

M. OULD AMY
G. ROUSSET

Groupement pour l'étude
des Structures Souterraines
de Stockage (G. 3S)
École Polytechnique
91128 Palaiseau Cedex

Modélisation numérique en thermo-poro-élastoplasticité d'un stockage souterrain de déchets radioactifs en milieu argileux saturé Application au calcul du champ lointain

Résumé

Le calcul de la réponse thermique, hydraulique et mécanique d'un milieu argileux saturé, soumis à un dégagement de chaleur associé à un enfouissement de déchets radioactifs exothermiques, pose des problèmes nombreux et complexes : la tridimensionnalité des structures d'accueil, les couplages thermo-hydro-mécaniques forts et variés, la rhéologie du matériau hôte et le caractère éminemment transitoire des phénomènes en présence.

Dans le cadre d'une description théorique générale traitant les couplages thermo-hydro-mécaniques, on effectue une modélisation numérique, basée sur la méthode des éléments finis, appliquée à la thermo-poro-élasticité et à la thermo-poro-plasticité, visant à analyser l'évolution à long terme (approche globale ou champ lointain) des champs de température, de pression, des déplacements et des contraintes au sein du massif hôte. L'étude illustre l'ampleur des phénomènes hydrauliques, thermiques et mécaniques provoqués par l'enfouissement souterrain et présente des résultats qui intéressent directement le dimensionnement du stockage dans une formation argileuse standard.

A numerical modelling on thermo-poro-elastoplasticity of an underground radioactive wastes disposal in saturated clayey medium Application to the calculation of the far field

Abstract

The analysis of the thermal, hydraulic, and mechanical responses of a saturated medium, subjected to a thermal load attached at the underground evacuation of exothermal radioactive wastes, gives rise to numerous complex problems : the tridimensionality of the storage structure, the strong thermo-hydro-mechanical couplings and the eminently transient character of the phenomena.

After a brief presentation of the general theoretical framework of thermo-hydro-mechanical couplings, a numerical modelling is performed, based on the finite element method, applied to thermo-poro-elasticity and thermo-poro-plasticity ; the objective is to study the long term evolution (global approach or far field) of the temperatures, pore pressures, displacements, as well as the stresses within the host material.

This study illustrates the importance of the hydraulic, mechanical and thermal phenomena, as provoked by the underground evacuation of nuclear wastes, and presents the results which are useful to the dimensioning of underground storage in clayey formations.

Introduction

L'enfouissement des déchets radioactifs dans des formations géologiques profondes pose de nombreux et complexes problèmes géotechniques dont un large aperçu est donné par bon nombre de spécialistes (Habib, 1990 ; Berest, 1989 ; Rousset, 1990 ; Côme, 1988).

Si on se limite aux milieux argileux saturés, et si on se situe seulement dans le cadre du calcul des structures souterraines de stockage, telles qu'elles sont conçues pour accueillir les déchets radioactifs de type C (déchets de haute activité et de longue vie), des aspects multiples et fondamentaux doivent être examinés avec soin :

1) la tridimensionnalité des structures : une solution prévoit en effet le creusement de réseaux de galeries parallèles, aux murs desquelles sont forés des puits verticaux où seront déposés les conteneurs de déchets vitrifiés. Les puits constituent des sources volumiques chauffant tout le massif. Les galeries s'organisent sous forme de modules ;

2) des couplages thermo-hydro-mécaniques de tous ordres (Rousset, 1992 ; Giraud, 1993) se présentent dans un milieu poreux biphasique où le squelette est en forte interaction avec le fluide interstitiel, l'ensemble est soumis à une énergie thermique importante ;

3) la rhéologie de l'argile hôte de l'enfouissement, dont l'identification n'est pas toujours aisée. Son comportement mécanique n'est pas en général élastique linéaire. Dans la plupart des cas, il est soit élasto-plastique, soit élasto-viscoplastique, souvent écrouissable (Rousset, 1988) ;

4) l'aspect transitoire des phénomènes en présence est essentiel. Il est dû à la fois à la conduction thermique et à la diffusion hydraulique. Il peut être également dû à la rhéologie (viscosité), au changement de porosité et surtout à la nature des chargements thermiques et mécaniques. Les déchets C possèdent une très longue activité liée à leur nature physique radioactive (plusieurs dizaines de siècles de durée de vie pour certains radionucléides). Le chargement mécanique est lié, pour sa part, à l'exécution d'un nombre important d'ouvrages, étalée dans le temps suivant un calendrier précis ;

5) des couplages structurels existent : on ne peut pas étudier une structure donnée sans prendre en compte l'influence des autres structures voisines. L'interaction entre les structures souterraines de stockage est donc de règle. Les puits interagissent, les galeries aussi, les puits et les galeries de même...

