de 300 MPa et une cohésion drainée de 300 kPa. L'argile est considérée comme "plastique".

Nous constatons également certaines différences entre l'argile de surface telle qu'observée

et minéralogique sont très variables suite à la présence de différentes couches plus silteuses, plus argileuses, plus riches en matières organiques ou plus carbonatées [Declerck et al., 1983] [Declerck et Viaene, 1993]. [Wouters et Vandenberghe, 1994] donnent une composition moyenne des bandes argileuses. Les bandes plus silteuses contiennent au maximum 40% de minéraux argileux et une plus grande proportion de quartz et de feldspaths [Wouters et Vandenberghe, 1994]. Quant à [Al-Mukhtar et al., 1996] et [Horseman et al., 1987], les mesures sont issues des échantillons testés. Pour Horseman, il s'agit d'échantillons se trouvant à une profondeur de -247 m caractérisant une bande argileuse." [Dizier, 2011]

Composition minéralogique [%]	Al-Mukhtar et al. (1966)	Wouters et Vandenberghe (1994)	Decleer et al. (1983)	Horseman et al. (1986)
Quartz	20-25	20	23,8-58,3	30
Interstratifié illite-smectite	33	40-50		
Illite	16	25-35	3-23	19
Smectite			19-42	22
Kaolinite	13	15-25	1-9	29
Feldspaths :		5-10		
Microcline	4-5		6,5-11,3	
Plagioclase	4-5		3,2-6,2	
Chlorite		5-10		
Pyrite	4-5	1-5	0,7-2,5	
Carbonates	traces	1-5	0,0-4,3	
Matières organiques		1-5		

**Table 2.1** – Revue bibliographique des proportions minéralogiques de l'Argile de Boom selon [Dizier, 2011].

dans l'argilière de Kruibeke et celle rencontrée en profondeur au laboratoire de Mol. En effet, l'érosion d'une partie de l'argile et des sables surincombants (Sables d'Eigenbilzen) offre une argile surconsolidée à Kruibeke avec un coefficient de surconsolidation mesuré sur des essais triaxiaux isotropes de 2-3 (contrainte atteinte avant l'érosion), alors qu'à Mol, l'argile est normalement consolidée puisque l'érosion est beaucoup moins importante et présente donc un coefficient un peu supérieur à 1 [Mertens et al., 2003].

Nous terminons la revue géotechnique en caractérisant l'argile de Boom du point de vue de sa conductivité hydraulique. Celle-ci est considérée comme peu perméable mais présente une anisotropie induite par l'alternance de couches silteuses, argileuses et offre donc une conductivité deux fois plus importante horizontalement ( $K_h$ ) que verticalement ( $K_v$ ). Selon [Aertsens et al., 2004],  $K_h = 2,3 \cdot 10^{-12} m/s$  et  $K_v = 4,6 \cdot 10^{-12} m/s$ . Précisons que la conductivité hydraulique horizontale est sensible<sup>3</sup> à la strate étudiée, c'est-à-dire selon la granulométrie, et que la conductivité hydraulique verticale est très variable selon que nous nous trouvons en surface ou en profondeur [Aertsens et al., 2004].

#### 2.1.4 Etat de fracturation

La fracturation du massif influence directement la conductivité hydraulique de celui-ci en créant un chemin préférentiel pour l'eau, rappelons que nous cherchons un massif faiblement perméable pour créer une barrière de confinement naturelle. Cette fracturation est d'origine naturelle ou artificielle mais peut présenter certaines propriétés de "cicatrisation". Cette dernière, énoncée à la section 1.5.3.2, est appelée "self-healing" s'il y a en plus perte de mémoire de la fracture, sinon on parle de "self-sealing" [Bastiaens et al., 2007].

Nous pouvons déjà contextualiser la situation de la Campine, qui est sous l'influence de l'extension NO-SE du Graben du Rhin et de sa branche de Roermond, ainsi que sous l'influence de l'extension E-O de l'Europe qui induit des failles normales orientées NO-SE dans l'argile de Boom dans la région de Mol [Dehandschutter et al., 2005] [Bergerat et

3. Variation égale à 5 à 60 fois la conductivité hydraulique verticale.

Caractéristiques de l'Argile de Boom		Mertens et al. (2003)	Mertens et al. (2004)	Dehandschutter et al. (2005)	Bernier et al. (2007)	Dehandschutter et al. (2004)	
		?	URF	En surface		En surface	URF
Masse volumique du sol [ $kg/m^3$ ]	$\rho$	1930	1900-2100	1900	2026	1900	2000-2100
Masse volumique gr. solides [ $kg/m^3$ ]	$\rho_s$	2650			2682		
Masse volumique sèche [ $kg/m^3$ ]	$\rho_d$	1490					
Teneur en eau [%]	$w$	28	19-24	25-30		25-30	22-27
Porosité [%]	$n$	43,8	36-40	35	39	35	33
Module de Young drainé [ $MPa$ ]	$E'$				300		
Module de Young non-drainé [ $MPa$ ]	$E$	300	200-400	110-300		110-200	200-400
Coefficient de Poisson drainé [-]	$\nu'$				0,125		
Coefficient de Poisson non-drainé	$\nu$	0,4	0,4	0,4		0,4	0,4
Cohésion drainée [ $MPa$ ]	$c'$				0,3		
Cohésion non-drainé [ $MPa$ ]	$c$		0,396	0,175-0,3		0,15-0,2	0,6-1,2
Angle de frottement drainé [ $^\circ$ ]	$\phi'$				18		
Angle de frottement non-drainé [ $^\circ$ ]	$\phi$		11	18		18	10
Angle de dilatance drainé [ $^\circ$ ]	$\psi'$				0-10		
$K_0 = \sigma'_x / \sigma'_y$ [-]	$K_0$					0,7	0,8
Coefficient de consolidation [-]	$oc$					2-3	1-2
Pression de préconsolidation [ $MPa$ ]	$p_0$					0,85	6

**Table 2.2** – Revue bibliographique des paramètres géotechniques de l'Argile de Boom selon [Dizier, 2011].

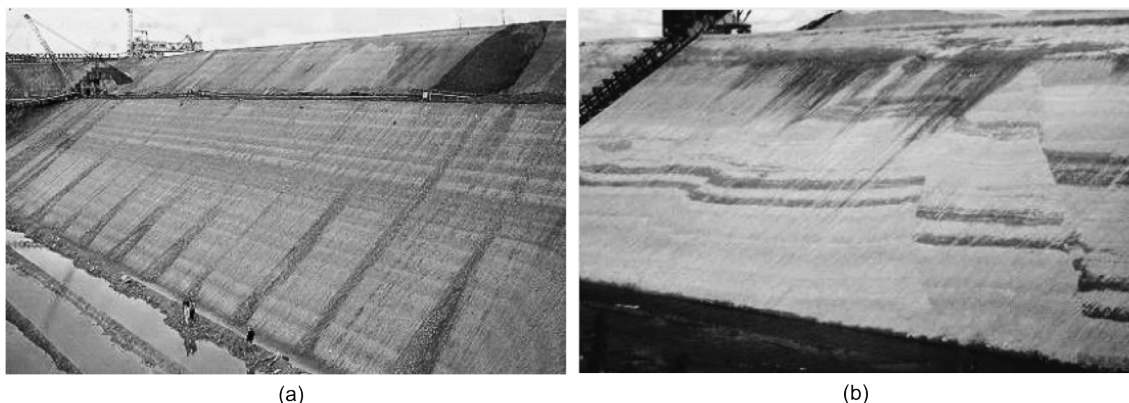
Vandycke, 1994].

#### 2.1.4.1 En surface

L'étude géologique de surface se base sur des expériences menées dans les argilières comme à Kruibeke (cf. figure 2.1) ou sous l'Escaut par des méthodes de reconnaissance géophysique (sismique réflexion).

**Structures localisées** On observe d'une part dans l'argillère de Kruibeke, représentée à la figure 2.3 (a), environ cinq failles normales d'un espacement de 5 à 10 m présentant un réseau de failles secondaires composées de glissements subparallèles à l'échelle centimétrique. D'autre part, on mesure à l'aide de "sismique réflexion" une érosion du massif argileux par l'Escaut qui induit une contrainte horizontale supérieure à la verticale avec la manifestation d'un diapir par des phénomènes visqueux [Dizier, 2011] selon [Schittekat et al., 1983].

**Structures homogènes** Cet autre type de structures affecte l'argile superficielle dans son ensemble. Elles se composent d'un réseau de joints orthogonaux et de micro-plans. Le premier est formé de joints orthogonaux d'extension présentant des joints subverticaux,



**Figure 2.3** – (a) Vue générale de l'argilière de Kruibeke avec la structure en bande de l'argile de Boom [PlanDéchets, 2011], (b) Discontinuités structurales (failles) dans l'argilière de Marke, argile Yprésienne [PlanDéchets, 2011].

perpendiculaires et dans la direction du pendage, espacés de 0,5 m à quelques mètres. Ils sont plus ou moins prononcés selon l'altération et avec une densité constante selon la profondeur, jusqu'à 30 m. Cette structure s'accompagne d'un réseau secondaire plus irrégulier et moins espacé mais similaire au premier, le tout étant d'origine naturelle [Mertens et al., 2003].

Les micro-plans présentent quant à eux une surface lisse et striée caractéristique de fractures de cisaillement, autrement dit du glissement. Ils sont d'une échelle centimétrique et présents aléatoirement, tout en étant plus abondants dans les parties plus argileuses [Dehandschutter et al., 2005]. Précisons que ce genre de fractures n'est possible qu'au-dessus d'une certaine profondeur pour laquelle la contrainte verticale est suffisamment faible que pour permettre une traction horizontale (liées par  $K_0$ ) [Mertens et al., 2003]. Cette traction ne serait par ailleurs induite que par des phénomènes de dessiccation et de pertes de fluides [Mertens et al., 2003], ou selon [Dehandschutter et al., 2005], par l'atteinte de l'état critique.

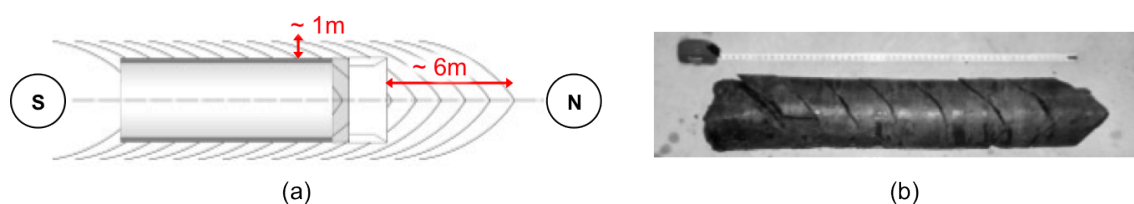
#### 2.1.4.2 En profondeur

L'étude géologique au niveau profond, se base sur les expériences menées au sein du laboratoire souterrain HADES détaillé à la section 1.5.3 et illustré à la figure 1.10. Ces recherches sont primordiales dans le cadre de l'enfouissement de déchets radioactifs, puisqu'il s'agit de l'argile directement concernée. Précisons que la formation de Boom présente à Mol une épaisseur d'environ 100 m et est située entre 185 et 287 m de profondeur dans le Membre de Putte (cf. figure 2.2).

Les études sus-mentionnées évaluaient l'évolution de la zone perturbée endommagée, l'EDZ (Excavated Damaged Zone), lors de la construction de la galerie de connexion détaillée à la section 1.5.3.2. Rappelons que le creusement s'est fait par un tunnelier à attaque ponctuelle avec la pose d'un soutènement en blocs de béton et clefs pour réduire la convergence du massif.

Cette excavation a induit des fractures de glissement (contraintes de cisaillement) observées et illustrées à la figure 2.4, produites par l'excavation de la galerie, il n'y a d'ailleurs pas de preuve de l'existence de fracturation naturelle à cette profondeur. On observe à la figure

2.4 que les discontinuités principales correspondent à deux plans de fractures conjugués, distribués symétriquement par rapport à l'axe du tunnel dont la partie supérieure pend vers le nord, alors que la partie inférieure pend vers le sud. Le pendage atteint environ  $60^\circ$  à l'axe de la galerie devant le front de taille. La direction de la fracturation se dirige quant à elle vers les parois latérales plus on s'éloigne du front de taille. Les carottages réalisés directement après l'excavation, l'un vertical vers le bas et l'autre horizontal vers l'est, montrent des fractures espacées de quelques décimètres, de même configuration mais réparties sur une épaisseur d'1 m selon la verticale et de 60 cm selon l'horizontal, ce qui traduit une anisotropie du matériau. Le rapport entre le diamètre de l'EDZ et le diamètre excavé est de 1,4 [Bernier et al., 2004].



**Figure 2.4** – (a) Extension de l'EDZ dans le plan vertical [EURIDICE, 2004c], (b) Fractures observées dans un forage de reconnaissance lors du creusement de la galerie de liaison [EURIDICE, 2004c].

### 2.1.4.3 Comportement de cicatrisation

Le projet SELFRAC, détaillé à la section 1.5.3.2, avait pour objectifs d'une part l'étude de l'origine des fractures et d'autre part, l'étude des comportements de cicatrisation de l'argile. Ces recherches ont été menées sur l'argile de Boom et l'argile à Opalines (Suisse). La conclusion tirée de ce programme est que l'argile de Boom présente un "self-sealing" rapide dès que l'état de contraintes est en compression [Bernier et al., 2004].

### 2.1.5 Conclusion

Suite à cette brève présentation du matériau "Argile de Boom", nous pouvons établir une base de caractéristiques utilisables pour la suite du travail.

L'argile peu indurée et plastique de Boom est présente à Mol à une profondeur variant de 185 à 287 m, sous sa forme la plus argileuse, riche en matières organiques, le Membre de Putte. Son état de fracturation est propre à cette profondeur, c'est-à-dire inexistant tant que l'on ne perturbe pas le milieu. C'est d'ailleurs les discontinuités engendrées par l'excavation des galeries qui conditionnent la vitesse de creusement. Ces dernières évoluent de manière anisotrope selon la verticale et l'horizontale, avec un profil parabolique devant le front de taille. Ces discontinuités tendent à se rapprocher des bords au-fur-et-à-mesure de l'avancement du front de taille. Notons que le matériau présente la faculté de "self-sealing" en cas de mise en compression, et donc l'EDZ aura tendance à se réduire au cours du temps.

## 2.2 Expériences réalisées dans le cadre du mémoire

Le mémoire propose de caractériser le comportement hydro-mécanique non saturé de l'argile de Boom par l'intermédiaire de courbes de rétention. Les résultats seront par la suite exploités en vue de mettre en évidence le comportement anisotrope de l'argile de Boom. Il convient d'établir en premier lieu, une base théorique explicitant les notions physiques mises en jeu et le protocole expérimental sous-jacent.

### 2.2.1 Problématiques et notions physiques des phénomènes

**Problématiques** Comme annoncé à la section 2.1.3, l'argile de Boom présente une porosité d'environ 35%, ce qui se traduit par la présence naturelle de gaz et d'eau (25%). Les gaz en questions sont l'air, et dans le cadre de l'enfouissement de déchets radioactifs, l'hydrogène résultant de la corrosion du métal utilisé pour les coques de canisters. Le matériau est donc soumis à des écoulements multiphasiques à étudier et caractériser pour garantir la faisabilité des enfouissements. En effet, diverses problématiques naissent de ces écoulements telles que :

- "Les échanges entre l'air ambiant dans les galeries et la roche hôte modifient la cinétique de désaturation de la roche hôte durant les phases de maintenance des alvéoles, ce qui peut ensuite modifier le comportement mécanique des composants argileux (roche hôte et bouchons d'argile gonflante). Les interactions sol-atmosphère nous intéressent donc particulièrement." [Gerard, 2011] ;
- "La migration du gaz produit par corrosion peut modifier le comportement mécanique des roches argileuses, car d'éventuels chemins préférentiels d'écoulement peuvent apparaître ou une montée en pression de gaz peut provoquer la fracturation du matériau." [Gerard, 2011] ;

Il est par conséquent primordial d'étudier les écoulements fluides dans le milieu poreux en conditions de saturation partielle, et de tenir compte des couplages "écoulements-mécanique". Les calculs et modélisations destinés à évaluer l'évolution de ces phénomènes, nécessitent de connaître certains paramètres propres au matériau à l'aide d'expérimentations, dont les courbes de rétention en eau.

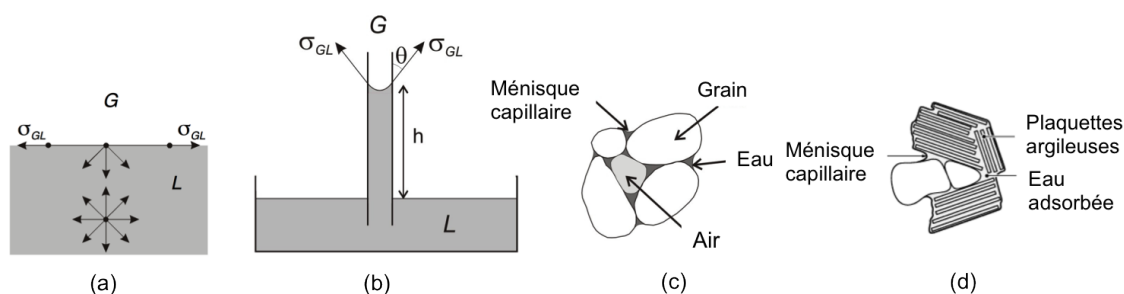
**Phénomènes physiques** D'un point de vue physique, la présence de divers fluides non-miscibles, air gazeux et eau liquide, introduit la notion d'interface de fluides et donc de tensions superficielles. Ces tensions de surface, notées  $\sigma_{GL}$  et illustrées à la figure 2.5 (a), résultent de l'équilibrage de forces entre les fluides au niveau de l'interface. Ces contraintes interviennent dans le phénomène de capillarité, régit par la loi de Jurin (explicité par la formule (2.1)), mis en évidence dans un tube capillaire illustré à la figure 2.5 (b).

On transpose le concept aux sols granulaires où le tube est remplacé par l'espace intragranulaire, appelé porosité et représenté à la figure 2.5 (c). Néanmoins, la structure en feuillets des sols argileux offre une structure interne différente (figure 2.5 (d)), et donc la pression capillaire perd de son sens, "puisque'apparaissent alors des interactions physico-chimiques exercées par les minéraux, ce qui modifient l'état de l'eau en saturation partielle" [Gerard, 2011]. Toutefois, on étend la notion de pression capillaire à la définition de succion, soit la différence entre pression gazeuse et pression liquide (voir la relation (2.1)), ce qui nous permet in fine de caractériser le comportement hydromécanique du matériau

partiellement saturé. Cette caractérisation est réalisée entre autres<sup>4</sup>, sur base de la relation entre la succion et la quantité relative de fluides présente dans le milieu, la saturation. Ceci est obtenu expérimentalement par une courbe de rétention [Gerard, 2011].

$$p_c = p_g - p_w = \rho_w g h = \frac{2\sigma_{GL}\cos\theta}{r} \quad (2.1)$$

où  $p_c$  est la différence entre les pressions gazeuse et liquide à l'interface, elle est appelée pression capillaire ou succion, utile dans notre cas.  $r$  est le rayon du tube capillaire ;  $\rho_w$  est la masse volumique du liquide et  $g$  la constante gravitationnelle.  $\theta$  est l'angle de contact dans le ménisque. Le tout est illustré à la figure 2.5 (b).



**Figure 2.5** – (a) Forces intermoléculaires sur une particule d'eau ; (b) Phénomène capillaire ; (c) Sol granulaire ; (d) Sol argileux [Gerard, 2011].

Etablir la courbe de rétention liant succion et degré de saturation en eau est donc fondamental pour l'étude des écoulements fluides. Dans le cadre du mémoire, nous mettrons à profit cette étude expérimentale, pour tenter d'illustrer le comportement anisotrope de l'argile de Boom.

### 2.2.2 Méthode expérimentale

L'établissement d'une courbe de rétention en eau d'un matériau se base sur l'étude de l'évolution de la teneur en eau ou de la saturation en fonction de la succion interne de ce matériau. La succion est généralement imposée au sein d'enceintes hermétiques à l'aide de l'une des méthodes explicitées ci-après :

- la mise en place de solutions aqueuses au sein de l'enceinte hermétique. Selon les propriétés physico-chimiques de la solution choisie, on assiste à l'établissement d'une humidité relative caractéristique de cette solution pour la température présente. Les solutions sont généralement à base de sels ou de concentrations en acide sulfurique. La technique permet d'atteindre des succions jusque 1000 MPa [Delage et al., 1997].
- la mise en place de la méthode osmotique qui consiste à imposer une succion par l'intermédiaire d'une différence de concentrations en molécules organiques (Polyéthylène glycol - PEG). On place au sein d'une solution aqueuse de PEG, une éprouvette de matériau saturée en eau contenue dans une membrane semi-perméable. Il se produit par osmose, un transfert d'eau de l'éprouvette vers la solution, ce qui impose une certaine pression osmotique à l'échantillon. Cette succion est caractéristique de la concentration en PEG choisie [Delage et al., 1997].

4. D'autres relations telles que les perméabilités liquide et gazeuse sont nécessaires.

- l'installation de générateurs d'humidité relative qui injectent dans l'enceinte hermétique, un air saturé en vapeur mélangé à de l'air sec dans une proportion propre à l'humidité relative que l'on désire. Les transferts se produisent sous forme de vapeur [Gerard, 2011] (selon [Tada et Watanabe, 2005]).
- l'installation de la méthode de surpression d'air qui consiste à imposer une pression d'air élevée à l'éprouvette et maintenir la pression d'eau à pression atmosphérique. On impose donc directement la pression capillaire mais la méthode est technologiquement limitée à des pressions de 1500 kPa [Gerard, 2011] (selon [Richards, 1941]).

La phase expérimentale du mémoire détermine la courbe de rétention à l'aide d'échantillons de matériau dont on caractérise l'état initial (masse, dimensions et saturation). Les éprouvettes sont ensuite placées par série de trois pièces au sein d'enceintes hermétiques, isothermes, dont on fixe pour chacune, l'humidité relative de leur atmosphère sur base de la succion que l'on souhaite imposer aux échantillons. Cette humidité relative est maintenue constante par l'intermédiaire de solutions salines détaillées précédemment. L'état physique d'une enceinte est donc constant, il va par conséquent s'y établir des transferts d'eau sous forme de vapeur, entre l'atmosphère et les éprouvettes partiellement saturées. Une fois ces échanges terminés, c'est-à-dire que l'on atteint un équilibre entre le milieu environnant et le matériau, il est possible de quantifier la succion imposée aux éprouvettes par la relation de Kelvin explicitée par l'expression (2.2).

$$p_c = p_a - p_w = \frac{RT}{M_v g} \ln h_r [MPa] \quad (2.2)$$

où  $p_c$  est la succion à calculer,  $R$  est la constante universelle des gaz parfaits ( $R = 8,3143 J mol^{-1} K^{-1}$ ),  $T$  la température exprimée en Kelvin,  $M_v$  est la masse molaire de la vapeur d'eau ( $M_v = 18,016 g mol^{-1}$ ),  $g$  la constante gravitationnelle ( $g = 9,81 m/s^2$ ), et  $h_r$  l'humidité relative maintenue constante dans l'enceinte.

L'échantillon d'argile placé dans une certaine humidité relative va voir sa masse varier selon son état de saturation initial. L'expérience demande donc de mesurer régulièrement l'éprouvette jusqu'à ce que l'on atteigne une stabilisation de sa masse. Une fois l'équilibre atteint, il est possible de déterminer la teneur massique en eau, soit le degré de saturation, par la relation (2.3).

$$S_{r,w} = \frac{V_w}{V_v} = \frac{M - M_s}{M_{sat} - M_s} \quad (2.3)$$

où  $S_{r,w}$  est le degré de saturation en eau du matériau pour une certaine humidité relative ambiante  $h_r$ .  $V_w$  est le volume d'eau et  $V_v$  est le volume poreux.  $M$  est la masse stabilisée de l'échantillon,  $M_s$  sa masse solide et  $M_{sat}$ , sa masse saturée d'eau. Précisons que ce mode opératoire est inspiré de la démarche proposée par [Delage et al., 1997]. La relation (2.3) n'est toutefois valide que si la variation volumique de l'éprouvette est négligeable.

De manière à contourner la problématique liée à la variation volumique, nous proposons de remplacer le degré de saturation par la teneur en eau exprimée par la formule (2.4) et explicitée en annexe 5.2.3.

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M - M_s}{M_s} \cdot 100 [\%] \quad (2.4)$$

où  $w$  est la teneur en eau de l'échantillon,  $M_w$  est la masse d'eau présente dans l'échantillon,  $M_s$  est la masse sèche de l'échantillon mesurée pour chaque pièce au terme de l'étude, et  $M$  est la masse de l'échantillon mesurée pour chaque pièce à chaque étape.

Il est toutefois intéressant d'exprimer la succion en fonction du degré de saturation. Dès lors, si les dimensions géométriques des éprouvettes sont mesurées au terme de chaque passage en enceinte, alors il est possible d'employer la formule du degré de saturation (2.5), établie en annexe 5.2.3.

$$S_{r,i} = \frac{w_i}{\rho_w} \left( \frac{M_s}{V_i - \frac{M_s}{\rho_s}} \right) \quad (2.5)$$

où  $S_{r,i}$  est le degré de saturation de l'échantillon au temps "i",  $w_i$  est la teneur en eau au temps "i",  $M_s$  est la masse de solide de l'échantillon,  $V_i$  est le volume de l'échantillon au temps "i",  $\rho_w$  est la masse volumique de l'eau, et  $\rho_s$  est la masse volumique des grains solides.

Notons qu'il convient de mesurer la masse sèche de chaque échantillon au terme de la campagne d'essais.

Nous disposons donc de la succion imposée au matériau par l'atmosphère ambiante, et de la teneur en eau ou du degré de saturation de ce même matériau. Ces deux informations correspondent à un point de la courbe de rétention. La manipulation est appliquée à un ensemble de séries de trois éprouvettes, qui transitent entre sept enceintes dotées d'une humidité relative personnelle, ce qui impose donc une succion différente selon la chambre où les échantillons se trouvent. Nous pouvons ainsi établir différents points de la courbe pour chaque éprouvette, et obtenir des valeurs moyennes qui réduisent au maximum la marge d'erreur.

Notons que les données recueillies peuvent présenter un comportement de rétention d'eau. Ce phénomène est selon [Gerard, 2011], caractérisé par :

- une pression d'entrée d'air qui est la pression capillaire à partir de laquelle le sol se désature lors du séchage et crée un chemin macroscopique au sein de l'éprouvette ;
- une saturation résiduelle qui est la limite inférieure de saturation du sol, où l'eau ne peut s'échapper que par diffusion ou évaporation sous forme de vapeur ;
- un effet d'hystérésis selon le chemin de séchage ou d'absorption suivi ;
- un effet de déformation de l'éprouvette qui influence le comportement de rétention et induit une saturation admise plus faible ;

### 2.2.3 Protocole expérimental appliqué

Le mémoire propose les résultats effectués sur deux programmes d'essais regroupant chacun plusieurs séries de trois éprouvettes réalisées par carottage dans des échantillons d'argile de Boom provenant du laboratoire souterrain HADES.

Ces séries ont ensuite transité dans différentes enceintes dont l'humidité relative était maintenue constante par l'emploi de solutions salines. L'humidité relative de chaque chambre a été choisie afin d'imposer une certaine succion totale au matériau et ainsi compléter de

manière intelligente la courbe de rétention. Le choix de former des séries de trois éprouvettes vise à établir des valeurs moyennes et donc de réduire la marge d'erreur.

Le laboratoire est représenté à la figure 5.5 en annexe 5.2, les enceintes hermétiques sont toutes similaires à celle présentée à la figure 2.6. Chacune d'elles disposent d'un bac contenant la solution saline qui fixe l'humidité relative de son atmosphère. Elles sont également entreposées au sein du Laboratoire de Matériaux de Construction agréé de l'Université de Liège, celui-ci garantit une température constante de  $21^{\circ}\text{C}$ . Afin de vérifier la constance des paramètres, un capteur muni d'un hygromètre et d'un thermomètre accompagne chaque chambre. Chaque éprouvette est placée sur un plateau personnel doté de son identification et qui évite toute perte de matière solide.

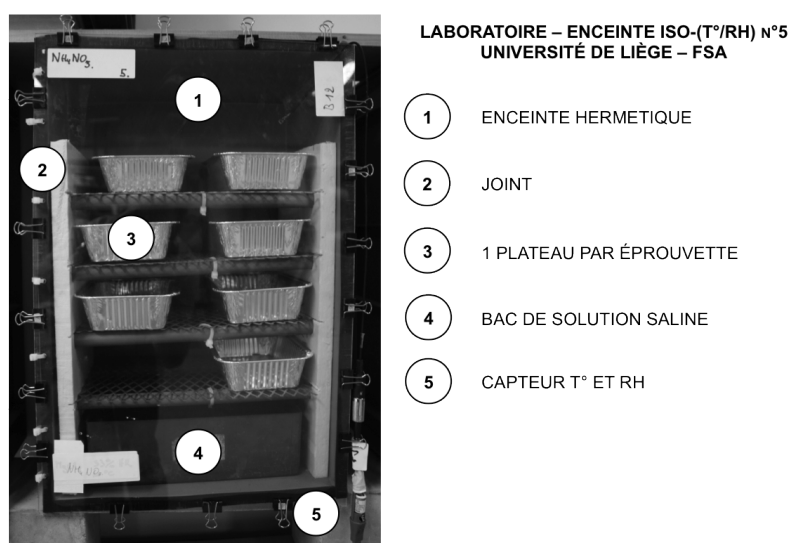


Figure 2.6 – Enceinte hermétique n°5 utilisée pour maintenir une humidité relative constante.

**Propriétés utiles du matériau** L'argile de Boom étudiée dans la partie expérimentale du mémoire est définie à la section 2.1 dont les propriétés géotechniques sont regroupées à la table 2.2. Nous complétons ces données par les limites d'Atterberg, redéfinies sur des éprouvettes prélevées sur les mêmes échantillons d'argile de Boom utilisés pour la réalisation des nos expériences.

Les limites d'Atterberg mesurées le 11 avril 2013 au laboratoire de géotechnique de l'Université de Liège, fournissent une limite de plasticité<sup>5</sup>  $W_P$  de 27,6%, une limite de liquidité<sup>6</sup>  $W_L$  de 76,5%, et un indice de plasticité  $I_P = W_L - W_P$  de 48,9%, ce qui confirme le caractère très plastique de l'argile de Boom ( $I_P > 40$ ). Ces résultats sont partiellement en accord avec les valeurs fournies par [Volckaert et al., 1996] à la table 1.1 p.5, qui indique une valeur de  $W_P$  comprise entre 32 et 51%, et une valeur de  $W_L$  comprise entre 55 et 80%. On constate une légère différence en terme de limite de plasticité, l'argile à notre disposition semblerait être plus plastique que la moyenne.

Au terme des deux campagnes d'essais, nous avons procédé à la mesure de la masse sèche de chaque échantillon afin d'obtenir les paramètres requis pour les relations (2.4) et (2.5). Ces

5. Teneur en eau à partir de laquelle le matériau passe de l'état solide à l'état plastique.

6. Teneur en eau à partir de laquelle le matériau passe de l'état plastique à l'état liquide.

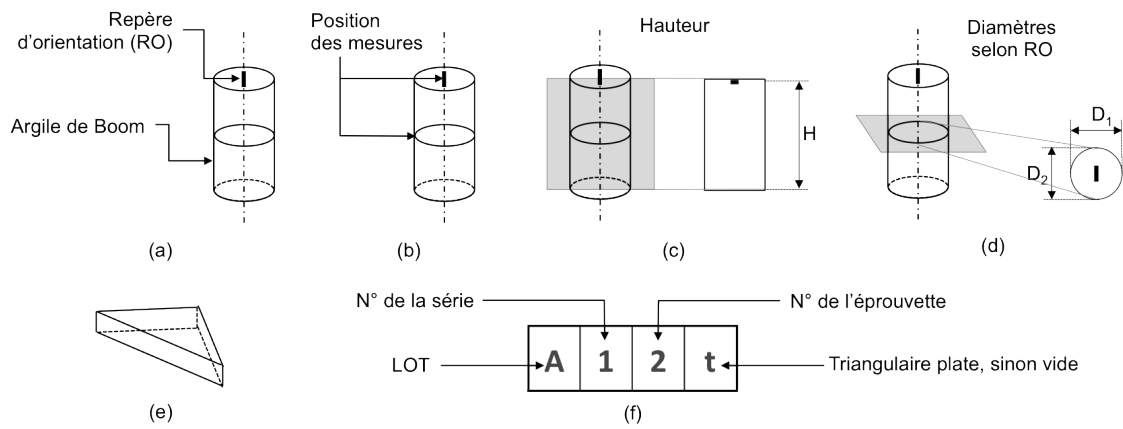
mesures sont réalisées en dernier lieu pour éviter toute altération du matériau, telle qu'une fracturation, ce qui modifierait la perméabilité de l'échantillon et fausserait l'expérience. La masse sèche est mesurée par la différence massique de l'échantillon au terme de la campagne, et l'échantillon au terme d'un passage de 24 h en étuve à  $105^{\circ}C$ .

**Préparation des éprouvettes** L'étude expérimentale se base sur deux campagnes d'analyses. La première réalisée du 13 novembre 2012 au 16 mai 2013 visait à établir une courbe de rétention simple en séchage, sans l'objectif de mise en évidence du comportement anisotrope. Cette étape a eu l'utilité, outre la courbe de rétention basique, de permettre à l'expérimentateur d'établir un protocole d'étude, calibrer les enceintes et leur humidité relative, s'entraîner pour le carottage délicat des éprouvettes, mais aussi d'identifier et d'anticiper les difficultés rencontrées face aux imprécisions liées à la taille des échantillons.

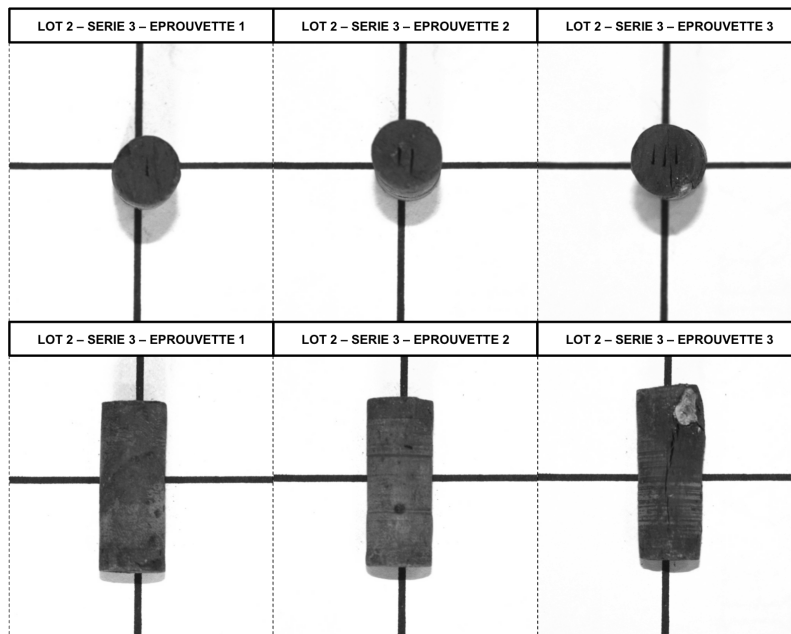
La seconde campagne réalisée du 18 février 2013 au 16 mai 2013, tenait compte des observations faites sur le premier lot. Ainsi, le carottage à l'eau des éprouvettes a été fortement amélioré de manière à obtenir des pièces encore plus cylindriques. La mise à forme s'est faite de manière relativement lente, en vérifiant que l'eau de l'outil n'altère pas le matériau argileux. Le premier lot présente en effet certaines déformations liées à l'humidification et à la compression de la part de l'outil. Nous avons également incisé superficiellement un des sommets de chaque éprouvettes. Cette opération permettait d'orienter dans l'espace la pièce en question et ainsi d'effectuer les mesures aux mêmes positions au fil des mois. Précisons qu'à ce moment, l'eau du carottage lisse superficiellement l'éprouvette, il est donc peu aisé de localiser une quelconque stratification au sein de l'échantillon. Le marquage est dès lors aléatoire, l'orientation vis-à-vis du litage du matériau se fait a posteriori, lors du séchage des séries. Le dernier apport de la deuxième campagne, est l'ajout à chaque série de deux pièces de géométrie triangulaire plate illustrée à la figure 2.7 (e). Le but était d'évaluer qualitativement l'influence de la surface spécifique face aux échanges hygroscopiques, il ne s'agissait absolument pas de mettre en évidence une quelconque anisotropie, ce qui rendait toute mesure dimensionnelle superflue.

L'éprouvette cylindrique théorique est schématisée à la figure 2.7 (a), on y indique également les positions du pied à coulisse (b) pour effectuer les mesures de hauteur (c) et de diamètres (d). Nous complétons la description par le principe d'identification de chaque éprouvette à l'aide du schéma 2.7 (f).

Finalement, la première campagne regroupe 5 séries de 3 éprouvettes, soit un total de 15 éprouvettes. La seconde campagne offre 5 séries de 5 éprouvettes (+ 1 pour la série 1), dont trois de géométrie cylindrique (+ 1 pour la série 1) et deux de géométrie "plate", soit un total de 26 éprouvettes. L'état initial de l'ensemble des pièces est proposé à la table 2.3. Rappelons qu'il est inutile de mesurer la taille des éprouvettes plates triangulaires. Les échantillons sont directement introduits en enceinte un fois carottés, il sont par conséquent considérés initialement saturés. La figure 2.8 présente une photographie d'une série du deuxième lot, au terme d'un transit en enceinte.



**Figure 2.7** – (a) Eprouvette d'argile de Boom dotée d'un léger renforcement utilisé comme référence d'orientation; (b) Position des mesures réalisées; (c) Hauteur mesurée; (d) Diamètres mesurés; (e) Eprouvette d'argile plate triangulaire; (f) Principe d'identification des éprouvettes.



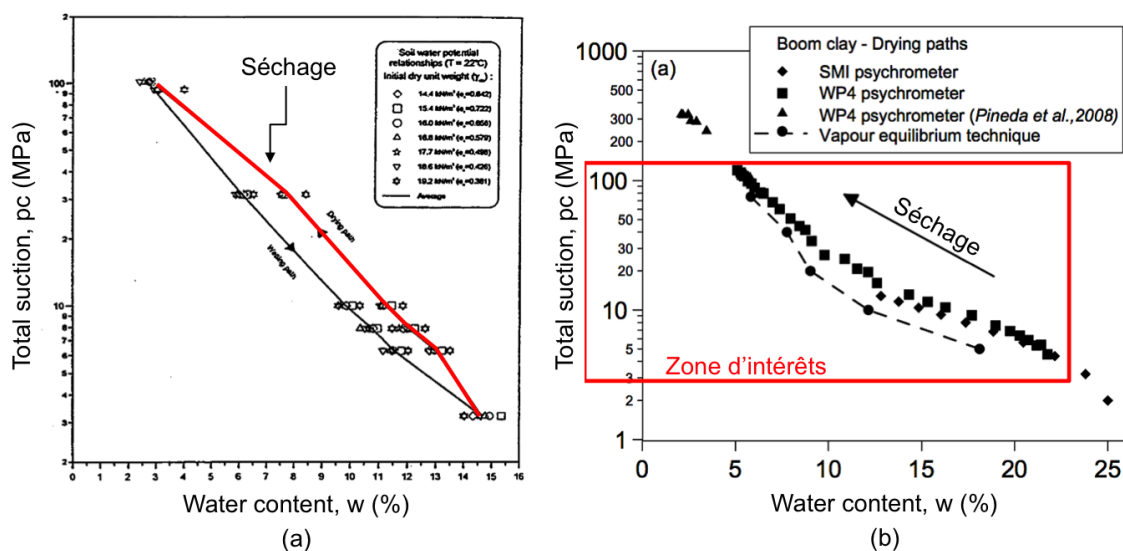
**Figure 2.8** – Exemple d'éprouvettes au terme d'un passage en enceinte - Lot 2/Série 3/Eprouvettes 1-3.

		LOT A - Séries 1 & 3										
		A.1.1	A.1.2	A.1.3	A.2.1	A.2.2	A.2.3	A.3.1	A.3.2	A.3.3		
LOT A	M [g]	7,38	6,42	7,83	8,45	7,30	9,39	6,97	7,13	8,00		
	M <sub>s</sub> [g]	5,58	4,94	6,57	6,47	5,65	7,29	5,37	5,74	6,23		
	LOT A - Séries 4 & 5											
		A.4.1	A.4.2	A.4.3	A.5.1	A.5.2	A.5.3					
LOT A	M [g]	6,26	8,13	5,12	6,86	6,59	5,79					
	M <sub>s</sub> [g]	4,71	6,22	4,34	5,31	5,38	4,64					
		LOT B - Séries 1 & 2										
		B.1.1	B.1.2	B.1.3	B.1.4	B.1.5t	B.1.6t	B.2.1	B.2.2	B.2.3	B.2.4t	B.2.5t
LOT B	M [g]	7,68	7,56	7,49	8,96	8,58	6,12	7,40	7,55	8,34	6,17	5,73
	M <sub>s</sub> [g]	5,88	5,79	5,66	6,78	6,34	4,58	5,55	5,76	6,80	4,61	4,19
	H [mm]	29,37	29,15	24,45	33,19			27,29	28,79	27,21		
	D <sub>1</sub> [mm]	13,13	13,28	13,51	13,37			13,44	13,24	13,15		
	D <sub>2</sub> [mm]	13,27	12,22	13,57	13,50			13,39	13,11	13,01		
			LOT B - Séries 3 & 4									
		B.3.1	B.3.2	B.3.3	B.3.4t	B.3.5t	B.4.1	B.4.2	B.4.3	B.4.4t	B.4.5t	
LOT B	M [g]	9,01	8,91	9,24	6,34	8,29	7,45	7,79	8,06	6,85	8,30	
	M <sub>s</sub> [g]	6,71	6,74	6,94	4,75	6,15	5,62	5,83	6,17	5,07	6,20	
	H [mm]	34,26	33,76	34,44			27,34	29,33	31,39			
	D <sub>1</sub> [mm]	13,64	13,04	13,65			13,40	13,17	13,16			
	D <sub>2</sub> [mm]	13,59	13,01	13,71			13,41	13,18	13,41			
		LOT B - Série 5										
		B.5.1	B.5.2	B.5.3	B.5.4t	B.5.5t						
LOT B	M [g]	6,65	6,56	6,53	8,57	7,72						
	M <sub>s</sub> [g]	5,04	4,94	4,98	6,31	5,80						
	H [mm]	24,64	24,75	25,31								
	D <sub>1</sub> [mm]	13,45	13,26	13,14								
	D <sub>2</sub> [mm]	12,39	13,29	13,12								

Table 2.3 – Masses et dimensions initiales, et masse sèche des éprouvettes des deux campagnes d'essais.

**Sélection de l'humidité relative** Nous avons sélectionné une gamme de succions totales telle que nous puissions valider nos observations sur une référence existante. Dès lors, sur base du chapitre 3.5.4 *Properties of natural Boom Clay*, de l'ouvrage [Charlier et al., 1999] et du rapport final [Volckaert et al., 1996] attaché, ainsi qu'à l'aide des articles [Lima et al., 2012] et [Delage et al., 2007], nous avons sélectionné sept valeurs d'humidité relative, et par conséquent déterminé les sels nécessaires. Ces derniers et leur humidité relative théorique générée à  $20^{\circ}\text{C}$ , sont regroupés à la table 2.4, sur base des valeurs théoriques fournies par [Volckaert et al., 1996] et [IBN, 2000]. Rappelons que la succion correspondante est calculée par la formule de Kelvin (2.2).

La figure 2.9 illustre à titre indicatif les courbes de rétentions obtenues par [Volckaert et al., 1996] et [Lima et al., 2012]. On observe ainsi à la figure 2.9 (a), le phénomène d'hystérésis annoncé à la section 2.2.2 selon que l'on soit en cours de séchage ou en cours d'hydratation. On remarque également une certaine différence entre les résultats, fonction de la technique utilisée, de la préparation des échantillons, de l'origine de ces échantillons, de la température, etc. Néanmoins, nous disposons d'une référence en termes d'ordres de grandeur et de tendances évolutives.



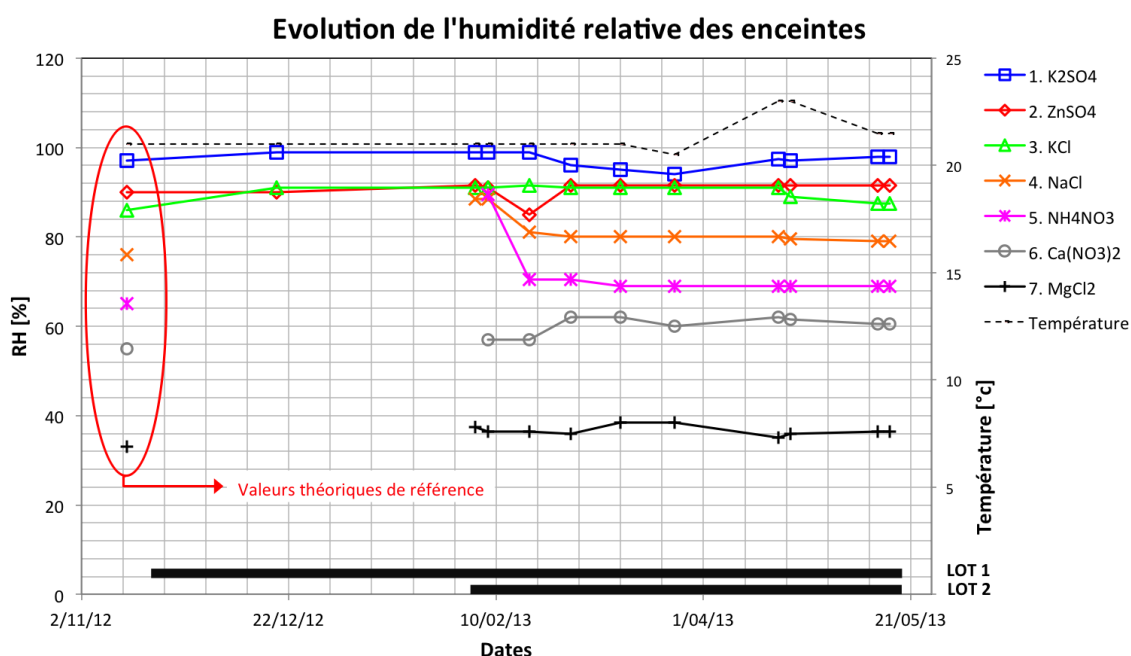
**Figure 2.9** – Courbes de rétention en eau, (a) [Volckaert et al., 1996] à  $20^{\circ}\text{C}$ , (b) [Lima et al., 2012] en séchage.

Les valeurs citées à la table 2.4 sont ainsi théoriques et valides pour une température de  $20^{\circ}\text{C}$ . Il convient donc de mesurer les valeurs réelles, compte tenu de la température de  $21 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  du laboratoire, de la présence d'autres expériences indépendantes en cours de réalisation dans les mêmes chambres, et de l'impact des ouvertures/fermetures des enceintes. Pour ce faire, un capteur doté d'un hygromètre et d'un thermomètre a été placé dans chaque chambre. Les résultats proposés à la figure 2.10 expriment la valeur moyenne de l'humidité relative de chaque enceinte au terme d'une tranche de cycle. L'évolution de la succion proposée à la figure 2.11 est calculée à l'aide de la formule de Kelvin en fonction des mesures d'humidité relative et des températures réelles moyennes sur la dernière tranche de chaque cycle. Une tranche correspond au temps écoulé entre deux mesures au sein d'un cycle. La dernière tranche se mesure donc entre la dernière mesure et la fin du cycle où l'on atteint l'équilibre. Par conséquent, nous obtenons plus de sept points de succion totale,

Numéro d'enceinte	Solution saline	RH théorique $rh$ [%]	Succion théorique $p_c$ [MPa]
Chambre 1	$K_2SO_4$	97	4,2
Chambre 2	$ZnSO_4$	90	14,6
Chambre 3	$KCl$	86	20,9
Chambre 4	$NaCl$	76	38,0
Chambre 5	$NH_4NO_3$	65	59,6
Chambre 6	$Ca(NO_3)_2$	55	82,7
Chambre 7	$MgCl_2$	33	153,4

**Table 2.4** – Sélection de l'humidité relative des sept chambres - Sels et valeurs théoriques attachées (à 20°C) [Volckaert et al., 1996] [IBN, 2000].

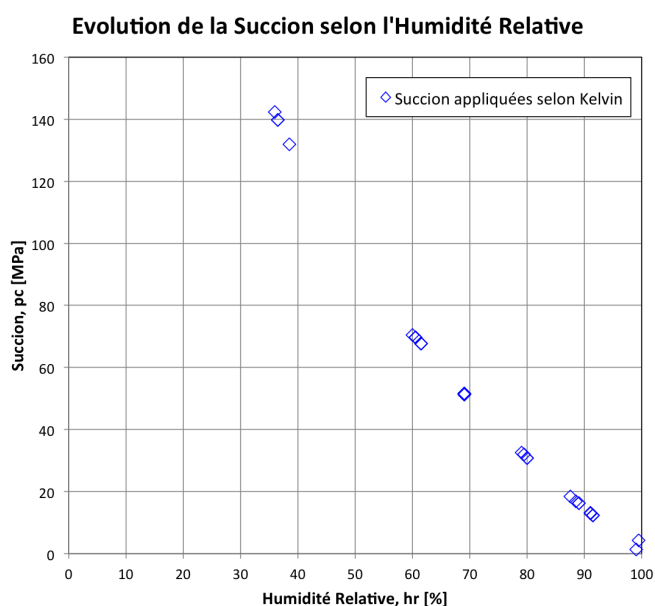
puisque l'humidité relative était faiblement variable dans le temps.