La prise en compte de l'ensemble de ces facteurs ne peut pas bien évidemment faire l'objet d'un unique modèle où un seul calcul suffit pour le dimensionnement final des structures souterraines de stockage. Bien au contraire, il s'agit d'un vaste domaine de recherches où des stratégies globales et complémentaires sont indispensables pour maîtriser tel ou tel aspect, pour parvenir, grâce à un travail de synthèse, à garantir la sécurité de toute l'opération de l'enfouissement.

Une analyse attentive des phénomènes en présence révèle cependant l'existence de deux échelles de temps et de deux échelles d'espace : ce qui se passe au voisi-

nage des ouvrages creusés (puits, galeries, etc.) où les phénomènes locaux sont amplifiés (champ proche) (Ould Amy, 1992 ; Picard, 1993) est différent des phénomènes qui se produisent à l'échelle du massif (champ lointain) (Ould Amy et Rousset, 1994).

C'est dans ce dernier cadre que se situe la présente étude numérique sur la modélisation thermo-hydro-mécanique d'un enfouissement de déchets radioactifs exothermiques (déchets C) en massif argileux. Les modèles globaux (étude du champ lointain) donnent une information générale sur l'évolution à long terme des structures, et, de ce point de vue, ils constituent un élément essentiel de l'analyse de la sûreté des ouvrages à long terme. On doit éviter à tout instant que le confinement des déchets dans des milieux poreux profonds ait une incidence préjudiciable sur la biosphère et les nappes souterraines.

L'étude comprend trois parties. Une première partie qui rappelle le cadre théorique et numérique sur lequel se base la modélisation. Une analyse en thermo-poro-élasticité est présentée en deuxième partie, portant sur une étude de sensibilité visant à proposer un jeu de paramètres géométriques satisfaisants pour le stockage des déchets en milieu argileux. Enfin, la troisième partie nous rapproche davantage de la réalité de l'enfouissement : on y tient compte de la stratification du site, de l'élastoplasticité de la roche hôte et la loi réelle de dégagement thermique des déchets.

2

Cadre théorique et numérique

2.1

Équations de base de la thermo-poro-élasticité

Nous nous plaçons dans le cadre de la théorie générale des milieux poreux faite par Coussy (1991), fondée sur la thermodynamique des systèmes ouverts généralisant ainsi la théorie tridimensionnelle de Biot (1941).

L'évolution d'un milieu poreux saturé isotrope homogène élastique linéaire thermodilatant, obéissant aux lois de Darcy (écoulement du fluide interstitiel) et de Fourier (conduction de la chaleur), en l'absence de forces inertielles et de thermo-convection, peut être correctement décrite en petites déformations par le système suivant [on adopte dans toute la suite la convention de la mécanique des milieux continus : signe (+) pour la traction et signe (-) pour la compression] :

$$\text{div} [\sigma - \sigma_0] + F = 0 \quad (\text{équilibre}) \quad (1)$$

$$\text{div} [\lambda_h \cdot \text{grad } P] = \frac{1}{M} \frac{\partial P}{\partial t} + b \frac{\partial e}{\partial t} - 3\alpha_m \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

(diffusion hydraulique) (2)

$$\text{div} [\lambda_T \cdot \text{grad } T] = C_\epsilon \frac{\partial T}{\partial t} + 3\alpha_o K_o T_o \frac{\partial e}{\partial t} - 3\alpha_m T_o \frac{\partial P}{\partial t} - Q_v$$

(diffusion thermique) (3)

$$\sigma - \sigma_0 = \left(K_0 - \frac{2}{3} G \right) \mathbf{e} \mathbf{1} + 2G\boldsymbol{\varepsilon} - b(P - P_0) \mathbf{1} - 3\alpha_0 K_0 \theta \mathbf{1} \quad (\text{loi de comportement}) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\text{grad } \mathbf{u} + {}^t \text{grad } \mathbf{u}] \quad (\text{petites déformations}) \quad (5)$$