**Figure 2.10** – Evolution de l'humidité relative des enceintes au cours des deux campagnes d'essais.

La figure 2.10 montre donc un certain écart entre les valeurs théoriques et la réalité, bien que l'ordre de grandeur soit respecté. On observe également le processus de mise en route des expériences du lot 1, et la phase de stabilisation des chambres énoncée précédemment. Notons que la solution saline de KCl a produit, la plupart du temps, une humidité relative de 90%. On considère que l'état atmosphérique stable a débuté le 18/02/13. Toutefois, chaque calcul sera reporté à la valeur de succion mesurée lors de la dernière tranche de son cycle.

**Campagne de mesures** Les mesures étaient réalisées en moyenne toutes les trois semaines. Au terme d'une tranche, chaque éprouvette était pesée le vendredi afin d'établir une mesure de référence. La même opération était réalisée la semaine suivante et une comparaison avec l'état de référence établi nous indiquait le niveau de stabilisation de



**Figure 2.11** – Evolution de la succion en fonction de l'humidité relative des enceintes et de la température du laboratoire au cours des deux campagnes d'essais.

l'éprouvette. Si l'équilibre était atteint pour les trois pièces de la série, celles-ci pouvaient passer dans la chambre suivante, sinon elles restaient dans son enceinte pour une nouvelle tranche de cycle. Notons que ce rythme théorique était sujet à certains impératifs de timing ou de disponibilité du laboratoire (notamment au cours des vacances de Pâques).

Techniquement, les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance au centième de gramme. Si la stabilisation est confirmée, un pied à coulisse mesure (uniquement sur le deuxième lot), la hauteur selon la marque illustrée à la figure 2.7 (b), et les deux diamètres identifiés en (d) de la même figure. Ces opérations ont pour but de mettre en évidence un comportement anisotrope de l'argile de Boom.

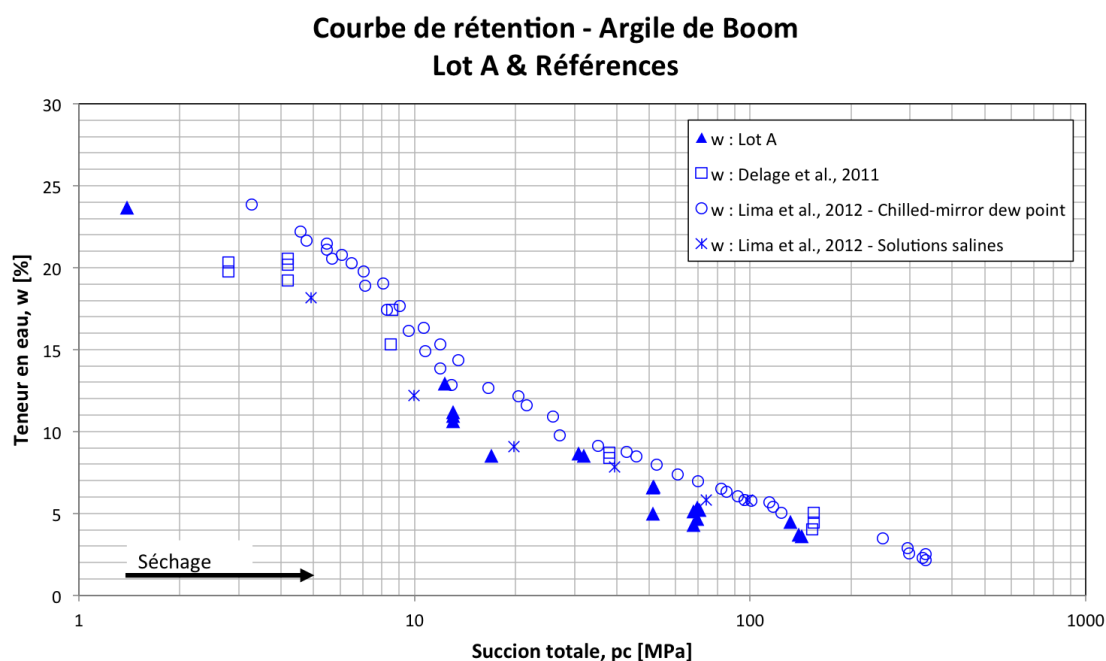
## 2.2.4 Courbe de rétention

### 2.2.4.1 Lot A - [13/11/12 - 16/05/13]

L'application du modus operandi détaillé à la section 2.2.3 en vue d'établir une courbe de rétention en eau lors de la phase de séchage sur le premier lot (cf. table 2.3), nous fournit à l'aide du post-traitement par la relation (2.4), les résultats proposés à la figure 2.12.

Pour rappel le Lot A a pour objectif d'établir une base pratique à la seconde campagne destinée, elle, à réaliser en plus d'une courbe de rétention en eau caractéristique du comportement hydromécanique du matériau, une série de mesures pour la mise en évidence de l'anisotropie de l'argile de Boom. Afin de valider nos mesures, nous joignons au Lot A, les résultats des courbes de rétention des auteurs [Delage et al., 2007] et [Lima et al., 2012].

La figure 2.12 présente donc une assez bonne correspondance entre les résultats du Lot A et les données fournies par la littérature. Cependant, même si l'ordre de grandeur est respecté, la littérature propose des valeurs légèrement plus élevées. Ceci s'explique par les conditions d'expérimentation, la préparation des éprouvettes et l'origine de l'argile. Ces



**Figure 2.12** – Courbe de rétention en eau du Lot A et comparaison aux références - Teneur en eau.

propriétés sont précisées à la table 2.5.

Ainsi, [Lima et al., 2012] se rapproche plus des résultats du Lot A, lorsque la méthode employée pour fixer l'humidité relative utilise également des solutions salines.

	[Delage et al., 2007]	[Lima et al., 2012]
<b>Origine du matériau</b>	HADES Galerie de liaison	HADES
<b>Préparation des échantillons</b>	Rectangulaires (30 × 30 × 10) Cylindriques œdométriques (d70, h20)	Cylindriques (d15, h12)
<b>Situation initiale</b>	Assèchement des échantillons par rapport à l'excavation	Non-précisé
<b>Méthode Expérimentale</b>	hr par solutions salines	1. Chilled-mirror dew-point 2. hr par solutions salines

**Table 2.5** – Paramètres d'expérimentation des courbes de rétention en eau.

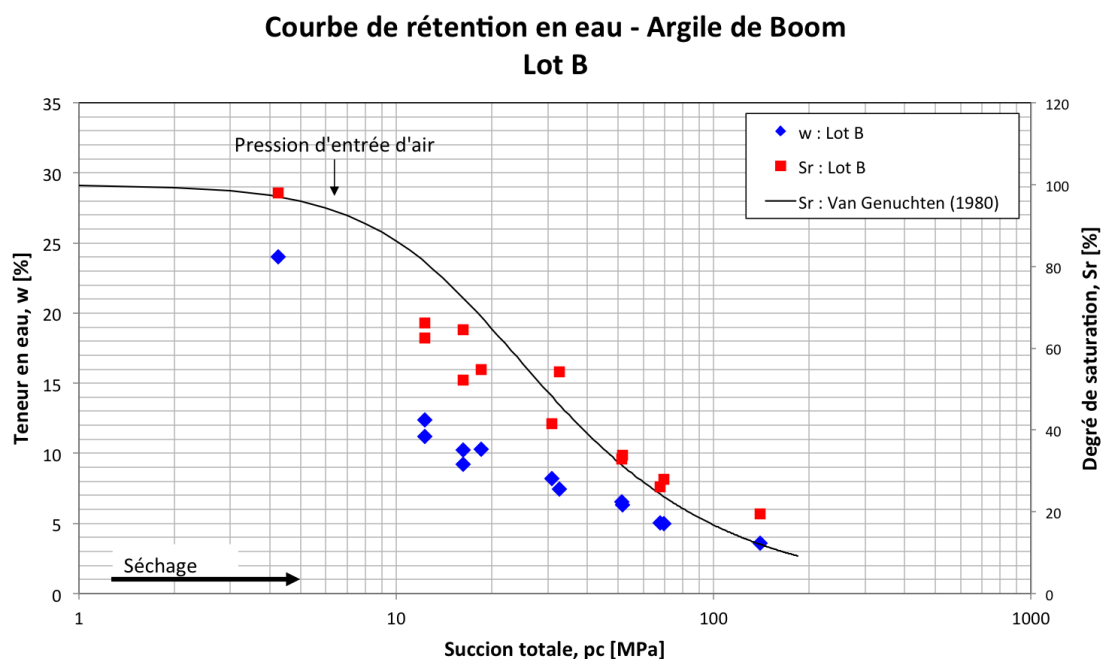
Notons que nos éprouvettes étaient initialement considérées comme saturées compte tenu de leur état intact, très proche des conditions in situ, mais aussi suite à l'humidification du carottage, bien que superficiel. Ce qui indique qu'à une succion de 1,4 MPa, soit une humidité relative ambiante proche de 99%, la teneur en eau du matériau est de 25%, soit conforme aux propriétés détaillées à la table 2.2. Nous disposons donc d'une base pratique confirmée qui permet de valider la deuxième campagne expérimentale.

### 2.2.4.2 Lot B - [18/02/13 - 16/05/13]

L'application du modus operandi détaillé à la section 2.2.3 en vue d'établir une courbe de rétention en eau en phase de séchage sur le second lot (cf. table 2.3), nous fournit à l'aide du post-traitement par la relation (2.4), les résultats proposés à la figure 2.13.

Pour rappel le Lot B a pour objectif de caractériser d'un point de vue hydro-mécanique non saturé l'argile de Boom par l'intermédiaire d'une courbe de rétention en eau, mais aussi de mettre en évidence les propriétés anisotropes de l'argile de Boom lors d'une phase de séchage.

Afin de valider les résultats, nous accompagnons la figure 2.14 des mesures obtenues par le premier Lot et des résultats issus de la littérature ([Delage et al., 2007] et [Lima et al., 2012]).



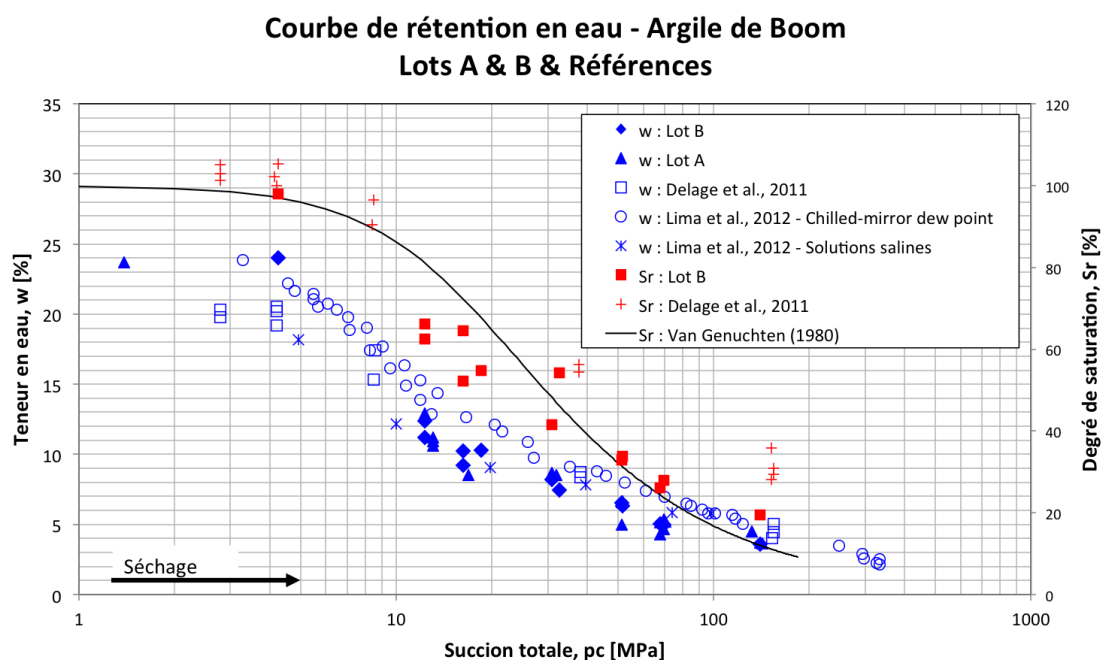
**Figure 2.13** – Courbe de rétention en eau du Lot B - Teneur en eau et degré de saturation - Approche de Genuchten.

La figure 2.13 propose un parallélisme entre l'évolution de la teneur en eau, fonction de la succion imposée, et le degré de saturation du matériau établi sur base de la relation (2.5). Nous approchons ces divers points par une fonction de Van Genuchten explicitée par la relation (2.6) [Croisé et al., 2006].

$$S_{r,we} = (1 + (p_c a)^n)^{\frac{1}{n} - 1} \quad (2.6)$$

où  $S_{r,we}$  est le degré de saturation effectif du sol, à considérer face au degré de saturation résiduel en eau  $S_{res,w}$ .  $p_c$  est la succion imposée au matériau,  $n$  est un facteur de forme employé pour paramétrer la courbe, et  $\frac{1}{a}$  est appelé "la pseudo pression d'entrée d'air" en phase gazeuse.

Les paramètres utilisés dans le modèle de Van Genuchten sont  $n = 2,0$  et  $a = 0,06 \text{MPa}^{-1}$ .



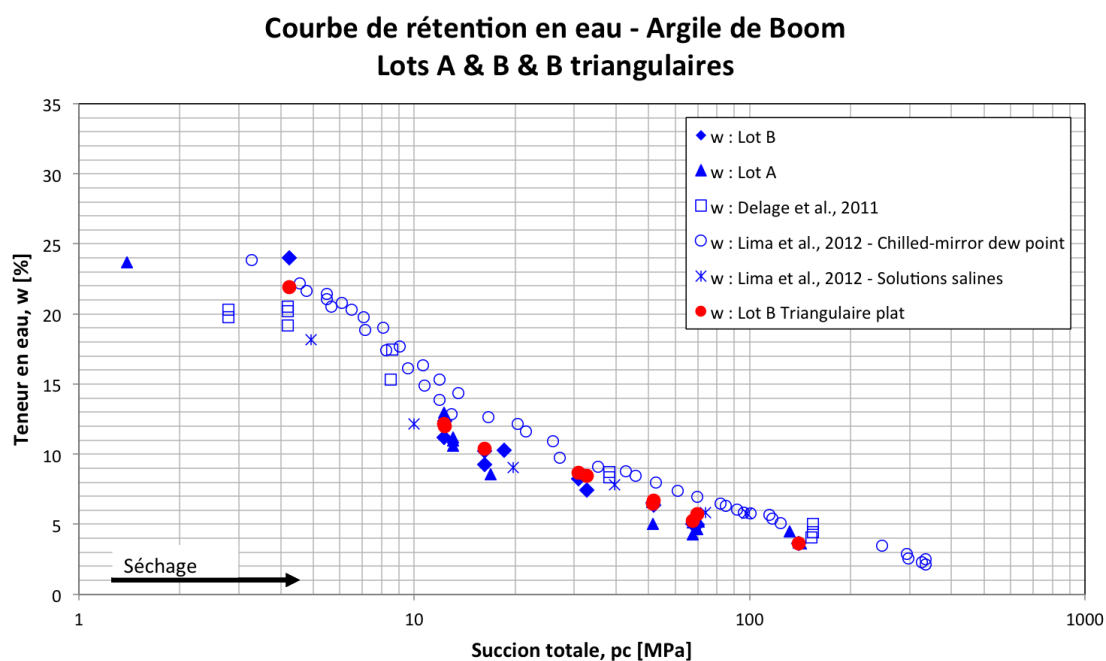
**Figure 2.14** – Courbe de rétention en eau du Lot B et comparaison au Lot A et aux références - Teneur en eau et degré de saturation - Approche de Genuchten.

La comparaison entre les différentes données fournies à la figure 2.14 confirme les résultats obtenus en termes d'évolution de teneur en eau en fonction de la succion présente au sein du matériau. Les résultats du second lot ne font dès lors que compléter le premier. La différence observée avec la littérature est liée aux mêmes remarques que celles établies précédemment.

On constate néanmoins, une disparité beaucoup plus marquée vis-à-vis de l'évolution du degré de saturation face aux résultats de [Delage et al., 2007]. En plus des différences liées aux méthodes expérimentales, nous pouvons également émettre certaines réserves quand au calcul de la saturation sur base de volumes déterminés géométriquement au terme de chaque cycle. Il était toutefois complexe de déterminer celle-ci autrement sans endommager l'échantillon. Un autre paramètre pouvant expliquer la différence est le choix de masse volumique des grains solides prise à  $2682,0 \text{ kg/m}^3$  comme proposé par [Bernier et al., 2007].

**Complément** La figure 2.15 propose l'intégration de l'évolution de la teneur en eau des éprouvettes triangulaires plates schématisées par la figure 2.7 (e), et réalisées selon le mode opératoire détaillé à la section 2.2.3 et dont les propriétés initiales sont regroupées à la table 2.3.

Comme illustré à la figure 2.15, les éprouvettes plates proposent des résultats similaires à ceux obtenus par les autres échantillons bien que la teneur en eau semble se rapprocher des valeurs proposées par la littérature. La différence est néanmoins assez faible mais nous permet de compléter la courbe de rétention par des résultats valides et cohérents.



**Figure 2.15** – Influence géométrique des éprouvettes sur la courbe de rétention.

Il serait toutefois intéressant d'étudier la vitesse d'atteinte de l'équilibre. Les pièces aplaties proposent en effet une surface spécifique différente de celles des cylindres, on pourrait imaginer que l'équilibre survienne plus rapidement pour l'un ou l'autre. Ce genre de recherches nécessiterait plus de mesures à une fréquence plus élevée. Ce qui n'est pas l'objet du présent mémoire.

**Conclusion** Les résultats sont cohérents et relativement proches de ce que propose la littérature. En résumé, le matériau présente une teneur en eau de près de 25% lorsqu'il est saturé, cette teneur descend à 15% lorsque l'humidité relative ambiante est de l'ordre de 90%, et atteint 4% de teneur en eau lorsque l'environnement est à 35 % d'humidité relative. L'évolution est donc non-linéaire, comme illustrée à la figure 2.14.

## 2.2.5 Mise en évidence du comportement anisotrope

### 2.2.5.1 Lot B - [18/02/13 - 16/05/13]

Le comportement anisotrope n'est étudié que sur les séries d'éprouvettes présentant une mise à forme suffisamment régulière que pour effectuer des mesures dimensionnelles représentatives. Ces mesures respectent les préceptes établis et détaillés par la figure 2.7. Le second lot a été réalisé sur base de l'enseignement tiré de la réalisation de la première campagne, le tout est décrit à la section 2.2.3. Rappelons que la courbe de rétention en eau exprimée selon les évolutions de la teneur en eau et du degré de saturation fonctions de la succion interne au matériau, sont proposées à la section 2.2.4.

La présente étude doit être menée de manière individuelle pour chaque échantillon. Pour rappel, l'orientation a été choisie de manière arbitraire sur les pièces car l'eau du carottage avait partiellement gommé toute trace de stratification. Au terme de la campagne d'essais, le séchage réalisé en étuve destiné à déterminer la masse sèche de chaque échantillon, a

permis de redécouvrir certaines traces du litage naturel de l'argile de Boom, un dépôt détritique marin. Un exemple de structures mises à jour est présentée à la figure 2.16, où l'on amplifie la présence du repère d'orientation à l'aide d'un trait de marqueur. Ce dernier n'est d'ailleurs pas forcément dans l'alignement des strates. Il convient de distinguer les strates naturelles des traces laissées par le carottage. Dès lors, l'étude se doit d'être personnelle à chaque éprouvette pour mettre en évidence l'évolution des déformations calculées sur base du repère d'orientation et la correspondance à l'orientation des structures.

Ceci ne présente un intérêt que si l'anisotropie n'est liée qu'à cette formation stratigraphique, ce à quoi nous tenterons de répondre dans ce chapitre.

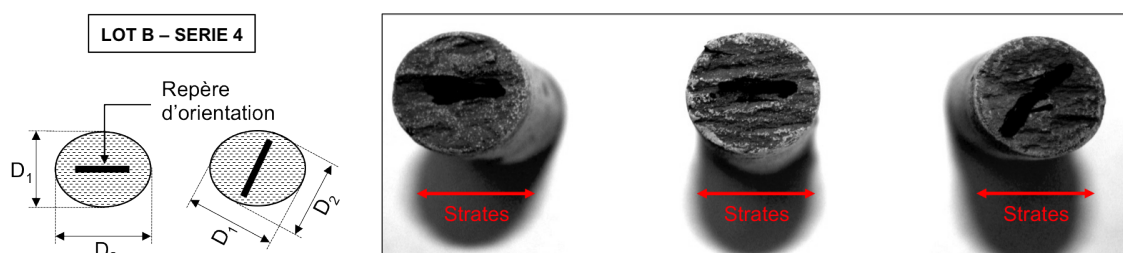


Figure 2.16 – Traces stratigraphiques mises à jour au terme du séchage - Lot B - Série 4.

**Série B.1.x** Cette série présente 4 échantillons dont les déformations sont calculées par rapport à l'état géométrique initial explicité à la table 2.3, ceci au terme de chaque cycle de séchage. La figure 2.17 présente les déformations en termes de hauteur, diamètres et volume, de chacune des éprouvettes rapportées à son orientation stratigraphique.

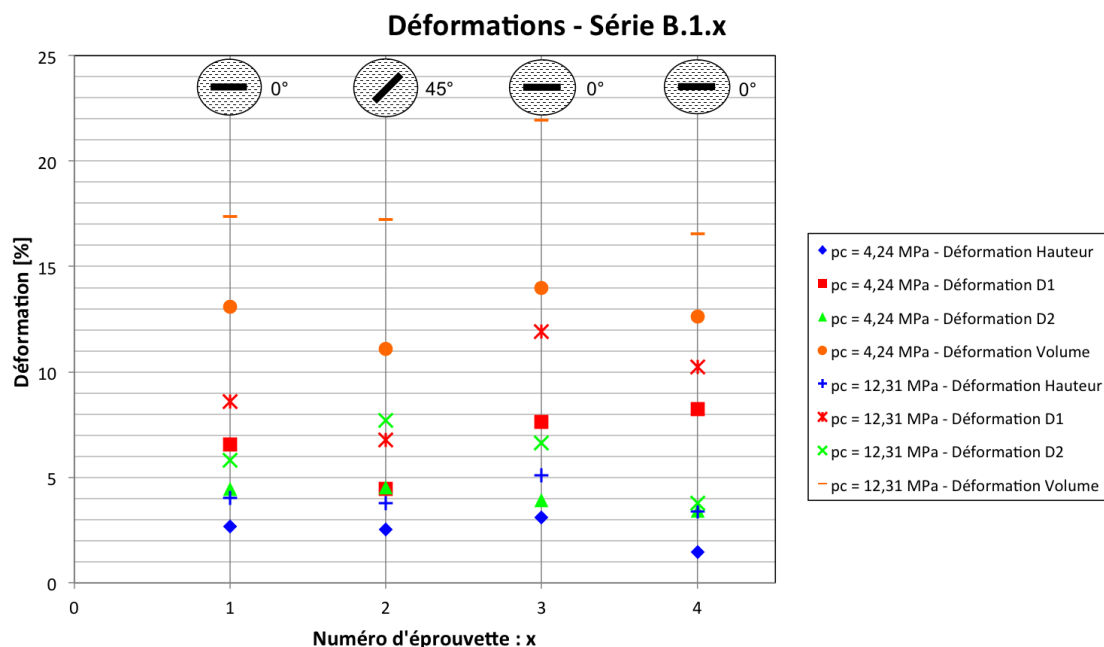


Figure 2.17 – Déformations de la série B.1.x au cours du séchage.

La figure 2.17 présente deux jeux de données<sup>7</sup>, le premier lié à l'imposition d'une succion totale de 4,2 MPa au matériau et l'autre lié à une succion totale de 12,3 MPa, le tout comparé en permanence à l'état des échantillons lors de leur introduction dans la première enceinte.

Au terme du premier cycle, toutes les éprouvettes présentent une déformation de hauteur de l'ordre de 3-4% par rapport à leur situation initiale. Les déformations de diamètres sont quant à elles beaucoup plus parlantes et indicatrices. Ainsi les échantillons 1, 3 et 4, donnent une déformation du diamètre D1 de l'ordre de 7-8%, pour une déformation du D2 de 3-4%, alors que l'échantillon 2 montre des déformations égales de D1 et D2 de 4%. Ces observations se reproduisent au terme de la seconde phase où la succion totale monte à 12,3 MPa. Ainsi le diamètre D1 des éprouvettes 1, 3 et 4 se déforme toujours plus que le D2, respectivement jusqu'à 12% et 8%. Inversement, l'échantillon 2 offre une déformation du même ordre de grandeur, environ 7% selon D1 et D2.

Le phénomène qui peut expliquer cette déformation différentielle selon la direction et seulement dans certains cas, est l'anisotropie du matériau. Les indicateurs joints en tête de figure 2.17, précisent l'orientation des strates mentionnées en début de section par rapport au repère d'orientation (RO) (qui impose l'emplacement des mesures sur les éprouvettes). Ainsi, les pièces qui présentent une déformation supérieure du D1, sont également celles pour qui le RO est dans l'alignement des strates. De manière similaire, l'échantillon 2 pour qui les diamètres se déforment également, est celui pour qui le RO est incliné à environ 45° par rapport au litage. Le caractère anisotrope lié à la stratification semble se confirmer. Il nous faut toutefois valider cette hypothèse à l'aide des quatre autres séries du Lot B.

En termes de variations volumiques calculées sur base de la hauteur et des diamètres selon la formulation d'un cylindre à base elliptique, on obtient une déformation de l'ordre de 17 à 22%. Ce qui est important mais doit être relativisé face à la perte d'eau induite par le séchage comme montré à la section 2.2.4.2. Rappelons qu'à la saturation, le matériau présente une teneur en eau supérieure à 25%, alors qu'à une humidité relative de 90% cette teneur chute à environ 15%, cela correspond à notre situation.

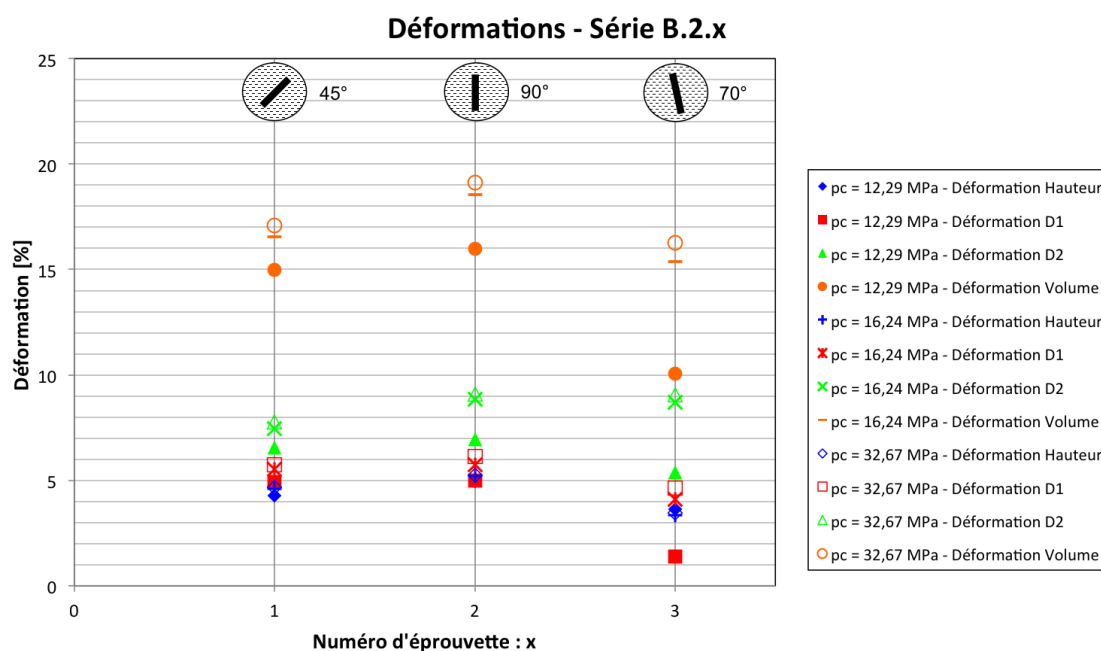
**Série B.2.x** Cette série présente 3 échantillons dont les déformations sont calculées par rapport à l'état géométrique initial explicité à la table 2.3, ceci au terme de chaque cycle de séchage. La figure 2.18 présente les déformations en termes de hauteur, diamètres et volume, de chacune des éprouvettes rapportées à son orientation stratigraphique.

La figure 2.18 présente trois cycles de séchage et donc trois jeux de données. L'objectif est à présent de confirmer l'hypothèse émise pour expliquer les observations de la série B.1.x.

Les schémas évolutifs des éprouvettes 2 et 3 sont totalement opposés à ceux observés aux échantillons B.1.(1-3-4), ainsi le D1 est en permanence inférieur au D2 tout au long du parcours de séchage. Si l'on tient compte de l'orientation des strates vis-à-vis de la prise de mesures, cela s'explique par le fait que le RO est perpendiculaire ou quasi perpendiculaire au litage, tel que précisé en tête de figure 2.18. Le diamètre mesuré perpendiculairement aux strates, D2 ici, est donc beaucoup plus sensible que celui orienté dans la direction des strates, D1 ici. La pièce 3 montre la même tendance mais de moindre importance, suite au fait que le RO est incliné de 45° par rapport aux structures. En effet, comme indiqué à la

---

7. L'identification respecte le principe établi à la figure 2.7 (f) - Dans l'ordre : Le lot, la série, le numéro d'éprouvette (ici x = 1 à 4)



**Figure 2.18** – Déformations de la série B.2.x au cours du séchage.

figure 2.16, le D1 et D2 sont alors fort semblables.

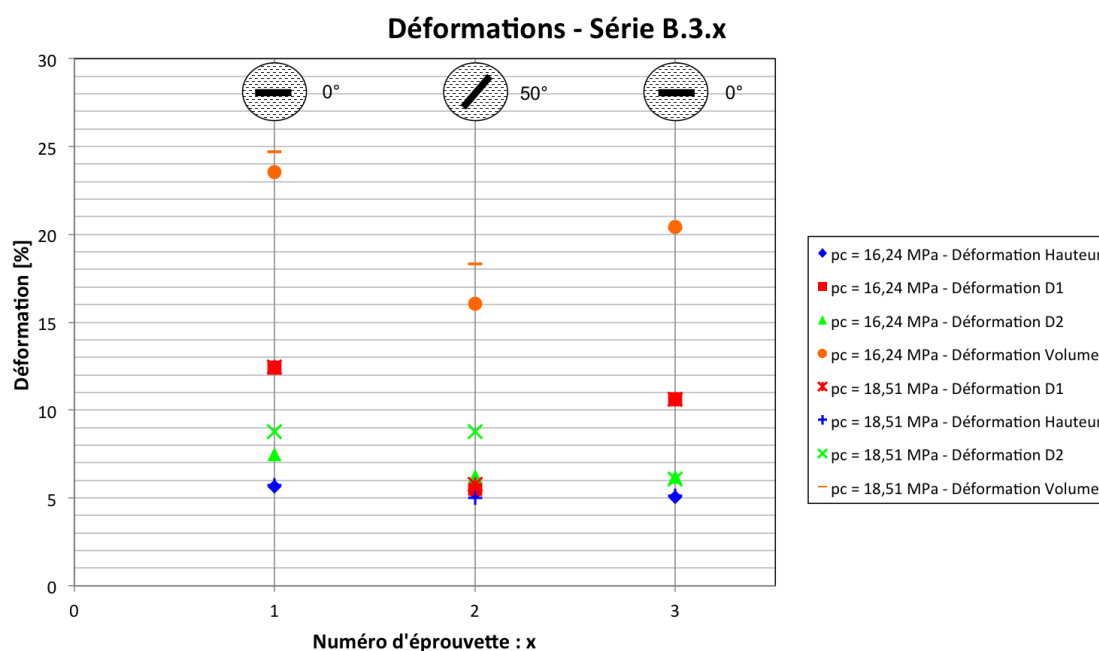
De manière générale, les éprouvettes se déforment d'environ 7% dans la direction des strates pour une succion totale de 12,3 MPa, comparé à la première série où pour une succion totale de 12,3 MPa, on obtenait une déformation de 7-8% dans cette même direction. Toutes ces déformations seront traitées de manière générale en fin de chapitre. Nous pouvons néanmoins préciser que l'anisotropie semble se confirmer.

**Série B.3.x** Cette série présente 3 échantillons dont les déformations sont calculées par rapport à l'état géométrique initial explicité à la table 2.3, ceci au terme de chaque cycle de séchage. La figure 2.19 présente les déformations en termes de hauteur, diamètres et volume, de chacune des éprouvettes rapportées à son orientation stratigraphique.

La figure 2.19 propose deux jeux de données, l'un pour une succion totale de 16,2 MPa et l'autre pour une succion totale de 18,5 MPa, ce qui est assez proche. Pratiquement, cette série est restée en permanence dans l'enceinte 3 munie d'une solution saline de KCl, les différences sont simplement liées à l'évolution des propriétés de cette chambre suite à la perte d'une certaine quantité d'eau, des ouvertures/fermetures, la présence d'autres expérimentation, etc.

Les résultats sont donc peu variables entre les deux sets, toutefois l'hypothèse de comportement anisotrope lié à la stratigraphie semble encore une fois se confirmer. En effet, le D1 se déforme de manière plus prononcée que le D2 pour les échantillons 1 et 3. Ces derniers proposent un RO dans la direction du litage, ce qui signifie que la déformation est moindre dans cette direction. La pièce 2 confirme encore la faible variabilité des diamètres lorsque les mesures sont prises à 45° des strates.

Les variations de diamètres et hauteur étant faibles, la déformation volumique l'est tout



**Figure 2.19** – Déformations de la série B.3.x au cours du séchage.

autant. Néanmoins, les déformations dans le sens du litage atteignent jusque 8% pour une succion totale de 16,2 MPa, ce qui était un peu moins dans le cas de la série B.2.x. Notons que toutes ces mesures sont sujettes aux erreurs liées à la taille des échantillons, et ce malgré les dispositions prises et la rigueur des phases de mesures.

**Série B.4.x** Cette série présente 3 échantillons dont les déformations sont calculées par rapport à l'état géométrique initial explicité à la table 2.3, ceci au terme de chaque cycle de séchage. La figure 2.20 présente les déformations en termes de hauteur, diamètres et volume, de chacune des éprouvettes rapportées à son orientation stratigraphique.

La figure 2.20 présente donc trois jeux de données liées aux succions de 30,9 MPa, 51,7 MPa et 69,7 MPa. Pour l'ensemble du parcours de séchage, le diamètre D1 se déforme plus que le D2 pour les éprouvettes 1 et 2, dont le repère d'orientation (RO) est placé dans la direction des strates. Ce qui constitue une preuve supplémentaire de l'effet de la stratification sur la déformation du matériau. L'éprouvette 3 présente des résultats typiques d'un RO fortement incliné par rapport au litage.

**Série B.5.x** Cette dernière série présente 3 échantillons dont les déformations sont calculées par rapport à l'état géométrique initial explicité à la table 2.3, ceci au terme de chaque cycle de séchage. La figure 2.21 présente les déformations en termes de hauteur, diamètres et volume, de chacune des éprouvettes rapportées à son orientation stratigraphique.

La figure 2.17 présente trois jeux de données propres aux succions totales de 51,6 MPa, 67,7 MPa et 139,7 MPa. En conformité avec les observations réalisées jusqu'ici, nous constatons l'importance de l'orientation des strates vis-à-vis des mesures effectuées. Ainsi, le diamètre D2 se déforme deux fois plus que le diamètre D1 orienté dans la direction du litage. Les éprouvettes 2 et 3 sont encore une fois caractéristiques d'un RO incliné par rapport aux strates.

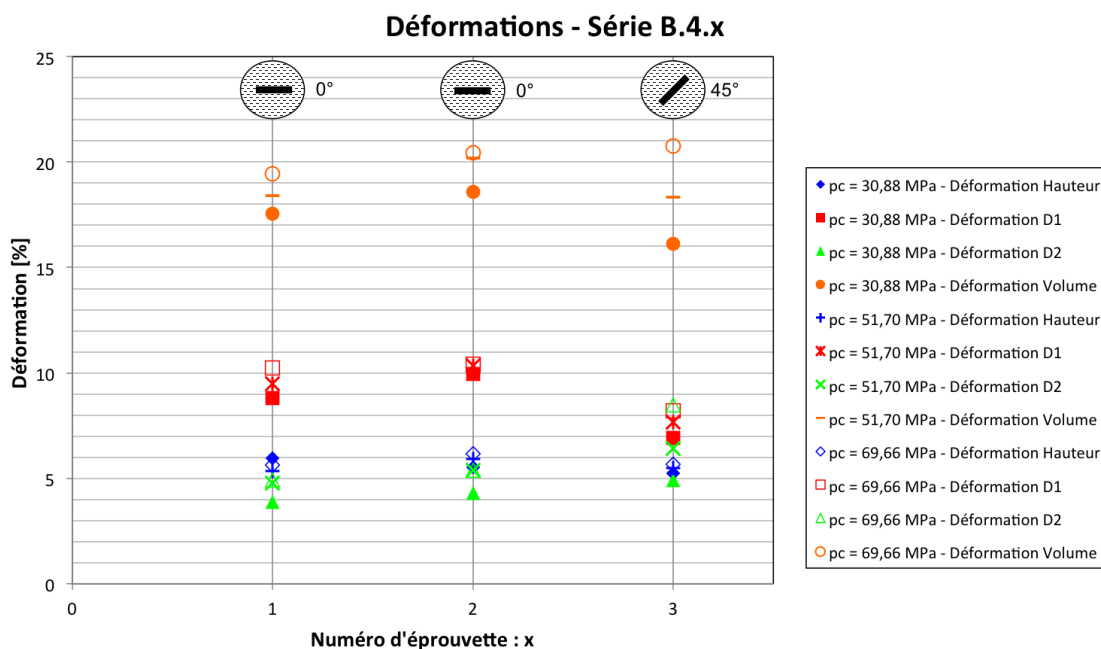


Figure 2.20 – Déformations de la série B.4.x au cours du séchage.

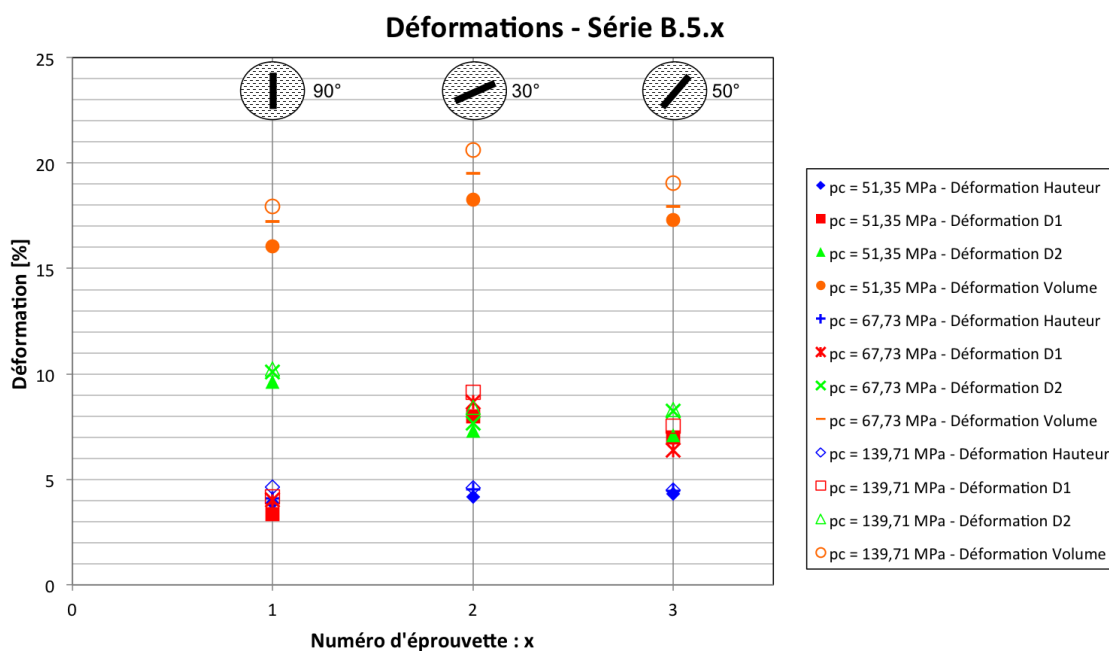


Figure 2.21 – Déformations de la série B.9.x au cours du séchage.

Nous observons que les déformations semblent ralentir et converger vers un maximum malgré le séchage de plus en plus important.

**Synthèse des déformations** L'étude globale des déformations est proposée à la figure 2.23. Elle regroupe l'ensemble des données relatives aux déformations des échantillons dont le repère d'orientation est ramené parallèlement ou perpendiculairement à la stratification. Celles dont le RO est incliné ne permettent pas une quantification représentative du phénomène et sont donc écartées. En d'autres termes, les notions de diamètres D1 et D2 sont remplacées par les diamètres perpendiculaire ou parallèle au litage tel qu'illustré à la figure 2.22.

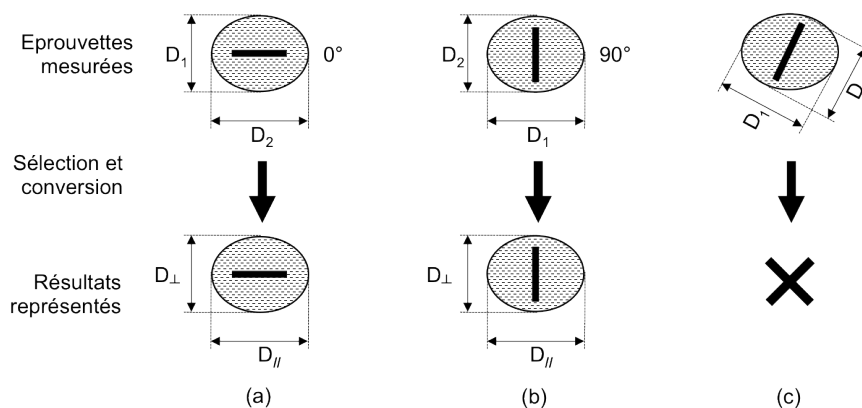


Figure 2.22 – Sélection et conversion des données expérimentales traitées à la figure 2.23.

**Synthèse - Evolution des déformations - Argile de Boom  
Lot B**

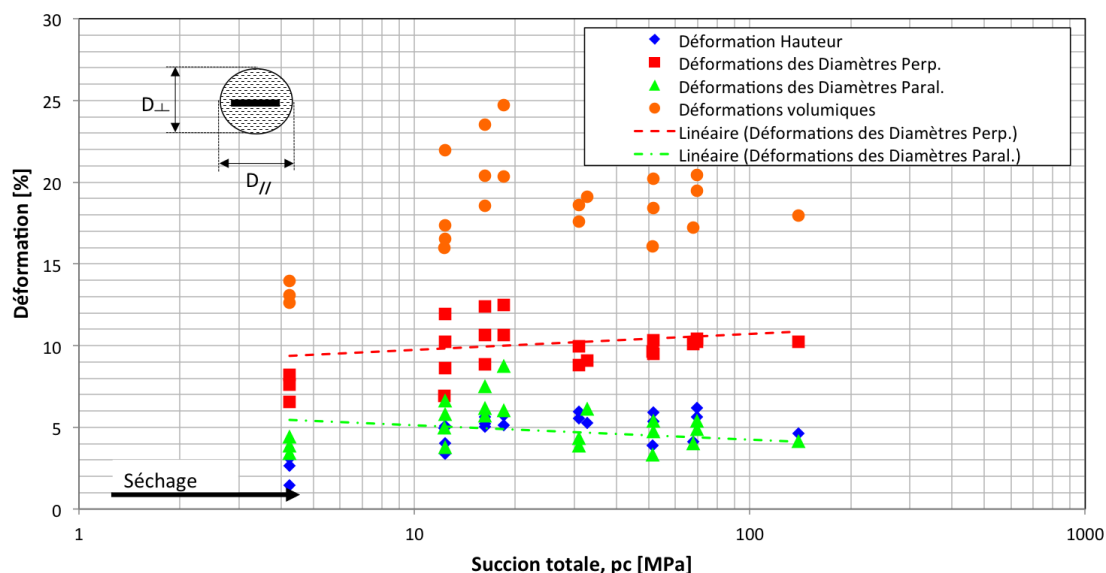


Figure 2.23 – Synthèse des déformations des échantillons d'argile de Boom à la suite du séchage.

La figure 2.23 propose l'évolution des déformations en fonction de la succion totale interne au matériau (fixée par l'humidité relative ambiante). Les disparités présentes sont liées à la nature hétérogène du matériau et suite aux erreurs de mesures inévitables sur de petits échantillons. Néanmoins, l'ordre de grandeur et la tendance générale transparaissent clai-

rement sur la représentation.

Nous constatons que le diamètre mesuré perpendiculairement aux strates est toujours plus déformable que celui orienté dans la direction du litage, et ceci quelque soit la succion totale imposée. Nous confirmons donc l'influence de l'anisotropie structurale de l'argile de Boom sur la déformabilité du matériau.

Nous définissons les notions de directions principales du matériau telles qu'orientées d'une part dans la direction des plans stratigraphiques et d'autre part de manière normale à ces plans.

On joint à la figure 2.23 l'évolution linéaire moyenne des déformations diamétrales. Cette évolution est ramenée en terme de ratio explicité par l'équation (2.7) et en termes de "pseudo-modules orthotropes" liant les déformations aux contraintes de succion totale, tel qu'exprimé aux formules (2.8) et (2.9).

$$\alpha(p_c) = \frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} \quad (2.7)$$

$$E_{\perp}(p_c) = \frac{p_c}{\epsilon_{\perp}} \quad (2.8)$$

$$E_{\parallel}(p_c) = \frac{p_c}{\epsilon_{\parallel}} \quad (2.9)$$

La représentation 2.24 quantifie le rapport existant entre les déformations différentielles relatives à chaque direction principale du matériau. On observe ainsi un rapport  $\alpha$  moyen variable de 1,8 à 2,5 selon que la succion totale soit respectivement de 4 MPa et 140 MPa. Ces valeurs sont proches du rapport d'anisotropie des modules de déformation proposés par [François et al., 2012], égal à  $\alpha = 2$ . En considérant une évolution moyenne linéaire, on observe une progression de l'ordre de 0,6% du coefficient  $\alpha$  parallèlement à l'augmentation de la succion.

Les pseudo-modules orthotropes définis par rapport à la succion totale présente au sein du matériau, évoluent quant à eux de manière non-linéaire tel qu'illustré à la figure 2.24. L'argile de Boom devient plus "raide" selon la direction stratigraphique, lorsque la succion totale augmente. En d'autres termes, le taux de variation de la déformation parallèle aux strates diminue avec la succion. Ce phénomène est également observé sur la direction normale aux strates dans une moindre mesure. Notons la valeur des modules pour une humidité relative moyenne de 80 à 90%, soit une succion totale comprise entre 15 et 30 MPa, qui offre des modules orthotropes de l'ordre de 200 et 400 MPa. Ces résultats sont similaires à ce qui est annoncé à table 2.2 regroupant divers valeurs issues de la littérature. [Alheid et al., 2005] observe pour l'argile à Opalines, une évolution des modules orthotropes de déformation classiques avec la teneur en eau, similaire à l'évolution des pseudo-modules orthotropes définis par la succion totale.

La figure 2.25 complète cette analyse en illustrant l'évolution de l'indice des vides en parallèle avec les déformations volumiques calculées.

Rappelons que les erreurs de mesures liées aux dimensions des éprouvettes influencent directement la précision de ce genre de résultats. Qualitativement, nous constatons une

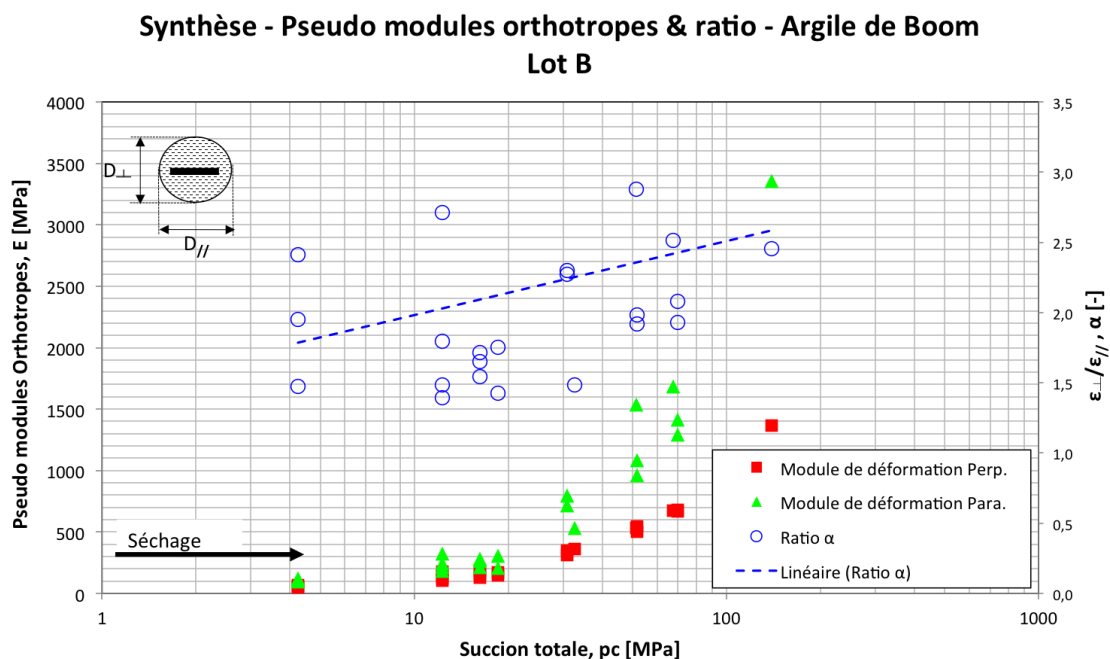


Figure 2.24 – Evolution du ratio  $\alpha = \epsilon_{\perp}/\epsilon_{\parallel}$  et des pseudo-modules orthotropes  $E_{\perp}$  et  $E_{\parallel}$ .