où σ_0 (Nm^{-2}) représente le tenseur des contraintes initiales en l'absence de forces volumiques, σ (Nm^{-2}) est le tenseur de contraintes actuelles, $\mathbf{F}$ (Nm^{-3}) les forces volumiques appliquées, λ_h ($\text{m}^4 \text{N}^{-1} \text{s}^{-1}$) le tenseur des conductivités hydrauliques, le point $\bullet$ représente le signe de contraction entre deux tenseurs, P (Nm^{-2}) la pression interstitielle, M (Nm^{-2}) le module de Biot, b (sans dimension) est le coefficient de Biot, e' (sans dimension) la déformation volumique ($e = \text{div } [\mathbf{u}] = \text{trace du tenseur des déformations } \boldsymbol{\varepsilon}$), α_m ($^\circ\text{C}^{-1}$) le coefficient de dilatation linéique thermique différentielle du fluide et de la matrice poreuse en conditions drainées, θ ($^\circ\text{C}$) est la variation de température subie, T (K) la température absolue, t (s) représente le temps, λ_T ($\text{Wm}^{-1} \text{C}^{-1}$) le tenseur des conductivités thermiques, C_v^0 ($\text{Jm}^{-3} \text{C}^{-1}$) la capacité calorifique à volume constant, α_0 ($^\circ\text{C}^{-1}$) le coefficient de dilatation thermique linéique drainé, K_0 (Nm^{-2}) le module élastique drainé de compression isotrope, T_0 (K) la température uniforme de référence, Q_v (Wm^{-3}) la puissance volumique thermique, G (Nm^{-2}) le module de cisaillement et P_0 (Nm^{-2}) la pression interstitielle de référence. On rappelle entre parenthèses les dimensions dans le système SI des différents paramètres.

Remarquons que pour un milieu indéformable et isobare, l'équation (3) est l'équation de diffusion thermique classique avec un terme source volumique. Il semble même que pour les applications usuelles, l'influence des termes de couplages dans l'équation (3) est négligeable sur l'évolution de la température. On reviendra plus tard sur ce point dans notre étude thermo-hydro-mécanique de l'enfouissement.

Le modèle théorique poro-élastique ainsi défini nécessite quatre types de données : les chargements thermiques, hydrauliques et mécaniques, les conditions aux limites (C.L) thermiques, hydrauliques et mécaniques également, les conditions initiales (C.I) et 12 paramètres physiques (cas isotrope) indépendants : E_0 , ν_0 , γ , b , λ_T , C_v^0 , M , γ_w , α_m , α_0 , λ_T , T_0 . La résolution de ce modèle théorique relève des méthodes numériques.

2.2

Modèle numérique

La formulation variationnelle dite faible en déplacement appliquée aux équations (1) à (5), avec prise en compte des conditions aux limites, suivie d'une discrétisation de l'espace du domaine étudié puis assemblage conformément à la méthode des éléments finis, donne le système algébrique à résoudre (Dangla, 1992 ; Skoczylas, 1992) :

$$[\mathbf{R}_{UU}] \{ \mathbf{U} \} + [\mathbf{C}_{UP}] \{ \mathbf{P} \} + [\mathbf{C}_{UT}] \{ \mathbf{T} \} = \{ \mathbf{F} \} \quad (6)$$

$$[\mathbf{C}_{UP}]^T \{ \dot{\mathbf{U}} \} + [\mathbf{R}_{PP}] \{ \mathbf{P} \} + [\mathbf{M}_{PP}] \{ \dot{\mathbf{P}} \} + [\mathbf{C}_{PT}] \{ \mathbf{T} \} = \{ \mathbf{W} \} \quad (7)$$

$$[\mathbf{C}_{UT}]^T \{ \dot{\mathbf{U}} \} + [\mathbf{C}_{PT}] \{ \dot{\mathbf{P}} \} + [\mathbf{R}_{TT}] \{ \mathbf{T} \} + [\mathbf{M}_{TT}] \{ \dot{\mathbf{T}} \} = \{ \mathbf{Q} \} \quad (8)$$

où $[\cdot]$ désigne la notation matricielle et $\{\cdot\}$ la notation vectorielle. Les inconnues nodales sont les déplacements $\{ \mathbf{U} \}$, la pression interstitielle $\{ \mathbf{P} \}$ et la température $\{ \mathbf{T} \}$. Les lettres $\mathbf{R}$ et $\mathbf{M}$ correspondent respectivement aux matrices de « rigidité » et de « masse », tandis que la lettre $\mathbf{C}$ introduit les matrices des divers couplages. Les vecteurs $\{ \mathbf{F} \}$, $\{ \mathbf{W} \}$ et $\{ \mathbf{Q} \}$ constituent respectivement le chargement nodal mécanique, hydraulique et thermique.

L'évolution du milieu thermo-poreux est donc complètement déterminée par la résolution d'un système matriciel linéaire symétrique différentiel de premier ordre exigeant le choix d'un schéma d'intégration dans le temps, par exemple, une interpolation linéaire entre les instants t et $t + \Delta t$ du type semi-implicite :

$$\mathbf{f}(t + \alpha \Delta t) = (1 - \alpha) \mathbf{f}(t) + \alpha \mathbf{f}(t + \Delta t) \quad \text{où } \alpha \in [0,1] \quad (9)$$

$\mathbf{f}$ pouvant être $\{ \mathbf{U} \}$, $\{ \mathbf{P} \}$ et $\{ \mathbf{T} \}$. C'est ce système que résout le module MPLI du code de calcul par éléments finis CESAR-LCPC (Humbert, 1989), outil de base de la modélisation qui suit.