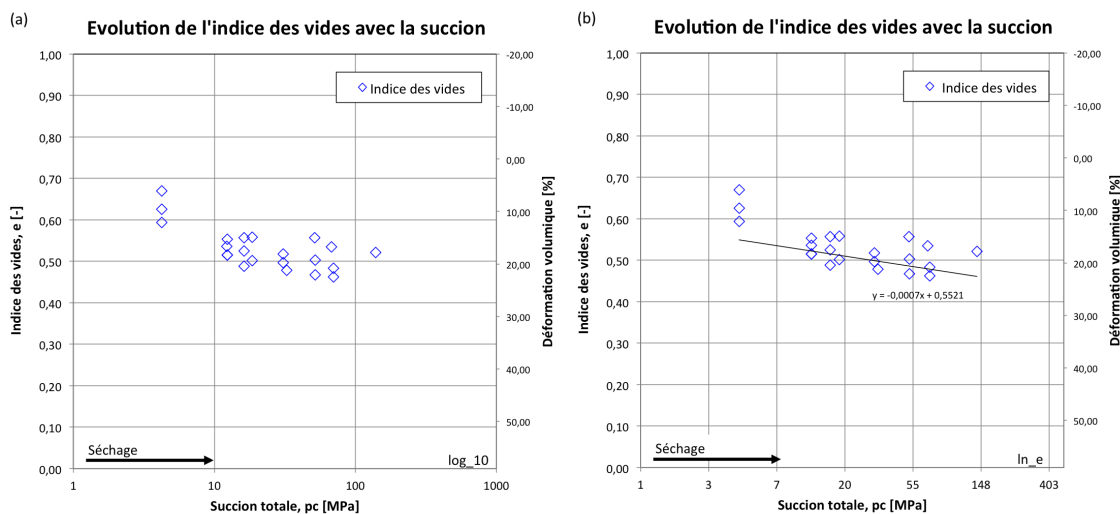
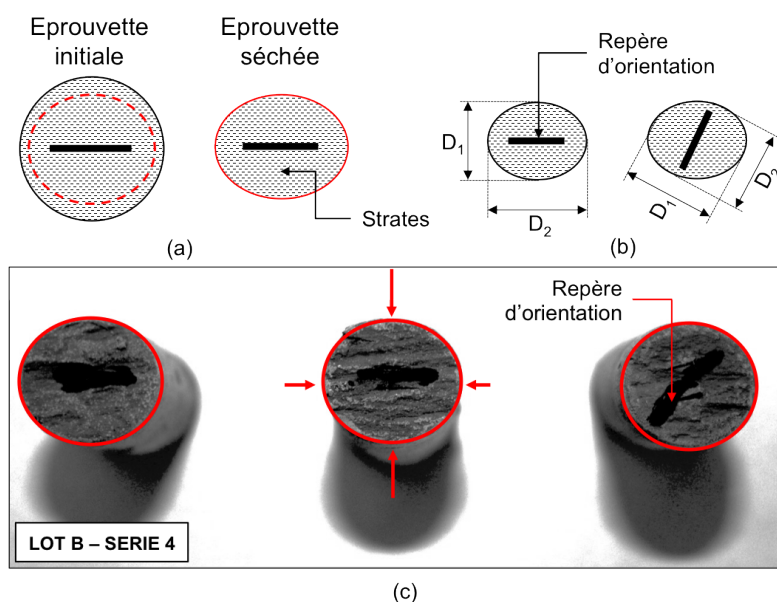


Figure 2.25 – Evolution de l'indice des vides en parallèle avec les déformations volumiques en fonction de la suction, (a) en base logarithmique 10, (b) en base logarithmique néperienne.

réduction de l'indice des vides, qui exprime le rapport entre le volume des vides et le volume solide de l'échantillon, en fonction de l'augmentation de la suction et parallèlement à l'augmentation des déformations volumiques. Ceci traduit une contraction de l'échantillon et une réduction de porosité puisque le volume de matière solide est constant.

La figure 2.25 (b) permet de déduire un taux moyen de déformation en fonction de l'évolution de la suction,  $\kappa_s = 0,0007$ . La littérature propose des valeurs variant de 0,03 pour [Delage et al., 2007], à 0,0012 selon [Vaunat et al., 2000]. Les résultats proposés dans le cadre du mémoire sont donc de l'ordre de grandeur de ce qui a été mesuré.

**Conclusion** La stratigraphie du matériau, soit l'anisotropie structurale de l'argile de Boom, influence de manière significative la déformation lors du séchage, ce qui induit donc une anisotropie comportementale. Nous résumons à la figure 2.26 les observations réalisées au cours de la seconde campagne d'essais. Ainsi, lors d'un séchage, l'argile se contracte plus dans la direction perpendiculaire au litage que dans la direction de ce dernier. Initialement circulaires, les sections droites des éprouvettes finissent avec une géométrie elliptique. La contraction du matériau provoque naturellement une rigidification de celui-ci, ce qui est mis en évidence par l'augmentation des pseudo-modules élastiques orthotropes. Précisons que l'annexe 5.2.4 propose pour toutes les éprouvettes, les mêmes photographies que celle de la figure 2.26 (c), ce qui permet d'observer les strates exacerbées par le séchage des échantillons.



**Figure 2.26** – Etude qualitative de la déformation des éprouvettes d'argile de Boom lors du séchage. (a) Schéma explicatif des observations, (b) localisation des prises de mesures, (c) exemple d'observation sur la série B.4.x.

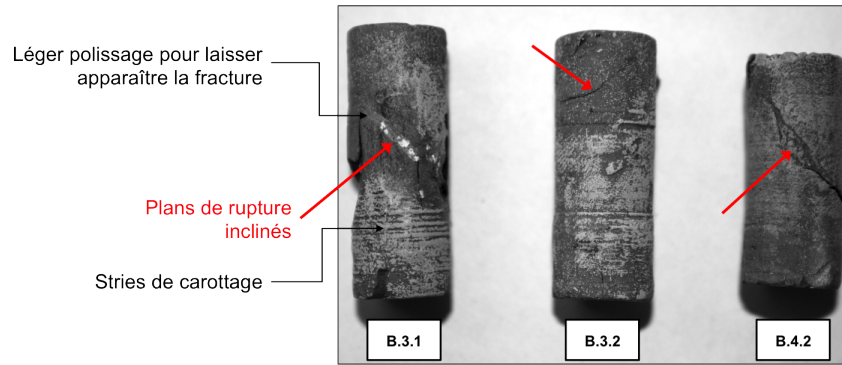
Les strates ne sont pas forcément orientées parallèlement à la direction axiale des échantillons. En cas d'inclinaison de celles-ci par rapport à cet axe, nous n'observons pas de courbure ou d'évolution atypique significativement importante que pour être remarquée. Par contre, on observe sur certaines pièces l'apparition de plans de rupture inclinés par rapport à l'axe centrale. La figure 2.27 propose trois exemples où cette situation est visible.

### 2.2.6 Conclusion

Le présent chapitre apporte une brève description des propriétés géologiques, géotechniques et structurales de l'argile de Boom à la section 2.1. Ces données sont utilisables et seront citées en référence tout au long du mémoire.

La section 2.2 décrit quant à elle les expérimentations menées dans le cadre du Travail de Fin d'Etudes afin de répondre aux exigences demandées.

La phase expérimentale du mémoire apporte à la section 2.2.4, une courbe de rétention



**Figure 2.27** – Mise en évidence de plans de fracturations inclinés à la suite du séchage.

en eau réalisée sur base de deux campagnes d'essais sur un total de 41 éprouvettes. Ces résultats sont validés par diverses références bibliographiques et peuvent être exploitées pour caractériser le comportement hydro-mécanique non saturé du matériau.

La dernière étape vise à exploiter les différentes mesures effectuées sur les échantillons de la deuxième campagne pour mettre en évidence le comportement anisotrope de l'argile de Boom. Après traitement, la section 2.2.5 met en lumière l'influence nette de l'orientation stratigraphique sur les déformations du matériau. Ce dernier aura tendance à plus se contracter lors d'une phase de séchage, dans sa direction normale aux strates, inversement, la contraction sera deux fois moindre dans la direction des plans du litage.

---

# Etude numérique du comportement anisotrope de l'argile de Boom

---

L'étude de faisabilité du confinement des déchets radioactifs de catégories B & C en couches géologiques profondes énoncé au chapitre 1.5.3, est menée au sein du programme de recherche et développement conduit par le SCK•CEN, l'ONDRAF/NIRAS et le GIE EURIDICE. La section 1.5.3.2 propose une brève description de ce programme.

Parmi les sujets analysés, se pose le problème des modifications thermo-hydro-mécaniques au sein de la roche hôte, suite aux rayonnements résiduels des déchets, chaleur incluse, et de l'altération du massif induite par l'excavation des galeries. Pour rappel, la géologie du site de stockage vise à établir une barrière naturelle ultime face à toute migration accidentelle de radionucléides vers la biosphère. Dès lors, il convient de garantir l'intégrité du sol à court et long termes, et donc de réaliser les études adéquates afin d'établir des modèles de comportement prédictifs.

Comme annoncé à la section 1.1, l'approche numérique du mémoire s'oriente sur l'étude du comportement hydro-mécanique anisotrope de l'argile de Boom. Il s'agit de se placer dans la lignée du programme CLIPEX (Clay Instrumentation Program for the EXTension of an underground research laboratory) coordonné par le GIE EURIDICE lors de l'extension du laboratoire souterrain HADES par la galerie de liaison de 2000 à 2002, notons que ces sujets sont introduits à la section 1.5.3.2.

Rappelons également les notions d'EdZ et d'EDZ essentielles à la bonne compréhension du présent chapitre [Bernier et al., 2004] :

- La zone perturbée d'excavation - Excavation disturbed Zone (EdZ), définie comme zone ayant subi des modifications hydromécaniques et géochimiques sans changement profond des propriétés de transport et d'écoulement. Il y a peu d'impact négatif sur la sécurité à long-terme au sein de l'EdZ.
- La zone endommagée d'excavation - Excavation Damaged Zone (EDZ), définie comme zone ayant subi des modifications hydromécaniques et géochimiques profondes des propriétés de transport et d'écoulement avec augmentation significative de la perméabilité dans le massif.

## 3.1 Programmes de recherches liés à l'altération du massif lors de l'excavation

Le programme CLIPEX prend place lors de l'excavation réalisée de 2000 à 2002 sur le site de Mol-Belgique, de la galerie de liaison d'une longueur de 90 mètres à 225 mètres de profondeur, cette dernière est illustrée à la figure 1.10. La construction vise à démontrer la faisabilité et la conformité du creusement par une méthode "industrielle", plus rapide et

économique, et d'en étudier les impacts sur le comportement hydro-mécanique du massif.

### 3.1.1 Modélisations réalisées par le programme CLIPEX

Le programme CLIPEX a mené différentes modélisations préliminaires et prédictions "à l'aveugle", en rapport avec l'excavation de la galerie de liaison et les résultats d'essais in-situ. Cette phase numérique s'est faite en partenariat avec différents groupes de recherche qui ont chacun utilisé un code personnel pour effectuer deux cas tests décrits dans la suite de cette section. Nous proposons ici une brève revue de ces modélisations de manière à établir une base comparative vis-à-vis des simulations et modèles du mémoire, mais aussi de manière à nous positionner face aux hypothèses prises par ces modèles.

#### 3.1.1.1 Equipes et codes numériques impliqués dans le programme CLIPEX

Selon [Bernier et al., 2007], les différentes équipes actives dans cette phase de modélisations et leur code respectif sont les suivants :

- **SCK•CEN et GEOCONTROL** : code FLAC - Code par différences finies explicite, généralement utilisé pour la simulation du comportement de structures rocheuses, de sols, etc. ;
- **UPM** : code ABAQUS - Suite de programmes de simulations basée sur la méthode des éléments finis. Son utilisation s'étend des calculs statiques simples aux problématiques de transferts de chaleur, de diffusion de masse, de gestion thermique, etc. ;
- **G3S** : code CESAR et ANTHYC - Respectivement, code éléments finis intégrant le calcul de milieux poreux avec les couplages inhérents, et code éléments finis 1,2,3-D pour l'étude des milieux poreux et de la mécanique des roches. Il intègre le calcul d'équilibres mécaniques avec couplages thermique, hydraulique et/ou chimique, et est adapté aux problèmes de thermodynamique de milieux continus ouverts en états stationnaire ou transitoire ;
- **ONDRAF/NIRAS** : code BOOMCLAY - Code éléments finis 1-D où un modèle rhéologique caractéristique de l'argile de Boom est implémenté ;

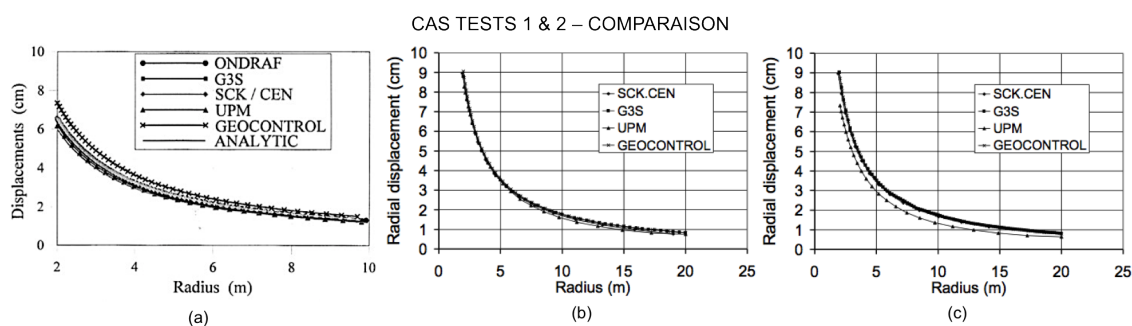
Afin de comparer les modélisations réalisées par chaque code, deux cas tests pour lesquels la géométrie, les conditions limites, les modèles constitutifs, les caractéristiques géotechniques et la séquence de construction, ont été imposés. Le choix du maillage était néanmoins libre.

#### 3.1.1.2 Modélisations préliminaires

Les cas tests préliminaires sont :

- **Cas test 1** :
  - Excavation uni-axiale, avec les modèles Mohr-Coulomb et Cam-Clay Modifié [Bernier et al., 2007].
  - Les résultats principaux pour le modèle Mohr-Coulomb sont illustrés en annexe 5.3.1 à la figure 5.7, avec un aperçu à la figure 3.1 (a). On y observe une extension de la zone plastique jusqu'à un rayon de 6m (La pression d'eau retrouve sa valeur initiale  $u_w = 2,25MPa$ , et les contraintes orthoradiales  $y$  atteignent leur maximum). Le déplacement radial est de 7 cm à un rayon de 2 m [Bernier et al., 2007].
- **Cas test 2** :

- Plus proche de la réalité, ce cas demande la prise en compte du séquençage de la construction, du déconfinement du massif au front de taille, et du soutènement avec et sans l'espace initial qui existe avec le massif (deux cas à étudier). Les modèles constitutifs imposés sont encore une fois Mohr-Coulomb et Cam-Clay Modifié. La réponse du massif face à une excavation réalisée à la vitesse de 2 m/j pour ce matériau faiblement perméable, a conduit à émettre l'hypothèse d'une argile non-drainée. De plus, il s'agit d'études préliminaires au programme CLIPEX censé caractériser le comportement hydro-mécanique d'un point de vue expérimental, il était donc inutile de spéculer sur cet aspect [Bernier et al., 2007].
- Les principaux résultats sont illustrés en annexe 5.3.1 à la figure 5.8, avec un aperçu à la figure 3.1 (b) & (c). On y observe de sérieuses différences entre certaines simulations pour le modèle Cam-Clay Modifié. Celles-ci peuvent s'expliquer par la différence de maillage entre modèles, le choix de formulation en grands-déplacements ou non, le type de discrétisation et la loi d'intégration pour le modèle Cam-Clay Modifié [Bernier et al., 2007].



**Figure 3.1** – Comparatif des résultats des cas Tests 1 & 2 pour le déplacement radial - (a) Test 1 Mohr-Coulomb ; (b) Test 2 avec Gap Mohr-Coulomb ; (c) Test 2 avec Gap Cam-Clay Modifié, sélection depuis [Bernier et al., 2007].

En conclusion, on constate pour les cas test 1 et 2 implémentant la loi constitutive de Mohr-Coulomb, une bonne correspondance entre les divers résultats. Inversement, on observe de grandes différences pour la loi Cam-Clay Modifié appliquée au cas test 2. Ces simulations ont permis d'obtenir un ordre de grandeur de la taille des zones perturbées et une idée de l'évolution hydro-mécanique au sein du massif [Bernier et al., 2007].

### 3.1.1.3 Prédiction à l'aveugle

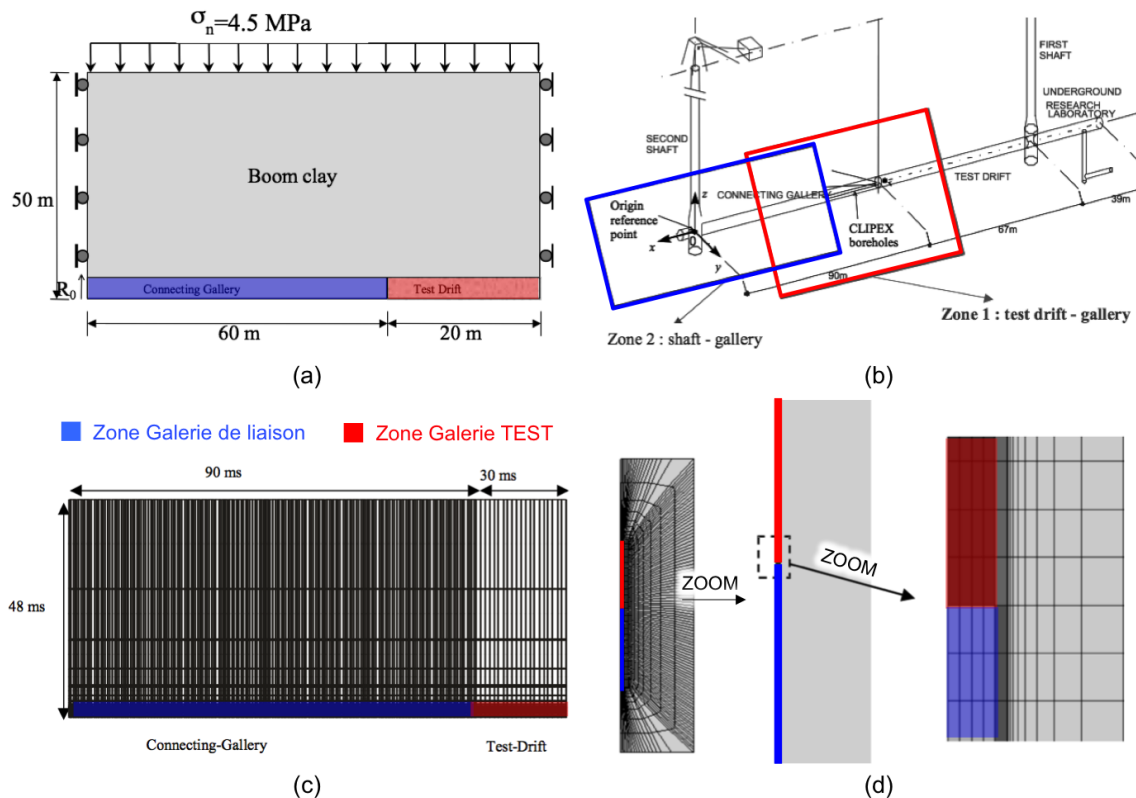
Cette seconde phase de modélisations est basée sur les paramètres réels de l'excavation et de la galerie de liaison. Les simulations ont été menées pour différents modèles rhéologiques et pour un comportement hydro-mécanique laissé au choix des équipes selon leur expérience et les résultats in-situ [Bernier et al., 2007] énoncés au chapitre 1.5.3.2.

Nous regroupons à la table 3.1, les différentes hypothèses et paramètres utilisés par les équipes. Cette revue est utile pour justifier et comparer les choix réalisés dans le cadre du mémoire. Précisons en premier lieu les géométries étudiées par les différents groupes :

- **SCK•CEN** : code FLAC

- Modélisation 2-D axi-symétrique, elle est concentrée à la jonction Galerie de liaison/Galerie TEST illustrée à la figure 3.2 (a), elle est également dotée d'un maillage

- densifié dans la région des instruments CLIPEX ;
- Phasage évolutif (Excavation de la galerie TEST, drainage de 14 ans, excavation de la galerie de liaison) ;
  - Etat de contraintes isotrope ;
  - **GEOCONTROL** : code FLAC
    - Modélisation 3-D de deux zones séparées illustrées à la figure 3.2 (b) ;
    - Phasage limité aux excavations des galeries TEST et de liaison ;
    - Etat de contraintes isotrope ;
  - **UPM** : code ABAQUS
    - Modélisation 2-D axi-symétrique, de 120 m de galerie (90 galerie de liaison, 30 de la galerie TEST) illustrée à la figure 3.2 (c) ;
    - Phasage limité aux excavations des galeries TEST et de liaison ;
    - Etat de contraintes isotrope ;
  - **G3S** : code ANTHYC
    - Modélisation 2-D axi-symétrique, définie pour limiter les effets de bord du point de vue hydraulique, soit un domaine de  $100 \times 400$  m, illustré à la figure 3.2 (d) ;
    - Phasage limité à l'excavation de la galerie TEST, la chambre de départ et la galerie de liaison ;
    - Etat de contraintes isotrope ;
  - **ONDRAF/NIRAS** : code BOOMCLAY - Ne participait pas à cette étape du projet ;



**Figure 3.2** – Représentation des domaines modélisés dans le cadre des prédictions à l'aveugle du programme CLIPEX - (a) SCK•CEN; (b) GEOCONTROL; (c) UPM; (d) G3S [Bernier et al., 2007].

Propriétés géotechniques - Modèle de Mohr-Coulomb								
		Module de Young E' [MPa]	Coefficient de Poisson $\nu'$ [-]	Angle de friction $\phi'$ [°]	Cohésion c' [MPa]	Angle de dilataance $\psi$ [°]		
A. Boom	SCK•CEN	300	0,125	18	0,3	0		
	GEOCONTROL	300	0,125	18	0,3	0		
	UPM	Pas modélisé						
	G3S	Pas modélisé						
Propriétés géotechniques - Modèle de Cam-Clay Modifié								
		NCL <sup>1</sup> $\lambda$ [-]	SWL <sup>2</sup> $\kappa$ [-]	CSL <sup>3</sup> M [-]	Pression préconsol. $p_c$ [MPa]	Coefficient de Poisson $\nu$ [-]	Volume spéc. <sup>4</sup> N [-]	
A. Boom	SCK•CEN	0,13	0,02	0,64-0,81	6	0,2	2,75	
	GEOCONTROL	0,13	0,02	0,64-0,81	6	0,2	2,75	
	UPM	0,13	0,02	0,814	6	0,2	2,75	
	G3S	0,05-0,25	LINEAIRE $E = 332MPa$	$\phi_c = 12^\circ$	4,5-6	0,2	?	
Propriétés hydrauliques de l'argile de Boom - Profondeur 225m								
		Perméabilité saturée $k_w$ [m/s]		Module de Bulk $\lambda_w$ [GPa]		Porosité n[-]		
A. Boom	SCK•CEN	$4.10^{-12}$		2		0,39		
	GEOCONTROL	$4.10^{-13}$		2		0,39		
	UPM	$1.10^{-14}$		2		0,39		
	G3S	$k_{w,0} \cdot (1 + \gamma tr \epsilon^p)$ $k_{w,0} = 4.10^{-12} m/s, \gamma = 10^4$		2		0,39		
Propriétés du soutènement								
		Module de Young E [GPa]	Coefficient de Poisson $\nu$ [-]	Epaisseur a [cm]	Rayon externe [m]	Raideur $K_{sn}$ [GPa]	Espace Gap b [cm]	
G.L.	SCK•CEN	30	0,3	40	2,4	5,5	2	
	GEOCONTROL	25	0,25	60	2,405	6,65	?	
	UPM	75	0,3	16	1,91	6,9	9	
	G3S	Pas modélisé explicitement					5	
C. TEST	SCK•CEN	Pas modélisé explicitement					0	
	GEOCONTROL	25	0,25	40	2,4	4,44	15	
	UPM	75	0,3	16	1,91	6,9	9	
	G3S	Pas modélisé explicitement					5	

**Table 3.1** – Revue bibliographique des paramètres employés dans les modélisations à l'aveugle du programme CLIPEX par SCK•CEN, GEOCONTROL, UPM et G3S [Bernier et al., 2007].

Précisons que le SCK•CEN, GEOCONTROL et G3S ont effectué une étude paramétrique de l'influence des lois constitutives, l'influence de la pente de la droite d'état critique (CSL), l'impact d'une pression de pore nulle en conditions limites, l'effet des écoulements d'eau, et l'influence de la perméabilité en fonction de l'état plastique [Bernier et al., 2007].

Nous ne détaillons pas les résultats tant ils sont nombreux et variés, néanmoins nous fournissons une synthèse comparative des grandes lignes des simulations réalisées à la table 3.2 issue de [Bernier et al., 2007]. Nous proposons également un résumé des conclusions apportées au terme des prédictions à l'aveugle effectuées dans le cadre du programme CLIPEX.

En conclusion, les résultats numériques obtenus sont tous cohérents malgré leurs quelques différences. Celles-ci peuvent s'expliquer selon [Bernier et al., 2007], par des disparités au niveau de :

1. Slope of the normal consolidation line (NCL)
2. Slope of the elastic swelling line (SWL)
3. Slope of the critical state line (CSL)
4. Volume spécifique à 1kPa sur la NCL

	<b>SCK•CEN</b>	<b>GEOCONTROL</b>	<b>UPM</b>	<b>G3S</b>
Modèle	2D-axi-sym.	3D	2D-axi-sym.	2D-axi-sym.
Lois utilisées	M-C-C ; M-C	M-C	M-C-C	C-C
Conditions initiales ( $\sigma_h, \sigma_v, u_w$ )	Homogène	Linéaire avec la profondeur	Homogène	Homogène
Interface Argile/soutènement	Non	Oui	Non	Non
Espace (sur-excavation)	2 cm	?	9 cm	5 cm
Drainage galerie TEST (1987-2001)	Oui	Non	Non	Oui

**Table 3.2** – Comparaisons des propriétés principales de chaque modèle de prédiction à l'aveugle réalisé dans le cadre du programme CLIPEX [Bernier et al., 2007].

- la taille de maillage ;
- les méthodes d'intégration des lois constitutives ;
- le diamètre des galeries ;
- les propriétés du soutènement ;
- la perméabilité ;
- l'emploi d'un modèle 2-D ou 3-D ;
- le choix du modèle numérique ;
- les propriétés de l'argile de Boom ;

Il en résulte une contrainte totale dans le massif qui peut atteindre 5,5 MPa, un soutènement soumis à une pression de 2 MPa, un déplacement axial en front de taille jusque 7 cm avec un modèle Cam-Clay Modifié, et jusqu'au double avec Mohr-Coulomb. Selon le modèle utilisé, la convergence est de l'ordre de 2,5-4 cm, avec cependant une stabilisation à 4 cm (C-C-M) ou 10 cm (M-C) suite à l'installation du soutènement. La zone plastique s'étend quant à elle jusqu'à 5-6 mètres selon le modèle et l'EdZ peut atteindre 25 m en direction radiale [Bernier et al., 2007].

### 3.1.2 Conclusion

Les deux campagnes de modélisation avaient pour objectifs, dans un premier temps de comparer les modèles entre-eux par l'intermédiaire de cas tests communs à tous, et par la suite de prédire le comportement hydro-mécanique de l'argile de Boom avant, pendant et après l'excavation de la galerie de liaison à l'aide d'une phase de prédiction "à l'aveugle".

Sur base des résultats obtenus lors de cette deuxième phase, le programme de recherche CLIPEX propose certaines perspectives d'investigations pour améliorer la correspondance entre les modèles et vis-à-vis des résultats d'essais in-situ. Outre les remarques développées précédemment, il serait intéressant, selon [Bernier et al., 2007], d'étudier l'implémentation dans le modèle d'un comportement plastique plus proche de la réalité, mais aussi de prendre en compte d'autres échelles de temps pour le développement des comportements hydro-mécaniques, ou encore de développer un modèle intégrant l'apparition des fracturations au sein de la roche. Dans une moindre mesure, générer un modèle 3-D suffisamment affiné ne peut qu'améliorer les résultats.

Cet ensemble de recommandations sert de base aux modèles réalisés dans le cadre du

mémoire.

### 3.2 Modèles réalisés dans le cadre du mémoire

L'objectif de la partie numérique du mémoire est de prendre en compte le comportement anisotrope de l'argile de Boom dans une modélisation de l'excavation de la galerie de liaison (cf. section 1.5.3). Sur base de certaines des recommandations émises à la section 3.1.2, ce modèle intègre simultanément une loi constitutive traduisant le comportement anisotrope du matériau, et l'anisotropie des contraintes présentes au sein du massif argileux. La modélisation sera réalisée à l'aide du code éléments finis LAGAMINE développé à l'Université de Liège.

Le présent chapitre détaille le cheminement suivi pour l'élaboration de ce modèle final sur base d'une analyse physique du problème. Les modélisations du programme CLIPEX détaillées à la section 3.1.1 sont une source d'inspiration.

Un ensemble de simulations destinées d'une part à étudier la physique du problème en état plan de déformation (EPD), et d'autre part à comparer/valider les lois constitutives implémentées, notamment à l'aide de développements analytiques, sont présentées dans un premier temps. La démarche se compose d'une multitude d'étapes où l'on accroît progressivement la complexité. Cette phase nous permet de détailler toutes les subtilités du comportement du massif lors de l'excavation des galeries. Nous étendons ensuite ces modèles à une géométrie 3-D particulière (Galerie Borgne), en vue de reproduire l'excavation de la galerie de liaison réelle. Finalement, les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales issues du programme CLIPEX.

La table 3.3 regroupe l'ensemble des réalisations présentées dans le cadre du mémoire.

$n^{\circ}$	Modèle	Etude THM	Lois constitutives	Conditions initiales	Soutènement
1	2D-EPD	M	Elastique parfait	$K_0 = 1,0$	Non
2	2D-EPD	M	Elastique parfait	$K_0 = 0,8$	Non
3	2D-EPD	M	Elastique Orthotrope <sup>1</sup>	$K_0 = 1,0$	Non
4	2D-EPD	M	Elastique Orthotrope <sup>1</sup>	$K_0 = 0,8$	Non
5	2D-EPD	M	Elasto-plastique Mohr-Coulomb	$K_0 = 1,0$	Non
6	2D-EPD	M	Elasto-plastique Mohr-Coulomb	$K_0 = 0,8$	Non
7	2D-EPD	M	Elasto-plastique Mohr-Coulomb écroui	$K_0 = 1,0$	Non
8	2D-EPD	M	Elasto-plastique Mohr-Coulomb écroui	$K_0 = 0,8$	Non
9	2D-EPD	M	Elasto-plastique Drucker-Prager	$K_0 = 0,8$	Non
10	2D-EPD	M	Elasto-plastique Van Eekelen	$K_0 = 0,8$	Non
11	2D-EPD	M	Elasto-plastique Orthotrope	$K_0 = 0,8$	Non
12	2D-EPD	M	Elastique parfait	$K_0 = 1,0$	Oui
13	2D-EPD	M	Elasto-plastique Drucker-Prager	$K_0 = 0,8$	Oui
14	2D-EPD	M	Elasto-plastique Orthotrope	$K_0 = 0,8$	Oui
15	2D-EPD	M-H	Elastique parfait	$K_0 = 1,0$	Oui
16	2D-EPD	M-H	Elasto-plastique Drucker-Prager	$K_0 = 0,8$	Oui
17	2D-EPD	M-H	Elasto-plastique Orthotrope	$K_0 = 0,8$	Oui
18	3D-GB	M-H	Elasto-plastique Drucker-Prager	$K_0 = 1,0$	Oui
19	3D-GB	M-H	Elasto-plastique Drucker-Prager	$K_0 = 0,8$	Oui
20	3D-GB	M-H	Elasto-plastique Drucker-Prager dillatant	$K_0 = 0,8$	Oui
21	3D-GB	M-H	Elasto-plastique Orthotrope	$K_0 = 0,8$	Oui

**Table 3.3** – Liste des simulations réalisées dans le cadre du développement d'un modèle final 3-D implémentant une loi constitutive dotée du comportement anisotrope de l'argile de Boom et une anisotropie de contraintes au sein du massif argileux.

### 3.2.1 Description des modélisations

L'entièreté des recherches menées dans le cadre du mémoire se basent sur les lois constitutives et les modèles décrits ci-après.

#### 3.2.1.1 Lois constitutives envisagées

**Loi constitutive Elastique linéaire :** C'est une loi élastique applicable aux éléments solides isotropes, caractérisés par leur module élastique de Young et leur coefficient de Poisson. Nous n'étudions pas les cas élastiques non-linéaires dans le cadre de ce travail. Cette loi est référencée dans le code LAGAMINE comme *ELA LAW [ITYPE 1]*.

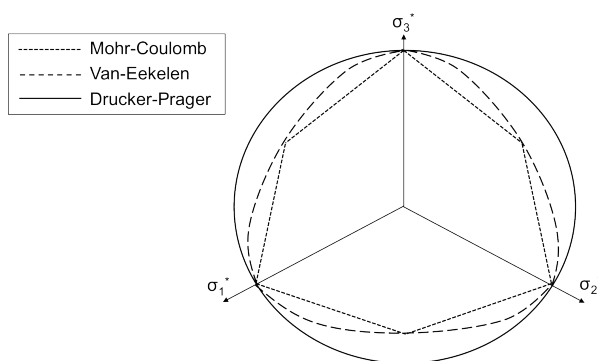
**Loi constitutive de Mohr-Coulomb :** C'est une loi élasto-plastique à frottement interne applicable aux éléments solides dotés d'un comportement élastique linéaire, ici à température constante. La loi est également paramétrable pour un adoucissement/écrouissage isotrope qui influence l'angle de friction et la cohésion. La surface de plasticité propre au modèle de Mohr-Coulomb est explicitée par l'équation (3.1) dans le plan des invariants et illustrée à la figure 3.3 dans le plan des contraintes déviatoriques.

$$f \equiv \frac{I_\sigma}{3} \sin \phi_C + II_{\hat{\sigma}} \cos \beta - \frac{III_{\hat{\sigma}}}{\sqrt{3}} \sin \beta \sin \phi_C - c \cos \phi_C = 0 \quad (3.1)$$

où,  $c$  est la cohésion,  $\phi_C$  l'angle de frottement en compression, et  $\beta$  donné par la relation (3.2).

$$\beta = -\frac{1}{3} \arcsin \left( \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{III_{\hat{\sigma}}}{II_{\hat{\sigma}}^3} \right) \quad (3.2)$$

Précisons que l'intégration est réalisée à l'aide d'un schéma d'Euler implicite arrière dans le programme LAGAMINE, où la loi y est référencée comme *EP-MOHR LAW [ITYPE 591]*.



**Figure 3.3** – Comparatif des surfaces de plasticité entre les lois constitutives de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager et Van-Eekelen.

1. Loi Orthotrope paramétrée pour approcher une loi élastique linéaire.

**Loi constitutive de Drucker-Prager :** C'est une loi élasto-plastique à frottement interne applicable aux éléments solides dotés d'un comportement élastique linéaire, ici à température constante. La surface de plasticité attachée au critère de Drucker-Prager est définie par l'équation (3.3) dans le plan des invariants et illustrée à la figure comparative 3.3 dans le plan des contraintes déviatoriques par un cercle circonscrit au critère de Mohr-Coulomb. [Barnichon, 1998] repris par [Dizier, 2011], "montre que pour des angles de frottement en compression élevés, le modèle de Drucker-Prager surestime la résistance en extension". Il convient donc d'étudier un autre critère qui distingue l'angle de frottement en conditions de compression et d'extension, le critère de Van Eekelen.

$$f \equiv II_{\hat{\sigma}} + m \left( I_{\hat{\sigma}} - \frac{3c}{\tan \phi_C} \right) = 0 \quad (3.3)$$

où,  $c$  est la cohésion,  $\phi_C$  l'angle de frottement en compression et  $m$  est fonction du critère de rupture de Drucker-Prager :

$$m = \frac{2 \sin \phi_C}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi_C)} \quad (3.4)$$

Précisons que la loi permet l'introduction d'écrouissage ou d'adoucissement isotrope, et que l'intégration est réalisée à l'aide d'un schéma d'Euler implicite arrière dans le programme LAGAMINE, où la loi y est référencée comme *EP-PLASOL LAW [ITYPE 72]*.

**Loi constitutive de Van-Eekelen :** C'est une loi élasto-plastique à frottement interne applicable aux éléments solides dotés d'un comportement élastique linéaire, ici à température constante. La surface de plasticité attachée au critère de Van-Eekelen est définie par la même équation (3.3), mais avec un coefficient de rupture défini par Van-Eekelen. Cette surface est illustrée à la figure comparative 3.3.

$$m = a (1 + b \sin 3\beta)^n \quad (3.5)$$

où,  $a$  et  $b$  sont fonctions des rayons réduits pour des chemins triaxiaux axisymétriques de compression et d'extension ( $r_C$  et  $r_E$ ) [Dizier, 2011].

$$a = \frac{r_C}{(1 + b)^n} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{\left(\frac{r_C}{r_E}\right)^{\frac{1}{n}} - 1}{\left(\frac{r_C}{r_E}\right)^{\frac{1}{n}} + 1} \quad (3.7)$$

$$r_C = \frac{2 \sin \phi_C}{\sqrt{3} (3 - \sin \phi_C)} \quad (3.8)$$

$$r_E = \frac{2 \sin \phi_E}{\sqrt{3} (3 + \sin \phi_E)} \quad (3.9)$$

Précisons que la loi permet l'introduction d'écrouissage ou d'adoucissement isotrope, et que l'intégration est réalisée à l'aide d'un schéma d'Euler implicite arrière dans le programme LAGAMINE, où la loi y est référencée comme *EP-PLASOL LAW [ITYPE 72]*.

**Loi constitutive Orthotrope :** C'est une loi élasto-plastique à frottement interne basée sur le modèle de Drucker-Prager précédemment cité. Elle est couplée à l'anisotropie des éléments solides poreux auxquels elle s'applique (écrouissage et adoucissement sont toujours permis), ici à température constante. L'anisotropie est prise en compte par la variation de propriétés géotechniques selon l'angle formé entre la contrainte principale et la normale à l'orientation stratigraphique du matériau. Le comportement est donc isotrope dans le plan stratigraphique et anisotrope dans la seule direction normale à ces strates. Cela transparait dans l'exemple de la cohésion interne exprimée dans la loi par l'équation (3.12). Celle-ci est directement présente dans l'expression de la surface de plasticité de Drucker-Prager, proposée par la relation (3.10) exprimée dans le plan des invariants p-q, traduction de la formule (3.3) [François et al., 2012].

$$f \equiv q - m \left( p' + \frac{c'}{\tan \phi'_C} \right) = 0 \quad (3.10)$$

où,  $p'$  est la contrainte moyenne,  $q$  la contrainte déviatorique,  $c'$  la cohésion caractérisées par la relation (3.12), et  $\phi'_C$  l'angle de friction en compression.

$$m = \frac{6 \sin \phi'_C}{3 - \sin \phi'_C} \quad (3.11)$$

Comme annoncé, la formule (3.10) intègre l'anisotropie du matériau, entre autre par l'intermédiaire d'une variation de sa cohésion dans l'espace selon l'orientation de la normale à cette anisotropie. On obtient ainsi trois valeurs de cohésion, une pour la contrainte principale parallèle à la normale aux strates ( $\alpha_{\sigma_1} = 0^\circ$ ), une pour la contrainte principale perpendiculaire à la normale ( $\alpha_{\sigma_1} = 90^\circ$ ), et une dernière lorsque la contrainte principale forme un angle de  $45^\circ$  ( $\alpha_{\sigma_1} = 45^\circ$ ) avec la normale de l'anisotropie du matériau. La cohésion varie linéairement entre ces valeurs tel qu'illustré à la figure 3.4.

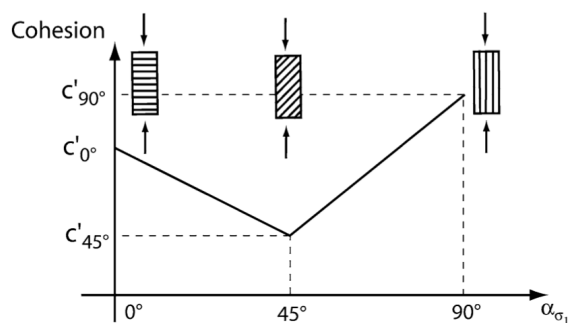
$$c'_{i \text{ ou } f} = \max \left[ \left( \frac{c'_{i \text{ ou } f (45^\circ)} - c'_{i \text{ ou } f (0^\circ)}}{45^\circ} \right) \alpha_{\sigma_1} + c'_{i \text{ ou } f (0^\circ)} ; \left( \frac{c'_{i \text{ ou } f (90^\circ)} - c'_{i \text{ ou } f (45^\circ)}}{45^\circ} \right) (\alpha_{\sigma_1} - 45^\circ) + c'_{i \text{ ou } f (45^\circ)} \right] \quad (3.12)$$

où les indices  $i$  et  $f$  correspondent respectivement aux cohésions initiales et finales, caractéristiques de la cohésion en cours d'écrouissage.  $\alpha_{\sigma_1}$  définie par l'équation (3.13), est l'angle formé entre la normale aux strates et la contrainte principale  $\vec{\sigma}_1$ .

$$\alpha_{\sigma_1} = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{n} \cdot \vec{\sigma}'_1}{\|\vec{n}\| \|\vec{\sigma}'_1\|} \right) \quad (3.13)$$

Cette loi est référencée dans le code LAGAMINE comme *ORTHOPLA3D LAW [ITYPE 608]*.

**Loi constitutive d'écoulement :** C'est une loi d'écoulement en milieu poreux pour éléments solides. Elle intègre divers paramètres tels que la porosité du milieu, la perméabilité intrinsèque du matériau dont une éventuelle anisotropie négligée dans le cadre du mémoire, la saturation et les propriétés du fluide (ceci est une liste non-exhaustive). La loi est référencée dans le programme LAGAMINE comme *ECOUS-S LAW [ITYPE 125]*.



**Figure 3.4** – Evolution de la cohésion selon  $\alpha_{\sigma_1}$  dans la loi Orthotrope [François et al., 2012].

### 3.2.1.2 Géométries

L'étude préliminaire se base sur deux modèles bi-dimensionnels simples (A & B) en état plan de déformation, avec ou sans soutènement. La phase d'étude tridimensionnelle est réalisée quant à elle à l'aide d'une géométrie C dite de "galerie borgne".

Le modèle A propose la géométrie illustrée à la figure 3.5 (a). Nous y appliquons le maillage de 11 671 nœuds représenté à la figure 3.5 (b). Celui-ci se veut suffisamment affiné, notamment au niveau des parois de l'ouvrage, pour permettre une comparaison de qualité face aux développements analytiques à venir.

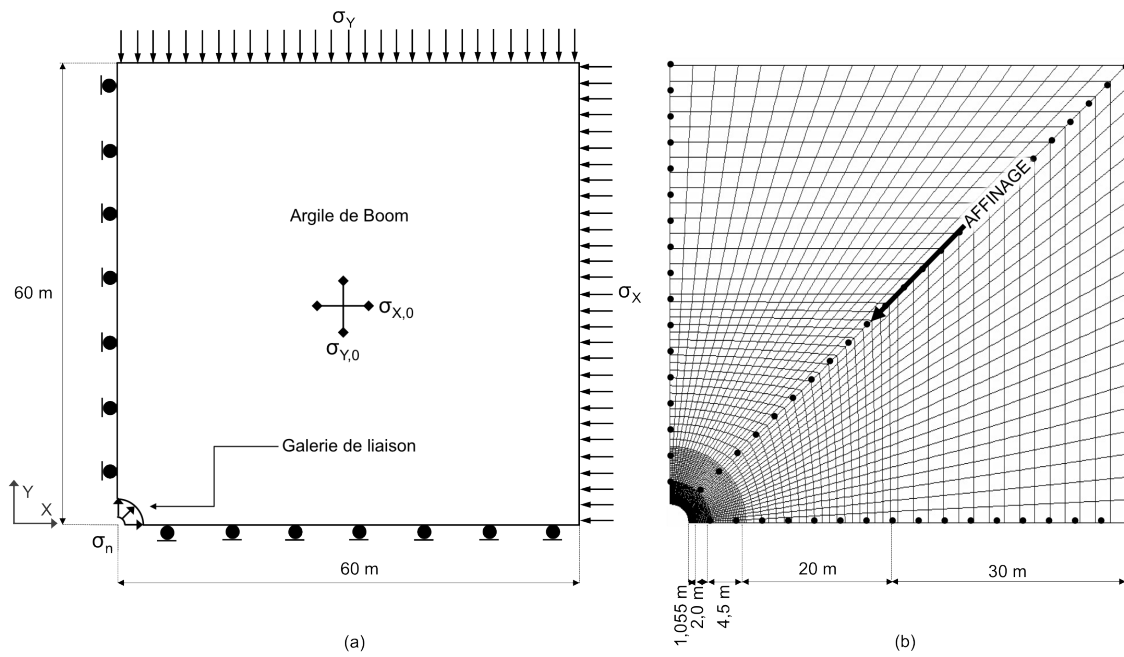
Le modèle A profite de la symétrie de la galerie circulaire en permettant de ne représenter qu'un quart à l'aide des conditions d'appuis ad hoc (appuis à rouleaux). Ceci réduit le nombre d'équations et conduit à un gain de temps de calcul. Nous limitons les effets de bords sur les calculs en créant un domaine de 60 m de côté, dans l'esprit des simulations réalisées par G3S. La galerie présente quant-à-elle, un rayon de 2,445 m conformément à la description des dimensions excavées et sur-excavées de la figure 1.11.

Les conditions limites, précisées individuellement au long des développements, sont exprimées par l'intermédiaire de forces linéiques appliquées sur le pourtour du domaine ( $\sigma_X$  et  $\sigma_Y$ ). L'excavation est simulée par la réduction constante en fonction du temps, d'une telle force appliquée normalement à l'intrados de la galerie ( $\sigma_n$ ). L'état initial du massif dépendra du choix d'étude mécanique ou hydro-mécanique ( $\sigma_{X,0}$  et  $\sigma_{Y,0}$ ).

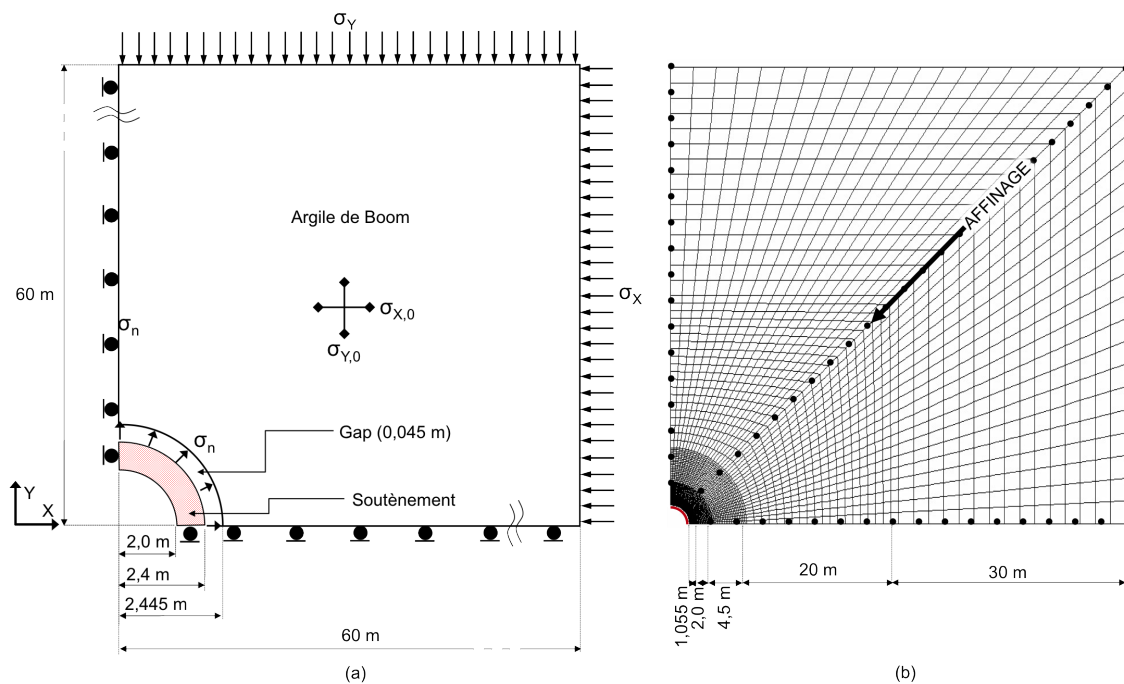
Le modèle B ajoute sur base de la géométrie A, un soutènement formant un "gap" initial de 4,5 cm avec le massif argileux. Ceci est toujours en accord avec la figure 1.11, et nous permet de mesurer la convergence du massif. La géométrie est illustrée à la figure 3.6 (a). Le maillage de 12 972 nœuds est présenté à la figure 3.6 (b).

Notons la présence de trois coupes mises en évidence sur les figures 3.5 (b) et 3.6 (b), destinées à l'étude comparative (verticale, horizontale et oblique - en pointillés).

Ces modèles 2-D ont pour but de nous fournir un aperçu du comportement physique du massif lors de l'excavation d'une galerie et d'estimer l'influence du choix des lois constitutives sur ce comportement. Sur base de ces observations, un modèle 3D plus proche de la réalité est ensuite proposé. Le choix se porte sur une galerie dite "borgne" illustrée à la figure 3.7.



**Figure 3.5** – Modèle bi-dimensionnel A - (a) Géométrie, appuis et conditions limites; (b) Maillage et coupes étudiées.



**Figure 3.6** – Modèle bi-dimensionnel B - (a) Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle); (b) Maillage et coupes étudiées.

La création de cette géométrie est obtenue par l'extrusion sur 35 m d'une section droite précisée à la figure 3.8, directement inspirée du modèle B. Nous complétons ce volume par l'ajout de 15 m de massif ne présentant pas de galerie ni de soutènement, tel qu'illustré à la figure 3.9. Cet artifice est lié à la stratégie choisie pour simuler l'excavation du massif

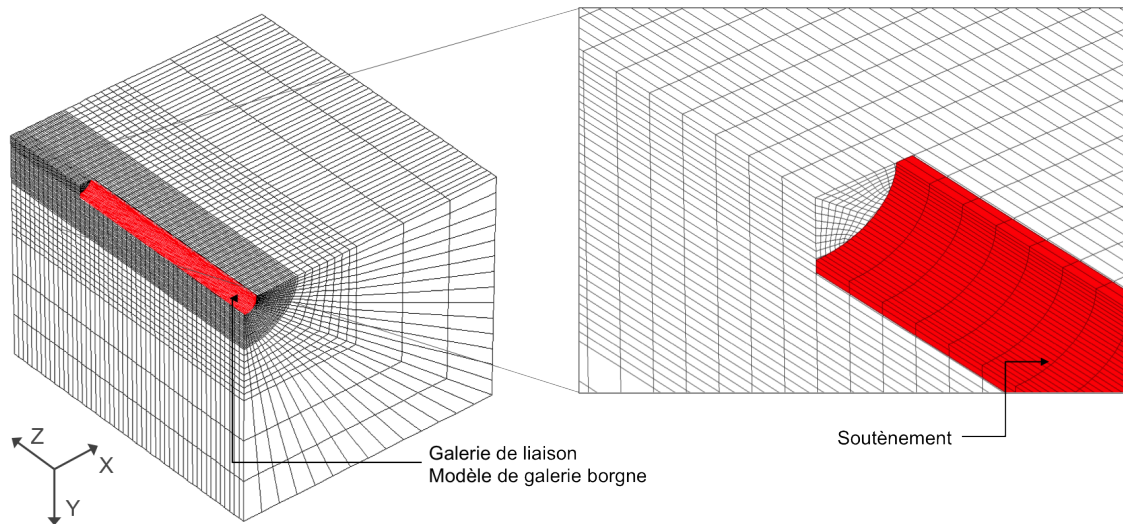


Figure 3.7 – Modèle tri-dimensionnel C - Maillage complet de la galerie borgne.

et vise à approcher au mieux le comportement réel du massif lors de ce creusement.

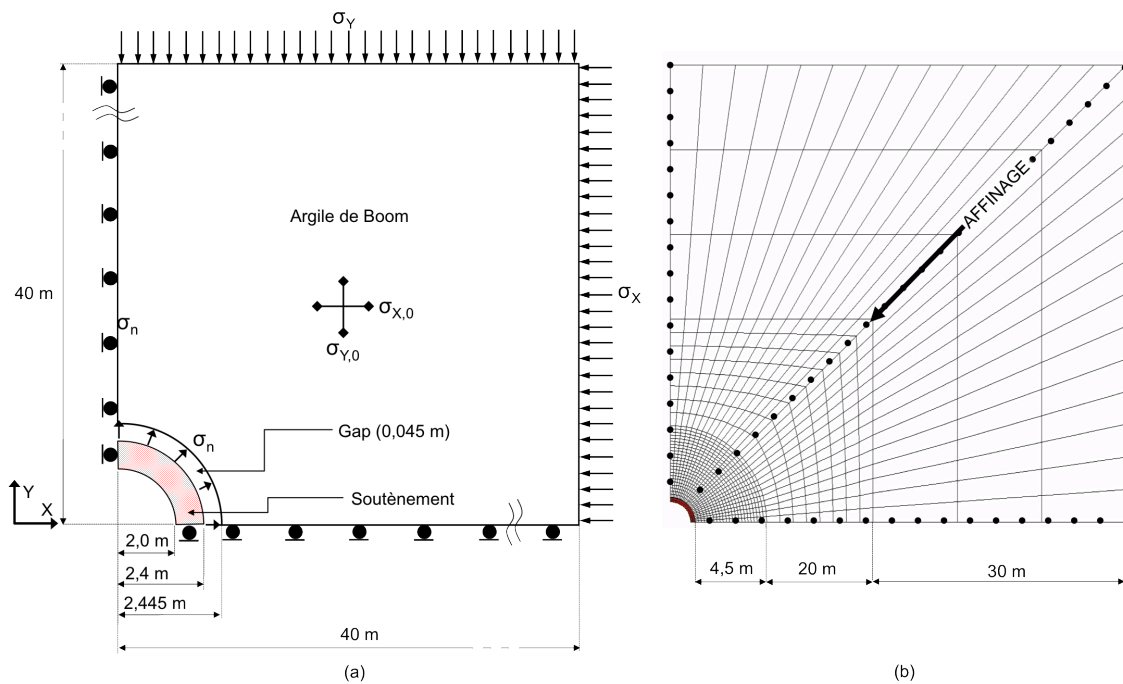
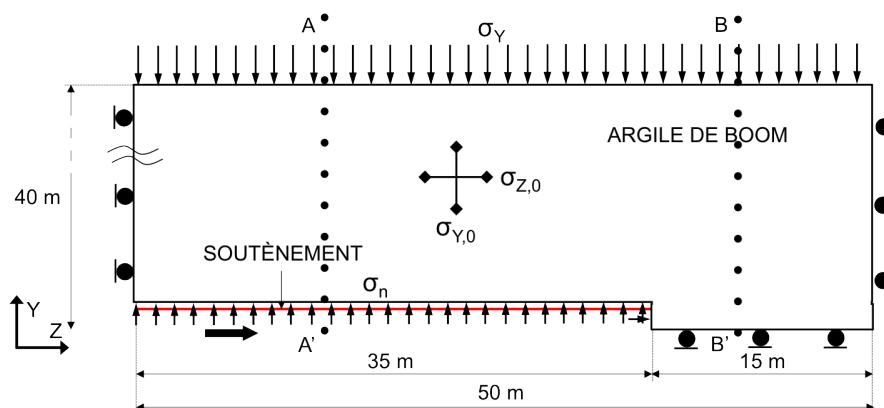


Figure 3.8 – Modèle tri-dimensionnel C - Coupe XY- (a) Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle); (b) Maillage et coupes étudiées.

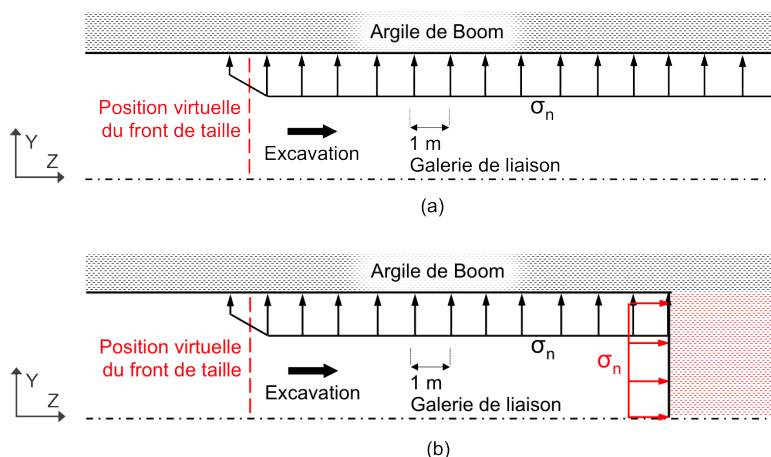
En effet, l'excavation est simulée par la réduction progressive d'une force surfacique appliquée à l'intrados de la galerie et non par la suppression d'éléments finis au sein du modèle. Dès lors, le comportement au front de taille ne peut être évalué correctement puisque numériquement il n'y a pas d'élément, comme le montre la figure 3.10 (a). Pour permettre une étude dans l'axe de la galerie, et donc simuler l'extrusion du front de taille et l'influence de sa présence sur le comportement global de la roche hôte, il convient de doter



**Figure 3.9** – Modèle tri-dimensionnel C - Coupe YZ- Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle).

la géométrie tri-dimensionnelle d'éléments complémentaires tels que représentés à la figure 3.10 (b), ce qui forme la galerie borgne. La roche, initialement présente à la place de la galerie, est simulée par l'application d'une force surfacique normale au fond du tunnel. Elle est réduite de manière progressive lorsque le front de taille virtuel atteint le dernier mètre, ce qui correspond à simuler complètement l'excavation dans cette dernière portion. In fine, il suffit de sélectionner la portion pertinente du domaine selon l'analyse menée.

Les dimensions du domaine sont également inspirées des modèles A & B, toutefois les modélisations 2-D montrent que les 60 m de côté ne sont pas strictement nécessaire, cette dimension est ramenée à 45 m dans le modèle 3-D afin de réduire le temps de calcul. La longueur a quant à elle été déterminée pour intégrer un maximum de capteurs du programme CLIPEX énoncés à la section 1.5.3.2, figure 1.13 et localisés en annexe à la représentation 5.3, tout en limitant les effets de bord. La densité de maillage est également fonction de la position des capteurs, il convenait de réduire au maximum celui-ci pour limiter le temps de calcul. Le modèle C, illustré à la figure 3.7, est doté de 65 331 nœuds et considère un maillage longitudinal homogène de tranches d'épaisseurs égales à 1 m.



**Figure 3.10** – Justificatif de l'emploi d'une galerie borgne. (a) Galerie sans fond, (b) avec fond et force surfacique simulant la présence virtuelle de roche.

Le modèle C présente donc certaines limites, notamment le fait qu'il ne tienne pas compte de la présence physique du front de taille en cours d'avancement. Ceci permet de négliger l'espacement initial entre le soutènement et le front de taille comme indiqué à la figure 1.11.

Précisons que la vitesse d'excavation considérée est de 2 m/j comme annoncée lors de la description de la construction de la galerie à la section 1.5.3.2.

### 3.2.2 Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie sans soutènement

#### 3.2.2.1 Simulation 1 - Modèle élastique linéaire à contraintes isotropes

Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.4. Les hypothèses de la simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 1$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive élastique linéaire ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Paramètres du modèle			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques			
Module de Young	$E$	300	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$	0,125	[-]
Masse volumique	$\rho$	2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.4** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 1 - Elastique linéaire à contraintes isotropes.

**Résultats** La figure 3.11 illustre la répartition des contraintes et des déplacements au terme de la phase d'excavation. Pour une exploitation plus pratique des résultats, il est proposé d'analyser l'évolution des contraintes et des déplacements selon les trois coupes de référence précisées à la figure 3.5. Ce mode de représentation est suivi tout au long de l'étude. Les illustrations 3.12 et 3.13 proposent respectivement l'évolution des contraintes radiales et orthoradiales, ainsi que l'évolution des déplacements au sein du massif argileux modélisé.

Les figures 3.14 (a)(b)(c) apportent certaines précisions à l'égard de l'évolution des contraintes en comparaison de l'approche analytique établie sur base du modèle de convergence - confinement détaillé en annexe 5.3.2. Ce dernier y est re-développé afin d'introduire les conditions aux limites propres aux modélisations numériques du mémoire. La figure 3.14 (d) exprime l'évolution des contraintes dans le plan des invariants p-q définis par les relations (3.14) et (3.15). Les contraintes normales sont déterminées sur base des relations de mécanique des matériaux rappelées par les équations (3.16) et (3.17) [Massonet et Cescotto,

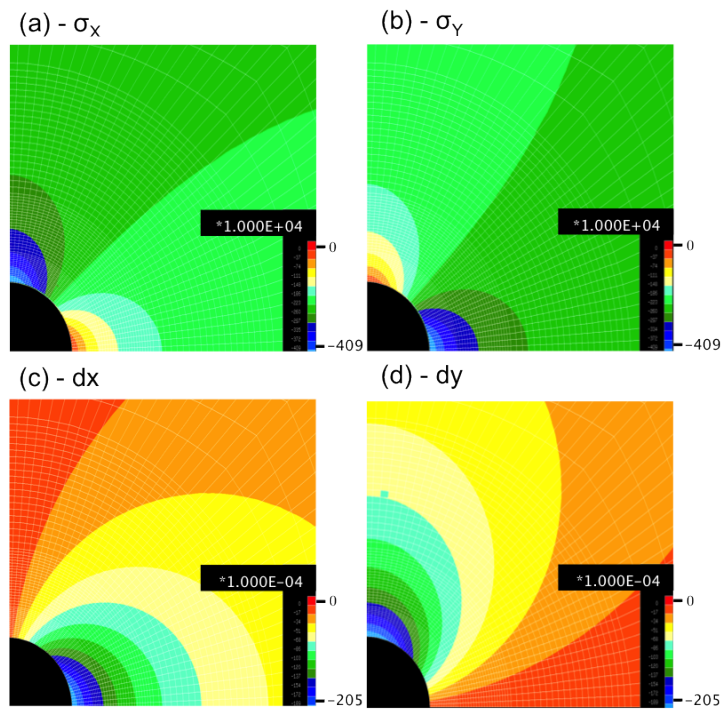


Figure 3.11 – Résultats de la simulation 1 - Zoom au niveau de la galerie - (a)  $\sigma_X$ , (b)  $\sigma_Y$ , (c)  $d_X$ , (d)  $d_Y$ .

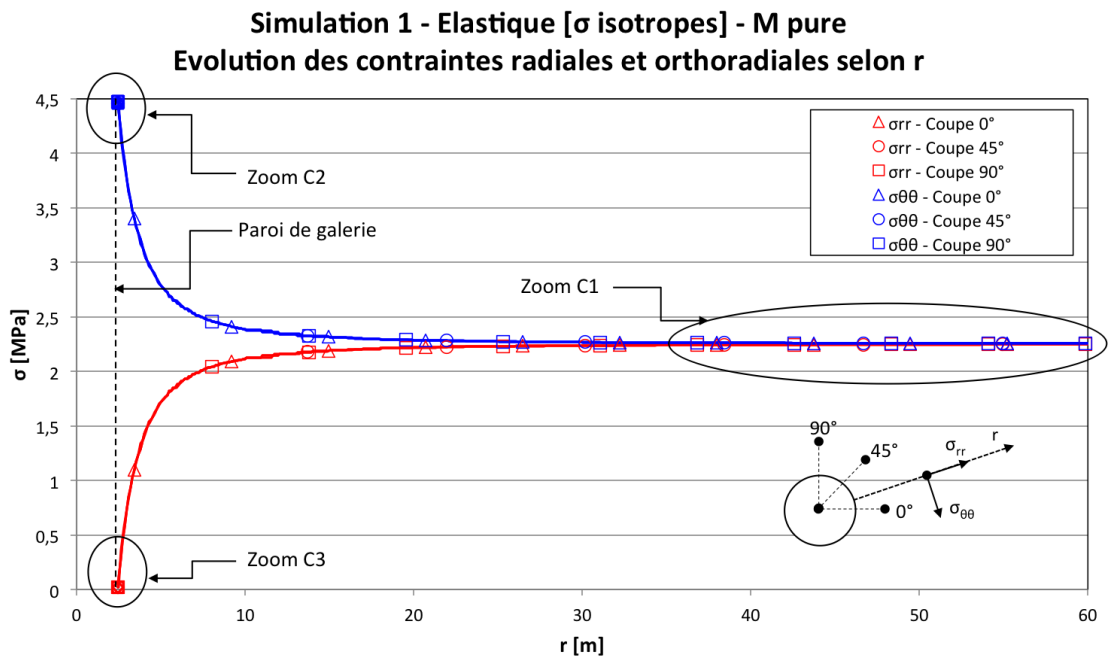
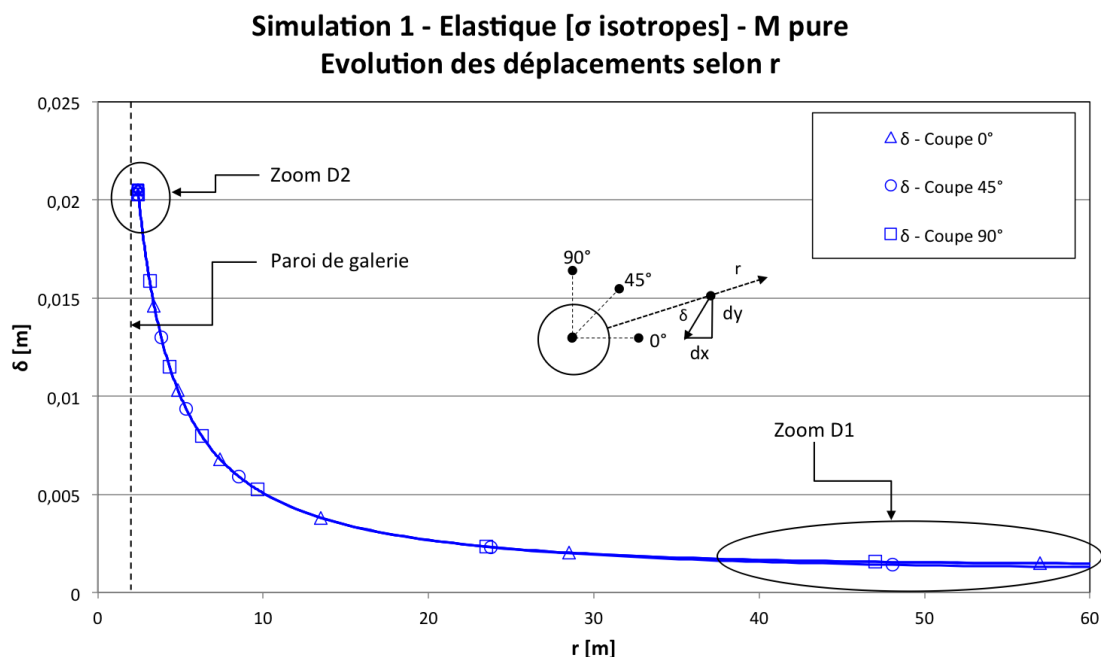


Figure 3.12 – Résultats de la simulation 1 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

2001].



$$\text{Contrainte moyenne} \equiv p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (3.14)$$

$$\text{Contrainte déviatorique} \equiv q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.15)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.16)$$

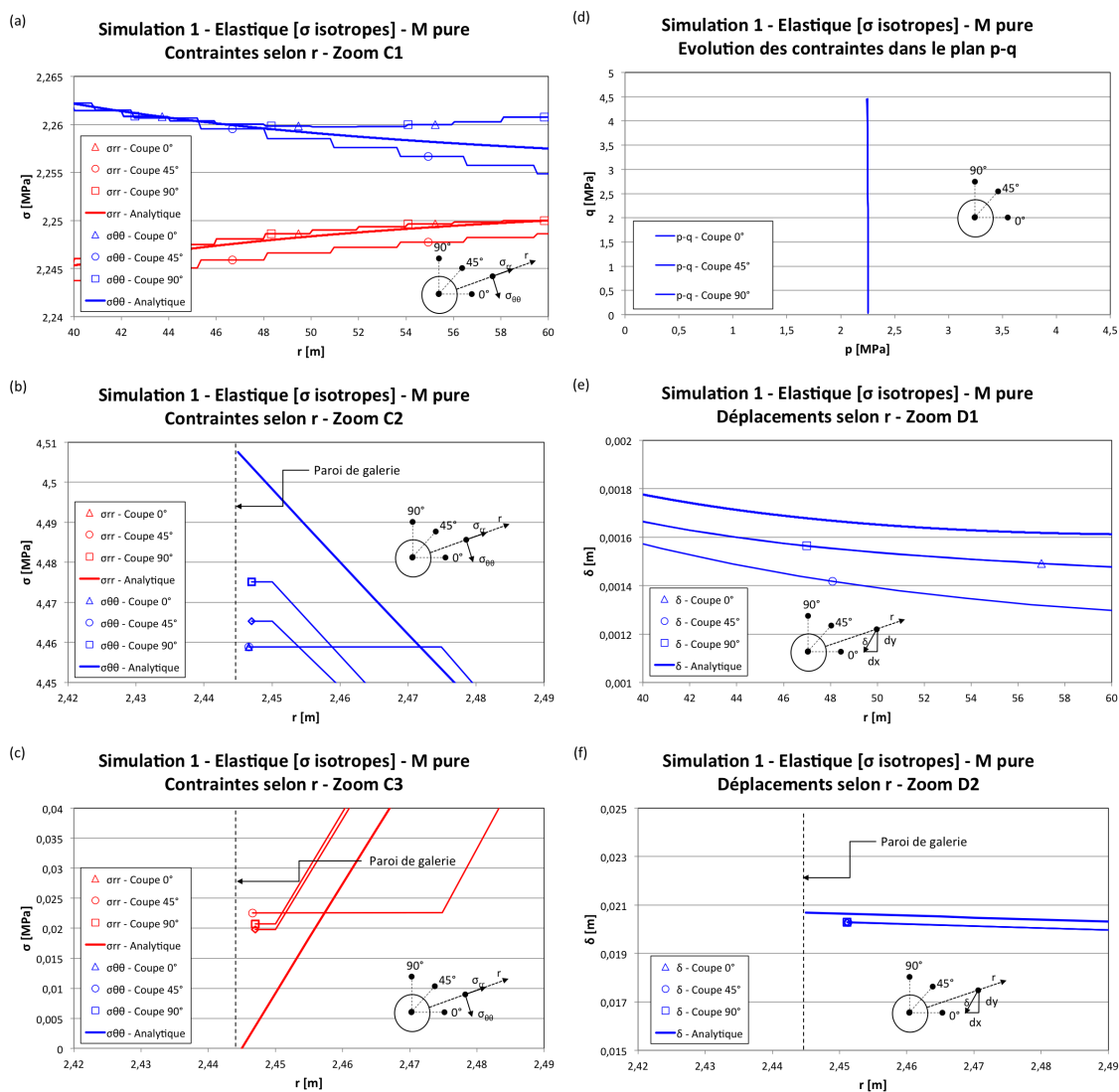
$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.17)$$

Les figures 3.14 (e)(f) définissent l'évolution des déplacements en paroi de galerie et aux frontières du domaine. Une comparaison à l'approche analytique de convergence - confinement (cf. annexe 5.3.2) est également jointe à ce graphique.

**Analyse des résultats** La figure 3.12 montre, pour les trois coupes, une évolution de contraintes semblable à celles observées par la méthode analytique modifiée<sup>1</sup> présentée en annexe 5.3.2 par la représentation 5.9. Pour un déconfinement total, la contrainte radiale ( $\sigma_{rr}$ ) s'annule en paroi de galerie et tend vers la contrainte initiale en bordure extérieure du domaine (côté opposé à la galerie).

La contrainte orthoradiale ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) est bien égale à deux fois la contrainte initiale en paroi et tend vers la contrainte initiale en bordure de domaine. Ces constatations sont étudiées

1. Modifiée pour intégrer les dimensions du domaine étudié, et ainsi se rapprocher au mieux de l'étude numérique.



**Figure 3.14** – Résultats de la simulation 1 - (a) Contraintes Zoom C1 en bordure de domaine, (b) Contraintes Zoom C2 en parois de galerie, (c) Contraintes Zoom C3 en parois de galerie, (d) Contraintes dans le plan p-q, (e) Déplacements Zoom D1 en bordure de domaine, (f) Déplacements Zoom D2 en paroi de galerie.

analytiquement en annexe 5.3.2 et synthétisées à la table 5.1. Elles sont en outre caractéristiques d'une étude élastique isotrope dans un champs de contraintes isotropes, d'où l'égalité entre les trois coupes, ce qui est également le cas de la représentation p-q des contraintes. En effet, la figure 3.14 (d) indique une évolution verticale dans le plan p-q, ce qui est typique de cette situation.

Si toutefois on procède à un "zoom" sur le graphique 3.12, on observe sur la figure 3.14(a) que les contraintes radiales tendent bien vers  $\sigma_0$ , en notant que la coupe oblique présente une longueur de 84,85 m, et n'atteindra la contrainte initiale qu'à cette distance. La contrainte orthoradiale montre également une surévaluation de  $\sigma_0$  suite à la taille du domaine, comme explicité en annexe 5.3.2. Elle est toutefois supérieure d'environ 0,003 MPa à la valeur analytique. Cette différence s'observe également en paroi de galerie tant du point de vue des contraintes radiales qu'orthoradiales. L'approche numérique induit

inévitavelmente des erreurs liées à la taille du maillage et à la précision demandée.

Du point de vue des déplacements, on constate une assez bonne correspondance entre les approches numérique et analytique, à la précision près (0,3 mm). Le déplacement maximal calculé numériquement est de 2,05 cm en paroi de galerie.

**Conclusion** Cette première simulation voulue basique sert de référence à l'ensemble des modélisations suivantes. On constate que les résultats numériques correspondent aux analytiques, à la précision près. Nous observons la similarité entre les trois coupes directement liée à l'état de contrainte isotrope et au comportement élastique isotrope du matériau. Les déplacements de 2,05 cm sont éloignés des résultats obtenus par les calculs prédictifs du programme CLIPEX énoncés à la section 3.1.1.3, qui pouvaient atteindre jusque 10 cm. Rappelons toutefois que la présente simulation est réalisée en élastique parfait, alors que les prédictions du programme CLIPEX étaient réalisées à l'aide d'une approche Cam-Clay Modifié ou Mohr-Coulomb.

### 3.2.2.2 Simulation 2 - Modèle élastique linéaire à contraintes anisotropes

Cette simulation étudie l'influence de l'anisotropie des contraintes. Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.5. Les hypothèses de la simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive élastique linéaire ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Paramètres du modèle			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques			
Module de Young	$E$	300	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$	0,125	[-]
Masse volumique	$\rho$	2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.5** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 2 - Elastique linéaire à contraintes anisotropes.

**Résultats** Les représentations 3.15 et 3.16 proposent respectivement l'évolution des contraintes radiales et orthoradiales, et l'évolution des déplacements au sein du massif argileux modélisé.

Les figures 3.17 (a)(b)(c) apportent certaines précisions vis-à-vis de l'évolution des contraintes en comparaison de l'approche analytique établie sur base du modèle de convergence - confinement détaillé en annexe 5.3.3. Ce dernier y est re-développé en complément de la version

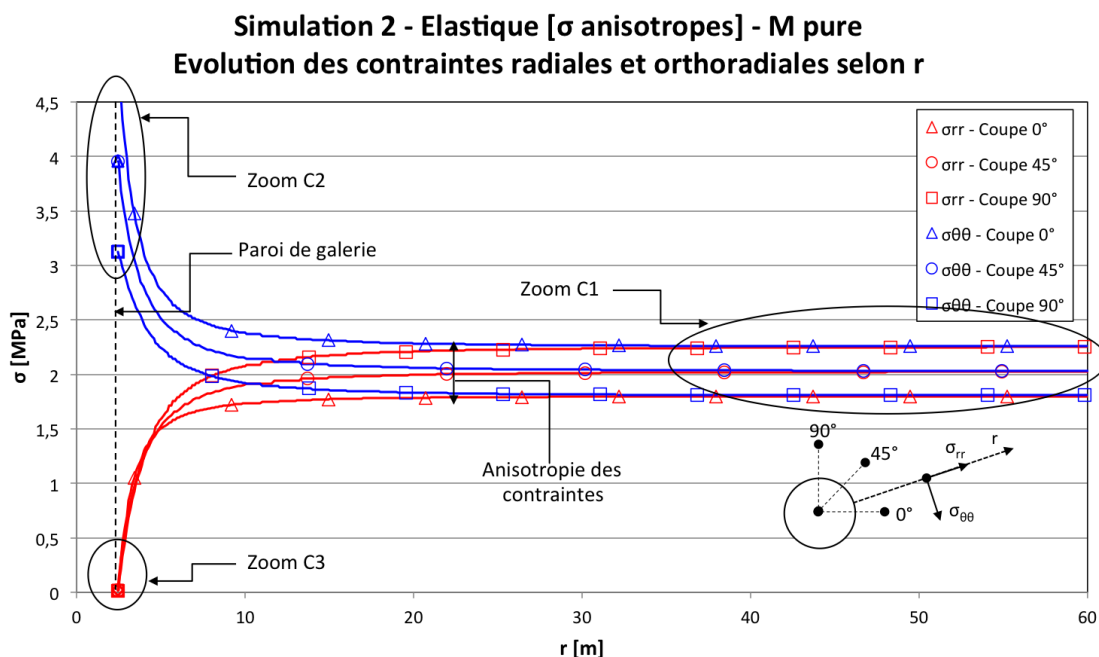


Figure 3.15 – Résultats de la simulation 2 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

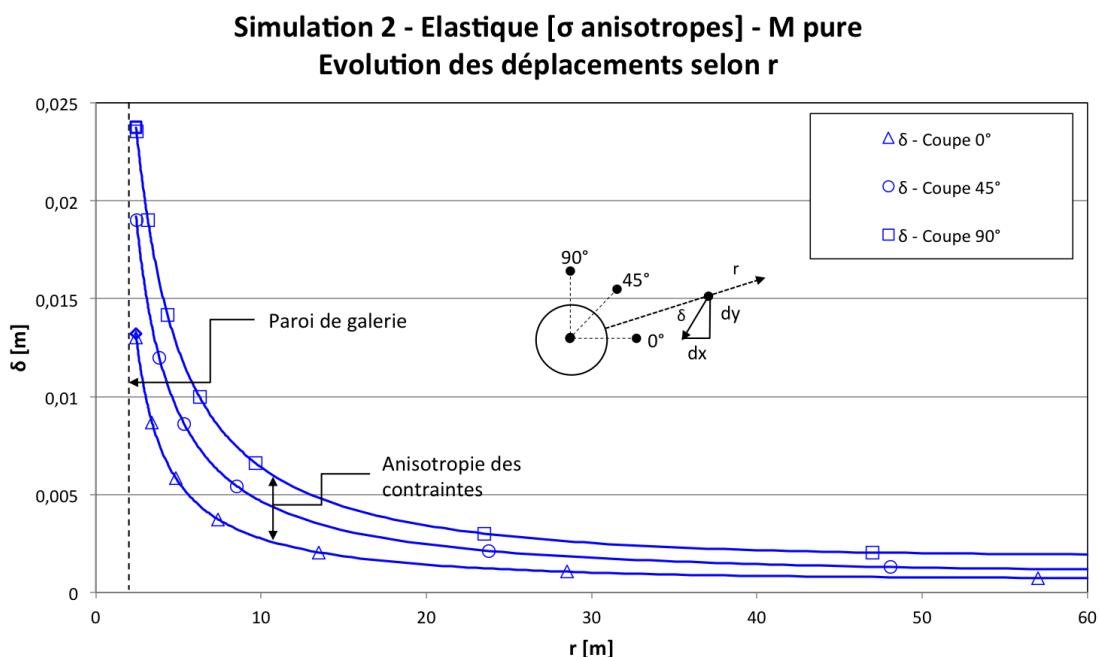
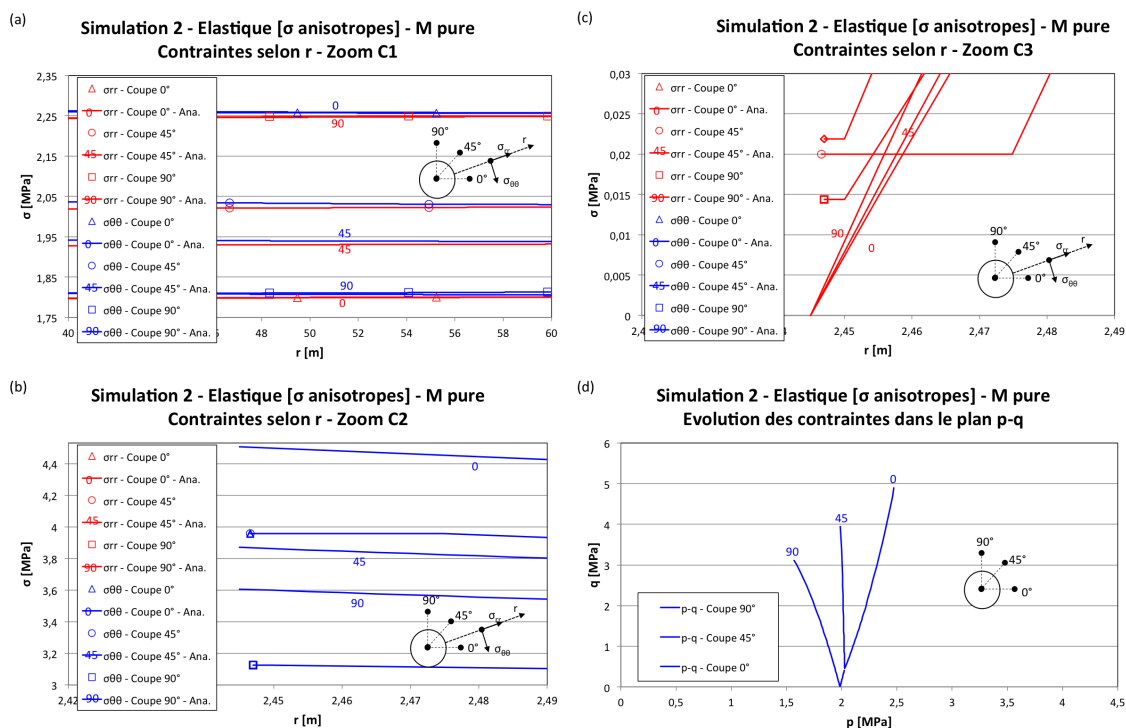


Figure 3.16 – Résultats de la simulation 2 - Evolution des déplacements selon  $r$ .

isotrope donnée en annexe 5.3.2, afin d'introduire les conditions aux limites propres aux modélisations numériques du mémoire et de comprendre la physique du phénomène. La figure 3.17 (d) exprime l'évolution des contraintes dans le plan des invariants p-q définis par les relations (3.14) et (3.15).



**Figure 3.17** – Résultats de la simulation 2 - (a) Contraintes Zoom C1 en bordure de domaine, (b) Contraintes Zoom C2 en parois de galerie, (c) Contraintes Zoom C3 en parois de galerie, (d) Contraintes dans le plan p-q.

**Analyse des résultats** La figure 3.15 montre, pour les trois coupes, une évolution de contraintes semblable à celle observée par la méthode analytique modifiée<sup>2</sup> présentée en annexe 5.3.3 par la représentation 5.12. Pour un déconfinement total, la contrainte radiale ( $\sigma_{rr}$ ) s’annule en paroi de galerie et tend vers la contrainte initiale multipliée de son coefficient d’anisotropie (fonction de l’angle de la coupe) en bordure extérieure du domaine.

La contrainte orthoradiale ( $\sigma_{\theta\theta}$ ) est proche de deux fois la contrainte initiale multipliée du coefficient  $K_0$  en paroi, et tend vers la contrainte initiale également multipliée par  $K_0$  en bordure de domaine. Ces constatations sont étudiées analytiquement en annexe 5.3.3 et synthétisées à la table 5.2. Elles sont en outre caractéristiques d’une étude élastique isotrope dans un champs de contraintes anisotropes, d’où la divergence entre les différents chemins de contraintes indiquée sur la figure 3.15.

Néanmoins, les figures 3.17 (a) et (b) montrent de sérieuses différences entre les approches numérique et analytique, principalement pour la coupe à 45° lorsqu’elle tend vers la limite extérieure du domaine. [Collin et al., 2010] explique ces difficultés en rappelant que les modèles classiques d’éléments finis souffrent de problèmes liés à la dépendance du maillage, mais qu’il est possible d’aller outre en utilisant des fonctions d’interpolation plus riches.

L’expression des contraintes dans le plan p-q met en évidence l’anisotropie des contraintes. La coupe oblique étant quasi verticale, puisque  $\sigma_{rr}$  et  $\sigma_{\theta\theta}$  par définition tendent théoriquement vers  $\beta(45^\circ)\sigma_0$  (cf. annexe 5.3.3).

2. Modifiée pour intégrer les dimensions du domaine étudié, et ainsi se rapprocher au mieux de l’étude numérique.

La représentation différenciée des déplacements selon les coupes à la figure 3.16 montre un déplacement supérieur pour la coupe verticale contrairement à la coupe horizontale. Ceci s'explique par le fait que la contrainte radiale est supérieure dans cette direction, ce qui engendre des déformations et donc des déplacements plus importants dans cette même direction. Le déplacement maximal calculé numériquement est de 2,30 cm en paroi de galerie, soit 0,25 cm de plus qu'en élastique doté de contraintes isotropes.

**Conclusion** Les résultats numériques répondent aux tendances fixées par l'étude analytique développée en annexe 5.3.3, à la précision près et aux simplifications numériques et analytiques près. L'introduction de l'anisotropie des contraintes se manifeste essentiellement par la divergence des chemins de contraintes au sein du massif, tel qu'indiqué à la figure 3.15.

Physiquement, plus on s'éloigne de la galerie, moins le massif en ressent l'influence, d'où une évolution de contraintes qui tend vers la situation initiale du milieu, anisotropie incluse. Inversement, l'influence est maximale en paroi puisque le milieu est déséquilibré par l'enlèvement de matière. L'absence de matériau supprime les pressions exercées normalement à la paroi, d'où une contrainte radiale nulle dans le sol. L'équilibre est toutefois rétabli par une redistribution des contraintes de manière circonférentielle, d'où l'augmentation des contraintes orthoradiales.

### 3.2.2.3 Simulations 3 & 4 - Modèles élastiques orthotropes à contraintes isotropes & anisotropes

L'objectif de cette simulation est de qualifier l'influence de l'anisotropie interne du matériau sur la réponse du massif, les paramètres géotechniques anisotropes font référence à [François et al., 2012] et sont regroupés avec les paramètres du modèle à la table 3.6. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Simulation 3 : Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 1$ ) ;
- Simulation 4 : Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive orthotrope dotée d'écrouissage de l'angle de frottement et paramétrée comme élastique linéaire (angle de friction infini) ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

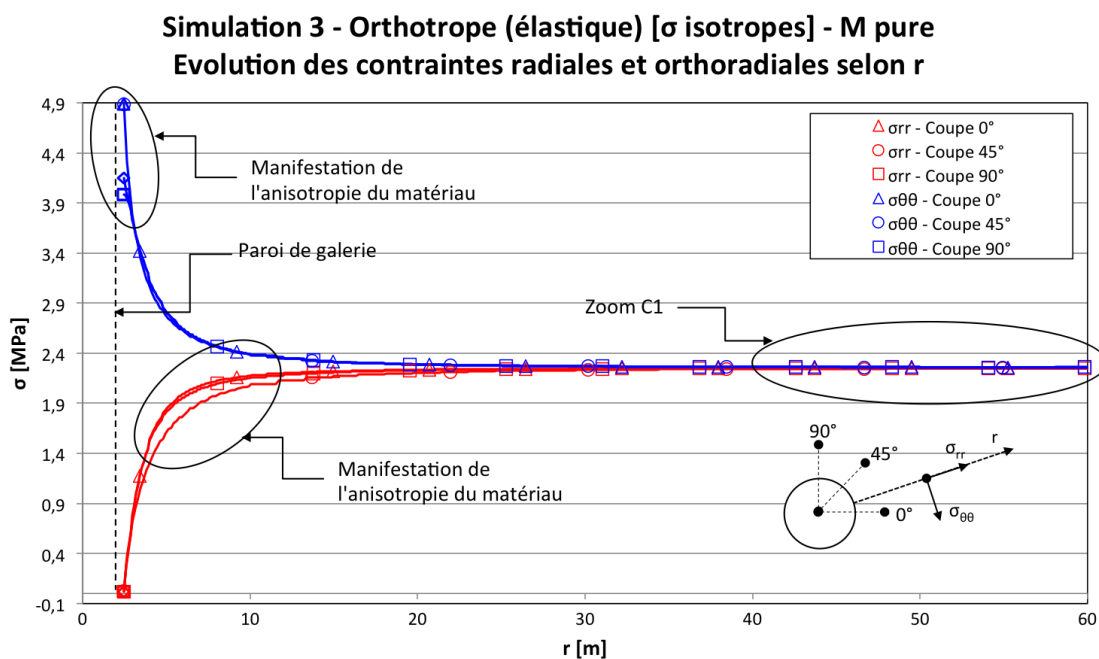
**Résultats** Les représentations 3.18 et 3.19 représentent l'évolution des contraintes, respectivement dans le cas de contraintes isotropes et anisotropes. Les illustrations 3.20 et 3.21 se concentrent sur les déplacements au sein du massif pour ces deux cas. Notons que les graphiques sont séparés afin de ne pas surcharger les représentations et de permettre une meilleure clarté.

Les figures 3.22 (a) et (b), traduisent l'évolution des contraintes dans le plan des invariants p-q.

**Analyse des résultats** La particularité de ces deux tests est donc le caractère anisotrope du matériau exprimé par les différentes valeurs du module de Young de la table 3.6.

Paramètres des modèles				
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	2,25	1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques				
Module de Young $\parallel$	$E_{\parallel}$		400	[MPa]
Module de Young $\perp$	$E_{\perp}$		200	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu_{\parallel}$		0,125	[-]
Coefficient de Poisson	$\nu_{\parallel\perp}$		0,0625	[-]
Module de cisaillement	$G_{\parallel\perp}$		178	[MPa]
Cohésion initiale ( $0^\circ$ )	$c'_{i,0^\circ}$		$\infty$	[kPa]
Cohésion initiale ( $45^\circ$ )	$c'_{i,45^\circ}$		$\infty$	[kPa]
Cohésion initiale ( $90^\circ$ )	$c'_{i,90^\circ}$		$\infty$	[kPa]
Angle de friction initial	$\phi'_i$		5	[°]
Angle de friction final	$\phi'_f$		18	[°]
Paramètre d'érouissage	$B_p$		0,01	[-]
Masse volumique	$\rho$		2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.6** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 3 & 4 - Orthotrope modifié élastique à contraintes isotropes & anisotropes [François et al., 2012].



**Figure 3.18** – Résultats de la simulation 3 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon r.

Celles-ci sont intégrées dans la loi orthotrope explicitée à la section 3.2.1.1. Notons que la stratification est considérée horizontale pour se rapprocher au mieux de la réalité. Le matériau est donc "plus raide" horizontalement que verticalement sur les modèles étudiés.

L'évolution des contraintes des figures 3.18 et 3.19, respecte les analyses effectuées aux

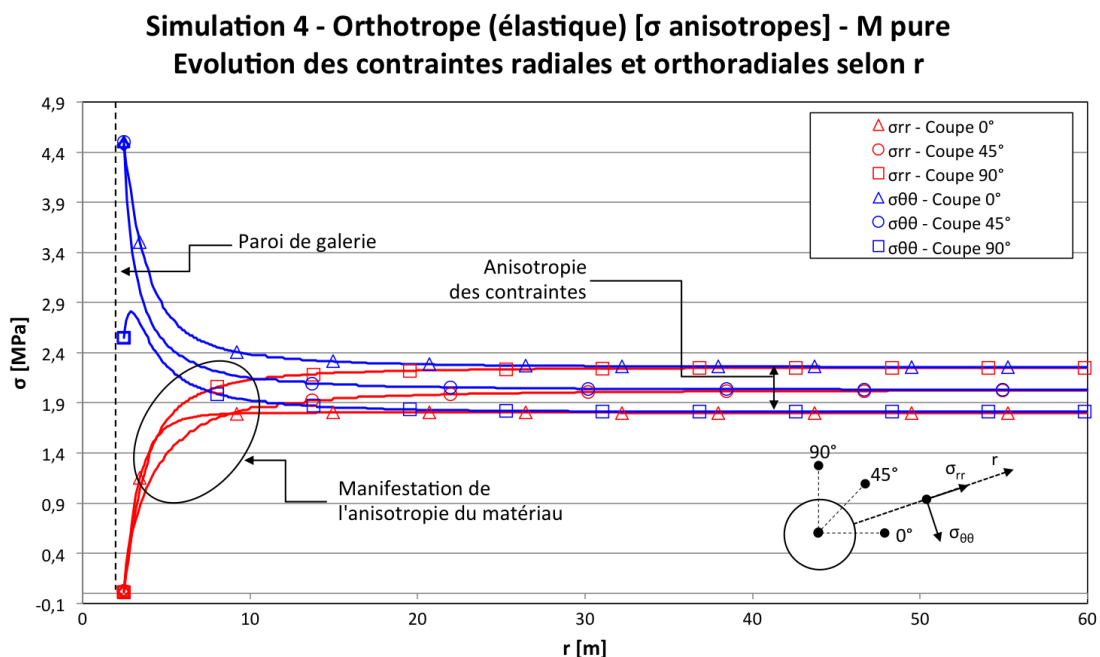


Figure 3.19 – Résultats de la simulation 4 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

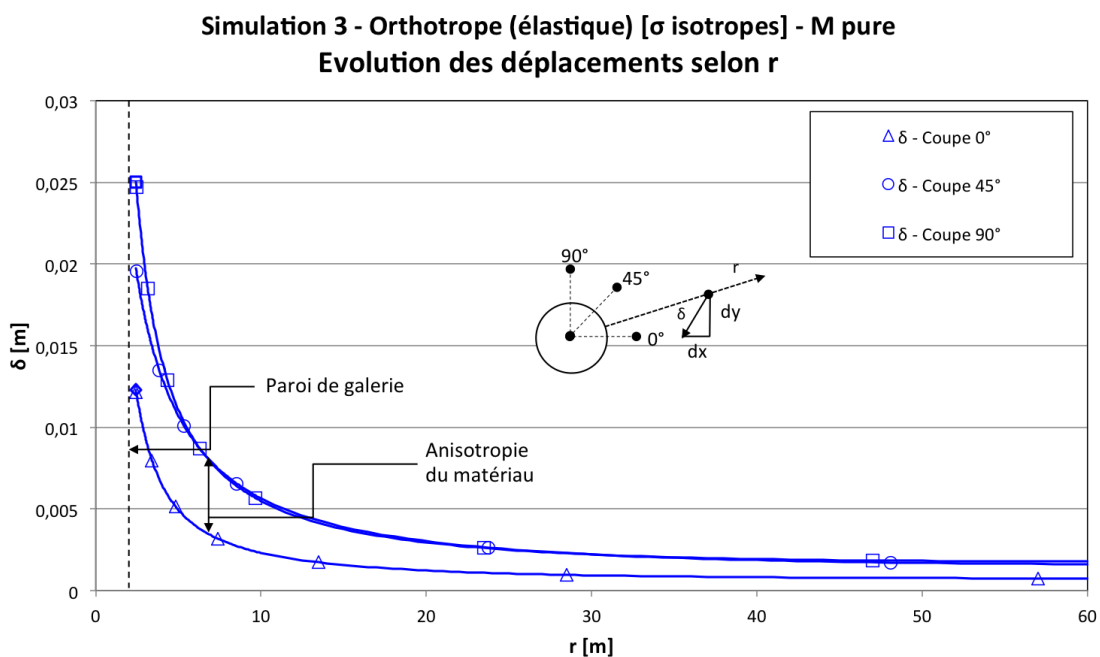
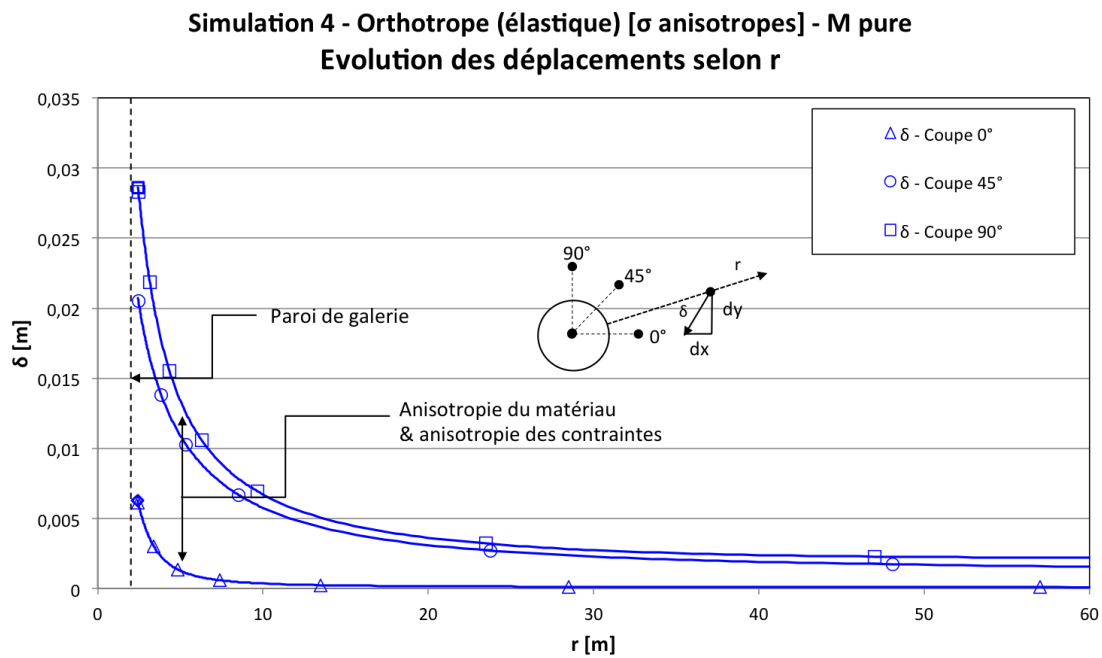


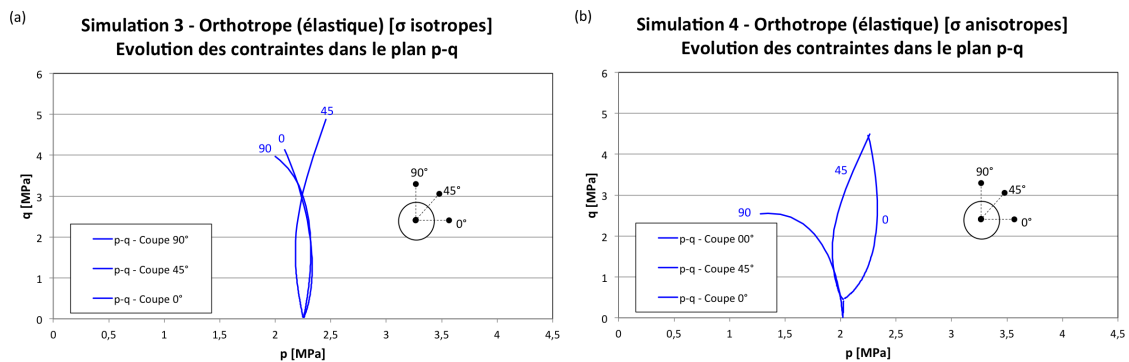
Figure 3.20 – Résultats de la simulation 3 - Evolution des déplacements selon  $r$ .

simulations 1 et 2. L'introduction d'anisotropie de contraintes se manifeste bien par la divergence des chemins de contraintes au sein du massif. Les valeurs limites sont également cohérentes avec la physique établie à la section 3.2.2.2.