3

Analyse thermo-poro-élastique de l'enfouissement

Un schéma actuellement étudié de l'enfouissement profond des déchets radioactifs de type C (classification française) en milieu argileux consiste à creuser un réseau de galeries horizontales parallèles au mur desquelles on creuse des puits verticaux, régulièrement espacés. Les puits sont destinés au dépôt des contenants des déchets vitrifiés. La géométrie tridimensionnelle du problème du stockage est illustrée par la figure 1. La durée de service des galeries est de l'ordre de quelques dizaines d'années.

Il existe en général deux approches différentes et complémentaires pour étudier ce problème : une approche par champ proche qui s'intéresse à la caractérisation des phénomènes locaux au voisinage immédiat des ouvrages (puits et galeries) et une approche par champ lointain qui s'intéresse, elle, à examiner les phénomènes qui se produisent à l'échelle du massif. Comme la durée de vie des déchets en question est beaucoup plus longue que la durée de service des ouvrages (galeries, par exemple), on peut considérer que cette dernière approche dite globale constitue un élément essentiel de l'évolution du stockage à long terme.

Dans ce cas, la puissance totale fournie par les puits est uniformément distribuée dans un cylindre dont la section est équivalente à l'emprise du stockage (surface) et de faible épaisseur (modèle du type galette). L'épaisseur de la galette représente la longueur des puits. Ce modèle dit global permet de ramener le problème tridimensionnel (Fig. 1) à un problème bidimensionnel axisymétrique (Fig. 2). L'hypothèse d'axisymétrie se justifie par deux raisons : la géométrie des puits et leur espacement régulier.

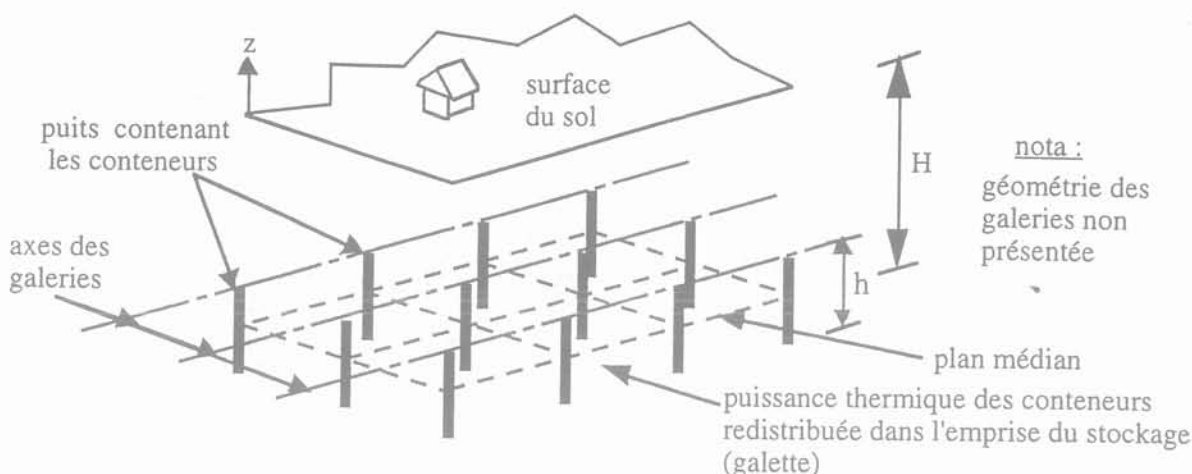


FIG. 1 Vue en plan horizontal de la structure de stockage avec la distribution des puits.
Horizontal layout of the storage structure, showing the rectangular grid of boreholes.