L'anisotropie du matériau influence néanmoins le sol comme indiqué aux figures 3.18



**Figure 3.21** – Résultats de la simulation 4 - Evolution des déplacements selon  $r$ .



**Figure 3.22** – Résultats des simulations 3 & 4 - (a) Contraintes dans le plan  $p$ - $q$  de la simulation 3, (b) Contraintes dans le plan  $p$ - $q$  de la simulation 4.

et 3.19. Nous constatons sur les dix premiers mètres certaines différences en termes de contraintes entre les simulations 1, 2 (matériaux isotropes) et les modélisations 3 et 4 (matériaux anisotropes). Ces différences sont surtout mises en évidence par la représentation des déplacements (3.20 et 3.21). Elles présentent chacune un déplacement maximal pour la coupe verticale, s'en suit un déplacement légèrement inférieur pour la coupe oblique et un déplacement minimal pour la coupe horizontale. Ceci résulte du fait que l'argile est deux fois plus raide dans le sens des strates, horizontales, et donc les déplacements sont moindres dans cette direction.

L'anisotropie des contraintes ne fait qu'amplifier les différences de déplacements selon l'orientation. Par exemple, pour une coupe verticale, la contrainte orthoradiale est moindre dans le cas de contraintes anisotropes que dans le cas isotrope, par conséquent la contrainte radiale correspondante est plus élevée au sein du massif et amplifie le déplacement vertical.

**Conclusion** Nous disposons d'une étude qualitative de l'évolution des contraintes et des déplacements dans le cas où l'on considère un matériau anisotrope. Nous en déduisons que la raideur supérieure de l'argile à l'horizontale, induit des déplacements moindres dans cette direction. L'anisotropie des contraintes, plus proche de la réalité, engendre des déplacements plus importants au sommet de la galerie.

Au terme de ces quatre modélisations élastiques, nous sommes en mesure d'identifier les phénomènes suivants :

- Plus on s'éloigne de la galerie, moins le massif est atteint par la présence de celle-ci. Les contraintes tendent vers leur valeur initiale et les déplacements se réduisent ;
- Suite à cette analyse, une anisotropie de contraintes produit naturellement une divergence des chemins de contraintes au sein du massif. Les déplacements s'en trouvent affectés et présentent des valeurs différentes selon l'orientation ;
- L'anisotropie de ce matériau se manifeste en amplifiant les déplacements verticaux, les contraintes liées sont également influencées ;

### 3.2.2.4 Simulations 5 & 6 - Modèles élasto-plastiques de Mohr-Coulomb à contraintes isotropes & anisotropes

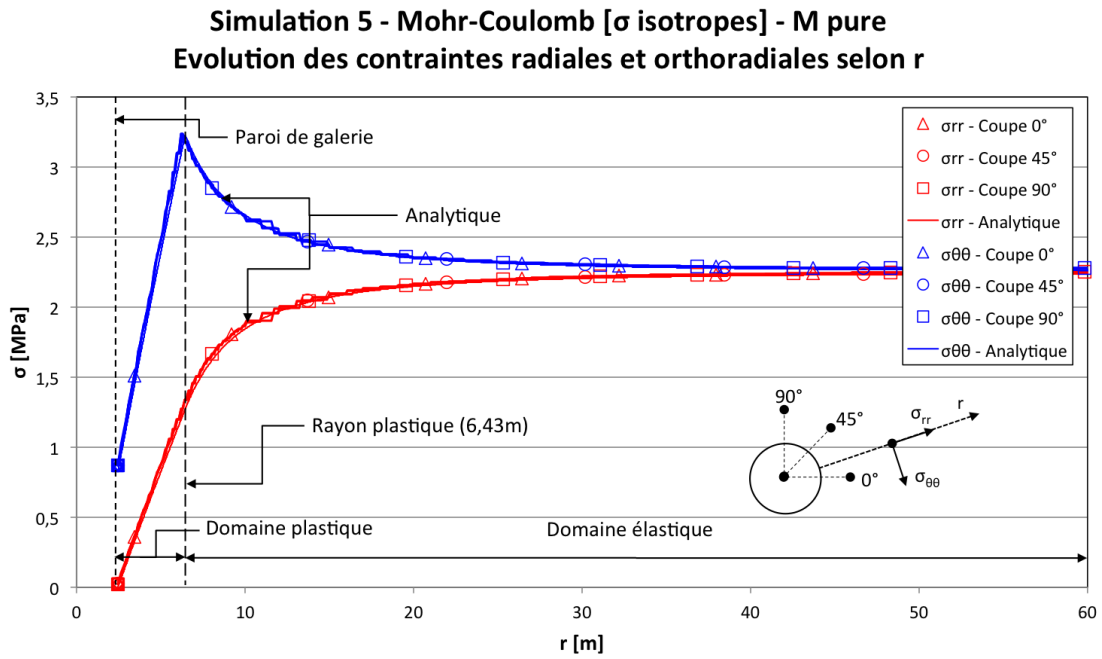
Les simulations 5 & 6 proposent d'introduire la notion de plasticité en présence d'un matériau isotrope. Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.7. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Simulation 5 : Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 1$ ) ;
- Simulation 6 : Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive de Mohr-Coulomb ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

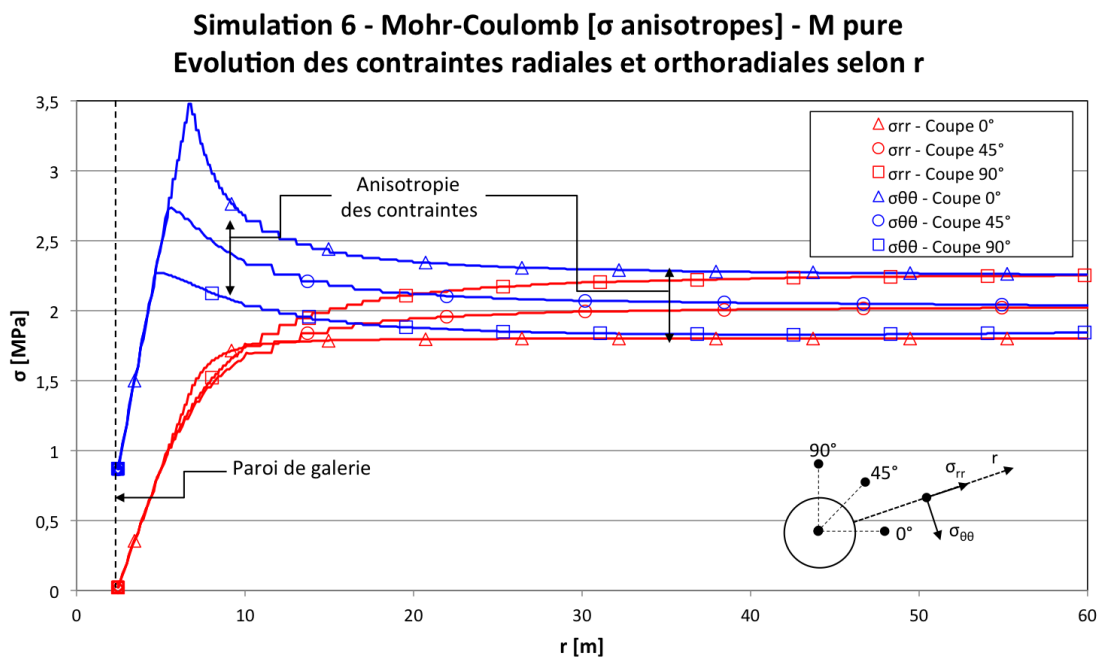
Paramètres des modèles				
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	ISO	ANISO	
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	2,25	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	2,25	2,25	[MPa]
		2,25	1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques				
Module de Young	$E$		300	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$		0,125	[-]
Cohésion initiale	$c'_i$		300	[kPa]
Cohésion finale	$c'_f$		300	[kPa]
Angle de friction initial	$\phi'_i$		18	[°]
Angle de friction final	$\phi'_f$		18	[°]
Masse volumique	$\rho$		2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.7** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 5 & 6 - Mohr-Coulomb à contraintes isotropes & anisotropes.

**Résultats** Les représentations 3.23 et 3.24 proposent l'évolution des contraintes radiales et orthoradiales selon l'éloignement vis-à-vis de la galerie. Les déplacements sont quant à eux joints en annexe 5.3.4 aux figures 5.13 et 5.14.



**Figure 3.23** – Résultats de la simulation 5 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .



**Figure 3.24** – Résultats de la simulation 6 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

**Analyse des résultats** La figure 3.23 intègre un calcul analytique réalisé sur base de la méthode de convergence / confinement<sup>3</sup> en état de contraintes isotropes. Cette méthode prédit un rayon plastique de 6,43 m (par rapport à l'axe de la galerie), ce qui correspond aux résultats numériques, à la précision demandée près. Cette valeur est également de l'ordre de grandeur de la taille de l'EDZ calculée par le programme CLIPEX à la section 3.1.1.3.

L'évolution des contraintes suit la même logique que celle rencontrée lors des cas tests du programme CLIPEX où les contraintes orthoradiales atteignent leur maximum à la limite de plasticité.

Pour un état de contrainte anisotrope, le modèle de Mohr-Coulomb définit une valeur de contrainte élastique proportionnelle à la contrainte initiale du massif (cf. figure 3.24). La contrainte  $\sigma_{\theta\theta}$  est supérieure au pied droit de la galerie, d'où une plus grande plasticité du massif dans cette direction.

Les déplacements représentés en annexe 5.3.4, montrent une augmentation des déplacements, de 9,2 cm dans le cas d'une distribution de contraintes isotropes, et de maximum 8,5 cm dans le cas anisotrope. Cet ordre de grandeur se rapproche des simulations réalisées dans le cadre du programme CLIPEX présentées à la section 3.1.1, malgré l'absence de l'eau.

**Conclusion** L'introduction de plasticité induit naturellement la distinction de deux zones de contraintes dans le massif, séparées au niveau du rayon plastique. L'endommagement du milieu affecte l'état de contrainte, en particulier la composante orthoradiale qui se voit réduite en zone plastifiée. Les déplacements augmentent donc directement.

### 3.2.2.5 Simulations 7 & 8 - Modèles élasto-plastiques de Mohr-Coulomb écrouis à contraintes isotropes & anisotropes

Sur base des simulations 5 & 6 dotées d'un comportement élasto-plastique basé du modèle de Mohr-Coulomb, nous étudions l'effet d'un écrouissage de l'angle de frottement du matériau. Les paramètres de la modélisation et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.8. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

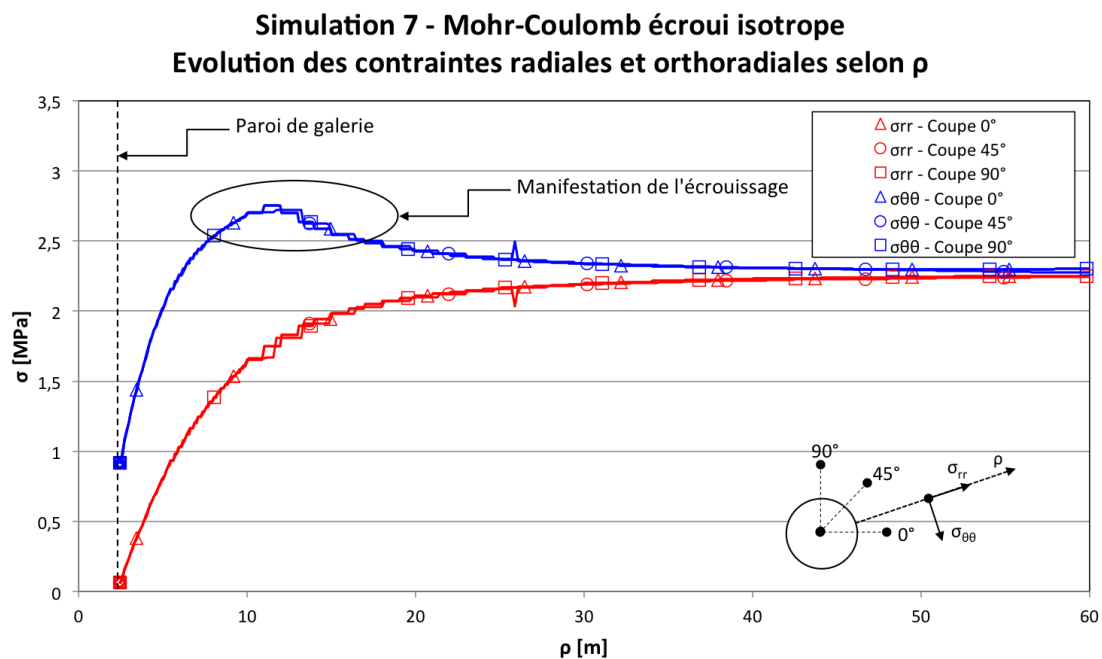
- Application du modèle A ;
- Étude en mécanique pure ;
- Simulation 7 : Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 1$ ) ;
- Simulation 8 : Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive de Mohr-Coulomb doté d'écrouissage ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** La représentation 3.25 propose l'évolution des contraintes selon les trois coupes caractéristiques du massif pour le cas de contraintes isotropes. Le cas anisotrope est joint avec les déplacements en annexe 5.3.4 aux figures 5.15, 5.16 et 5.17.

3. Contrairement aux calculs élastiques, la méthode de convergence/confinement en élasto-plastique (Mohr-Coulomb) n'a pas été re-développée dans le cadre du mémoire afin d'intégrer les effets liés à la limitation physique du domaine. La conséquence est une moins bonne correspondance des résultats aux bornes du domaine.

Paramètres des modèles				
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	ISO	ANISO	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	2,25	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	2,25	2,25	[MPa]
2,25			1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques				
Module de Young	$E$		300	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$		0,125	[-]
Cohésion initiale	$c'_i$		300	[kPa]
Cohésion finale	$c'_f$		300	[kPa]
Angle de friction initial	$\phi'_i$		5	[°]
Angle de friction final	$\phi'_f$		18	[°]
Paramètre d'écroissage	$B_p$		0,01	[-]
Masse volumique	$\rho$		2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.8** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 7 & 8 - Mohr-Coulomb à contraintes isotropes & anisotropes.



**Figure 3.25** – Résultats de la simulation 7 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

**Analyse des résultats** L'introduction d'écroûissage remplace le pic caractéristique de la transition plastique/élastique du modèle de Mohr-Coulomb proposé par les simulations 5 & 6, par un "plateau". Ceci est lié au caractère évolutif des propriétés du matériau qui devient de plus en plus frottant au cours du chargement. L'écroûissage de l'angle de frottement augmente la zone plastifiée, ce qui se traduit par un rayon plastique accru et une augmentation des déplacements en paroi, de l'ordre de 17 cm pour le cas isotrope et 15,5 cm dans le cas anisotrope, tel qu'illustré en annexe 5.3.4 aux figures 5.16 et 5.17.

### 3.2.2.6 Simulations 9 & 10 - Modèles élasto-plastique de Drucker-Prager et Van Eekelen écrouis à contraintes anisotropes

Les simulations 9 & 10 remplacent le modèle de Mohr-Coulomb par ceux de Drucker-Prager et Van Eekelen. Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.9. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Simulation 9 : Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager doté d'écrouissage ;
- Simulation 10 : Emploi de la loi constitutive de Van-Eekelen doté d'écrouissage ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Paramètres des modèles			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques			
Module de Young	$E$	300	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$	0,125	[-]
Cohésion initiale	$c'_i$	300	[kPa]
Cohésion finale	$c'_f$	300	[kPa]
Angle de friction initial	$\phi'_i$	5	[°]
Angle de friction final	$\phi'_f$	18	[°]
Paramètre d'écrouissage	$B_p$	0,01	[-]
Masse volumique	$\rho$	2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.9** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 9 & 10 - Drucker-Prager et Van-Eekelen à contraintes anisotropes.

**Résultats** Les représentations 3.26 et 3.27 proposent l'évolution des contraintes radiales et orthoradiales selon l'éloignement vis-à-vis de la galerie.

**Analyse des résultats** Bien que la distinction entre les figures 3.26 et 3.27 semble infime, on mesure néanmoins une contrainte orthoradiale maximale de 2,77 MPa à la limite de plasticité avec le modèle de Drucker-Prager, alors que la valeur maximale est de 2,75 MPa avec le modèle de Van-Eekelen. Précisons en guise de comparaison qu'avec le modèle de Mohr-Coulomb écroui, la valeur maximale est de 2,74 MPa. Ceci confirme que le modèle de Drucker-Prager surestime la plasticité par rapport aux modèles de Van-Eekelen et Mohr-Coulomb.

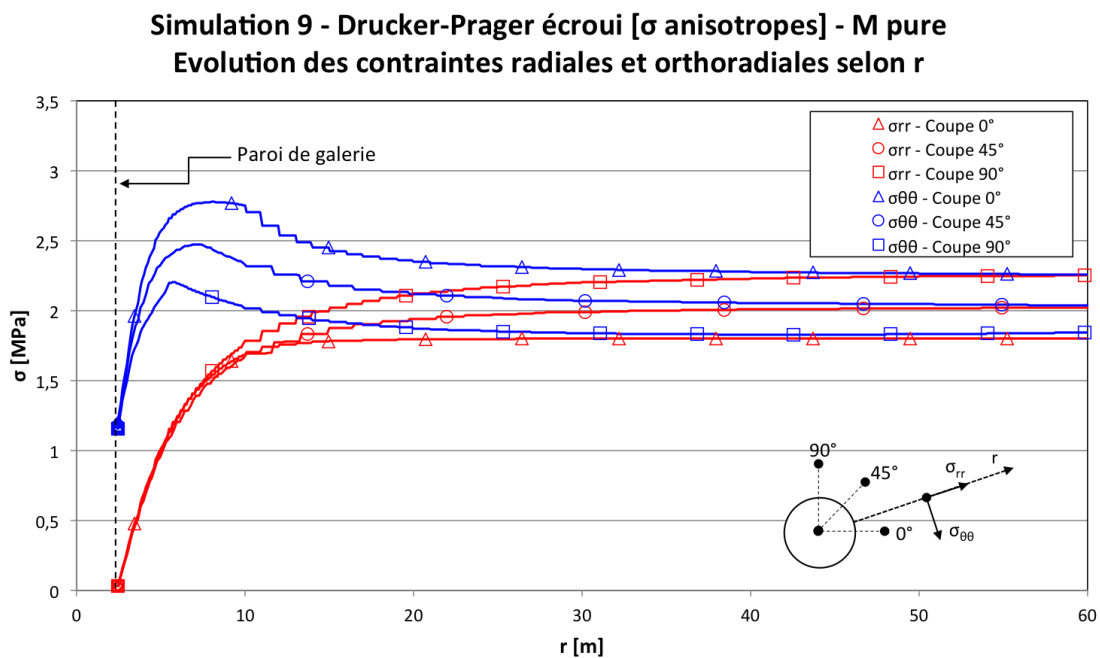


Figure 3.26 – Résultats de la simulation 9 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

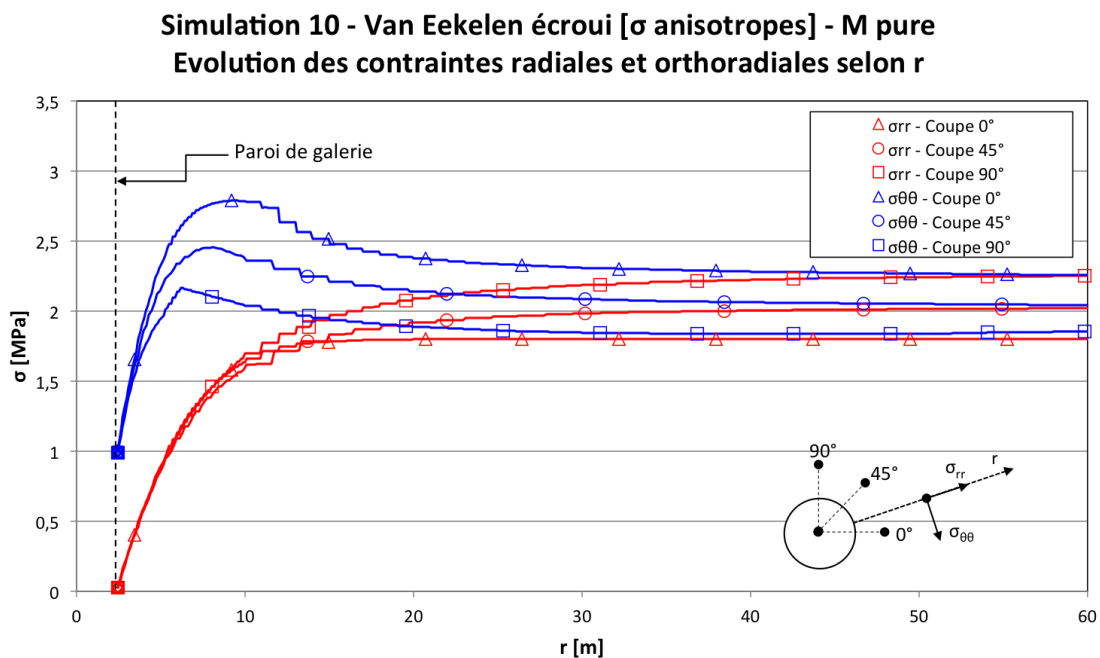


Figure 3.27 – Résultats de la simulation 10 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

### 3.2.2.7 Simulation 11 - Modèle élasto-plastique orthotrope à contraintes anisotropes

Cette simulation complète l'étude du comportement mécanique de l'argile de Boom en intégrant l'anisotropie élasto-plastique du matériau et l'anisotropie des contraintes. Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.10. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle A ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_X}{\sigma_Y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive Orthotrope (Drucker-Prager modifié) dotée d'écrouissage, mais sans adoucissement ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

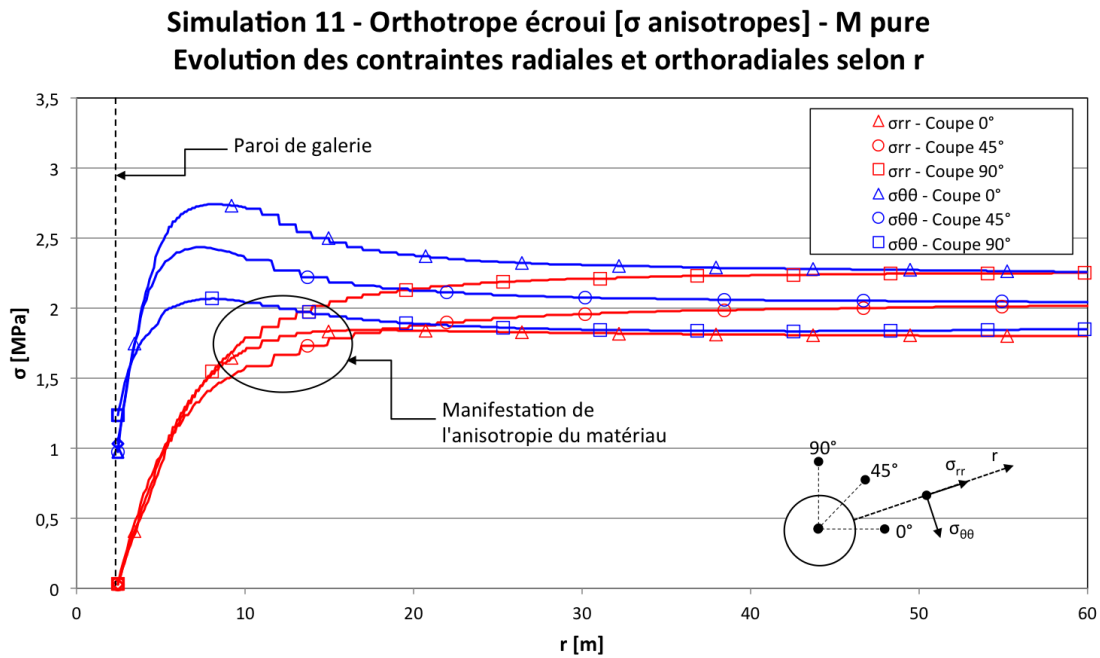
Paramètres des modèles			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	1,80	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	1,80-2,25	[MPa]
Paramètres géotechniques			
Module de Young $\parallel$	$E_{\parallel}$	400	[MPa]
Module de Young $\perp$	$E_{\perp}$	200	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu_{\parallel}$	0,125	[-]
Coefficient de Poisson	$\nu_{\parallel\perp}$	0,0625	[-]
Module de cisaillement	$G_{\parallel\perp}$	178	[MPa]
Cohésion initiale (0°)	$c'_{i,0^\circ}$	255	[kPa]
Cohésion initiale (45°)	$c'_{i,45^\circ}$	240	[kPa]
Cohésion initiale (90°)	$c'_{i,90^\circ}$	330	[kPa]
Cohésion finale (0°)	$c'_{f,0^\circ}$	255	[kPa]
Cohésion finale (45°)	$c'_{f,45^\circ}$	240	[kPa]
Cohésion finale (90°)	$c'_{f,90^\circ}$	330	[kPa]
Angle de friction initial	$\phi'_i$	5	[°]
Angle de friction final	$\phi'_f$	18	[°]
Paramètre d'écrouissage	$B_p$	0,01	[-]
Masse volumique	$\rho$	2100	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.10** – Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 11 - Orthotrope à contraintes anisotropes [François et al., 2012].

**Résultats** La représentation de l'évolution des contraintes est proposée à la figure 3.28. L'évolution des déplacements dans le massif est jointe en annexe 5.3.4 à la figure 5.18.

**Analyse des résultats** Le comportement anisotrope du massif s'exprime à la figure 3.28 par la divergence du chemin de contraintes radiales de la coupe diagonale. On constate également de légères modifications quant aux extrema des contraintes orthoradiales, notamment pour la coupe verticale.

Rappelons que comme la loi orthotrope est basée sur le modèle de Drucker-Prager, des similitudes avec la simulation 10 au niveau des chemins de contrainte et de déplacement sont visibles. Nous observons ainsi le caractère écroui du matériau par la formation du



**Figure 3.28** – Résultats de la simulation 11 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

"plateau" de contraintes orthoradiales. L'anisotropie des contraintes se manifeste par la séparation en chemins différenciés, tendant vers la contrainte initiale agrémentée du coefficient d'anisotropie  $K_0$ , propre à chaque orientation tel que précisé en annexe 5.3.3.

**Conclusion** Nous disposons à ce stade de l'analyse d'un aperçu général de la contribution de chaque hypothèse sur le comportement du massif en termes de contraintes et de déplacements. Les étapes suivantes vont intégrer la présence du soutènement et le couplage hydro-mécanique. Nous disposerons alors d'une base complète pour interpréter les résultats du modèle final tri-dimensionnel.

### 3.2.3 Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement

#### 3.2.3.1 Simulation 12 - Modèle élastique linéaire à contraintes isotropes avec soutènement

Ce test initialise l'étude de l'influence du soutènement sur le comportement du massif argileux, ce qui se traduit par l'utilisation du modèle B. Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.4, complétées des données du soutènement de la table 3.11. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle B ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 1$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive parfaitement élastique ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Propriétés mécaniques du soutènement			
Module de Young	$E$	41000	[MPa]
Coefficient de Poisson	$\nu$	0,2	[-]
Masse volumique	$\rho$	2400	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Table 3.11** – Paramètres mécaniques du soutènement [Bastiaens et al., 2003].

**Résultats et analyse** Les résultats sont identiques à ceux de la première simulation proposés aux figures 3.12, 3.13 et 3.14. Le soutènement ne joue aucun rôle dans ce cas-ci. L'explication logique est que le déplacement maximal du massif est inférieur au "gap" initialement présent entre le soutènement et le massif. Pour rappel, ce dernier est introduit afin de représenter les marges d'excavation et de sur-excavation présentées à la figure 1.11. Comme précisé à la figure 3.6, l'espace est de 4,5 cm, or le déplacement maximal observable à la figure 3.14 (f) n'est que de 2 cm.

### 3.2.3.2 Simulations 13 & 14 - Modèles élasto-plastiques de Drucker-Prager et orthotrope écrouis à contraintes anisotropes avec soutènement

Ces simulations visent à étudier l'influence d'un soutènement de 40 cm d'épaisseur doté des propriétés détaillées à la table 3.11, sur les modélisations 9 & 11. Ces dernières réalisent une étude mécanique élasto-plastique sur base du modèle de Drucker-Prager et du modèle Orthotrope en contraintes anisotropes.

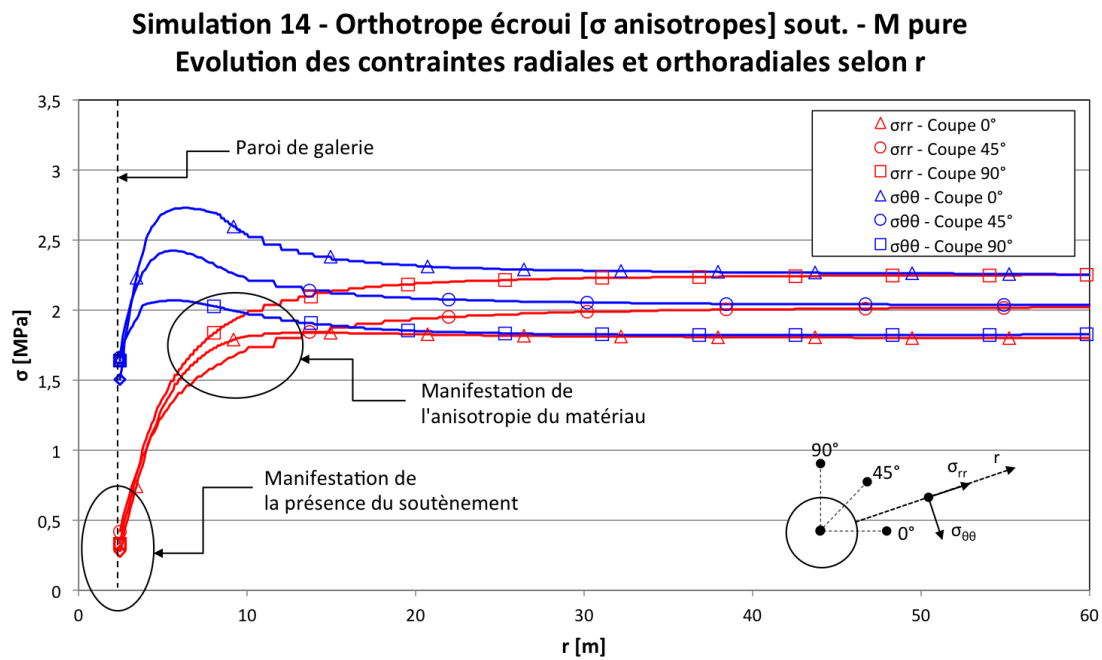
Le choix de comparer ces deux modèles mécaniques est lié à leur base commune, rappelons que le modèle Orthotrope est identique au modèle de Drucker-Prager, l'anisotropie du matériau en plus. Nous gardons à l'esprit que Drucker-Prager peut surestimer les contraintes admissibles en traction.

Les paramètres du modèle et les propriétés géotechniques de l'argile de Boom utilisées sont regroupés à la table 3.9 pour le modèle de Drucker-Prager et à la table 3.10 pour le modèle orthotrope. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle B ;
- Etude en mécanique pure ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,8$ ) ;
- Simulation 13 : Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager dotée d'écrouissage, sans adoucissement ;
- Simulation 14 : Emploi de la loi constitutive Orthotrope (Drucker-Prager modifié) dotée d'écrouissage, sans adoucissement ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** La figure 3.29 propose l'évolution des contraintes au sein du massif selon les trois coupes caractéristiques de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  et  $90^\circ$  pour un matériau anisotrope. Le cas isotrope doté du modèle de Drucker-Prager est joint à la figure 5.19 présente en annexe 5.3.4.

**Analyse des résultats** Les déplacements non-représentés, ont pour seul intérêt d'indiquer que le déplacement maximal calculé est limité à la taille du "gap", soit 4,5 cm. Les contraintes qui en découlent montrent l'apparition d'une contrainte radiale minimale non-nulle en paroi de galerie pour les deux simulations. Cette contrainte est l'expression



**Figure 3.29** – Résultats de la simulation 14 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

de la pression exercée par le massif sur le soutènement lors de sa convergence empêchée. La pression exercée sur le soutènement diffère de 0,1 MPa selon la présence d'anisotropie de matériau ou non. Nous observons toujours les distinctions analysées aux simulations 9 et 11.

### 3.2.4 Modélisations préliminaires 2-D - Analyse du comportement hydro-mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement

#### 3.2.4.1 Simulation 15 - Modèle élastique linéaire à contraintes isotropes avec soutènement en couplage hydro-mécanique

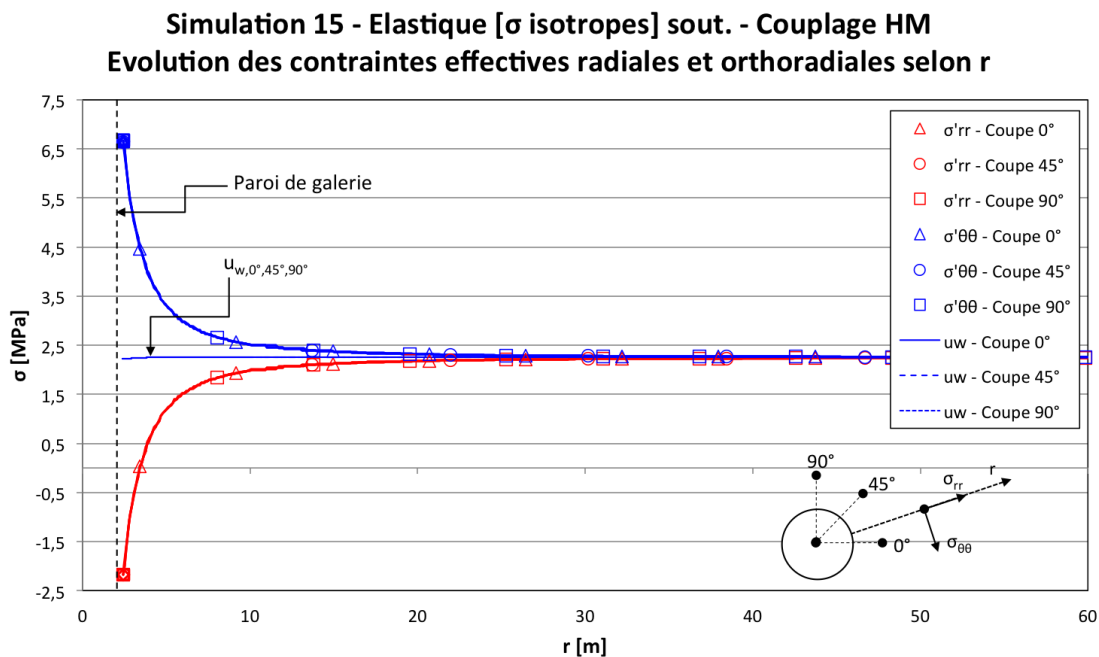
Les cas tests suivants visent à étudier l'influence du couplage hydro-mécanique sur la réponse du massif. La première simulation proposée se veut la plus basique possible afin d'éliminer tout phénomène parasite. Nous employons donc la loi constitutive parfaitement élastique en contraintes isotropes. Cette dernière utilise les propriétés géotechniques définies à la table 3.4, et un soutènement caractérisé à la table 3.11. Les propriétés d'écoulement sont quant à elles regroupées à la table 3.12. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle B ;
- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 1$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive élastique linéaire ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** Les figures 3.30 et 3.31 proposent l'évolution des contraintes et des déplacements dans le massif selon les trois coupes caractéristiques de 0°, 45° et 90°.

Propriétés isotropes des écoulements internes			
Perméabilité intrinsèque du massif	$k_{int.}$	$4.10^{-19}$	$[m^2]$
Porosité du massif	$n$	0,39	$[-]$
Coefficient de compressibilité de l'eau	$1/\chi_w$	$4,9.10^{-10}$	$[Pa^{-1}]$
Viscosité dynamique du fluide	$\mu_w$	$1.10^{-3}$	$[Pa.s]$
Masse volumique du fluide	$\rho_w$	1000	$[kg/m^3]$
Pression d'eau initiale	$u_{w,0}$	2,25	$[MPa]$

Table 3.12 – Paramètres d'écoulement interne isotrope.

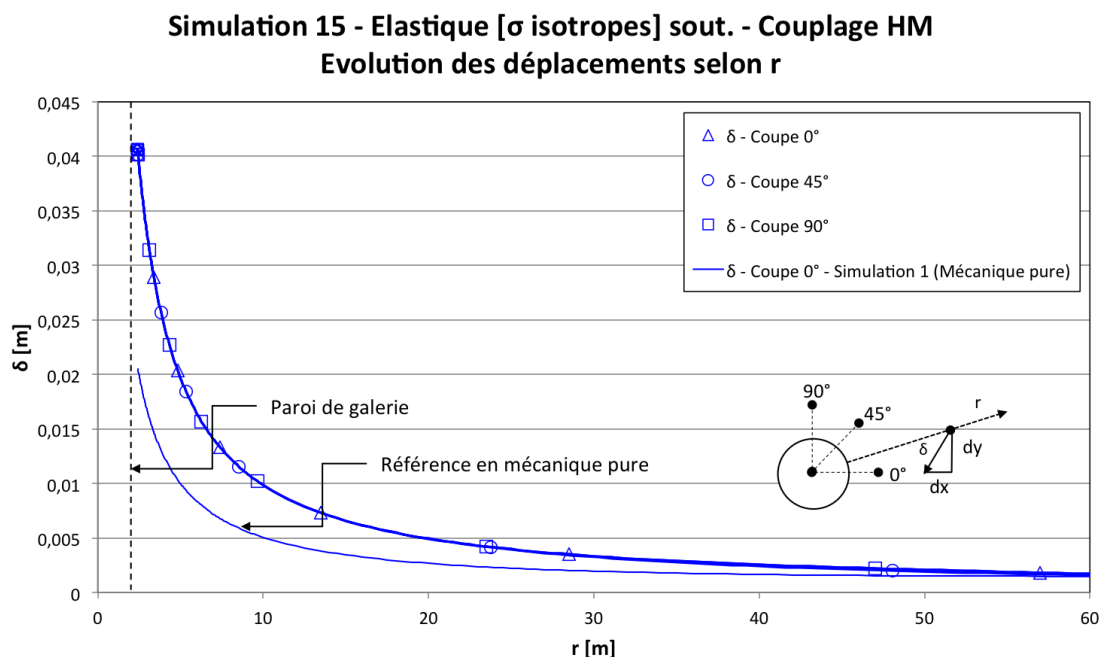
Figure 3.30 – Résultats de la simulation 15 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$ .

**Analyse des résultats** L'introduction de la composante hydraulique induit les notions de contraintes effectives et totales liées par la relation (3.18).

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (3.18)$$

où,  $\sigma$  la contrainte totale,  $\sigma'$  la contrainte effective (contrainte existante entre grains solides) et  $u_w$  la pression d'eau.

Dans le cas élastique linéaire en état de contrainte isotrope, la pression d'eau est constante dans toutes les directions. Ce qui est vrai grâce au déplacement insuffisant qui empêche le contact entre le massif et le soutènement (4,5 cm). Les contraintes effectives suivent quant à elles, l'allure des contraintes étudiées par la simulation 1, avec toutefois la particularité de mise en traction du matériau en paroi de galerie. Ceci est lié au caractère non-drainé du modèle qui maintient la pression d'eau constante puisqu'il n'y a ni contact, ni plastification. Dès lors, le déconfinement total se traduit par une contrainte totale nulle, et conduit donc à une contrainte effective en traction par la relation (3.18).



**Figure 3.31** – Résultats de la simulation 15 - Evolution des déplacements selon  $r$ .

L'éloignement de la galerie ramène progressivement le massif vers son état initial. Par conséquent, les contraintes effectives et les pressions d'eau tendent vers leur valeur initiale, et donc la contrainte totale retrouve sa valeur  $\sigma_0 + u_{w,0}$  en bordure de domaine. La contrainte orthoradiale subit également la présence de l'eau avec une valeur en paroi de 6,7 MPa.

La variation de l'état de contrainte impliquant la composante hydraulique conduit au doublement du déplacement en paroi, tel qu'illustré à la figure 3.31. Nous obtenons à présent un déplacement de 4,1 cm selon les trois directions, puisque nous sommes en état de contrainte isotrope.

#### 3.2.4.2 Simulations 16 & 17 - Modèles élasto-plastiques de Drucker-Prager et orthotrope écrouis à contraintes anisotropes avec soutènement en couplage hydro-mécanique

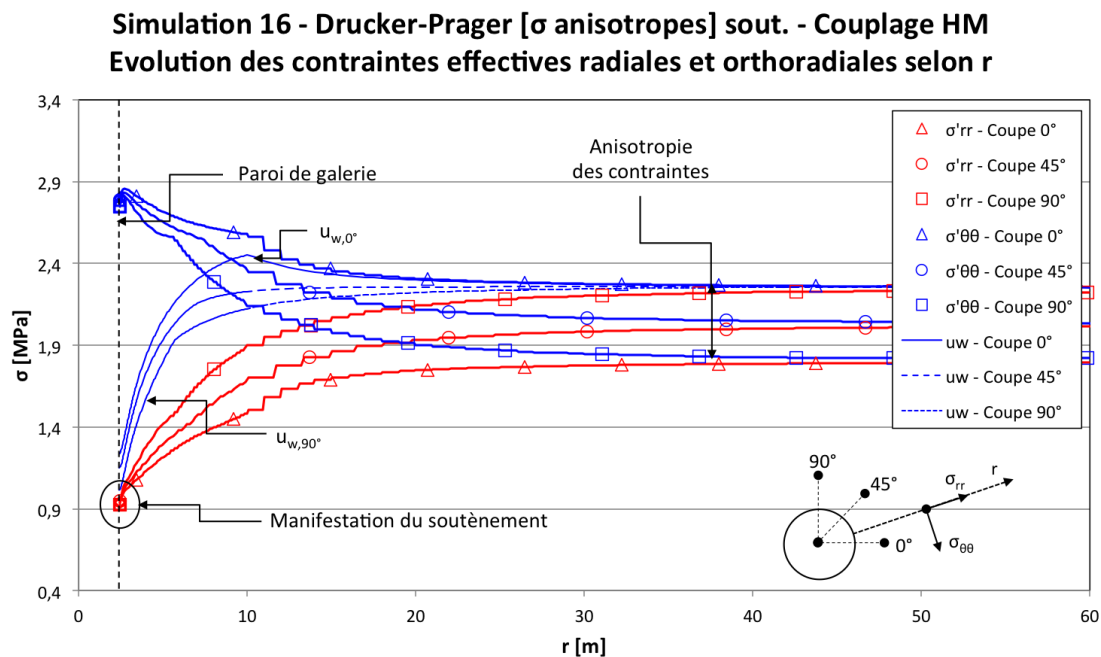
La dernière étape avant l'étude tridimensionnelle vise à introduire l'ensemble des paramètres étudiés jusqu'à présent. Les simulations 16 et 17 proposent l'analyse hydro-mécanique sur base du modèle de Drucker-Prager et du modèle Orthotrope exprimant l'anisotropie du matériau, tous deux dotés d'un écrouissage de l'angle de frottement. L'état de contrainte est anisotrope et un soutènement est placé par l'intermédiaire du modèle B.

Les propriétés géotechniques sont définies à la table 3.9 pour le modèle de Drucker-Prager et à la table 3.10 pour le modèle Orthotrope. Le soutènement est caractérisé à la table 3.11 et les propriétés d'écoulement sont regroupées à la table 3.12. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle B ;

- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,8$ ) ;
- Simulation 16 : Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager ;
- Simulation 17 : Emploi de la loi constitutive Orthotrope (Drucker-Prager modifié) ;
- Simulation de l'excavation d'une tranche de 10 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** Les figures 3.32 et 3.33 proposent l'évolution des contraintes au sein du massif, respectivement pour le modèle de Drucker-Prager et pour le modèle Orthotrope.

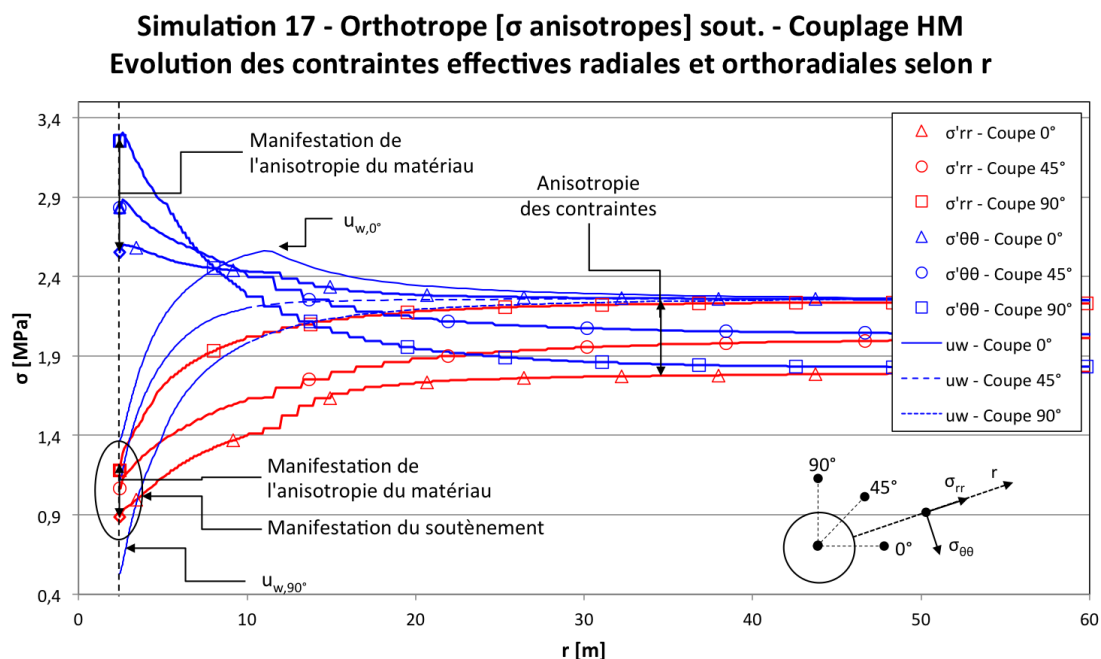


**Figure 3.32** – Résultats de la simulation 16 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$ .

**Analyse des résultats** La plastification du matériau induit des déplacements, non-représentés, plus importants qui conduisent pour les deux cas tests, à faire entrer le massif en contact avec le soutènement. Cela est exprimé par l'augmentation des contraintes radiales effectives qui sont à présent en compression et non plus en traction comme pour le cas parfaitement élastique de la simulation 15. La plastification induit également une augmentation de la porosité, ce qui réduit les pressions d'eau dans la zone plastifiée. Ce nouvel état de contrainte influence naturellement les contraintes orthoradiales. Le tout s'adapte pour garantir l'équilibre.

La prise en compte de l'eau dans le comportement du massif exacerbe l'influence de l'anisotropie du matériau sur l'évolution des contraintes effectives et pressions d'eau. Une comparaison entre les figures 3.32 et 3.33 montre en effet de sérieuses différences, tant du point de vue des pressions que sur la divergence des contraintes effectives, alors que précédemment ces différences étaient plus discrètes (cf. simulations 13 et 14).

L'évolution des contraintes au sein du massif se stabilisent à une distance de 30 à 35 m de la galerie en présence d'un matériau isotrope, et à une distance de 35 à 40 m pour un



**Figure 3.33** – Résultats de la simulation 17 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$ .

matériau anisotrope. Ceci traduit la taille de l'EdZ et semble légèrement plus importante que les résultats du programme CLIPEX (25 m, cf. section 3.1.1.3).

### 3.2.4.3 Conclusion

Le cheminement suivi au cours de la phase d'étude préliminaire nous permet d'identifier et de comprendre la contribution de chaque paramètre dans le comportement physique du massif lors de l'excavation de la galerie. Notons que l'anisotropie des contraintes et du matériau sont mises en évidence à plusieurs reprises au cours de l'analyse. Le modèle final ne présente un intérêt que s'il prédit correctement le comportement réel, d'où l'étape ultime où l'on procède à une comparaison entre les résultats numériques et les valeurs des mesures in situ.

L'étape suivante consiste donc à utiliser les connaissances recueillies tout au long des cas tests et au sein de la littérature, pour établir un modèle le plus proche de la réalité, muni d'une anisotropie de contraintes et in fine d'un comportement anisotrope du matériau. L'intérêt du mémoire reste néanmoins la démarche scientifique, d'où la création de différents cas destinés à évaluer l'apport progressif des anisotropies dans un domaine tridimensionnel.

Le résultat est la création de la géométrie tridimensionnelle finale, détaillée à la section 3.2.1.2 et illustrée à la figure 3.7. Nous justifions la réduction du domaine, de 60 m de côté pour les études en état plan de déformation à 45 pour la galerie borgne, suite à la taille de l'EdZ limitée au plus à 45 m selon les observations. Les densités de maillages sont quant à elles liées à la positions des capteurs du programme CLIPEX.

### 3.2.5 Modélisations finales 3-D - Analyse du comportement hydro-mécanique de l'Argile de Boom lors de l'excavation d'une galerie dotée d'un soutènement

Les simulations tridimensionnelles sont au nombre de quatre. Elles sont destinées à être comparées à la phase préliminaire et à être confrontées aux données d'essais in situ.

#### 3.2.5.1 Simulation 18 - Modèle élasto-plastique de Drucker-Prager écroui à contraintes isotropes en couplage hydro-mécanique

La simulation 18 propose une étude hydro-mécanique élasto-plastique sans anisotropie à l'aide du modèle de Drucker-Prager. Précisons toutefois que le matériau présente un écrouissage de l'angle de frottement. Les propriétés géotechniques de l'argile sont définies à la table 3.9. Les propriétés d'écoulement sont regroupées à la table 3.12, et les caractéristiques du soutènement sont reprises à la table 3.11. Les paramètres du modèles sont fournis à la table 3.13. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle C ;
- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes isotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 1$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager avec écrouissage de l'angle de frottement ;
- Simulation de l'excavation de 35 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Paramètres des modèles			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_Z$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{Z,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	2,25	[MPa]

Table 3.13 – Paramètres du modèle de la simulation 18.

**Résultats et analyse** L'évolution des contraintes (non représentée) selon les trois directions caractéristiques de la coupe réalisée à l'abscisse  $Z = 20m$  (cf. figure 3.9) présente une évolution caractéristique d'un état de contrainte isotrope. Les chemins suivis par les contraintes radiales et orthoradiales sont en effet égaux selon les diverses orientations. La présence du soutènement se manifeste par une contrainte radiale non-nulle en paroi. La zone plastique s'étend jusqu'à un rayon d'environ 8m (par rapport à l'axe de la galerie), soit sur une distance de 5,5 m. La plasticité induit une augmentation de porosité et donc une chute des pressions de pore. Ces résultats déjà observés dans la phase préliminaire ne présentent que l'intérêt de valider le modèle tri-dimensionnel du point de vue numérique.

#### 3.2.5.2 Simulation 19 - Modèle élasto-plastique de Drucker-Prager écroui à contraintes anisotropes en couplage hydro-mécanique

Nous intégrons à présent l'anisotropie des contraintes, toujours selon le modèle de Drucker-Prager doté d'un écrouissage de l'angle de frottement. Les propriétés géotechniques de l'argile sont définies à la table 3.9. Les propriétés d'écoulement sont regroupées à la table 3.12, et les caractéristiques du soutènement sont reprises à la table 3.11. Les paramètres

du modèles sont fournis à la table 3.14. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle C ;
- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager avec écrouissage de l'angle de frottement ;
- Simulation de l'excavation de 35 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

Paramètres des modèles			
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_X$	1,8	[MPa]
Contrainte Totale Principale Horizontale	$\sigma_Z$	1,8	[MPa]
Contrainte Totale Principale Verticale	$\sigma_Y$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{X,0}$	1,8	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Horizontale	$\sigma_{Z,0}$	1,8	[MPa]
Contrainte Totale Initiale Verticale	$\sigma_{Y,0}$	2,25	[MPa]
Contrainte Totale Normale Intrados	$\sigma_n$	1,8 - 2,25	[MPa]

Table 3.14 – Paramètres du modèle de la simulation 19.

**Résultats** Les figures 3.34 et 3.35 proposent l'évolution des contraintes au sein du modèle 3-D selon les trois directions caractéristiques. Ces données sont extraites au sein des deux coupes précisées à la figure 3.9 ( $Z = 20m$  et  $Z = 43 m$ ).

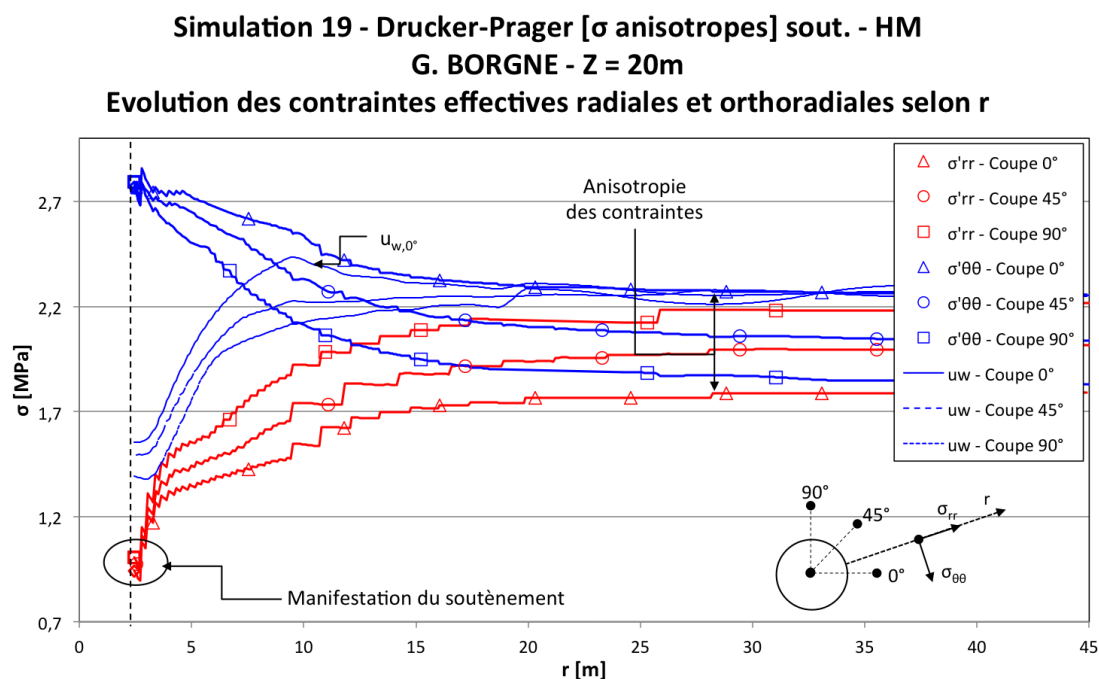
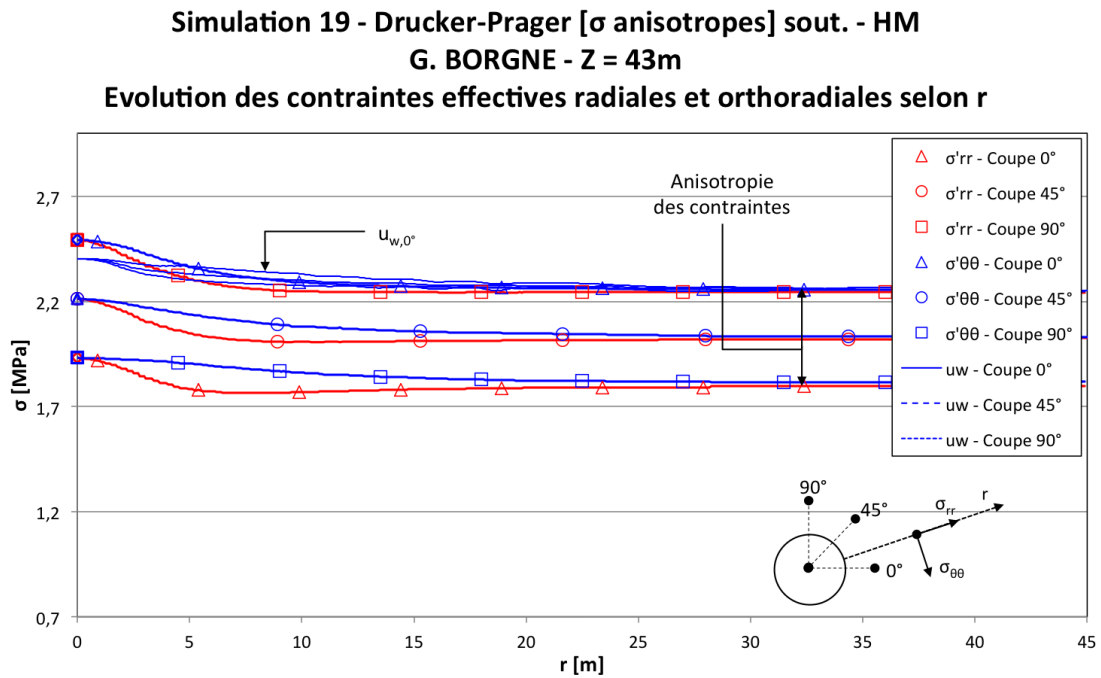


Figure 3.34 – Résultats de la simulation 19 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$  en  $Z = 20m$ .

**Analyse des résultats** Les contraintes illustrées aux figures 3.34 et 3.35 évoluent selon la tendance caractéristique d'un état anisotrope de contrainte établi lors de la simulation préliminaire 2. L'éloignement de la galerie ramène les contraintes vers leur état initial qui



**Figure 3.35** – Résultats de la simulation 19 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$  en  $Z = 43m$ .

est fonction de l'orientation (coefficient  $K_0$ ). Les phénomènes liés au soutènement et à la plasticité se retrouvent également la figure 3.34.

La coupe réalisée à l'abscisse  $Z = 43m$  (non représentée) indique que l'excavation de la galerie se fait légèrement ressentir devant le front de taille.

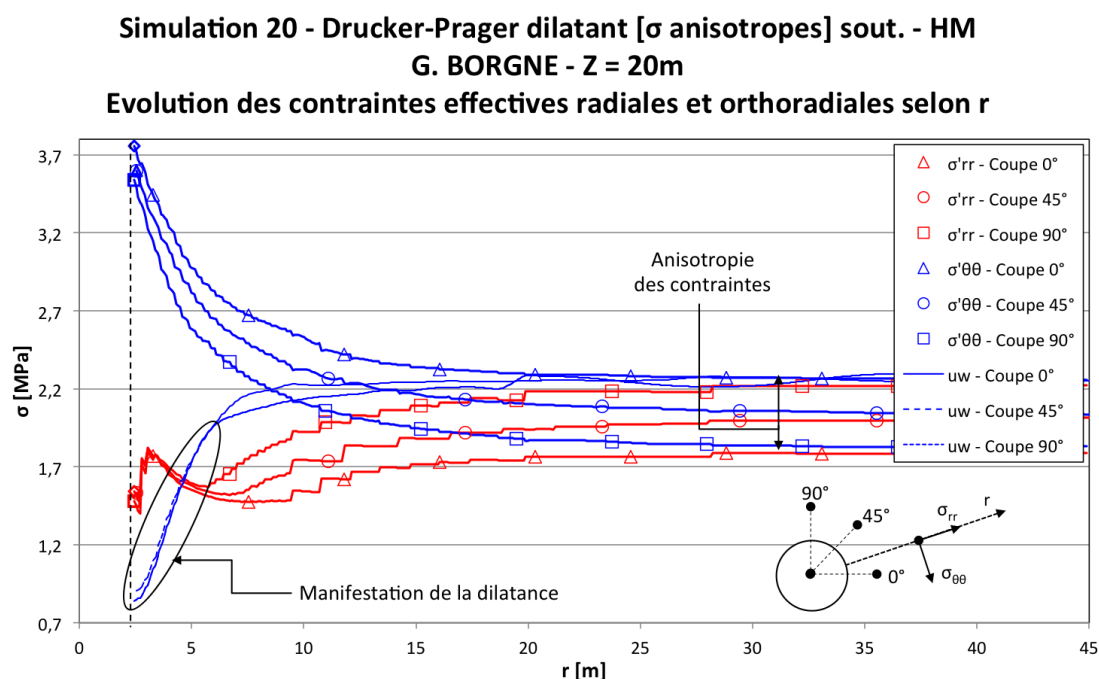
### 3.2.5.3 Simulation 20 - Modèle élasto-plastique de Drucker-Prager écroui doté de dilataance à contraintes anisotropes en couplage hydro-mécanique

La simulation 20 copie le cas 19 en y ajoutant une dilataance de  $10^\circ$ . Les paramètres du modèles, les lois employées, et les propriétés géotechniques sont identiques à l'exception de la dilataance. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle C ;
- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive de Drucker-Prager avec dilataance de  $10^\circ$  et écrouissage de l'angle de frottement ;
- Simulation de l'excavation de 35 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** La figure 3.36 propose l'évolution des contraintes au sein de la coupe d'abscisse  $Z = 20m$ . La coupe à l'abscisse de 43 m présente peu d'intérêt.

**Analyse des résultats** Le massif subit une augmentation volumique liée au phénomène de dilataance, ce qui augmente la convergence. Celle-ci est toutefois bloquée par la présence du soutènement, et se répercute par un accroissement de la pression sur le



**Figure 3.36** – Résultats de la simulation 20 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon  $r$  en  $Z = 20m$ .

soutènement, ce qui se traduit par une augmentation des contraintes radiales. La dilatance génère une augmentation de volume et donc un accroissement de porosité, ce qui décroît encore plus les pressions d'eau en zone plastifiée. Le nouvel état d'équilibre modifie l'état des contraintes orthoradiales.

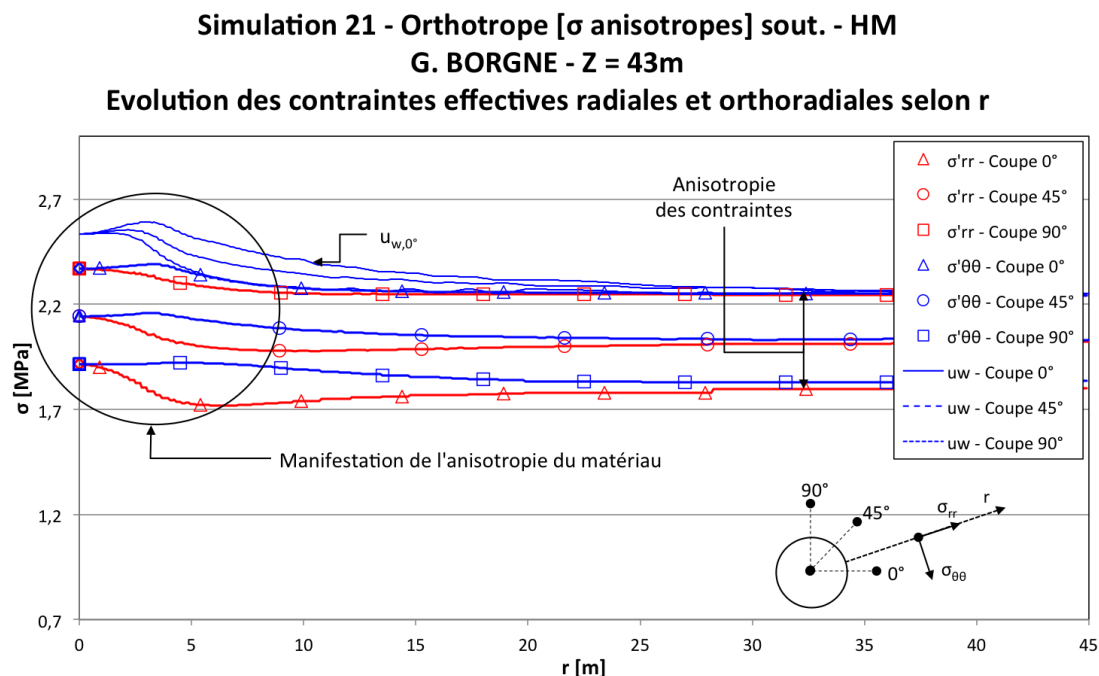
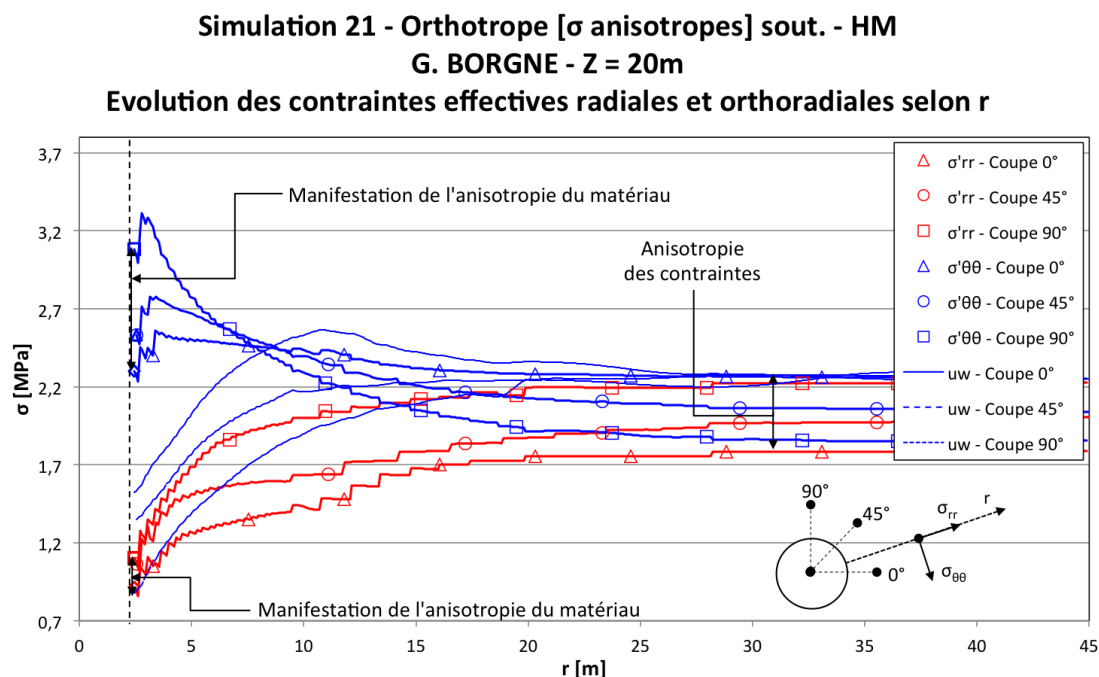
### 3.2.5.4 Simulation 21 - Modèle élasto-plastique orthotrope écroui doté de dilatance à contraintes anisotropes en couplage hydro-mécanique

La modélisation finale intègre l'anisotropie des contraintes et le comportement anisotrope du matériau par l'application du modèle Orthotrope. Les propriétés géotechniques de l'argile sont définies à la table 3.10. Les propriétés d'écoulement sont regroupées à la table 3.12, et les caractéristiques du soutènement sont reprises à la table 3.11. Les paramètres du modèles sont fournis à la table 3.14. Les hypothèses de simulation sont les suivantes :

- Application du modèle C ;
- Etude en couplage hydro-mécanique non-drainé ;
- Etat de contraintes anisotrope ( $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 0,8$ ) ;
- Emploi de la loi constitutive Orthotrope (Drucker-Prager modifié) avec écrouissage de l'angle de frottement ;
- Simulation de l'excavation de 35 mètres de galerie à la vitesse de 2m/j ;

**Résultats** Les figures 3.37 et 3.38 proposent l'évolution des contraintes au sein du modèle 3-D selon les trois directions caractéristiques des coupes d'abscisses  $Z = 20m$  et  $Z = 43m$ . Les représentations regroupées au sein de la figure 5.20 en annexe 5.3.4, présentent une vue 3-D de l'évolution des contraintes et des déplacements dans le massif au terme de l'excavation. L'illustration 5.20 (h) effectue un zoom au niveau de front de taille. L'ex-

trusion maximale mesurée est de 9,6 cm, soit 2,6 cm de plus que pour les simulations du programme CLIPEX (cf. section 3.1.1.3).



**Analyse des résultats** La simulation 17 décrite à la section 3.2.4.2, prédit une mise en évidence plus marquée de l'anisotropie dans le cas de couplage hydro-mécanique. Les figures 3.37 et 3.38 vérifient cette prédiction par la divergence accrue des chemins de contraintes observées au sein du massif par rapport à la simulation 20. L'absence de dilatance montre également un niveau de pression d'eau plus important qu'à la simulation 20.

### 3.2.5.5 Conclusion

Les modélisations réalisées dans cette section répondent aux prédictions établies lors de la phase préliminaire. Nous disposons de résultats numériques caractérisés chacun par un paramètre particulier (isotropie/anisotropie des contraintes, isotropie/anisotropie du matériau), le modèle final recherché étant celui qui intègre les anisotropies du matériau et des contraintes. Il convient dès lors de comparer ces résultats avec les données d'essais in situ en vue de valider le modèle ou en tout cas d'en estimer un degré de correspondance. Il nous est également permis d'étudier l'influence du paramétrage des simulations, ceci dans l'esprit de recherche du travail de fin d'études.

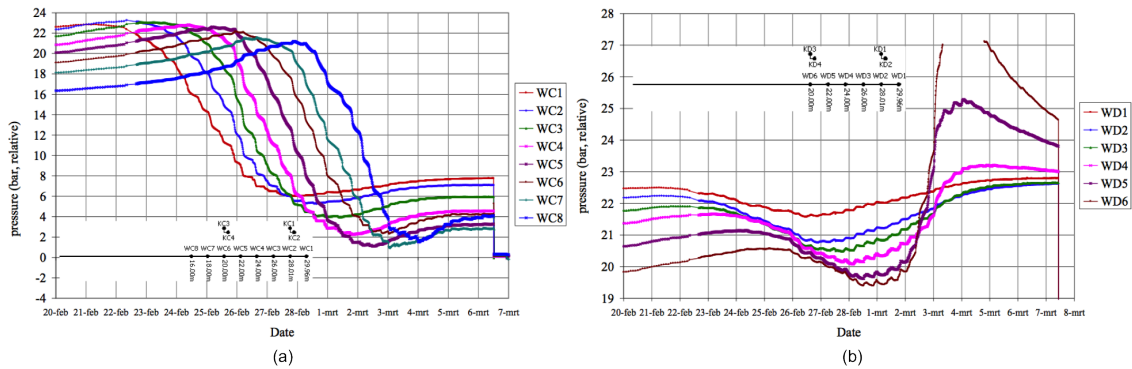
### 3.2.6 Confrontation des résultats numériques aux données in situ

Le chapitre 9.3 du rapport final du programme CLIPEX [Bernier et al., 2007] conclut que les simulations réalisées dans le cadre de ce programme suivent la tendance générale de l'évolution des pressions de pore lors de l'excavation, mais divergent largement des mesures in situ. Le mémoire propose donc une étude comparative sur base des pressions d'eau, afin d'une part, d'estimer le niveau de correspondance des modélisations, et d'autre part, d'apporter une modeste contribution aux recherches menées.

La comparaison se fait pour les séries de piezomètres WC et WD détaillées à la section 1.5.3.2. Le choix se justifie pour leur orientation et leur position "extrême" dans le massif. La série C installe ses capteurs obliquement à partir de la galerie TEST dans un plan vertical le long de l'axe de la galerie. La série D propose des capteurs selon l'horizontale perpendiculaire à l'axe de la galerie (cf. figure 1.13 et annexe 5.1.3).

Les résultats fournis par les piezomètres au cours de l'excavation de la galerie sont illustrés aux figures 3.39 (a) et (b). Ces dernières indiquent que l'état de pression de pore initial est hétérogène au sein du massif. Pour faciliter la comparaison avec les résultats numériques, qui eux considèrent un état homogène à  $u_{w,0} = 2,25 MPa$  nous ramenons les valeurs in situ à une référence commune aux simulations tel qu'illustré à la figure 3.40.

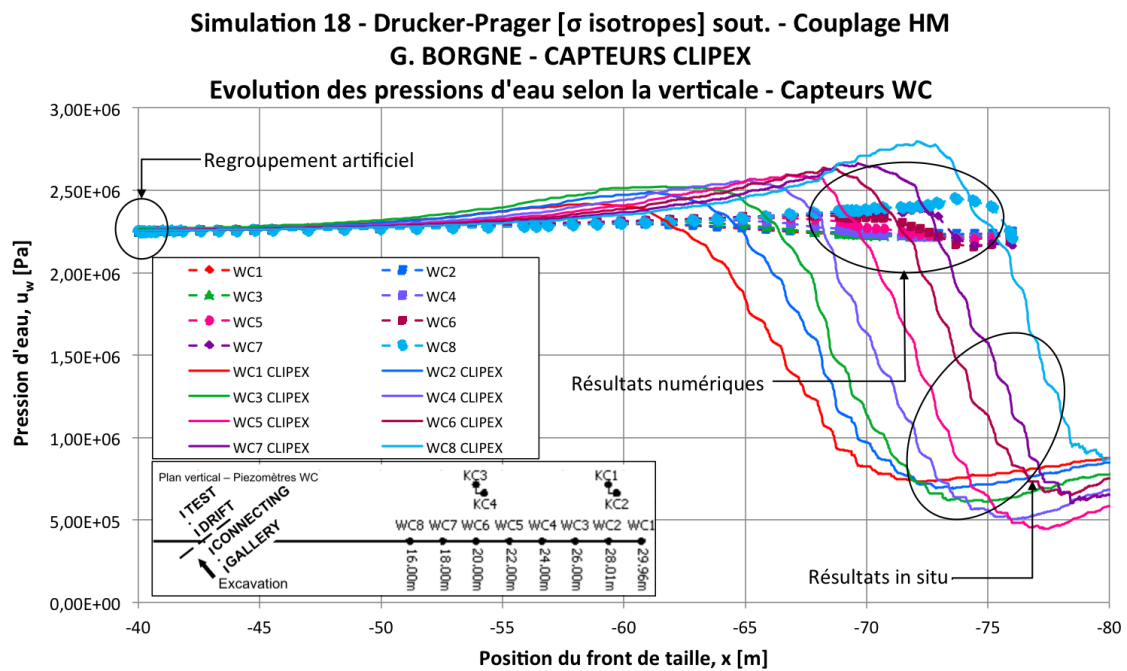
D'un point de vue pratique, le référentiel des représentations futures est établi selon la position du front de taille lors de l'excavation de la galerie. Les données du programme CLIPEX à notre disposition sont exprimées en fonction de la date de la prise des mesures. En considérant une vitesse moyenne d'avancement de 2m/j et la date de la fin des travaux, il nous est possible de procéder à la conversion de référentiels. Notons que l'excavation débute sous le deuxième puits à la position 0, et que le front de taille avance jusqu'à la galerie TEST située à une distance de -90m. Au cours de l'avancement, chaque capteur (fixe) mesure une variation de la pression de pore.



**Figure 3.39** – Résultats in situ de l'évolution des pressions d'eau au cours de l'excavation de la galerie de liaison - (a) série WC verticale, (b) série WD horizontale [Bernier et al., 2007].

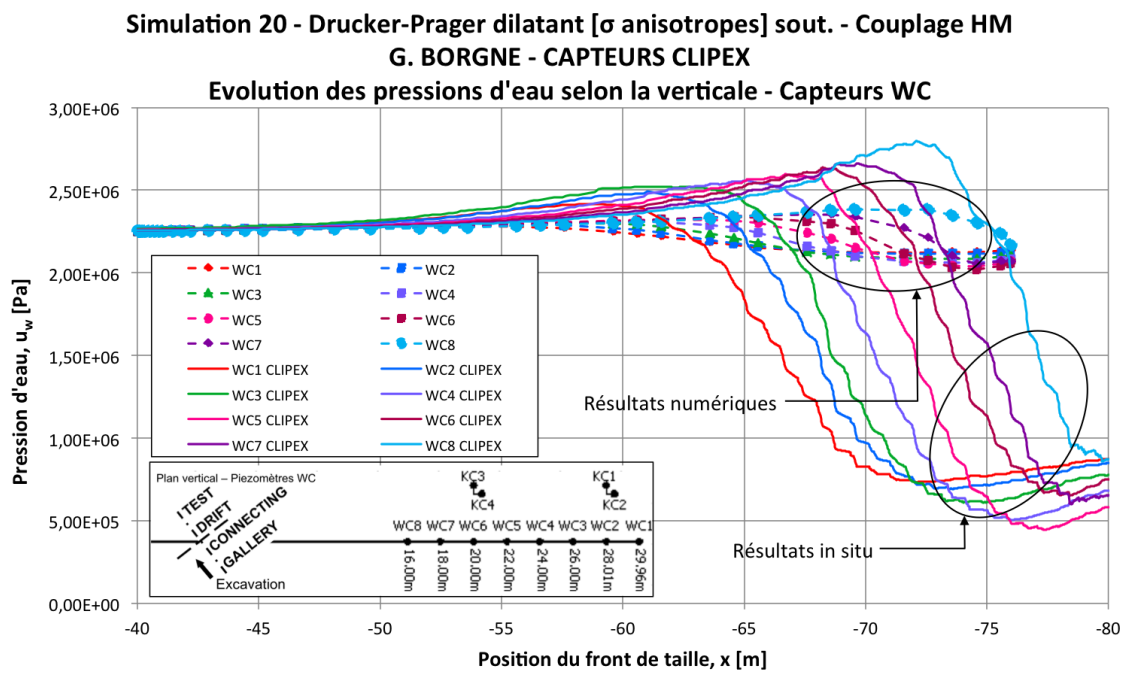
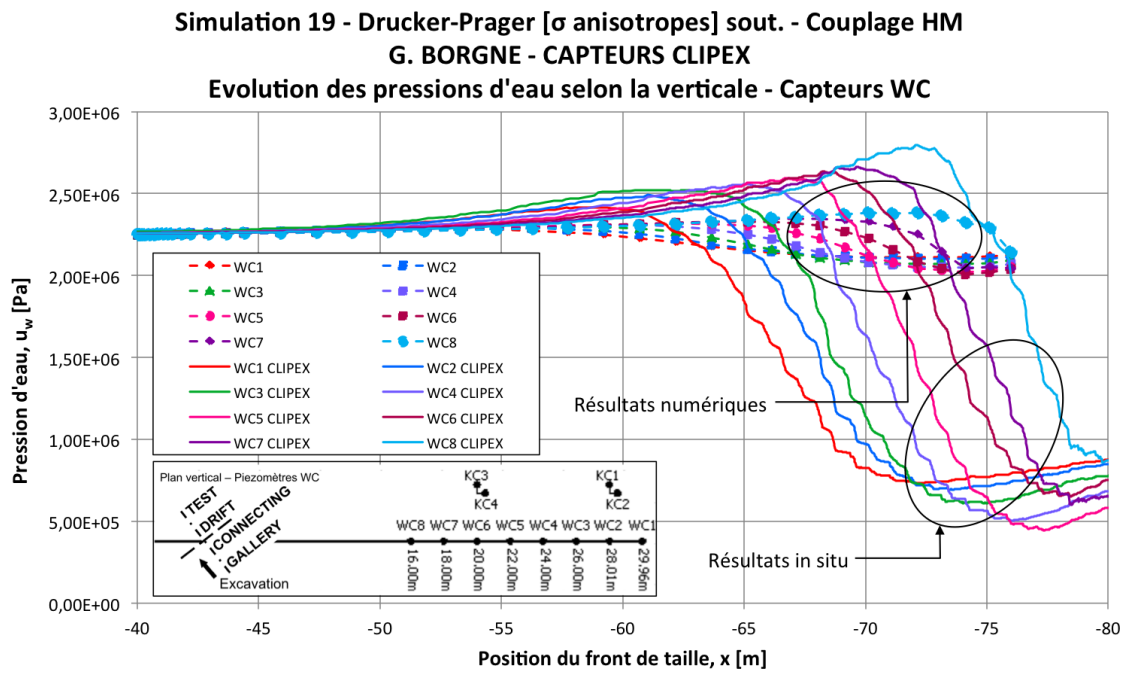
### 3.2.6.1 Etude de la série WC

Les comparaisons sont fournies aux figures 3.40 à 3.43. Notons qu'elles ne fournissent pas de données numériques au-delà de -75 m, ce qui concorde avec la modélisation de la galerie borgne où les 15 derniers mètres ne sont pas excavés.



**Figure 3.40** – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 18 - Série WC.

**Analyse des résultats** L'évolution des pressions d'eau "numériques" suit une tendance semblable aux mesures in situ, ceci est aisément observable à la figure 3.43. Un capteur voit la pression d'eau suivre une légère phase de croissance pour ensuite décroître plus fortement, jusque cinq fois plus faibles que la pression initiale. On assiste en dernier lieu à une légère remontée. Le déphasage existant entre les piezomètres est lié à la distance qui les sépare. On constate néanmoins une divergence très marquée entre les valeurs pour la



plupart des simulations, tout comme pour le programme CLIPEX.

Le cas élasto-plastique appliqué dans un massif en état de contrainte isotrope présente en effet un "fuseau" de pressions très étroit (cf. figure 3.40). L'introduction de l'anisotro-

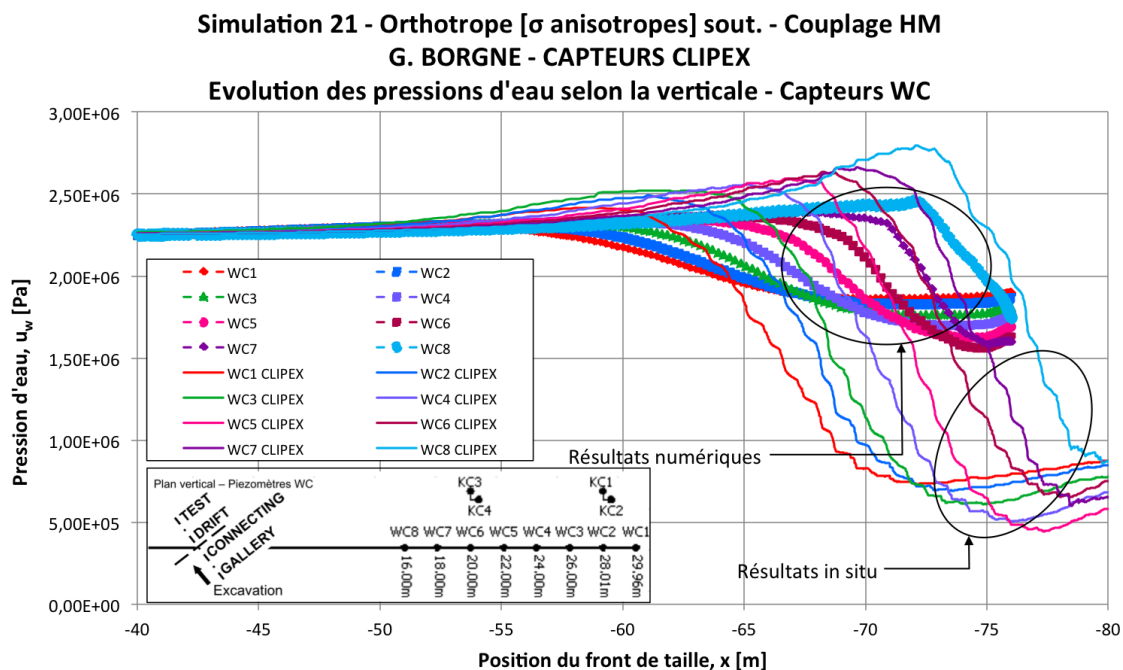


Figure 3.43 – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 21 - Série WC.

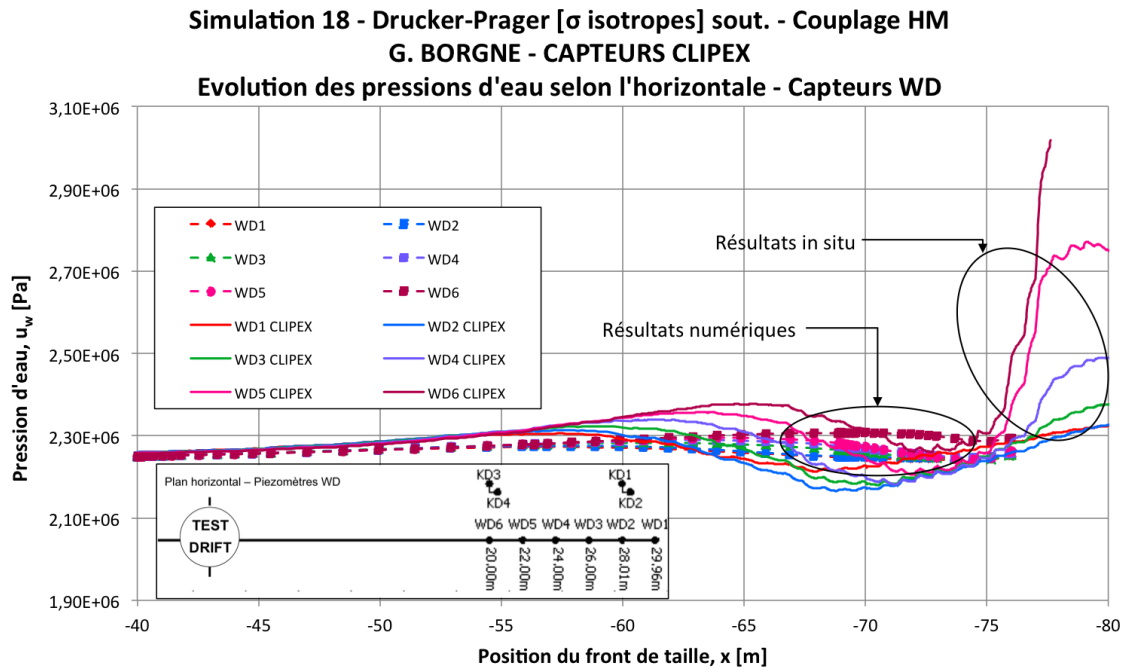
pie des contraintes améliore légèrement la situation. La dilatance du matériau contribue également à se rapprocher de la réalité, mais cela reste marginal. Nous réalisons une avancée significative en introduisant le comportement anisotrope du matériau. La figure 3.43 montre en effet un éclatement du fuseau, plus proche de la réalité. La phase de croissance est toutefois moins bien approchée.

### 3.2.6.2 Etude de la série WD

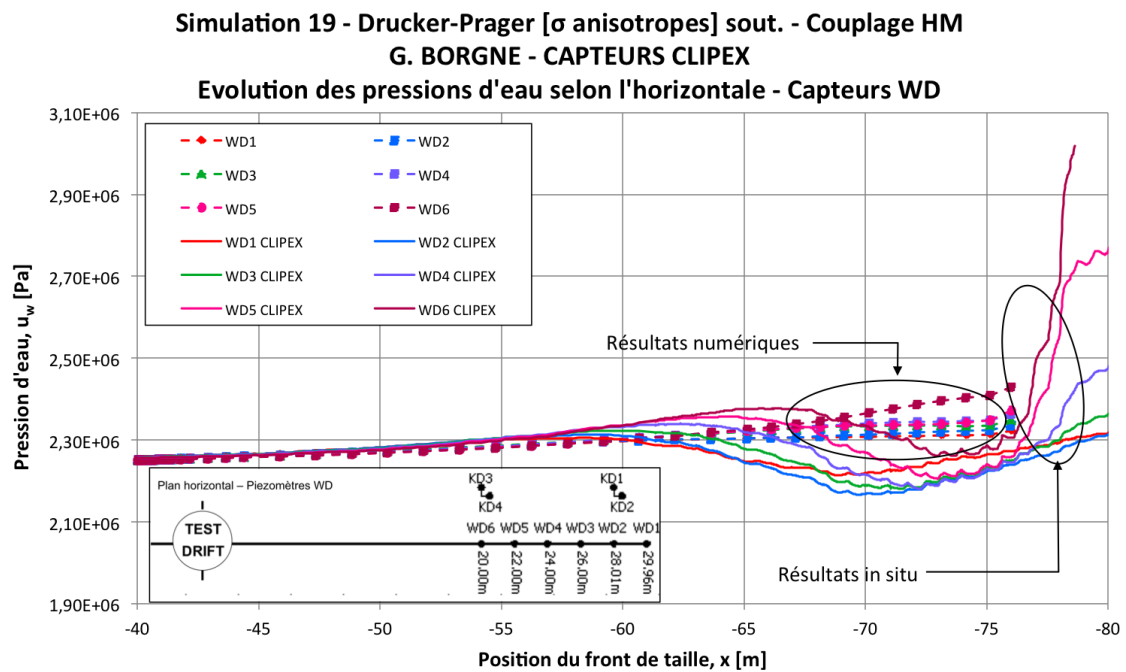
Les comparaisons en termes de pressions d'eau selon un plan horizontal sont fournies aux figures 3.44 à 3.47.

**Analyse des résultats** L'évolution des modèles conduit à reproduire de mieux en mieux la phase de montée en pression d'eau jusqu'à la phase décroissante qui elle, est mal simulée. Le modèle Orthotrope indique néanmoins l'apparition d'une phase décroissante bien qu'insuffisante.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des simulations est fortement éloigné de la réalité dans le plan horizontal perpendiculairement à la galerie de liaison.



**Figure 3.44** – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 18 - Série WD.



**Figure 3.45** – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 19 - Série WD.

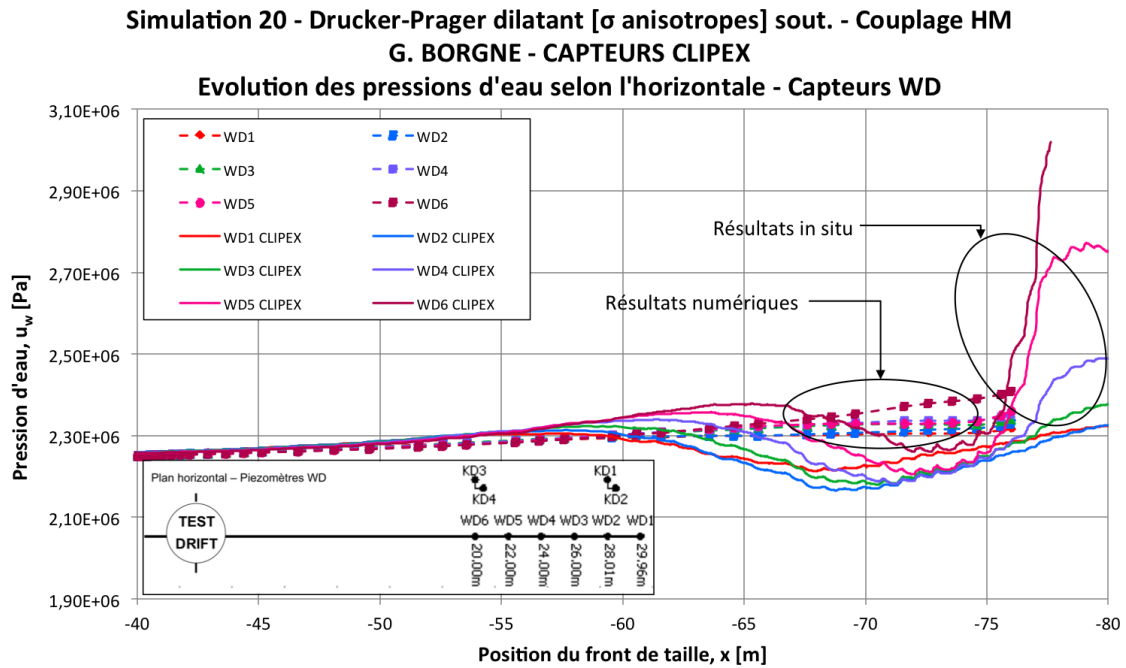


Figure 3.46 – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 20 - Série WD.

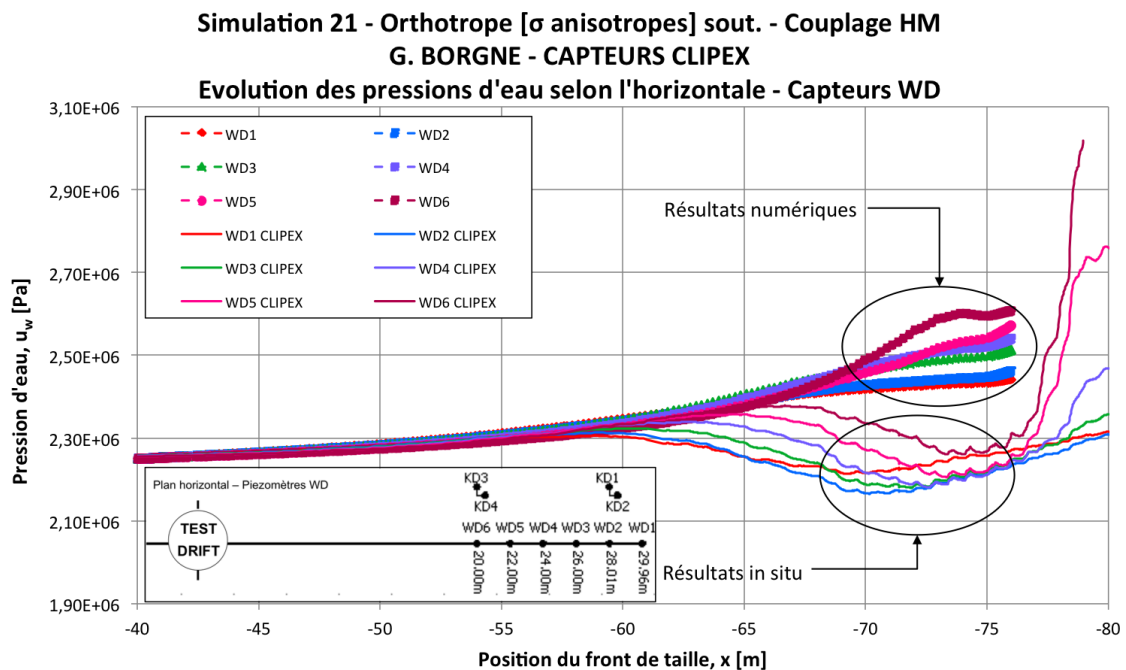


Figure 3.47 – Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 21 - Série WD.

### 3.2.6.3 Conclusion

La comparaison des quatre modèles tridimensionnels avec les données in situ, montre l'importance du comportement anisotrope du matériau pour mieux approcher la réponse réelle du massif.

Il convient toutefois de rappeler les mauvaises correspondances, essentiellement :

- sur la phase de montée en pression selon un plan vertical ;
- sur la phase de décroissance en pression selon un plan horizontal ;
- l'ordre de grandeur des variations des pressions ;

La tendance évolutive est néanmoins respectée dans chaque cas, mais la loi Orthotrope est celle qui se rapproche le plus du schéma de pression de pore.

## 3.3 Conclusion

La partie numérique du mémoire établit un cheminement destiné à l'apprentissage de la physique des phénomènes qui apparaissent lors de l'excavation d'une galerie dans un massif argileux. A terme, cette base sert à créer une modélisation plus complexe destinée à approcher au mieux le comportement réel du milieu en intégrant entre autres, certaines recommandations émises par le programme CLIPEX à la section 3.1.1.3.

La validation du modèle final à l'aide de données expérimentales permet de déterminer le degré de correspondance de celui-ci avec la réalité. Il en ressort que la modélisation 21, munie du modèle Orthotrope et d'une anisotropie de contraintes, apporte certaines améliorations intéressantes vis-à-vis de la modélisation de l'évolution des pressions de pore dans le milieu.

Notons que notre modèle final présente une loi d'écoulement interne isotrope, et considère une paroi de galerie non drainée. Il serait intéressant de réaliser une étude paramétrique sur base de ces propriétés en faisant varier les points suivants :

- implémenter le drainage en paroi ;
- introduire une anisotropie des écoulements internes ;
- étudier l'influence des paramètres géotechniques ;
- modifier la perméabilité en fonction du degré de plastification et de fracturation du milieu ;

---

## Conclusion générale

---

Cet exposé s'inscrit dans le cadre de la gestion des déchets radioactifs de haute activité à longue durée de vie. La solution actuellement préconisée en Belgique est l'enfouissement des colis en couches géologiques profondes peu perméables. Le choix de la géologie du site de stockage vise à former une barrière ultime face à toute migration accidentelle de radionucléides vers la biosphère.

Outre les prolégomènes destinés à caractériser le contexte dans lequel notre étude évolue, le plan de notre travail comporte deux chapitres principaux. Ceux-ci se placent dans la logique de démonstration de la faisabilité et de la fiabilité à long terme de la technique d'enfouissement.

∴

La première phase de recherche présentée au chapitre 2, se concentre sur une étude expérimentale destinée à caractériser le comportement hydro-mécanique non drainé de l'argile de Boom. Cette argile peu indurée et plastique est présente sur le site de Mol à une profondeur de 185 à 287 m sous sa forme la plus argileuse. La caractérisation est réalisée par la création d'une courbe de rétention par séchage. Pour ce faire, nous avons placé 41 éprouvettes d'argile au sein de chambres hermétiques dont nous fixons l'humidité relative à l'aide d'une sélection de solutions salines particulières. Les échanges hydriques se stabilisaient après un certain temps, ce qui se traduisait par l'obtention d'un point de la courbe. Cette dernière exprime en effet une relation entre la teneur en eau du matériau, aisément mesurable à l'aide de la masse sèche de l'échantillon, et la succion totale imposée à celui-ci. La succion est calculée par la relation de Kelvin sur base de l'humidité relative ambiante.

Les résultats obtenus au terme de cette première phase ont été relativement proches de ce que la littérature propose. En résumé, le matériau présente une teneur en eau de près de 25% lorsqu'il est saturé, cette teneur descend à 15% lorsque l'humidité relative ambiante est de l'ordre de 90%, et elle atteint 4% de teneur en eau lorsque l'environnement est à 35% d'humidité relative. On en mesure donc une évolution non linéaire. Suite à certaines adaptations, il nous a été également possible d'exprimer cette courbe en fonction du degré de saturation des échantillons, déduit grâce aux dimensions mesurées à chaque stabilisation. Ces résultats sont à relativiser compte tenu des erreurs de mesures inévitables pour des éprouvettes de cette taille.

Ces mesures réalisées selon plusieurs orientations ont été exploitées pour mettre en évidence un comportement anisotrope de l'argile de Boom. L'exploitation de ces données a

montré que la stratification du matériau, soit l'anisotropie structurelle de l'argile de Boom, influence de manière significative la déformation des éprouvettes lors du séchage. Lors de ce séchage, l'argile se contracte plus dans la direction perpendiculaire au litage que dans la direction de ce dernier. Initialement de sections droites circulaires, les éprouvettes finissaient avec une section droite elliptique. La contraction différentielle du matériau a été traduite par l'expression de pseudo-modules élastiques orthotropes et comparée aux résultats proposés par divers auteurs. Le rapport de déformation existant entre les deux directions principales sont estimées à un facteur 2, dans une gamme de température et d'humidité relative habituelle.