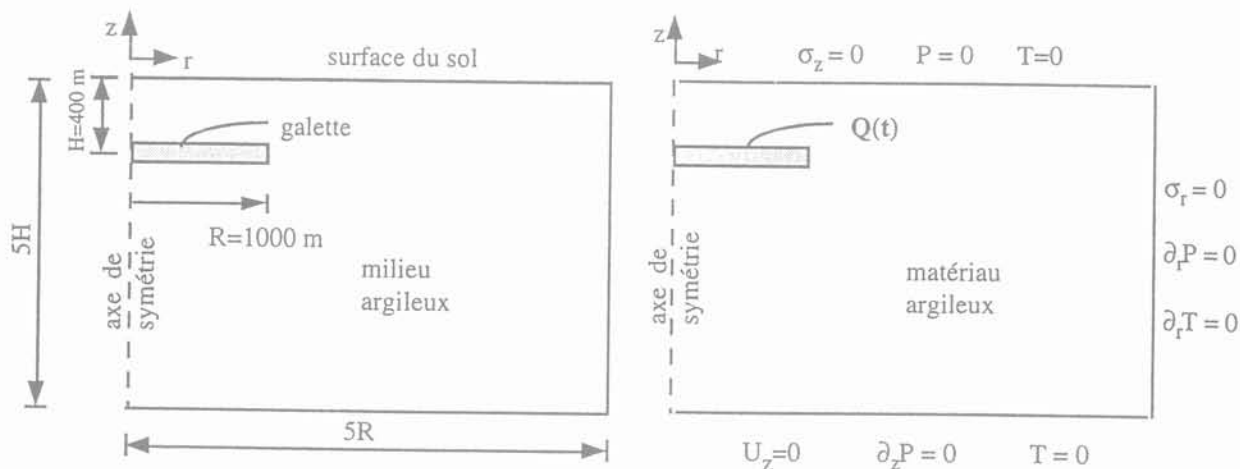


FIG. 2 Domaine d'analyse et conditions aux limites.
Domain of analysis and the boundary conditions.

3.1

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de l'étude thermo-poro-élastique est de mener une réflexion autour de questions concrètes :

- 1) Quel est l'effet de l'épaisseur de la galette (longueur des puits) sur la réponse thermique, hydraulique et mécanique du massif ? L'augmentation de l'épaisseur agit-elle dans le sens de la sécurité ?
- 2) Peut-on évaluer le domaine de validité de modèles mono-dimensionnels thermo-poro-élastiques grâce à l'étude paramétrique de l'élancement ?
- 3) Existe-t-il des zones du massif suffisamment chargées susceptibles d'une éventuelle plastification ?
- 4) Dans quel sens agit l'écoulement de l'eau interstitielle (chemins de drainage) en vu d'applications hydro-géologiques ultérieures ?
- 5) Quelle serait l'amplitude du soulèvement de la surface du sol causé par l'enfouissement profond ? Ce déplacement est-il réversible à long terme ?

3.2

Géométrie, maillage, état initial et conditions aux limites

On raisonnera dans toute la suite par rapport à un état de référence hydrostatique : les quantités calculées sont donc des variations par rapport à cet état.

La géométrie et les conditions aux limites sont illustrées sur la figure 2. On considère que la température moyenne à la surface du sol n'est pas affectée par l'enfouissement pendant la période étudiée.

Récapitulons alors :

- C.I. : $\{u\} = \{t\} = \{P\} = \{0\}$ à $t = 0$;
- C.L. : $\{u\}$: $u_r = 0$ sur l'axe $r = 0$ et sur la limite latérale, $u_z = 0$ sur la base du modèle ;
- $\{T\}$: $T = 0$ à la surface du sol $z = 0$ et sur la base du modèle, $\partial_r T = 0$ sur la limite latérale du modèle ;
- $\{P\}$: $P = 0$ drainage à la surface du sol $z = 0$ et flux nul partout ailleurs : $\partial_r P = 0$.

Une étude paramétrique portant sur l'épaisseur de la galette est effectuée. On envisage 7 valeurs : $h = 10$ m, 20 m, 40 m, 60 m, 80 m, 120 m, 140 m. Un maillage typique est présenté sur la figure 3, volontairement raffiné au voisinage de la structure chauffante (zones à forts gradients). Il comporte 1 650 nœuds et 747 éléments finis isoparamétriques quadratiques adaptés aux calculs de diffusion (triangles à 6 nœuds mixés à des quadrilatères à 8 nœuds).

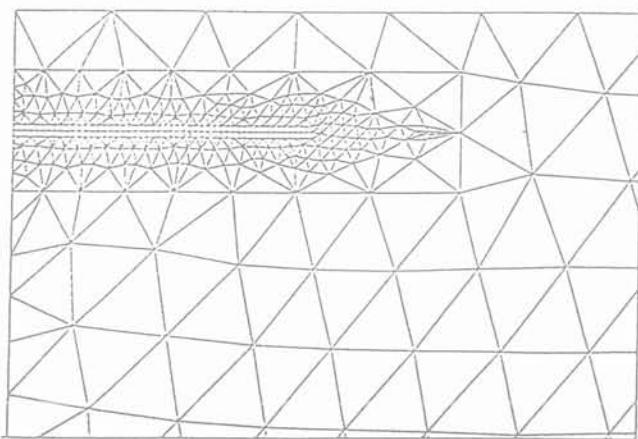


FIG. 3 Maillage d'éléments finis.
The finite element mesh.

3.3

Paramètres physiques

On considère, à ce stade, un calcul homogène : la structure chauffante possède les mêmes caractéristiques physiques que le massif avoisinant. Celles de ce dernier sont données dans le tableau I. Ces paramètres correspondent aux plus récentes données recueillies sur une argile du bassin parisien à la cote 400 m, profondeur envisagée pour l'enfouissement dans cette étude.

3.4

Chargement thermique

Le seul chargement considéré dans toute l'étude est la puissance thermique dégagée par les déchets radioactifs. On tient compte, à ce stade (on appliquera la loi de dégagement dans toute sa généralité dans l'analyse thermo-poro-élastoplastique qui suit) que du premier

terme exponentiel en fonction du temps t , compté en années :

$$q(t) = q_0 \cdot \exp(-wt) \quad (10)$$

avec :

$q_0 = 4,92 \cdot 10^7$ W correspondant à la puissance initiale dégagée, après trente ans de refroidissement à la surface du sol, par 10^5 tonnes d'uranium métal produisant chacun un millier de watts ;

$w = 0,024 \text{ an}^{-1}$ inverse de la constante de temps (41,6 ans) liée à la décroissance radioactive des déchets.

La puissance volumique introduite s'écrit alors :

$$Q(t) = \frac{q(t)}{\pi R^2 h} \quad (11)$$

où R représente le rayon de la galette et h son épaisseur.

3.5

Analyse des résultats

3.5.1

Température et pression interstitielle

Les évolutions des champs de température et de pression étant à peu près analogues d'un point de vue qualitatif, nous avons volontairement regroupé leur analyse. La figure 4 donne, pour toutes les épaisseurs étudiées de galettes l'évolution temporelle au centre du stockage, là où les grandeurs sont maximales, tandis que la figure 5 donne l'évolution spatiale des profils de température et de pression le long de l'axe de symétrie du stockage pour différents instants. Il s'agit d'une diffusion hydraulique dont le moteur est la diffusion thermique aux tendances qualitatives prévisibles, découlant directement de la nature transitoire du chargement thermique :

- on note indépendamment de l'épaisseur de la galette la présence d'un paroxysme thermique et d'un paroxysme hydraulique. L'instant et l'intensité de ces deux paroxysmes dépendent de l'épaisseur de la galette. Plus l'épaisseur est faible, plus les paroxysmes hydraulique et thermique sont forts (à cause de la concentration de l'énergie dans un volume réduit) et se produisent plus vite ;

- à court terme, pendant la phase d'échauffement au centre du stockage, l'effet de l'épaisseur est relativement net sur les températures, moins important sur les pressions interstitielles. Mais après 200 ans environ, se produit une uniformisation aussi bien thermique

TABLÉAU I Caractéristiques physiques de l'argile.

Poids volumique γ	$= 20 \text{ MN m}^{-3}$	Porosité n	$= 20 \%$
Module d'Young drainé E_0	$= 2 \ 330 \text{ MPa}$	Coefficient de Biot b	$= 1$
Coeff. de Poisson drainé ν_0	$= 0,3$	Température de référence T_0	$= 293 \text{ K}$
Poids volumique de l'eau γ_w	$= 10 \text{ MN m}^{-3}$	Capacité calorifique à volume constant C_e^0	$= 2,85 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Module de Biot M	$= 5 \ 500 \text{ MPa}$	Conductivité thermique isotrope λ	$= 1,7 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Perméabilité isotrope k	$= 4 \cdot 10^{-12} \text{ ms}^{-1}$	Coeff. drainé de dilatation thermique α_0	$= 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Module de compression K_0	$= 1 \ 940 \text{ MPa}$	Dilatation thermique différentielle drainée α_m	$= 2,45 \cdot 10^{-5}$

qu'hydraulique : l'état final (long terme) de la température et de la pression est indépendant de l'épaisseur de la galette ;

– la zone affectée par l'écoulement et par l'échauffement est variable : son importance est fonction de l'importance de l'épaisseur de la galette ;

– contrairement au paroxysme thermique qui se situe toujours au centre de stockage, le paroxysme hydraulique (Fig. 5b) se déplace du centre vers une zone de part et d'autre de celui-ci qui se développe dans le temps. Ce phénomène est remarquable seulement dans la phase de refroidissement du centre du stockage. Il découle en fait du rôle du terme (3) de l'équation (2) qu'il faut bien analyser. Pendant la phase de l'échauffement, c'est ce terme qui est responsable de la surpression interstitielle ; on peut l'interpréter comme un chargement hydraulique d'origine thermique, autrement dit il constitue un apport de volume fluide qui génère naturellement la pression du fluide. Pendant cette phase, l'eau est drainée de la zone chauffée vers le massif. Pendant la phase de refroidissement, le centre de stockage se refroidit le plus vite, et en ce point le terme (3) change de sens ($\partial T < 0$) soutirant ainsi une partie de l'apport de masse fluide, ce qui s'accompagne d'une diminution de pression interstitielle alors qu'au-delà du centre de stockage, le massif continue de s'échauffer générant de ce fait la surpression interstitielle. C'est pourquoi la localisation du paroxysme hydraulique (Fig. 5b) hors du centre de stockage se produit toujours dans la phase de refroidissement du centre du stockage.