∴

La seconde phase de recherche présentée au chapitre 3 vise à étudier par l'intermédiaire de modélisations numériques le comportement global du massif accueillant les installations d'enfouissement. Il a été proposé d'étudier le comportement hydro-mécanique non saturé du massif argileux lors de l'excavation de la galerie de liaison, galerie réalisée entre 2000 et 2002, lors de l'extension du laboratoire souterrain HADES à Mol - Belgique.

L'étude présentait tout un cheminement destiné à identifier et comprendre la physique des phénomènes présents au sein du massif lors de l'excavation de la galerie de liaison. Les démarches intégraient successivement à l'aide de 21 modélisations, les phénomènes de plasticité, d'anisotropie de contraintes, d'écrouissage de l'angle de frottement, de pose d'un soutènement, de couplage hydro-mécanique non saturé, et l'anisotropie du matériau. Au terme de cette phase préliminaire, nous avons proposé un modèle tridimensionnel relativement proche de la réalité, intégrant l'anisotropie des contraintes et pouvant intégrer le comportement anisotrope de l'argile de Boom. Ceci est réalisé par l'intermédiaire d'une loi constitutive orthotrope basée sur le modèle de Drucker-Prager.

Les résultats finaux obtenus ont été comparés à la phase préliminaire et répondaient aux prédictions de celles-ci. Il convenait ensuite de confronter les résultats numériques aux données in situ collectées lors du creusement de la galerie de liaison. Afin de réduire le domaine d'investigation, nous nous sommes limités à étudier l'évolution des pressions de pore au sein du massif pour certains capteurs. Cet aspect souffrait en effet de problèmes de divergence entre les résultats de simulations anciennement réalisées et les données in situ.

La confrontation entre les valeurs expérimentales et le modèle final a mis en évidence le caractère bénéfique de l'anisotropie du matériau sur la correspondance entre la réalité et le modèle. Celui-ci est pourtant loin de reproduire la réponse réelle de la roche hôte, mais apporte certaines pistes d'investigations, telles que :

- l'implémentation d'un drainage en paroi ;
- l'introduire d'une anisotropie des écoulements internes ;
- étudier l'influence des paramètres géotechniques ;
- modifier la perméabilité en fonction du degré de la perturbation du milieu, voire de la fracturation de celui-ci, ce qui traduit le concept d'EdZ ;

Il est bien sûr possible de se référer aux recommandations proposées en conclusion du programme CLIPEX.

∴

L'intérêt pour ce sujet est accru par son actualité prégnante. Il est en effet fréquent que le nucléaire fasse l'objet de toutes les attentions médiatiques, politiques et citoyennes, tant les impacts environnementaux et sociaux sont considérables pour chacun. Les catastrophes récentes témoignent du risque encouru si cette énergie n'est pas traitée avec tous les égards et la dextérité qu'elle demande.

Par conséquent, il nous a semblé opportun de mettre à profit la dynamique de recherche exigée par le travail de fin d'études pour étudier un domaine substantiel dans le cadre du traitement des déchets nucléaires. Parce qu'il s'agit d'une énergie pouvant contribuer au mieux être de tous ou être, au contraire, un élément destructeur de notre environnement, cette ressource énergétique nécessite dans son utilisation une implication responsable des opérateurs politiques et techniques dont les ingénieurs occupent une place de premier plan.

---

## Table des figures

---

1.1	Consommation d'énergie primaire dans le monde en 2010 [BP, 2011]. . . . .	3
1.2	Evolution de la production électrique nucléaire dans le monde de 1971-2010 et production électrique mondiale en 2010 par carburant [IEA, 2012]. . . . .	3
1.3	Nombre de réacteurs et leur statut dans le monde en 2013 [IAEA/PRIS, 2013].	4
1.4	Répartition de la production électrique belge en 2009 par carburant [WNA, 2013a]. . . . .	5
1.5	Organisation du cycle du combustible nucléaire en Belgique [Synatom, 2013c].	6
1.6	Production mondiale d'uranium en 2011 [WNA, 2012]. . . . .	8
1.7	Confinement des déchets de catégorie A - Projet cAt ONDRAF - Dessel, Belgique [ONDRAF/NIRAS, 2010]. . . . .	12
1.8	Étapes caractéristiques du fonctionnement du système de dépôt et fonctions de sûreté associée [EURIDICE, 2011]. . . . .	14
1.9	Architecture du superconteneur [EURIDICE, 2011]. . . . .	14
1.10	Laboratoire souterrain HADES - Mol, Belgique. . . . .	15
1.11	Coupe dans le bouclier du tunnelier, montrant sa forme conique, ses coupeaux ajustables pour définir la sur-excavation et la sur-excavation totale (pas à l'échelle) [Bastiaens et al., 2003]. . . . .	16
1.12	(a) Coupe montrant les infrastructures souterraines; (b) Tunnelier; (c) Haveuse; (d) Soutènement en blocs et clefs; (e) Galerie de liaison terminée [Bastiaens et al., 2003] [Bastiaens et Bernier, 2005]. . . . .	16
1.13	CLIPLEX, programme d'instrumentation [Bernier et al., 2007]. . . . .	17
1.14	(a) Placement de deux piézomètres parallèles dans la galerie de liaison, (b) 4 forages instrumentés, 2 récepteurs et 3 émetteurs dans chacun et forage central [EURIDICE, 2004d]. . . . .	19
2.1	Localisation des affleurements d'Argile de Boom et profondeur de la couche argileuse en Belgique [Baekelandt et al., 2001]. . . . .	21
2.2	Profil lithostratigraphique de l'argile de Boom et variations lithologiques [Baekelandt et al., 2001]. . . . .	22
2.3	(a) Vue générale de l'argilière de Kruibeke avec la structure en bande de l'argile de Boom [PlanDéchets, 2011], (b) Discontinuités structurales (failles) dans l'argilière de Marke, argile Yprésienne [PlanDéchets, 2011]. . . . .	25
2.4	(a) Extension de l'EDZ dans le plan vertical [EURIDICE, 2004c], (b) Fractures observées dans un forage de reconnaissance lors du creusement de la galerie de liaison [EURIDICE, 2004c]. . . . .	26
2.5	(a) Forces intermoléculaires sur une particule d'eau; (b) Phénomène capillaire; (c) Sol granulaire; (d) Sol argileux [Gerard, 2011]. . . . .	28
2.6	Enceinte hermétique $n^{\circ}5$ utilisée pour maintenir une humidité relative constante.	31

2.7	(a) Eprouvette d'argile de Boom dotée d'un léger renforcement utilisé comme référence d'orientation ; (b) Position des mesures réalisées ; (c) Hauteur mesurée ; (d) Diamètres mesurés ; (e) Eprouvette d'argile plate triangulaire ; (f) Principe d'identification des éprouvettes. . . . .	33
2.8	Exemple d'éprouvettes au terme d'un passage en enceinte - Lot 2/Série 3/Eprouvettes 1-3. . . . .	33
2.9	Courbes de rétention en eau, (a) [Volckaert et al., 1996] à 20°C, (b) [Lima et al., 2012] en séchage. . . . .	35
2.10	Evolution de l'humidité relative des enceintes au cours des deux campagnes d'essais. . . . .	36
2.11	Evolution de la succion en fonction de l'humidité relative des enceintes et de la température du laboratoire au cours des deux campagnes d'essais. . .	37
2.12	Courbe de rétention en eau du Lot A et comparaison aux références - Teneur en eau. . . . .	38
2.13	Courbe de rétention en eau du Lot B - Teneur en eau et degré de saturation - Approche de Genuchten. . . . .	39
2.14	Courbe de rétention en eau du Lot B et comparaison au Lot A et aux références - Teneur en eau et degré de saturation - Approche de Genuchten. . .	40
2.15	Influence géométrique des éprouvettes sur la courbe de rétention. . . . .	41
2.16	Traces stratigraphiques mises à jour au terme du séchage - Lot B - Série 4. . .	42
2.17	Déformations de la série B.1.x au cours du séchage. . . . .	42
2.18	Déformations de la série B.2.x au cours du séchage. . . . .	44
2.19	Déformations de la série B.3.x au cours du séchage. . . . .	45
2.20	Déformations de la série B.4.x au cours du séchage. . . . .	46
2.21	Déformations de la série B.9.x au cours du séchage. . . . .	46
2.22	Sélection et conversion des données expérimentales traitées à la figure 2.23. . .	47
2.23	Synthèse des déformations des échantillons d'argile de Boom à la suite du séchage. . . . .	47
2.24	Evolution du ratio $\alpha = \epsilon_{\perp}/\epsilon_{\parallel}$ et des pseudo-modules orthotropes $E_{\perp}$ et $E_{\parallel}$ . . .	49
2.25	Evolution de l'indice des vides en parallèle avec les déformations volumiques en fonction de la succion, (a) en base logarithmique 10, (b) en base logarithmique népérienne. . . . .	49
2.26	Etude qualitative de la déformation des éprouvettes d'argile de Boom lors du séchage. (a) Schéma explicatif des observations, (b) localisation des prises de mesures, (c) exemple d'observation sur la série B.4.x. . . . .	50
2.27	Mise en évidence de plans de fracturations inclinés à la suite du séchage. . .	51
3.1	Comparatif des résultats des cas Tests 1 & 2 pour le déplacement radial - (a) Test 1 Mohr-Coulomb ; (b) Test 2 avec Gap Mohr-Coulomb ; (c) Test 2 avec Gap Cam-Clay Modifié, sélection depuis [Bernier et al., 2007]. . . . .	54
3.2	Représentation des domaines modélisés dans le cadre des prédictions à l'aveugle du programme CLIPEX - (a) SCK•CEN ; (b) GEOCONTROL ; (c) UPM ; (d) G3S [Bernier et al., 2007]. . . . .	55
3.3	Comparatif des surfaces de plasticité entre les lois constitutives de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager et Van-Eekelen. . . . .	59
3.4	Evolution de la cohésion selon $\alpha_{\sigma_1}$ dans la loi Orthotrope [François et al., 2012]. . . . .	62
3.5	Modèle bi-dimensionnel A - (a) Géométrie, appuis et conditions limites ; (b) Maillage et coupes étudiées. . . . .	63

3.6	Modèle bi-dimensionnel B - (a) Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle); (b) Maillage et coupes étudiées. . . . .	63
3.7	Modèle tri-dimensionnel C - Maillage complet de la galerie borgne. . . . .	64
3.8	Modèle tri-dimensionnel C - Coupe XY- (a) Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle); (b) Maillage et coupes étudiées. . . . .	64
3.9	Modèle tri-dimensionnel C - Coupe YZ- Géométrie, appuis et conditions limites (Pas à l'échelle). . . . .	65
3.10	Justificatif de l'emploi d'une galerie borgne. (a) Galerie sans fond, (b) avec fond et force surfacique simulant la présence virtuelle de roche. . . . .	65
3.11	Résultats de la simulation 1 - Zoom au niveau de la galerie - (a) $\sigma_X$ , (b) $\sigma_Y$ , (c) $d_X$ , (d) $d_Y$ . . . . .	67
3.12	Résultats de la simulation 1 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	67
3.13	Résultats de la simulation 1 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	68
3.14	Résultats de la simulation 1 - (a) Contraintes Zoom C1 en bordure de domaine, (b) Contraintes Zoom C2 en parois de galerie, (c) Contraintes Zoom C3 en parois de galerie, (d) Contraintes dans le plan p-q, (e) Déplacements Zoom D1 en bordure de domaine, (f) Déplacements Zoom D2 en paroi de galerie. . . . .	69
3.15	Résultats de la simulation 2 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	71
3.16	Résultats de la simulation 2 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	71
3.17	Résultats de la simulation 2 - (a) Contraintes Zoom C1 en bordure de domaine, (b) Contraintes Zoom C2 en parois de galerie, (c) Contraintes Zoom C3 en parois de galerie, (d) Contraintes dans le plan p-q. . . . .	72
3.18	Résultats de la simulation 3 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	74
3.19	Résultats de la simulation 4 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	75
3.20	Résultats de la simulation 3 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	75
3.21	Résultats de la simulation 4 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	76
3.22	Résultats des simulations 3 & 4 - (a) Contraintes dans le plan p-q de la simulation 3, (b) Contraintes dans le plan p-q de la simulation 4. . . . .	76
3.23	Résultats de la simulation 5 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	78
3.24	Résultats de la simulation 6 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	78
3.25	Résultats de la simulation 7 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	80
3.26	Résultats de la simulation 9 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	82
3.27	Résultats de la simulation 10 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	82
3.28	Résultats de la simulation 11 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	84
3.29	Résultats de la simulation 14 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	86
3.30	Résultats de la simulation 15 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ . . . . .	87

3.31	Résultats de la simulation 15 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	88
3.32	Résultats de la simulation 16 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ . . . . .	89
3.33	Résultats de la simulation 17 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ . . . . .	90
3.34	Résultats de la simulation 19 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ en $Z = 20m$ . . . . .	92
3.35	Résultats de la simulation 19 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ en $Z = 43m$ . . . . .	93
3.36	Résultats de la simulation 20 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ en $Z = 20m$ . . . . .	94
3.37	Résultats de la simulation 21 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ en $Z = 20m$ . . . . .	95
3.38	Résultats de la simulation 21 - Evolution des contraintes effectives radiales, orthoradiales et de la pression d'eau selon $r$ en $Z = 43m$ . . . . .	95
3.39	Résultats in situ de l'évolution des pressions d'eau au cours de l'excavation de la galerie de liaison - (a) série WC verticale, (b) série WD horizontale [Bernier et al., 2007]. . . . .	97
3.40	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 18 - Série WC. . . . .	97
3.41	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 19 - Série WC. . . . .	98
3.42	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 20 - Série WC. . . . .	98
3.43	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 21 - Série WC. . . . .	99
3.44	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 18 - Série WD. . . . .	100
3.45	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 19 - Série WD. . . . .	100
3.46	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 20 - Série WD. . . . .	101
3.47	Comparaison des mesures in situ avec les résultats numériques de la simulation 21 - Série WD. . . . .	101
5.1	Localisation des laboratoires en Europe et Amérique du Nord [Lebon, 2009].	119
5.2	Stockage des déchets radioactifs de catégories B & C - Belgique [EURIDICE, 2010]. . . . .	119
5.3	Position des capteurs du programme de recherches CLIPEX [Bernier et al., 2007]. . . . .	120
5.4	Âges géologiques [Dejonghe, 2007]. . . . .	121
5.5	Laboratoire d'enceintes hermétiques isothermes - Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées - 1) $K_2SO_4$ ; 2) $ZnSO_4$ ; 3) $KCl$ ; 4) $NaCl$ ; 5) $NH_4NO_3$ ; 6) $Ca(NO_3)_2$ ; 7) $MgCl_2$ . . . . .	121
5.6	Observation de la stratification des éprouvettes au terme du séchage. . . . .	125
5.7	Résultats du cas Test 1 pour un modèle de Mohr-Coulomb [Bernier et al., 2007]. . . . .	126
5.8	Résultats du cas Test 2 en termes de déplacement radial - Comparaison des modèles de Mohr-Coulomb et Cam-Clay Modifié [Bernier et al., 2007]. . . . .	126
5.9	Comparatif d'études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini. . . . .	131

5.10	Comparatif d'études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini - Zooms. . . . .	131
5.11	Evolution des contraintes initiales anisotropes dans le massif - $K_0 = 0,8$ et $\sigma_0 = 2,25MPa$ . . . . .	132
5.12	Evolution des contraintes selon le modèle analytique de convergence/confinement - Domaine fini. . . . .	133
5.13	Résultats de la simulation 5 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	134
5.14	Résultats de la simulation 6 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	134
5.15	Résultats de la simulation 8 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	135
5.16	Résultats de la simulation 7 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	135
5.17	Résultats de la simulation 8 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	136
5.18	Résultats de la simulation 11 - Evolution des déplacements selon $r$ . . . . .	136
5.19	Résultats de la simulation 13 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon $r$ . . . . .	137
5.20	Résultats de la simulation 21 - (a) $dx$ , (b) $dy$ , (c) $dz$ , (d) $u_w$ , (e) $\sigma_X$ , (f) $\sigma_Y$ , (g) $\sigma_Z$ , et (h) déplacement au front de taille. . . . .	138

---

## Liste des tableaux

---

1.1	Liste des réacteurs nucléaires belges actifs et arrêtés en 2012 [WNA, 2013a] [SPFEconomie, 2013]. . . . .	5
1.2	Classification des sites accueillant des substances radioactives selon l'ONDRAF [InventaireDéchets, 2013]. . . . .	6
1.3	Classification des déchets radioactifs selon l'ONDRAF [ONDRAF/NIRAS, 2013a]. . . . .	9
1.4	Liste des capteurs au fond de la galerie TEST dans le cadre du projet CLIPEX [Bernier et al., 2007]. . . . .	18
2.1	Revue bibliographique des proportions minéralogiques de l'Argile de Boom selon [Dizier, 2011]. . . . .	23
2.2	Revue bibliographique des paramètres géotechniques de l'Argile de Boom selon [Dizier, 2011]. . . . .	24
2.3	Masses et dimensions initiales, et masse sèche des éprouvettes des deux campagnes d'essais. . . . .	34
2.4	Sélection de l'humidité relative des sept chambres - Sels et valeurs théoriques attachées (à 20°C) [Volckaert et al., 1996] [IBN, 2000]. . . . .	36
2.5	Paramètres d'expérimentation des courbes de rétention en eau. . . . .	38
3.1	Revue bibliographique des paramètres employés dans les modélisations à l'aveugle du programme CLIPEX par SCK•CEN, GEOCONTROL, UPM et G3S [Bernier et al., 2007]. . . . .	56
3.2	Comparaisons des propriétés principales de chaque modèle de prédiction à l'aveugle réalisé dans le cadre du programme CLIPEX [Bernier et al., 2007].	57
3.3	Liste des simulations réalisées dans le cadre du développement d'un modèle final 3-D implémentant une loi constitutive dotée du comportement anisotrope de l'argile de Boom et une anisotropie de contraintes au sein du massif argileux. . . . .	58
3.4	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 1 - Elastique linéaire à contraintes isotropes. . . . .	66
3.5	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 2 - Elastique linéaire à contraintes anisotropes. . . . .	70
3.6	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 3 & 4 - Orthotrope modifié élastique à contraintes isotropes & anisotropes [François et al., 2012]. . . . .	74
3.7	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 5 & 6 - Mohr-Coulomb à contraintes isotropes & anisotropes. . . . .	77

3.8	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 7 & 8 - Mohr-Coulomb à contraintes isotropes & anisotropes. . . . .	80
3.9	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques des simulations 9 & 10 - Drucker-Prager et Van-Eekelen à contraintes anisotropes. . . . .	81
3.10	Paramètres du modèle et propriétés géotechniques de la simulation 11 - Orthotrope à contraintes anisotropes [François et al., 2012]. . . . .	83
3.11	Paramètres mécaniques du soutènement [Bastiaens et al., 2003]. . . . .	85
3.12	Paramètres d'écoulement interne isotrope. . . . .	87
3.13	Paramètres du modèle de la simulation 18. . . . .	91
3.14	Paramètres du modèle de la simulation 19. . . . .	92
5.1	Comparatif d'études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini. .	130
5.2	Comparatif d'études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini. .	133

---

## Liste des abréviations

---

AFCN	Agence fédérale de Contrôle nucléaire (Belgique)
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique (Autriche)
CLIPEX	CLay Instrumentation Programme for the EXtension of an underground research laboratory
EB	Etat belge
Euratom	Communauté européenne pour l'énergie atomique
EURIDICE	European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in a Clay Environment
FBFC	Franco-belge de fabrication de combustibles (France)
FBFC	International Franco-belge de fabrication de combustibles International (Belgique)
GIE	Groupement d'intérêt économique
HADES	High-Activity Disposal Experimental Site
IRE	Institut national des radioéléments (Belgique)
MOX	Mixed Oxide
ONDRAF	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (Belgique)
PRACLAY	Preliminary Demonstration Test for Clay Disposal
SCK•CEN	Studiecentrum voor Kernenergie / Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (Belgique)

---

## Bibliographie

---

- [Abels et al., 2007] H.A. Abels, S. Van Simaey, F.J. Hilgen, E. De Man, et N. Vandenberghe. *Obliquity-dominated glacio-eustatic sea level change in the early Oligocene : evidence from the shallow marine silicatic Rupelian stratotype (Boom Formation, Belgium)*. Terra Nova, v19, 2007.
- [Aertsens et al., 2004] M. Aertsens, I. Wemaere, et L. Wouters. *Spatial variability of transport parameters in the Boom Clay*. Applied Clay Science, 26, 2004.
- [AFCN, 2013a] AFCN. *Doel 3 and Tihange 2 reactor pressure vessels - Provisional evaluation report*. Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire, 2013a.
- [AFCN, 2013b] AFCN. Ines (international nuclear event scale), 2013b. <http://fanc.fgov.be/>.
- [Al-Mukhtar et al., 1996] M.A. Al-Mukhtar, N. Belanteur, D. Tessier, et S.K. Vanapalli. *The fabric of a clay under controlled mechanical and hydraulic stress states*. Applied Clay Science, 11, 1996.
- [Alheid et al., 2005] H.J. Alheid, J.F. Aranyossy, P. Blumling, N. Hoteit, et M. Van Geet. *EDZ Development and evolution (WP 4.1) - State of the Art Report*. BGR, ANDRA, NAGRA, SCK-CEN, 2005.
- [Baekelandt et al., 2001] L. Baekelandt, J. Bel, J.P. Boyazis, D. Brosemer, W. Cool, C. Cossemans, P. De Preter, L. Dujacquier, L. Froment, R. Gens, P. Kunsch, P. Lalieux, J. Lenssens, L. Van Cauteren, L. Wouters, J. Marivoet, L. Ortiz, I. Wemaere, Th. Zeevaert, L. Sweeck, F. Bernier, et D. De Bruyn. *SAFIR2 : Safety Assessment and Feasibility Interim Report (SAFIR) 2*. ONDRAF/NIRAS, 2001.
- [Barnichon, 1998] J.D. Barnichon. *Finite Element Modelling in Structural and Petroleum Geology*. Université de Liège, 1998.
- [Bastiaens et Bernier, 2005] W. Bastiaens et F. Bernier. *25 years of underground engineering in a plastic clay formation : the HADES underground research facility*. EIG EURIDICE, 2005.
- [Bastiaens et al., 2003] W. Bastiaens, F. Bernier, M. Buyens, M. Demarche, X.L. Li, J.-M. Linotte, et J.Verstricht. *The extension of the HADES underground research facility at Mol, Belgium - The construction of the connecting gallery, report 03-294*. GIE EURIDICE, 2003.
- [Bastiaens et al., 2007] W. Bastiaens, F. Bernier, et X.L. Li. *SELFRAC : Experiments and conclusions on fracturing, self-sealing processes in clays*. Physics and Chemistry of the earth, 32, 2007.
- [Bergerat et Vandycke, 1994] F. Bergerat et S. Vandycke. *Paleostress analysis and geodynamical implications of Cretaceous - Tertiary faulting in Kent and the Boulonnais*. Journal of the geological society, London, 151, 1994.

- [Bernier et al., 2007] F. Bernier, X.L. Li, J. Verstricht, J.D. Barnichon, V. Labiouse, et W. Bastiaens. *CLIPLEX : Final Report of the CLay Onstrumentation Programme for the EXtension of an underground research laboratory*. GIE EURIDICE, ANDRA, G3S, ENRESA, GEOCONTROL et U.P.M., 2007.
- [Bernier et al., 2004] F. Bernier, X.L. W. Bastiaens, et L. Ortiz. *SELFRAC : Final Technical Publishable Report*. GIE EURIDICE, 2004.
- [BP, 2011] BP. *BP Statistical Review of World Energy*. British Petroleum, 2011.
- [CE2030, 2007] CE2030. *Commission Energy 2030 - Final Report - Executive Summary*. Commission Energy 2030, 2007.
- [Charlier et al., 1999] R. Charlier, F. Collin, X.L. Li, et J.P. Radu. *Review of the benchmarks of the CATSIUS CLAY project*. Université de Liège, 1999.
- [Collin et al., 2010] F. Collin, D. Caillerie, et R. Chambon. *General solutions of the thick-walled cylinder problem in an isotropic elastic micromorphic medium*. Université de Liège, Grenoble Université Joseph-Fourier, 2010.
- [Craen et al., 1999] M. De Craen, R. Swennen, et E. Keppens. *Petrography and geochemistry of septarian carbonate concretions from the Boom Clay Formation (Oligocene, Belgium)*. Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw, 77, 1999.
- [Croisé et al., 2006] J. Croisé, G. Mayer, P. Marschall, J.M. Matray, T. Tanaka, et P. Vogel. *Gas Threshold Pressure Test Performed at the Mont Terri Rock Laboratory (Switzerland) : Experimental Data and Data ANALysis*. Colenco Power Engineering AG, NAGRA, IRSN, Obayashi Corporation, BGR, 2006.
- [Decler et Viaene, 1993] J. Decler et W. Viaene. *Rupelian Boom Clay as raw material for expanded clay manufacturing*. Applied Clay Minerals, 8, 1993.
- [Decler et al., 1983] J. Decler, W. Viaene, et N. Vandenberghe. *Relationship between chemical, physical and mineralogical characteristics of the Rupelian Boom Clay, Belgium*. Clay Mineral, 18, 1983.
- [Dehandschutter et al., 2005] B. Dehandschutter, S. Vandycke, M. Sintubin, N. Vandenberghe, et L. Wouters. *Brittle fractures and ductile shear bands in argillaceous sediments : interferences from Oligocene Boom Clay (Belgium)*. Journal of Structural Geology, 27, 2005.
- [Dejonghe, 2007] L. Dejonghe. *Guide de lecture des cartes géologiques de Wallonie*. Région Wallonne, 2007.
- [Delage et al., 1997] P. Delage, M.D. Howat, et Y.J. Cui. *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Soil Mechanics Research Centre (CERMES), Paris, France, 1997.
- [Delage et al., 2007] P. Delage, T.T. Le, A.M. Tang, Y.J. Cui, et X.L. Li. *Suction effects in deep Boom clay block samples*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (CERMES, Institut Navier), Paris, France ; EURIDICE Group, Mol, Belgium, 2007.
- [Dizier, 2011] A. Dizier. *Caracterisation des effets de temperature dans la zone endommagée autour de tunnels de stockage de déchets nucléaires dans des roches argileuses*. Université de Liège, 2011.
- [Echelpoel et Weedon, 1990] E. Van Echelpoel et G.P. Weedon. *Milankovitch cyclicity and the Boom Clay Formation : an Oligocene siliclastic shelf sequence in Belgium*. Geological Magazine, 127, 1990.
- [EURIDICE, 2004a] EURIDICE. Clipex, 2004a. [www.euridice.be/fr/ex\\_clipex.shtm](http://www.euridice.be/fr/ex_clipex.shtm).

- [EURIDICE, 2004b] EURIDICE. Connecting gallery, 2004b. [www.euridice.be/fr/ex\\_connGal.shtm](http://www.euridice.be/fr/ex_connGal.shtm).
- [EURIDICE, 2004c] EURIDICE. The connecting gallery, 2004c. [www.euridice.be/eng/ex\\_connGal.shtm](http://www.euridice.be/eng/ex_connGal.shtm).
- [EURIDICE, 2004d] EURIDICE. Selfrac, 2004d. [www.euridice.be/fr/ex\\_selfrac.shtm](http://www.euridice.be/fr/ex_selfrac.shtm).
- [EURIDICE, 2010] EURIDICE. *Recherches sur la sûreté et la faisabilité d'un dépôt final de déchets radioactifs*. GIE EURIDICE, 2010.
- [EURIDICE, 2011] EURIDICE. Objectifs et contenu du programme de r&d, 2011. <http://www.euridice.be/fr/02002programma.shtm>.
- [EURIDICE, 2012] EURIDICE. Missions de l'eig euridice, 2012. [www.euridice.be](http://www.euridice.be).
- [François et al., 2012] B. François, V. Labiouse, A. Dizier, F. Marinelli, R. Charlier, et F. Collin. *Hollow Cylinder Tests on Boom Clay : Modelling of Strain Localization in the Anisotropic Excavation Damaged Zone*. Springer-Verlag Wien, 2012.
- [Gerard, 2011] P. Gerard. *Impact des transferts de gaz sur le comportement poro-mécanique des matériaux argileux*. Université de Liège, 2011.
- [Horseman et al., 1987] S.T. Horseman, M.G. Winter, et D.C. Entwistle. *Geotechnical characterisation of Boom clay in relation to disposal of radioactive waste*. Publications of the European Communities, EUR 1087 EN, Luxembourg, 1987.
- [IAEA, 2012] IAEA. *Nuclear Technology Review*. International Atomic Energy Agency, 2012.
- [IAEA/PRIS, 2013] IAEA/PRIS. Base de données sur les réacteurs nucléaires, 2013. [www.iaea.org/pris/](http://www.iaea.org/pris/).
- [IBN, 2000] IBN. *Performance hygrothermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination des propriétés de sorption hygroscopique (ISO 12571 :2000)*. Institut belge de normalisation (IBN), 2000.
- [IEA, 2012] IEA. *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency, 2012.
- [IMO, 2013] IMO. London convention and protocol, 2013. [www.imo.org](http://www.imo.org).
- [InventaireDéchets, 2013] InventaireDéchets. *Synthèse du troisième rapport d'inventaire des passifs nucléaires de l'ONDRAF à sa tutelle (période 2008-2012)*. ONDRAF/NIRAS, 2013.
- [IRE, 2013] IRE. Présentation de l'ire, 2013. [www.ire.eu](http://www.ire.eu).
- [laradioactivite.com, 2013] laradioactivite.com. Problématique des déchets, 2013. [www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com).
- [Lebon, 2009] P. Lebon. *Laboratoires Souterrains Pour L'étude de Stockage Géologique Des Déchets à Vie longue*. Ed. Techniques Ingénieur, 2009.
- [Letsch et Sissing, 1983] W.J. Letsch et W. Sissing. *Tertiary stratigraphy of the Netherlands*. Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw, 62, 1983.
- [Lima et al., 2012] A. Lima, E. Romero, et Y. Pina. *Water retention properties of two deep Tertiary clay formations within the context of radioactive waste disposal*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [Massonet et Cescotto, 2001] C. Massonet et S. Cescotto. *Mécanique des matériaux*. Bibliothèques des Universités - Génie Civil - Université de Liège, 2001.
- [MB, 2003] MB. Loi. Economie, PME, Classes moyennes et Energie, 2003.

- [Mertens et al., 2003] J. Mertens, N. Vanderberghe, L. Wouters, et M. Sintubin. *The origin and development of joints in the Boom Clay Formation (Rupelian) in Belgium*. In : Van Rensbergen P., Hillis R.R, Maltman A.J., Morley C.K. (ed) *Subsurface Sediment Mobilization*. Geological Society, London, Special publications, 217, 2003.
- [OCDE, 2013] OCDE. A propos de l'ocde, 2013. [www.oecd.org](http://www.oecd.org).
- [ONDRAF/NIRAS, 2010] ONDRAF/NIRAS. *Master Plan - Le projet cAt à Dessel*. ONDRAF/NIRAS, 2010.
- [ONDRAF/NIRAS, 2011] ONDRAF/NIRAS. *Résumé exécutif du plan déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes, rapport NIROND 2011-04 F, 2011*. ONDRAF/NIRAS, 2011.
- [ONDRAF/NIRAS, 2013a] ONDRAF/NIRAS. Classification des déchets, 2013a. [www.ondraf.be/content/classification](http://www.ondraf.be/content/classification).
- [ONDRAF/NIRAS, 2013b] ONDRAF/NIRAS. Ondraf/niras, 2013b. [www.ondraf.be/content/volumes](http://www.ondraf.be/content/volumes).
- [ONU, 2013] ONU. La population mondiale devrait dépasser les 9 milliards de personnes en 2050, 2013. [www.un.org](http://www.un.org).
- [ONU, Février 2012] ONU. *Conférence des Nations-Unies sur le commerce et le développement*. Organisation des Nations-Unies, Février 2012.
- [PlanDéchets, 2011] PlanDéchets. *Plan déchets pour la gestion à long terme des déchets radioactifs conditionnés de haute activité et/ou de longue durée de vie et aperçu de questions connexes, rapport NIROND 2011-02 F, 2011*. ONDRAF/NIRAS, 2011.
- [Queneudec, 1965] J.P. Queneudec. *Le rejet à la mer des déchets radioactifs*, volume 11. *Annuaire français de droit international*, 1965.
- [Richards, 1941] L.A. Richards. *A pressure membrane extraction apparatus for soil solution*. *Soil science*, 51, 1941.
- [Schittekat et al., 1983] J. Schittekat, J.P. Henriët, et N. Vandenberghe. *Geology of the Scheldt Surge Barrier. Characteristics of an overconsolidated Clay*. In : 8th International Harbour Congress 2, Antwerp, 1983.
- [Simaëys et Vandenberghe, 2006] S. Van Simaëys et N. Vandenberghe. *Rupelian - Geological Belgica 9/1-2 : 95-101*. KULeuven, 2006.
- [SPFEconomie, 2013] SPFEconomie. La sortie du nucléaire, 2013. [economie.fgov.be](http://economie.fgov.be).
- [Stroobants et Cosnard, 2013] J.P. Stroobants et D. Cosnard. *La Belgique autorise GDF Suez à redémarrer deux centrales nucléaires*. *Le Monde*, 2013.
- [Synatom, 2013a] Synatom. Amont du cycle, 2013a. [www.synatom.be/fr/synatom-gere-1%E2%80%99amont-du-cycle-du-combustible](http://www.synatom.be/fr/synatom-gere-1%E2%80%99amont-du-cycle-du-combustible).
- [Synatom, 2013b] Synatom. Qui sommes-nous ?, 2013b. [www.synatom.be/fr/synatom-1](http://www.synatom.be/fr/synatom-1).
- [Synatom, 2013c] Synatom. Synatom gère l'aval du cycle du combustible, 2013c. [www.synatom.be/fr/synatom-gere-1%E2%80%99aval-du-cycle-du-combustible](http://www.synatom.be/fr/synatom-gere-1%E2%80%99aval-du-cycle-du-combustible).
- [Tada et Watanabe, 2005] S. Tada et K. Watanabe. *Dynamic determination of sorption isotherm of cement based materials*. *Cement and Concrete*, 35, 2005.
- [Vandenberghe et al., 1997] N. Vandenberghe, B. Laenen, E. Van Echelpoel, et D. Lagrou. *Cyclostratigraphy and climatic eustasy. Example of the Rupelian stratotype*. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Earth and Planetary Science*, 325, 1997.

- [Vaunat et al., 2000] J. Vaunat, E. Romero, et C. Jommi. *Elastoplastic modelling of deformation and hysteretic water changes in unsaturated soils*. Universitat Politècnica de Catalunya, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Politecnico di Milano, 2000.
- [Volckaert et al., 1996] G. Volckaert, F. Bernier, E. Alonso, A. Gens, J. Samper, M. Villar, P.L. Martin-Martin, J. Cuevas, R. Campos, H. Thomas, C. Imbert, et V. Zingarelli. *Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories (model development and validation) - Final report*. European Commission, 1996.
- [WNA, 2012] WNA. The nuclear fuel cycle, 2012. [world-nuclear.org](http://world-nuclear.org).
- [WNA, 2013a] WNA. Nuclear power in belgium, 2013a. [world-nuclear.org](http://world-nuclear.org).
- [WNA, 2013b] WNA. Nuclear power in the world today, 2013b. [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org).
- [Wouters et Vandenberghe, 1994] L. Wouters et N. Vandenberghe. *Géologie de la Campine - Essai de synthèse*. ONDRAF/NIRAS, 1994.

---

# Annexes

---

## 5.1 Introduction

### 5.1.1 Expériences menées à travers le monde

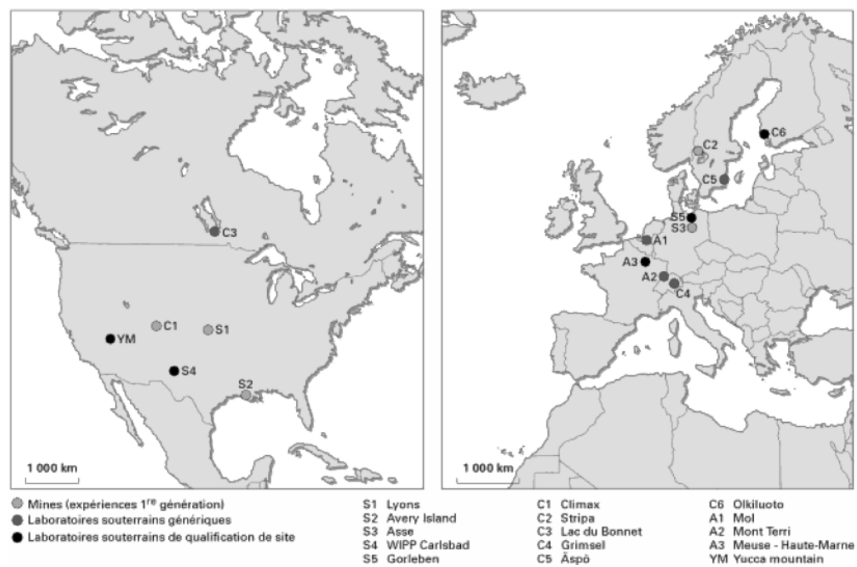


Figure 5.1 – Localisation des laboratoires en Europe et Amérique du Nord [Lebon, 2009].

### 5.1.2 Principe de stockage catégories B & C

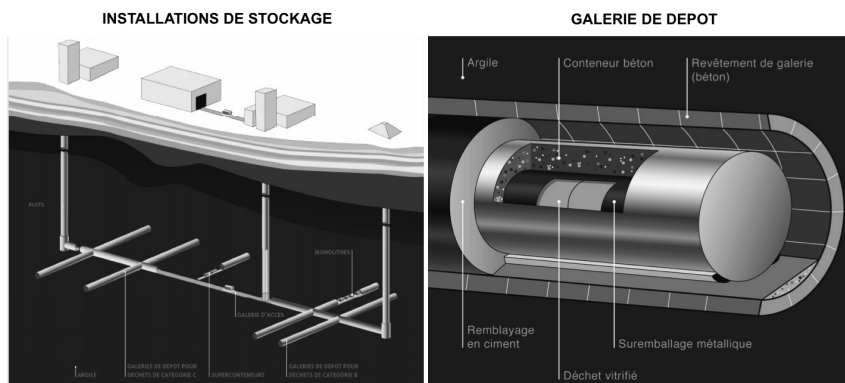


Figure 5.2 – Stockage des déchets radioactifs de catégories B & C - Belgique [EURIDICE, 2010].

5.1.3 Localisation des capteurs du programme CLIPEX

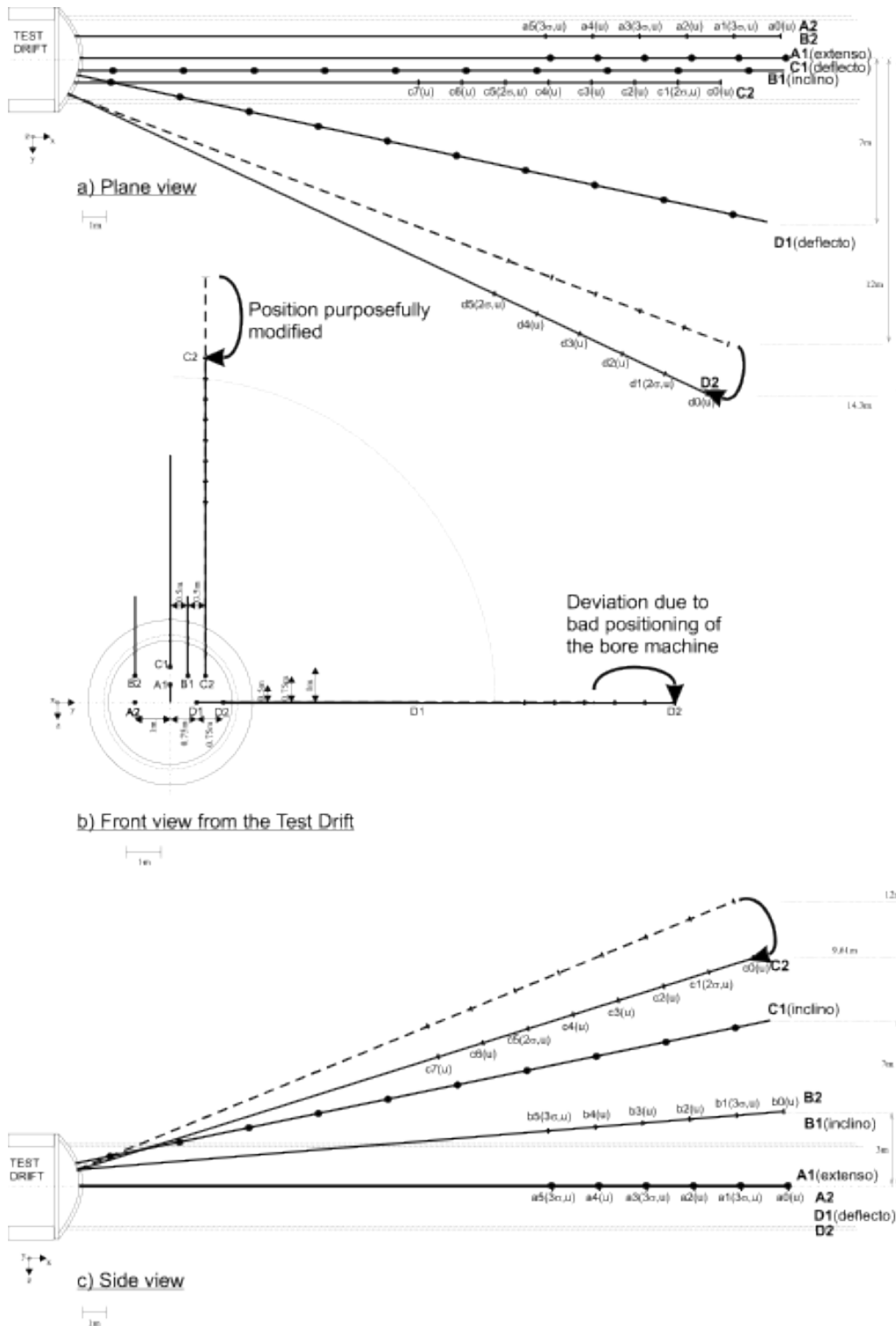


Figure 5.3 – Position des capteurs du programme de recherches CLIPEX [Bernier et al., 2007].

## 5.2 Etude expérimentale

### 5.2.1 Ages géologiques

ECHELLE STRATIGRAPHIQUE DE WALLONIE								
AGE Ma	ÈRE	SYSTÈME	SÉRIE	ÉTAGE	N° Fossile	ANCIENS NOMS	PHASES OROGÉNIQUES	
0.01	CÉNOZOÏQUE	QUATERNAIRE	HOLOCÈNE		41	FLANDRIEN	PYRÉNÉENNE  LARAMIENNE	
1.75			PLÉISTOCÈNE		39			40
5.1		NÉOGÈNE	PLIOCÈNE	PLAISANCIEN		37		SCALDISIEN
				ZANCLÉEN		38		DIESTIEN ANTWERPIEN
			MIOCÈNE	MESSINIEN		36		HOUTHALIENIEN
				TORTONIEN SERRAVALIEN LANGHÉN BURDIGALIEN AGUITANIEN		35		
23		PALÉOÈNE	OLIGOCÈNE	CHATTIEN RUPÉLIEN		34		
37			ÉOCÈNE	PRIABONIEN BARTONIEN LUTÉTIEN YPRESIEN		33		BRUXELLIEN
53				PALÉOCÈNE	THANÉTIEN SÉLANDIEN DANIEN			31
65			SUPERIEUR	SUPERIEUR	MAASTRICHTIEN CAMPANIEN SANTONIEN CONIACIEN TURONIEN CEPHEZIEN			30
88					28			
					27			

Figure 5.4 – Ages géologiques [Dejonghe, 2007].

### 5.2.2 Laboratoire

Les enceintes hermétiques et isothermes situées au sein de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège, sont représentées par la photographie reprise à la figure 5.5.

LABORATOIRE – ENCEINTES ISO-(T°/RH)  
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FSA



Figure 5.5 – Laboratoire d'enceintes hermétiques isothermes - Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées - 1)  $K_2SO_4$ ; 2)  $ZnSO_4$ ; 3)  $KCl$ ; 4)  $NaCl$ ; 5)  $NH_4NO_3$ ; 6)  $Ca(NO_3)_2$ ; 7)  $MgCl_2$ .

### 5.2.3 Calcul des paramètres expérimentaux

La représentation des résultats expérimentaux se base sur les trois paramètres explicités ci-après.

**La succion** Le premier paramètre est la succion, déduite de l'humidité relative ambiante par la relation de Kelvin fournie par la relation (5.1).

$$p_c = p_a - p_w = \frac{RT}{M_v g} \ln h_r [MPa] \quad (5.1)$$

où :

- $p_c$  : la succion interne à l'échantillon ;
- $p_a$  : la pression d'air interne à l'échantillon ;
- $p_w$  : la pression d'eau interne à l'échantillon ;
- $R$  : la constante des gaz parfait ;
- $T$  : la température en Kelvin ;
- $M_v$  : la masse molaire de la vapeur d'eau ;
- $g$  : la constante gravitationnelle ;
- $h_r$  : l'humidité relative de l'atmosphère ambiante ;

**La teneur en eau** Le second paramètre obtenu aisément à chaque stabilisation, est la teneur en eau dont l'expression est déduite de la masse mesurée lors de l'atteinte d'un équilibre de masse. Elle est donnée par la relation (5.2).

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M - M_s}{M_s} \cdot 100 [\%] \quad (5.2)$$

où :

- $w$  : la teneur en eau de l'échantillon ;
- $M_w$  : la masse d'eau présente dans l'échantillon ;
- $M_s$  : la masse sèche de l'échantillon mesurée pour chaque pièce au terme de l'étude ;
- $M$  : la masse de l'échantillon mesurée pour chaque pièce à chaque étape ;

**Le degré de saturation** Le troisième paramètre est la saturation explicitée par la formule (5.3). Elle est déterminée sur base de la masse sèche, de la teneur en eau et du volume de l'échantillon lors d'une stabilisation "i".

$$S_{r,i} = \frac{w_i}{\rho_w} \left( \frac{M_s}{V_i - \frac{M_s}{\rho_s}} \right) \quad (5.3)$$

où :

- $S_r$  : le degré de saturation de l'échantillon ;
- $w$  : la teneur en eau ;
- $M_s$  : la masse de solide de l'échantillon ;
- $V$  : le volume de l'échantillon ;
- $\rho_w$  : la masse volumique de l'eau ;

–  $\rho_s$  : la masse volumique des grains solides ;

Le développement de l'équation (5.3) est précisé ci-après. On débute par l'expression de la teneur en eau, intégrant les termes de saturation, de volume total de l'échantillon et de porosité.

$$w_i = \frac{M_{w,i}}{M_s} \quad (5.4)$$

$$= \frac{\rho_w n_i S_{r,i} V_i}{M_s} \quad (5.5)$$

$$\text{Preuve : } \frac{\rho_w n_i S_{r,i} V_i}{M_s} = \frac{M_{w,i}}{V_{w,i}} \frac{V_{v,i}}{V_i} \frac{V_{w,i}}{V_{v,i}} \frac{V_i}{M_s} = \frac{M_{w,i}}{M_s} \quad (5.6)$$

Dès lors, en isolant le terme de porosité de l'équation (5.5), on obtient (5.7) :

$$n_i = \frac{w_i M_s}{\rho_w S_{r,i} V_i} \quad (5.7)$$

Si l'on réexprime la teneur en eau sur base de la saturation, de la porosité mais sans l'intervention du volume de l'échantillon, on obtient l'équation (5.11) :

$$w_i = \frac{M_{w,i}}{M_s} \quad (5.8)$$

$$= \frac{M_{w,i}}{\rho_s V_s} \quad (5.9)$$

$$= \frac{\rho_w S_{r,i} V_{v,i}}{\rho_s V_s} \quad (5.10)$$

$$= \frac{\rho_w S_{r,i}}{\rho_s} \left( \frac{n_i}{1 - n_i} \right) \quad (5.11)$$

On obtient finalement la relation (5.3), en isolant le terme du degré de saturation présent dans l'équation (5.11) et en introduisant la porosité exprimée par la formule (5.7) :

$$S_{r,i} = w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( \frac{1 - n_i}{n_i} \right) \quad (5.12)$$

$$= w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( \frac{1 - \frac{w_i M_s}{\rho_w S_{r,i} V_i}}{\frac{w_i M_s}{\rho_w S_{r,i} V_i}} \right) \quad (5.13)$$

$$= w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( \frac{\rho_w S_{r,i} V_i - w_i M_s}{w_i M_s} \right) \quad (5.14)$$

$$= w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{\rho_w S_{r,i} V_i}{w_i M_s} - w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5.15)$$

$$S_{r,i} - \frac{\rho_s}{M_s} S_{r,i} V_i = -w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5.16)$$

$$S_{r,i} \left( \frac{M_s - \rho_s V_i}{M_s} \right) = -w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (5.17)$$

$$S_{r,i} = w_i \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( \frac{M_s}{\rho_s V_i - M_s} \right) \quad (5.18)$$

$$S_{r,i} = \frac{w_i}{\rho_w} \left( \frac{M_s}{V_i - \frac{M_s}{\rho_s}} \right) \quad (5.19)$$

où :

- $S_{r,i}$  : le degré de saturation de l'échantillon à la mesure "i" ;
- $w_i$  : la teneur en eau à la mesure "i" ;
- $M_s$  : la masse de solide de l'échantillon ;
- $V_i$  : le volume de l'échantillon à la mesure "i" ;
- $\rho_w$  : la masse volumique de l'eau ;
- $\rho_s$  : la masse volumique sèche de l'échantillon ;

Notons que la saturation peut également se calculer par la formule (5.20), mais celle-ci suppose une variation quasi nulle du volume de l'éprouvette, ce qui n'est pas forcément le cas.

$$S_r = \frac{M - M_s}{M_{sat} - M_s} \quad (5.20)$$

**Conclusion** En conclusion, on détermine ces paramètres à l'aide de quatre données, l'humidité relative, la masse sèche de chaque éprouvette déterminée au terme de la campagne d'essais, la masse et le volume de l'échantillon (déterminé de manière géométrique pour éviter l'altération de la pièce) à chaque stabilisation.