Du point de vue quantitatif, on peut formuler les remarques suivantes :

– le maximum de pression est de l'ordre de 4 MPa pour $h = 10$ m ; le maximum de température est atteint pour cette même épaisseur et vaut environ 72 °C. Le tableau II résume l'ensemble des valeurs maximales de pression et de température ainsi que les instants de paroxysme correspondants pour chaque épaisseur de galette. Si on ajoute à ces variations les champs de température et de pression initiales on obtient un maximum thermique de l'ordre de 100 °C, en ne tenant compte que du premier terme de la puissance volumique des déchets, ce qui tend à minorer ce paroxysme (si on prend 15 °C comme température moyenne au sol et un gradient géothermique d'environ 0,03 °C/m), tandis que le maximum de pression est de l'ordre de 8 MPa. *A priori*, ces valeurs ne représenteraient pas, du point de vue thermique et hydraulique, des risques majeurs ou préjudiciables à la sécurité de l'enfouissement des déchets radioactifs dans une argile raide ;

– quelle que soit l'épaisseur de la galette, le paroxysme hydraulique semble se produire toujours plus vite que le paroxysme thermique ; celui-ci s'étale, suivant l'épaisseur de 40 ans ($h = 10$ m) à 90 ans ($h = 140$ m), tandis que le premier varie entre 35 ans ($h = 10$ m) et

65 ans ($h = 140$ m). Ce phénomène s'explique : la diffusivité qui importe ici n'est pas le coefficient de consolidation classique auquel sont habitués les mécaniciens des sols argileux [$c_v = \lambda_h / (E_0 \gamma_w)$] saturés. Ce coefficient, quoique faible dans notre application, n'est pas déterminant pour une argile raide où la porosité ne change pas énormément. C'est la diffusivité hydraulique pure qui est le responsable principal des échanges d'eau, sous le chargement thermique : $k_h = \lambda_h M$, soit $2,22 \cdot 10^{-6}$ m²/s. La diffusivité thermique, elle, est de l'ordre de $6 \cdot 10^{-7}$ m²/s ($\lambda T / \rho C$). Il en résulte donc que la diffusion hydraulique est plus rapide que la diffusion thermique.

• Isovaleurs, lignes de courant et vitesses

Pour avoir une idée globale de la répartition spatiale des champs de température et de pression, on a tracé pour un seul jeu de données ($h = 40$ m) les isothermes et les isobares à des instants différents, ainsi que les vitesses (flux de fluide ou de chaleur), les lignes de courant étant les lignes où les vitesses sont tangentes. La figure 6 donne les équipressions aux instants 50 ans et 100 ans et la figure 7 les isothermes à 50 ans.

L'examen de ces figures confirme l'analyse déjà faite : forte activité hydraulique et thermique dans la zone du stockage, gradients verticaux élevés, écoulement vers les zones à basse pression dans le massif, conduction de chaleur vers les zones froides du milieu hôte. Pendant la phase du refroidissement du centre du stockage (temps supérieur à 50 ans), on voit nettement les deux écoulements : au voisinage de la galette retour de l'écoulement vers le stockage (la galette), au-delà on a un écoulement vers le massif. Au voisinage de celui-ci, à la limite latérale de stockage, l'écoulement et la conduction sont bidimensionnels. En dehors de cette zone, les isothermes et les isovaleurs sont presque des lignes horizontales auxquelles sont perpendiculaires les vitesses. Plus le temps augmente, plus se développe un écoulement et une conduction radiaux vers la pointe de la galette.

3.5.2

Déplacements et déformations

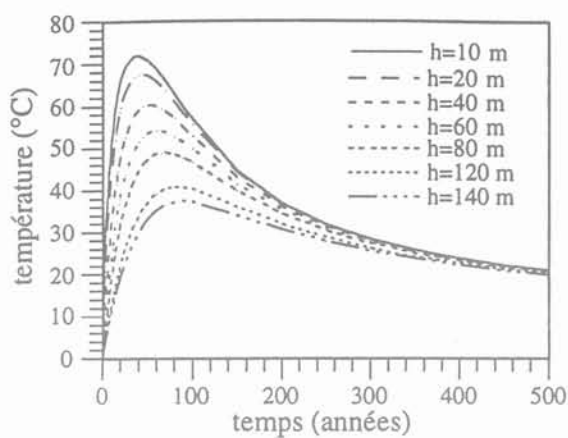
La figure 8 présente le profil du déplacement vertical le long de l'axe du stockage à l'aplomb du centre à des instants différents et pour les épaisseurs minimale et maximale de la galette. Ensuite la déformée du contour initial (Fig. 9) à 50 ans, ainsi que les isovaleurs des déplacements verticaux et des déplacements radiaux (Fig. 10) à ce même instant complètent la présentation.