## 5.2.4 Résultats expérimentaux

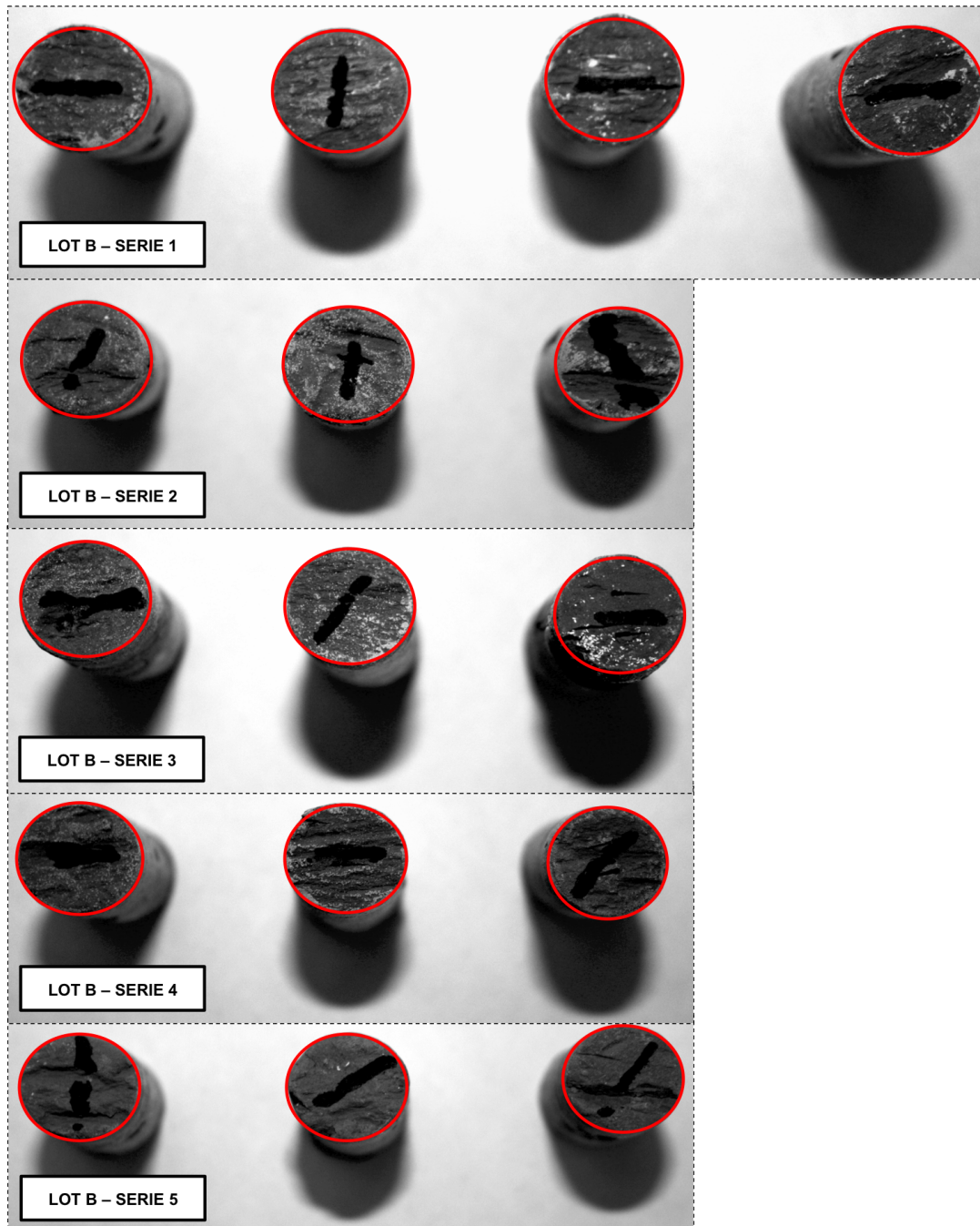


Figure 5.6 – Observation de la stratification des éprouvettes au terme du séchage.

### 5.3 Etude numérique

#### 5.3.1 Cas tests réalisés préliminaires - Programme CLIPLEX

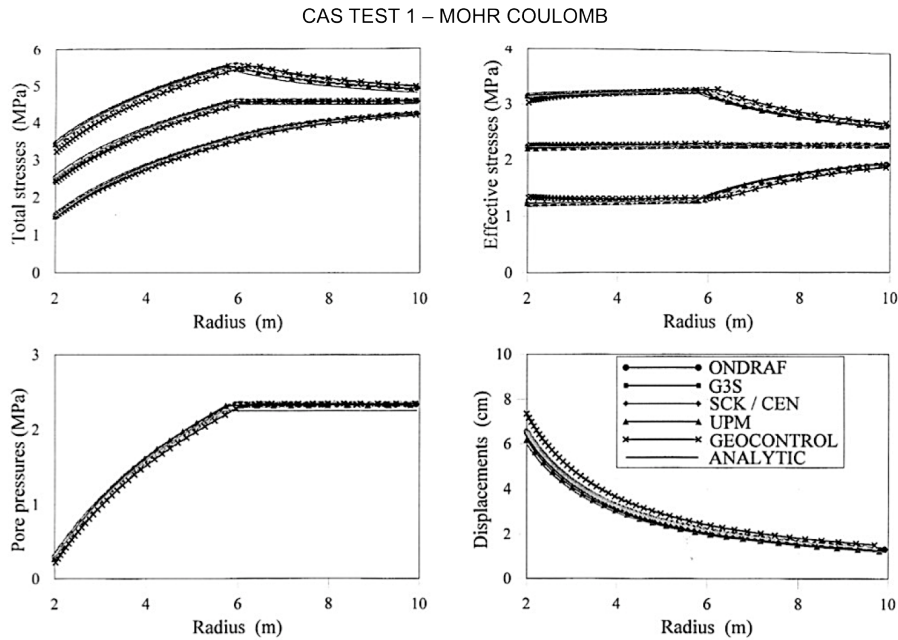


Figure 5.7 – Résultats du cas Test 1 pour un modèle de Mohr-Coulomb [Bernier et al., 2007].

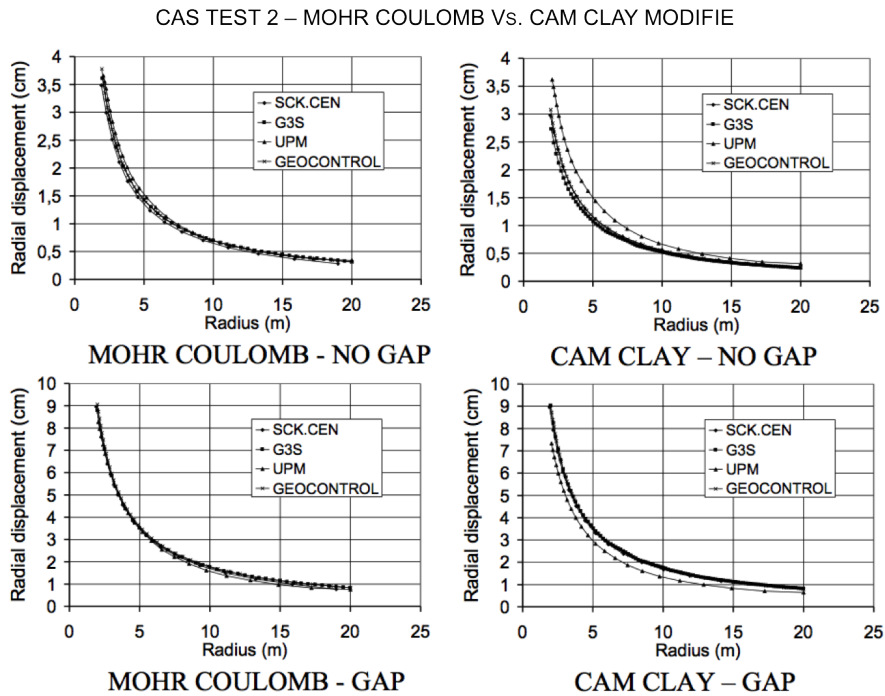


Figure 5.8 – Résultats du cas Test 2 en termes de déplacement radial - Comparaison des modèles de Mohr-Coulomb et Cam-Clay Modifié [Bernier et al., 2007].

### 5.3.2 Développement analytique de la méthode de convergence/confinement en contraintes isotropes

Le calcul de l'état de contrainte et de déformation d'un massif rocheux élastique isotrope sous état de contrainte isotrope soumis à l'excavation d'une galerie circulaire, peut être approché par la méthode analytique de convergence/confinement. Il convient dans le cadre du mémoire de paramétrer les conditions aux limites de la méthode pour approcher au mieux les résultats numériques.

**Développement analytique** La problématique en question présente un champ de déformation explicité selon la mécanique des milieux continus par la relation (5.21).

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.21)$$

La loi de comportement élastique est exprimée en fonction des coefficients de Lamé par l'équation (5.22).

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{ll} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (5.22)$$

où,

$$\lambda = K - \frac{2}{3}G \quad (5.23)$$

L'équation différentielle à résoudre correspond aux équations d'équilibre fournies par l'équation (5.24).

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - \rho g_i = 0 \quad (5.24)$$

Le problème présentant une symétrie de révolution, il est dès lors intéressant d'exprimer le développement en coordonnées polaires.

$$\vec{e}_r = \cos \theta \vec{e}_1 + \sin \theta \vec{e}_2 \quad (5.25)$$

$$\vec{e}_\theta = -\sin \theta \vec{e}_1 + \cos \theta \vec{e}_2 \quad (5.26)$$

Le champ de déformation correspondant (5.21) est réexprimé selon les deux termes (5.27) et (5.28)

$$\epsilon_{rr} = \partial_r u(r) \quad (5.27)$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{u(r)}{r} \quad (5.28)$$

où  $u(r)$  est le champ de déplacement radial. Le tenseur de contraintes (5.22) est quant à lui réécrit par les relations (5.29), (5.30) et (5.31).

$$\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_{rr} \vec{e}_r \otimes \vec{e}_r + \sigma_{\theta\theta} \vec{e}_\theta \otimes \vec{e}_\theta \quad (5.29)$$

$$\sigma_{rr} = \lambda \left( \partial_r u(r) + \frac{u(r)}{r} \right) + 2\mu \partial_r u(r) \quad (5.30)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \lambda \left( \partial_r u(r) + \frac{u(r)}{r} \right) + 2\mu \frac{u(r)}{r} \quad (5.31)$$

Le calcul de la divergence du tenseur de contraintes permet de réexprimer l'équation d'équilibre (5.24) sous la forme décrite par la formule (5.32).

$$\frac{1}{r} (\partial_r [r\sigma_{rr}] - \sigma_{\theta\theta}) = 0 \quad (5.32)$$

Sur base de l'expression de  $\sigma_{rr}$  et  $\sigma_{\theta\theta}$  donnée par les relations (5.30) et (5.31), l'équation différentielle (5.32) devient :

$$(\lambda + 2\mu) r \partial_r \left( \frac{1}{r} \partial_r (ru(r)) \right) = 0 \quad (5.33)$$

Il nous est dès lors possible d'établir l'expression du champ de déplacement radial généralisé. En primitivant deux fois l'équation d'équilibre (5.33), nous obtenons pour  $r \neq 0$  :

$$\int \int \partial_r \left( \frac{1}{r} \partial_r (ru(r)) \right) dr dr = 0 \quad (5.34)$$

$$\Rightarrow \int \frac{1}{r} \partial_r (ru(r)) dr = \int A dr \quad (5.35)$$

$$\Rightarrow \int \partial_r (ru(r)) dr = \int A r dr \quad (5.36)$$

$$\Rightarrow ru(r) = \frac{Ar^2}{2} + B \quad (5.37)$$

$$\Rightarrow u(r) = \frac{Ar}{2} + \frac{B}{r} \quad (5.38)$$

L'expression des deux constantes d'intégration permet de paramétrer le modèle au domaine étudié. Précisons en premier lieu l'expression utile (5.39).

$$\partial_r u = \frac{A}{2} - \frac{B}{r^2} \quad (5.39)$$

Les constantes d'intégration sont déterminées en fixant les conditions initiales aux frontières du domaine. Pour  $\lambda$ , le taux de déconfinement du massif (non-déconfiné :  $\lambda = 0$  ; déconfiné :  $\lambda = 1$ ), on décrit l'état de contrainte en paroi de galerie égal à  $\sigma_{rr}(R) = (1 - \lambda)\sigma_0$ , avec  $\sigma_0$  la contrainte initiale. De manière similaire, l'état de contrainte aux frontières extérieures est supposé suffisamment éloigné de la galerie que pour ne pas subir l'influence du déconfinement,  $\sigma_{rr}(r_{lim}) = \sigma_0$ . Il convient toutefois de tenir compte de l'état de déformation initial, or l'état de contrainte initial n'induit pas de déformation et déplacement dans le domaine. Dès lors, pour  $u_{r_{lim},0} = 0$ , les conditions initiales sont ramenées aux expressions (5.40), qui considèrent une évolution de contrainte nominale dans le massif. Il est alors possible d'explicitier les deux constantes d'intégration à l'aide des relations (5.41) et (5.42). Il

convient d'intégrer in fine l'état de contrainte initial, ce qui est rendu possible par l'analyse élastique linéaire.

$$\text{Hypothèses} \begin{cases} r = R & \rightarrow \sigma_{rr}(R) = -\lambda\sigma_0 \\ r = r_{lim} & \rightarrow \sigma_{rr}(r_{lim}) = 0 \end{cases} \quad (5.40)$$

$$A = \left( \frac{\lambda\sigma_0}{\lambda + \mu} \right) \left( \frac{R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.41)$$

$$B = \left( \frac{\lambda\sigma_0}{2\mu} \right) \left( \frac{r_{lim}^2 R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.42)$$

Nous pouvons à présent reformuler les contraintes radiales et orthoradiales des équations (5.30) et (5.31), à l'aide des expressions du champ de déplacement radial (5.38) et de sa dérivée (5.39), sur base des constantes A et B définies par les relations (5.41) et (5.42). Notons que l'expression des contraintes doit intégrer l'état initial.

$$\sigma_{rr} = \lambda\sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{r^2} \left( \frac{r^2 - R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) + \sigma_0 (1 - \lambda) \quad (5.43)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \lambda\sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{r^2} \left( \frac{r^2 + R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) + \sigma_0 (1 - \lambda) \quad (5.44)$$

**Etude aux conditions limites** Pour un déconfinement maximal ( $\lambda = 1$ ), une étude aux conditions limites montre, pour  $r_{lim}$  fini, que la contrainte radiale,  $\sigma_{rr}$  en  $r = R$  :

$$\sigma_{rr}(R) = \sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{R^2} \left( \frac{R^2 - R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.45)$$

$$\sigma_{rr}(R) = 0 \quad (5.46)$$

Alors que pour  $r = r_{lim}$  (fini),

$$\sigma_{rr}(r_{lim}) = \sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{r_{lim}^2} \left( \frac{r_{lim}^2 - R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.47)$$

$$\sigma_{rr}(r_{lim}) = \sigma_0 \quad (5.48)$$

Si toutefois  $r_{lim} \rightarrow \infty$ , l'équation (5.43) est alors indéterminée et nous obtenons la limite de l'équation (5.43) pour une dimension de domaine tendant vers l'infini par la méthode de l'Hospital, ce qui donne :

$$\sigma_{rr}(r)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = \left( 1 - \lambda \frac{R^2}{r^2} \right) \sigma_0 \quad (5.49)$$

C'est-à-dire :

$$\sigma_{rr}(R)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = 0 \quad (5.50)$$

$$\sigma_{rr}(\infty)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = \sigma_0 \quad (5.51)$$

Quant à la contrainte orthoradiale,  $\sigma_{\theta\theta}$ , en  $r = R$  avec  $r_{lim}$  fini :

$$\sigma_{\theta\theta}(R) = \sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{R^2} \left( \frac{R^2 + R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.52)$$

$$\sigma_{\theta\theta}(R) = 2\sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{r_{lim}^2 - R^2} \quad (5.53)$$

Alors qu'en  $r = r_{lim}$  (fini),

$$\sigma_{\theta\theta}(r_{lim}) = \sigma_0 \frac{r_{lim}^2}{r_{lim}^2} \left( \frac{r_{lim}^2 + R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.54)$$

$$\sigma_{\theta\theta}(r_{lim}) = \sigma_0 \left( \frac{r_{lim}^2 + R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.55)$$

Si toutefois  $r_{lim} \rightarrow \infty$ , l'équation (5.44) est alors indéterminée et nous obtenons la limite par Hospital, ce qui donne :

$$\sigma_{\theta\theta}(r)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = \left( 1 + \lambda \frac{R^2}{r^2} \right) \sigma_0 \quad (5.56)$$

C'est-à-dire :

$$\sigma_{\theta\theta}(R)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = 2\sigma_0 \quad (5.57)$$

$$\sigma_{\theta\theta}(\infty)_{r_{lim} \rightarrow \infty} = \sigma_0 \quad (5.58)$$

On synthétise cette analyse à la table 5.1 en particulierisant l'étude aux modèles A et B développés dans le mémoire ( $R = 2,445m$  et  $r_{lim} = 60m$ ).

$r_{lim}$	$\rightarrow \infty$		60m	
$r$	$R$	$r_{lim}$	$R$	$r_{lim}$
$\sigma_{rr}(r)$	0	$\sigma_0$	0	$\sigma_0$
$\sigma_{\theta\theta}(r)$	$2\sigma_0$	$\sigma_0$	$2\sigma_0.1,0017$	$\sigma_0.1,0033$

**Table 5.1** – Comparatif d'études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini.

On constate qu'un modèle doté d'un domaine fini sera influencé au niveau de ses contraintes orthoradiales par coefficient fonction de la taille de ce domaine. Ceci résulte directement du choix de conditions limites ( $\sigma_{rr}(r_{lim}) = \sigma_0$ ), le cas idéal étant un domaine infini. Les figures 5.9 et 5.10 proposent une illustration graphique de ces constatations.

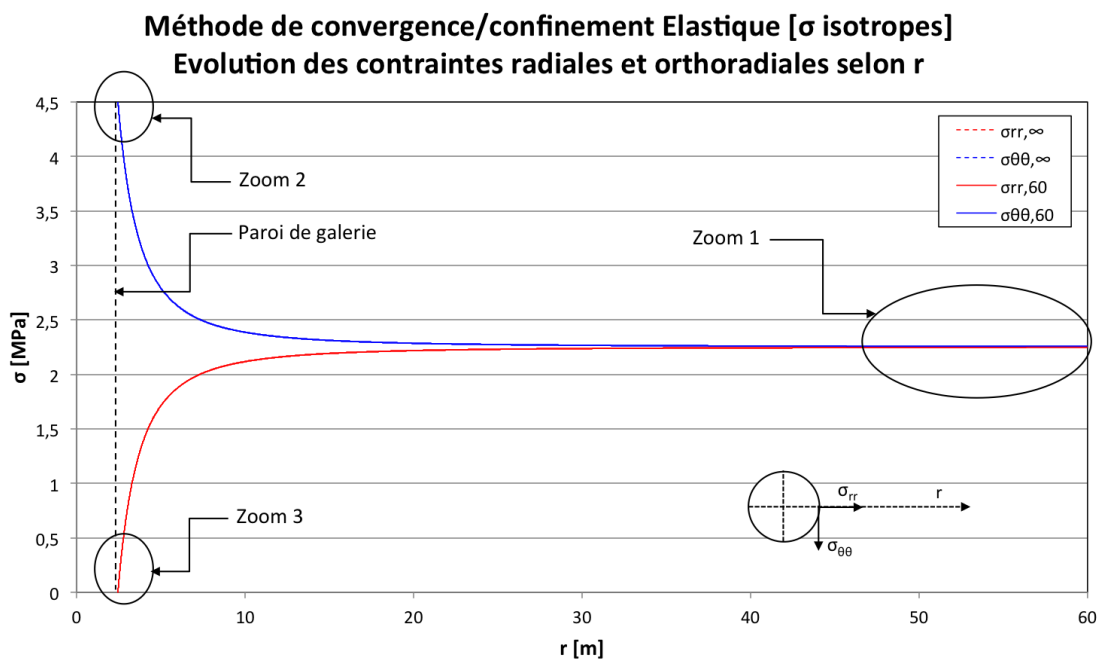


Figure 5.9 – Comparatif d’études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini.

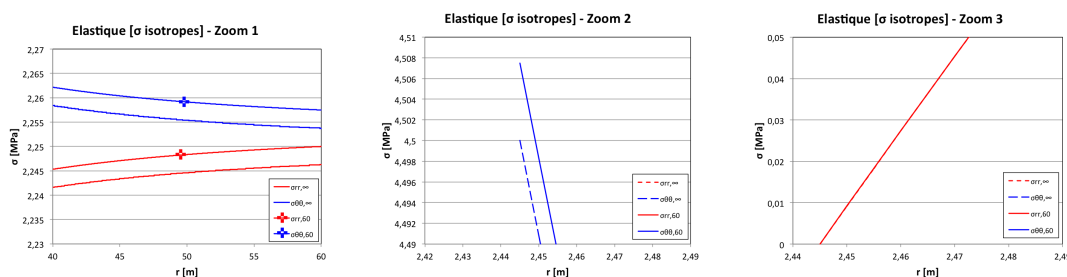


Figure 5.10 – Comparatif d’études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini - Zooms.

### 5.3.3 Développement analytique de la méthode de convergence/confinement en contraintes anisotropes

Le développement proposé à la section 5.3.2 permet une généralisation complémentaire dans le cas où l’état de contrainte initial présente une distribution anisotrope exprimée par le coefficient  $K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ .

Sur base de l’équation du déplacement exprimée par la relation (5.38), déduite de l’équation d’équilibre (5.32), on définit les constantes d’intégration en tenant compte du coefficient d’anisotropie  $K_0$ . Les conditions limites permettant une telle définition sont similaires à celles évoquées par les relations (5.40). Elles sont à présent réexprimées par les formules

(5.59).

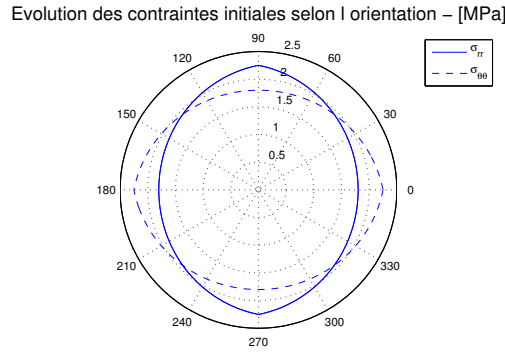
$$\text{Hypothèses} \begin{cases} r = R & \rightarrow \sigma_{rr}(R) = -\lambda\sigma_0\alpha(\theta) \\ r = r_{lim} & \rightarrow \sigma_{rr}(r_{lim}) = 0 \\ r = R & \rightarrow \sigma_{\theta\theta}(R) = -\lambda\sigma_0\beta(\theta) \\ r = r_{lim} & \rightarrow \sigma_{\theta\theta}(r_{lim}) = 0 \end{cases} \quad (5.59)$$

avec,

$$\alpha(\theta) = (1 - (1 - K_0)|\cos \theta|) \quad (5.60)$$

$$\beta(\theta) = (1 - (1 - K_0)|\sin \theta|) \quad (5.61)$$

et  $\theta$  l'angle formé entre l'horizontal et la coupe étudiée. La figure 5.11 présente une évolution de l'état de contrainte initial selon les hypothèses 5.59.



**Figure 5.11** – Evolution des contraintes initiales anisotropes dans le massif -  $K_0 = 0,8$  et  $\sigma_0 = 2,25MPa$ .

L'expression des constantes A et B pour  $\sigma_{rr}$ , est alors proposée aux équations (5.62) et (5.63). Pour  $\sigma_{\theta\theta}$ , il suffit de remplacer  $\alpha(\theta)$  par  $\beta(\theta)$ .

$$A(\theta) = \left( \frac{\lambda\sigma_0\alpha(\theta)}{\lambda + \mu} \right) \left( \frac{R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.62)$$

$$B(\theta) = \left( \frac{\lambda\sigma_0\alpha(\theta)}{2\mu} \right) \left( \frac{r_{lim}^2 R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) \quad (5.63)$$

Ce qui permet de ré-exprimer l'évolution des contraintes selon  $r$ , le rayon en coordonnées polaires, anciennement définies par les relations (5.43) et (5.44), par les formules (5.64) et (5.65).

$$\sigma_{rr} = \lambda\sigma_0\alpha(\theta) \frac{r_{lim}^2}{r^2} \left( \frac{r^2 - R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) + \sigma_0\alpha(\theta) (1 - \lambda) \quad (5.64)$$

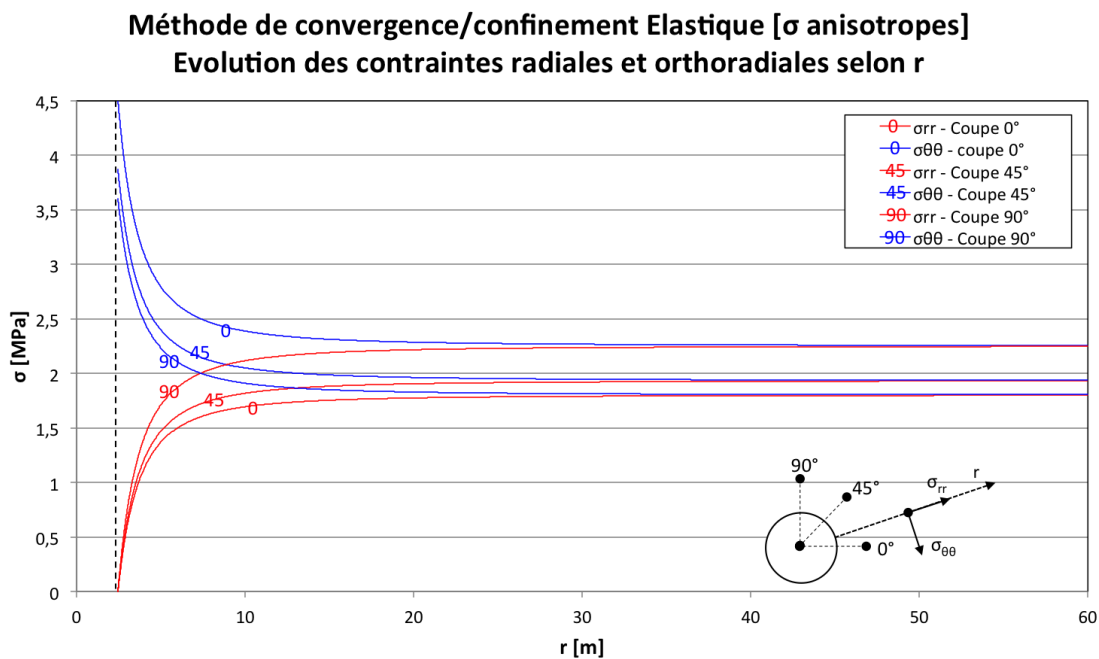
$$\sigma_{\theta\theta} = \lambda\sigma_0\beta(\theta)\frac{r_{lim}^2}{r^2} \left( \frac{r^2 + R^2}{r_{lim}^2 - R^2} \right) + \sigma_0\beta(\theta)(1 - \lambda) \tag{5.65}$$

A titre indicatif, nous proposons les valeurs atteintes aux limites du domaine pour trois coupes caractéristiques (0°, 45° et 90°), tel que données à la table 5.2, attention les facteurs liés au choix de domaine ( $r_{lim} = 60m$ ) sont ici négligés.

Coupe	0°		45°		90°	
$r_{lim}$	60m		84,85m		60m	
$r$	$R$	$r_{lim}$	$R$	$r_{lim}$	$R$	$r_{lim}$
$\sigma_{rr}(r)$	0	$K_0\sigma_0$	0	$\alpha(45^\circ)\sigma_0$	0	$\sigma_0$
$\sigma_{\theta\theta}(r)$	$2K_0\sigma_0$	$\sigma_0$	$2\beta(45^\circ)\sigma_0$	$\beta(45^\circ)\sigma_0$	$2\sigma_0$	$K_0\sigma_0$

**Table 5.2** – Comparatif d’études aux conditions limites - Domaine infini, domaine fini.

La figure 5.12 illustre l’évolution des contraintes résultant de ces expressions analytiques.



**Figure 5.12** – Evolution des contraintes selon le modèle analytique de convergence/confinement - Domaine fini.

5.3.4 Compléments graphiques des simulations

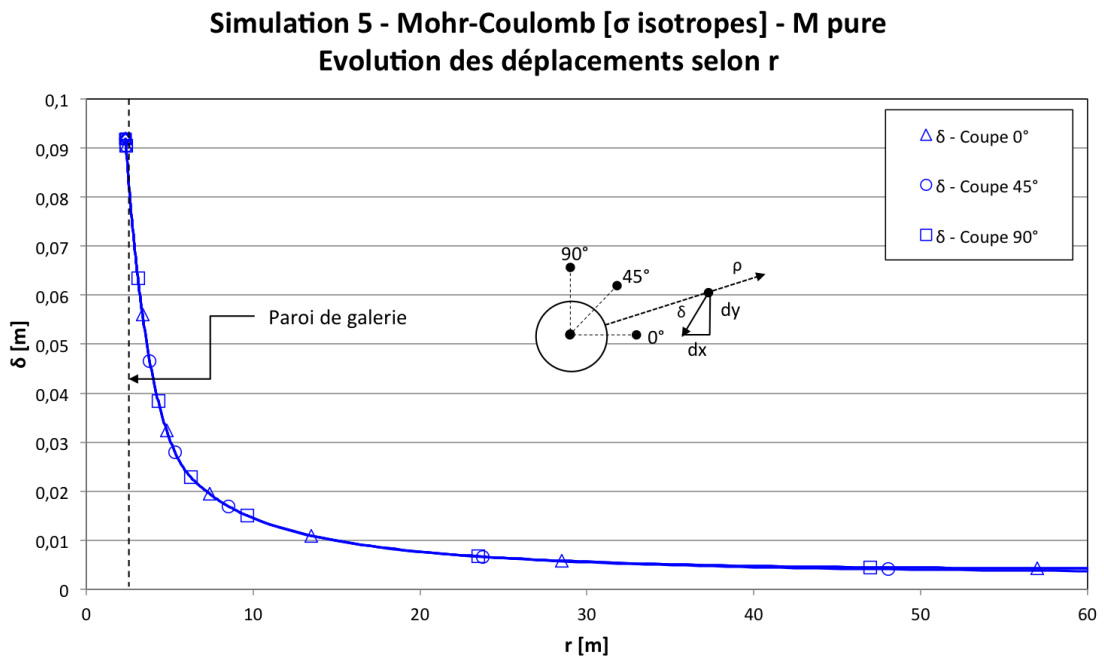


Figure 5.13 – Résultats de la simulation 5 - Evolution des déplacements selon  $r$ .

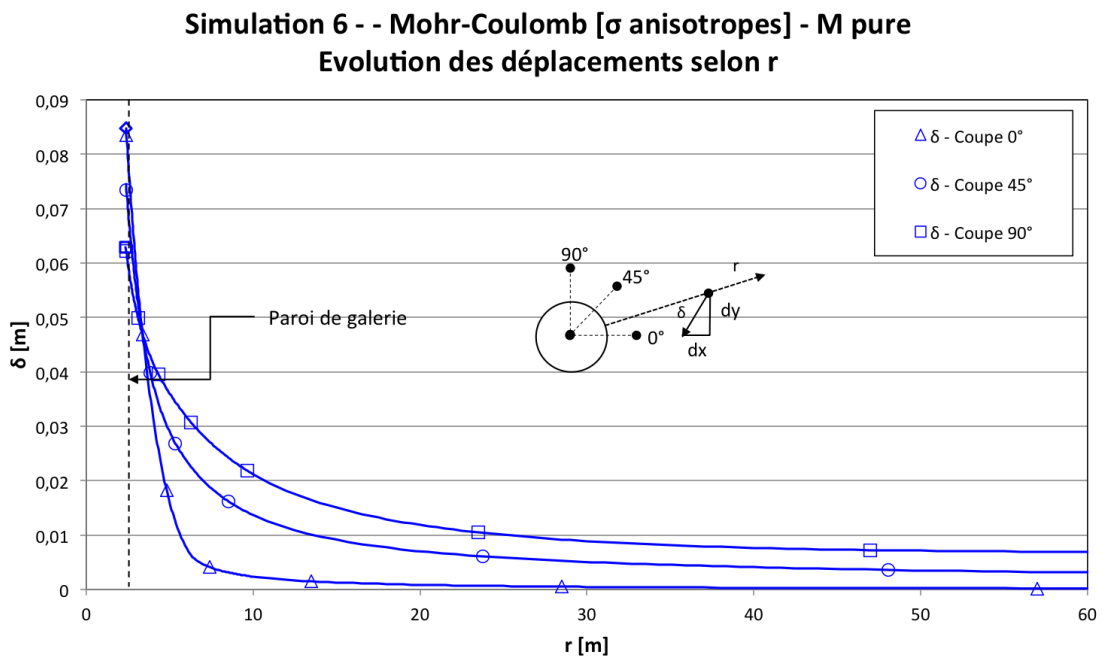


Figure 5.14 – Résultats de la simulation 6 - Evolution des déplacements selon  $r$ .

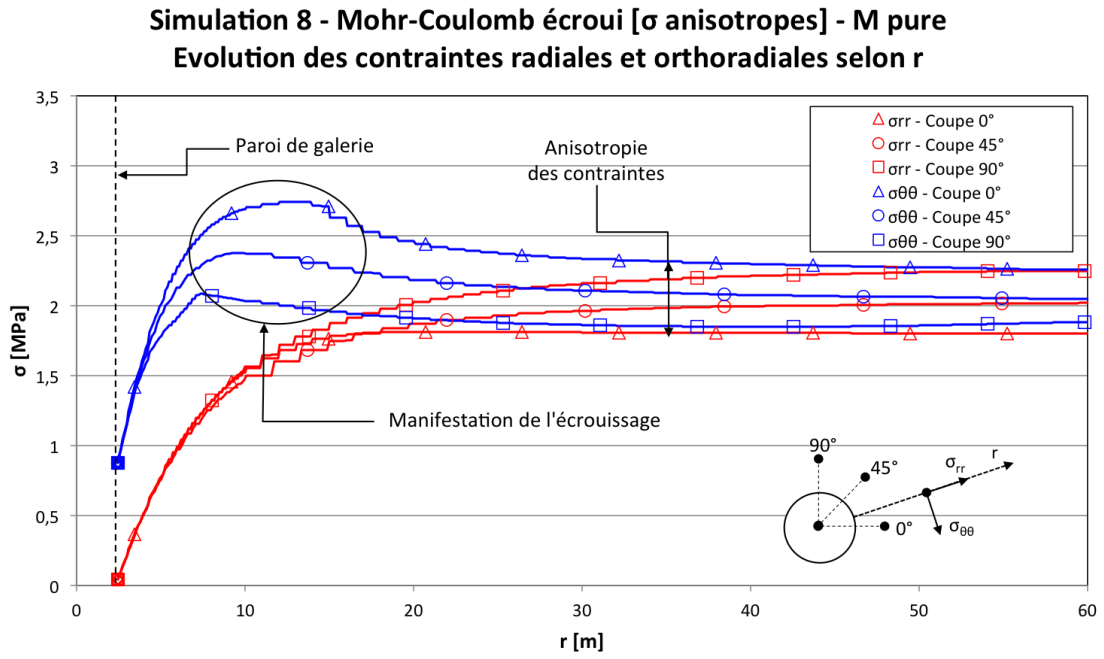


Figure 5.15 – Résultats de la simulation 8 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .

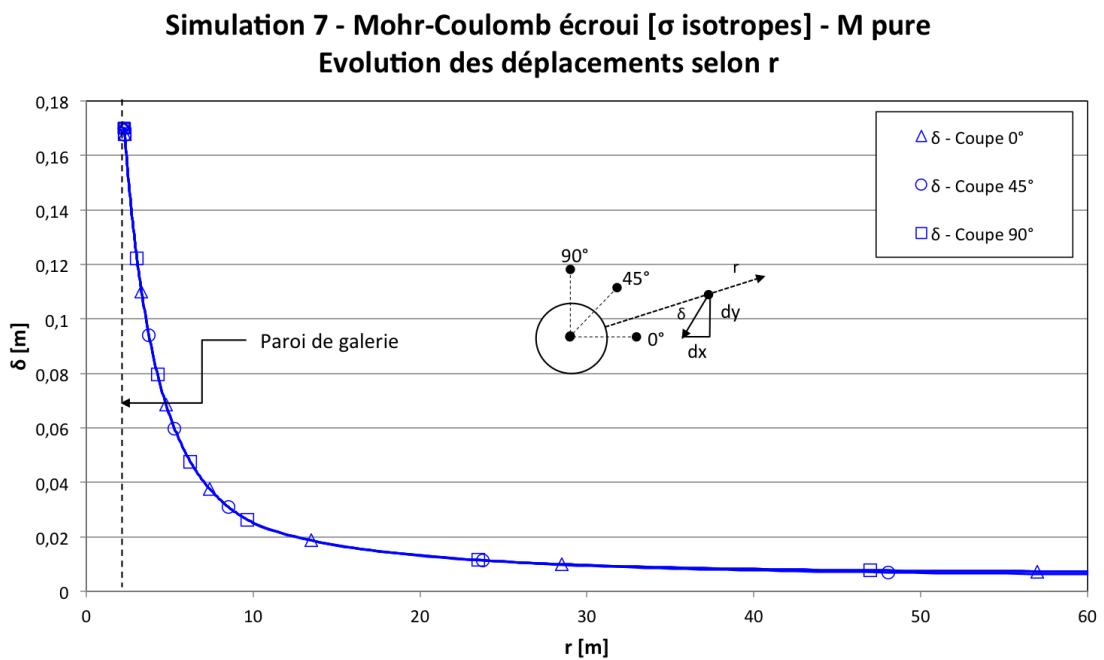
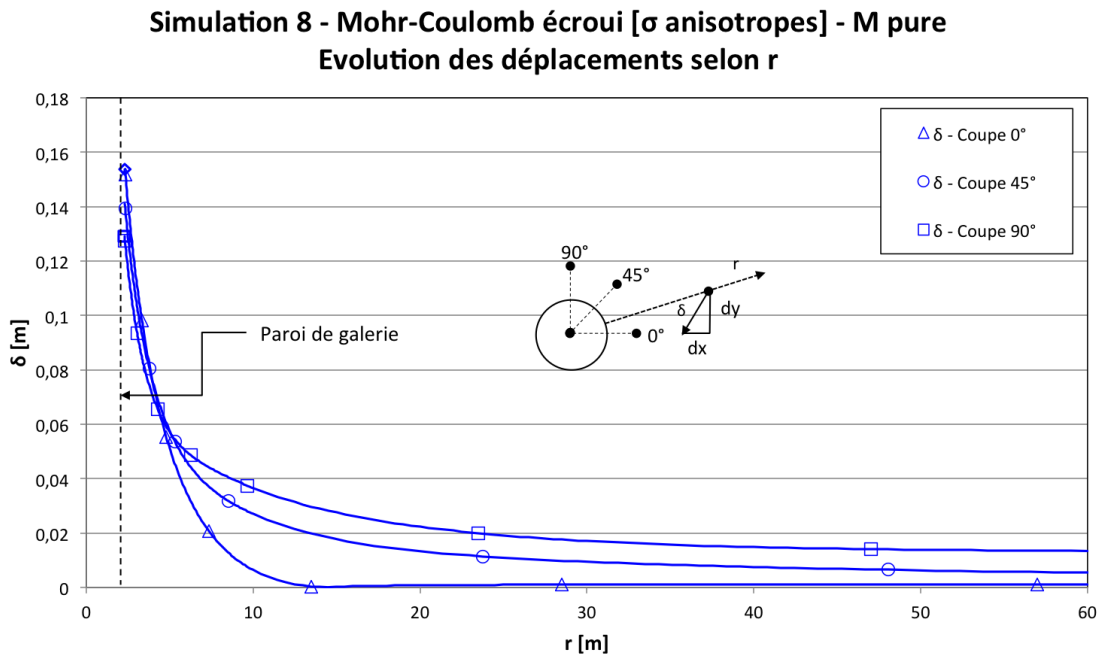
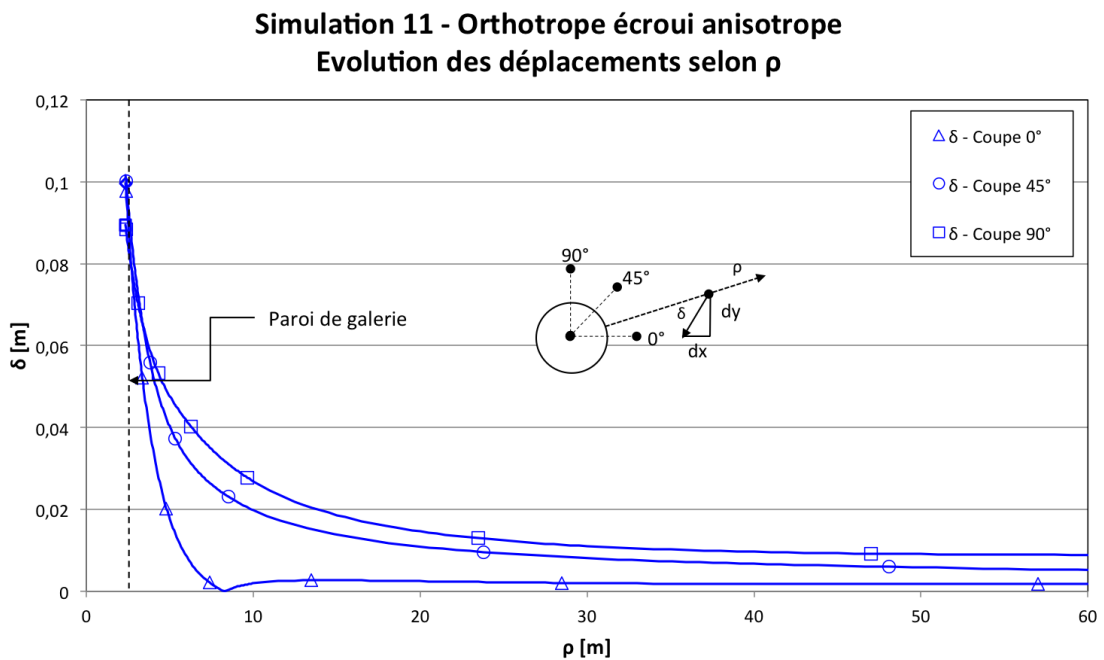


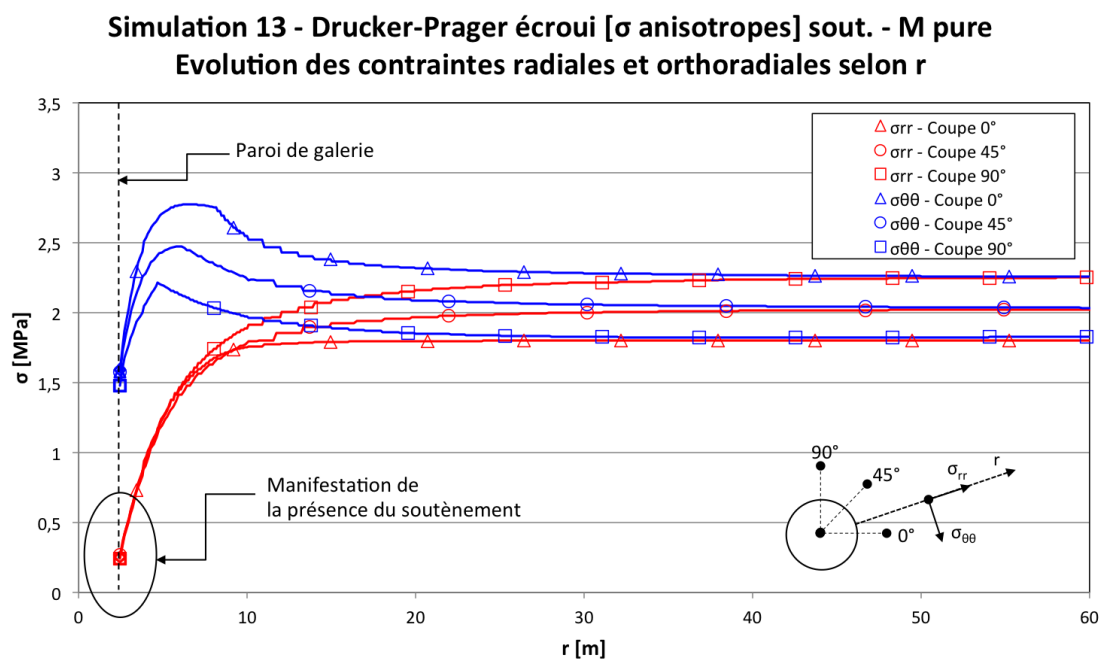
Figure 5.16 – Résultats de la simulation 7 - Evolution des déplacements selon  $r$ .



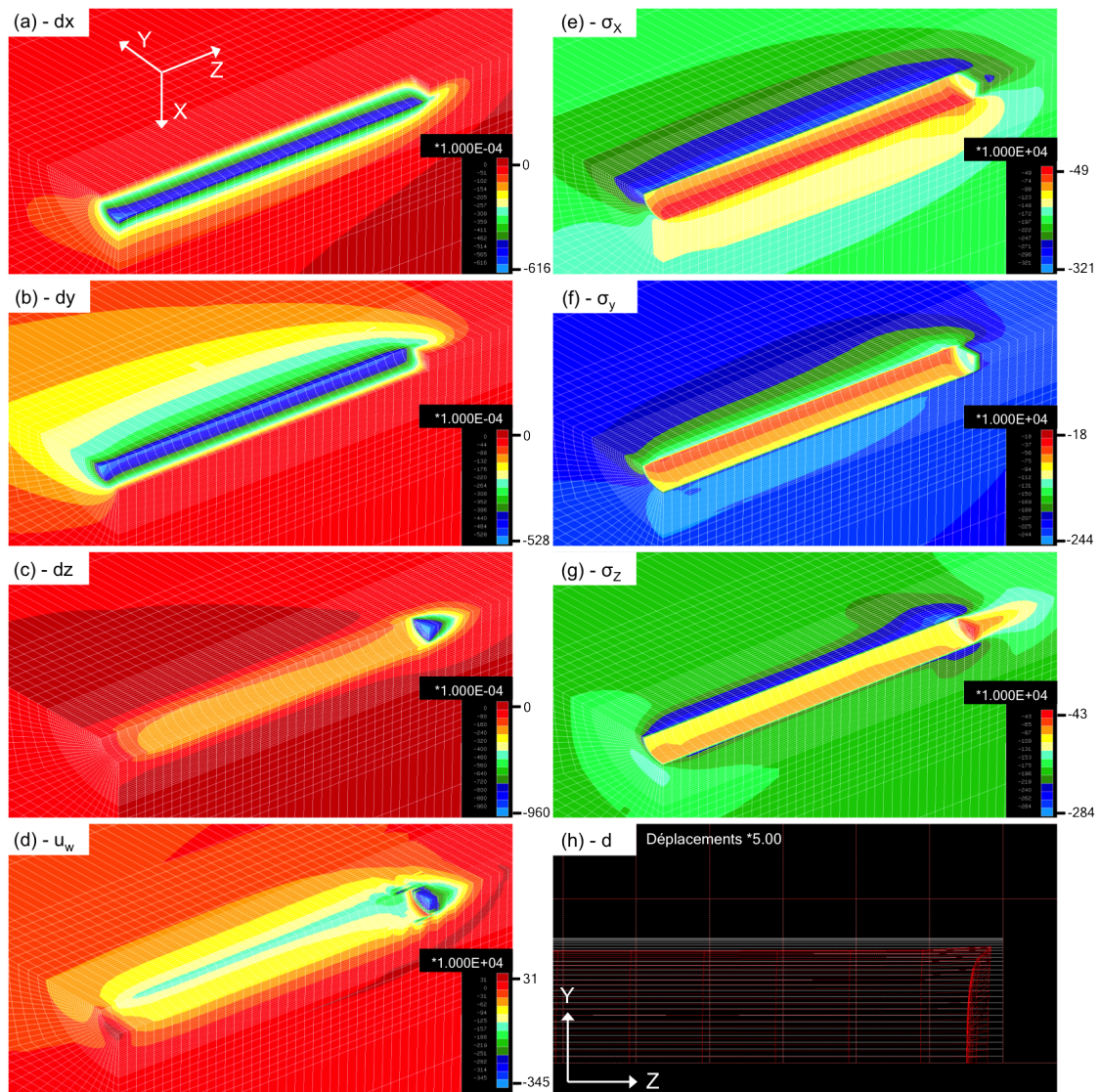
**Figure 5.17** – Résultats de la simulation 8 - Evolution des déplacements selon  $r$ .



**Figure 5.18** – Résultats de la simulation 11 - Evolution des déplacements selon  $r$ .



**Figure 5.19** – Résultats de la simulation 13 - Evolution des contraintes radiales et orthoradiales selon  $r$ .



**Figure 5.20** – Résultats de la simulation 21 - (a)  $dx$ , (b)  $dy$ , (c)  $dz$ , (d)  $u_w$ , (e)  $\sigma_x$ , (f)  $\sigma_y$ , (g)  $\sigma_z$ , et (h) déplacement au front de taille.