Les commentaires suivants peuvent être faits :

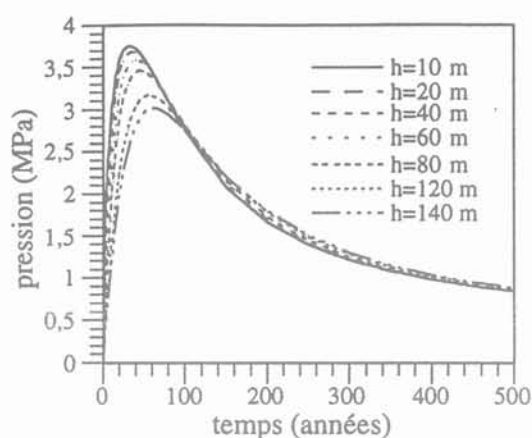
– indépendamment de l'épaisseur, le déplacement vertical augmente à mesure que l'on s'approche de la surface du sol, mais il n'est pas maximal en ce point. Le déplacement maximal se situe entre le milieu du stockage et la surface du sol ;

TABEAU II Paroxysmes thermique et hydraulique.

h (m)	10	20	40	60	80	120	140
$T_{\max}$ (°C)	71,8	67,6	60,3	54,2	49,1	40,7	37,4
$t(T_{\max})$ (ans)	40	45	50	60	70	80	90
$P_{\max}$ (MPa)	3,8	3,7	3,7	3,6	3,5	3,2	3,0
$t(P_{\max})$ (ans)	35	37	40	42	45	55	65

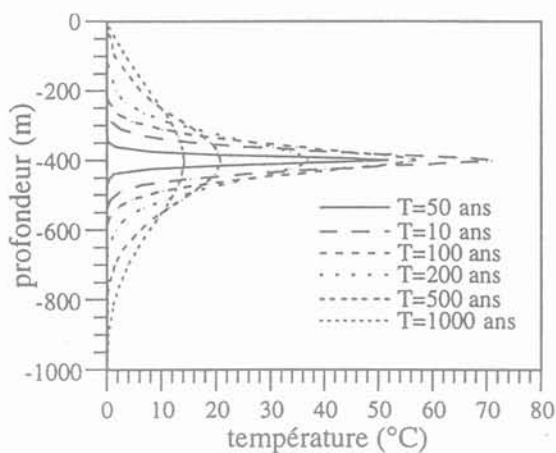


(a) Température

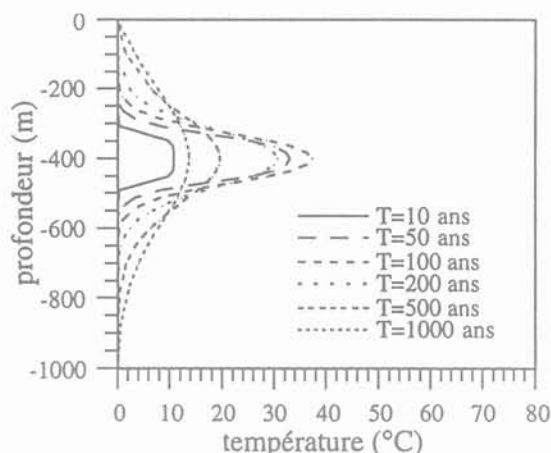


(b) Pression

FIG. 4 Évolution de la température et de la pression interstitielle au centre de la galette.
Evolution of the temperature (a) and the pore water pressure (b) at the centre of the cake.



(a) Profil de température pour h=10m
(a) Temperature profile for h=10m



(b) Profil de température pour h=140m
(b) Temperature profile for h=140m

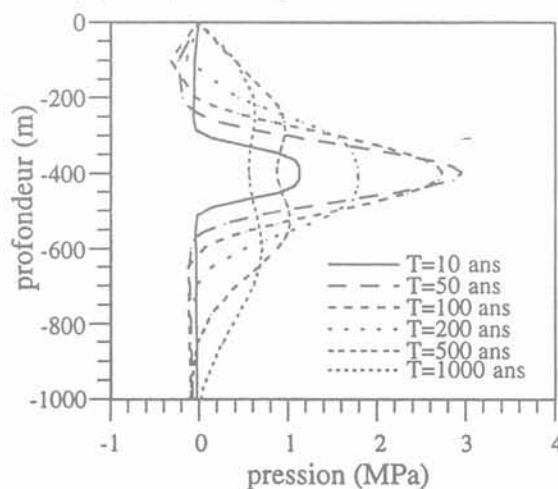
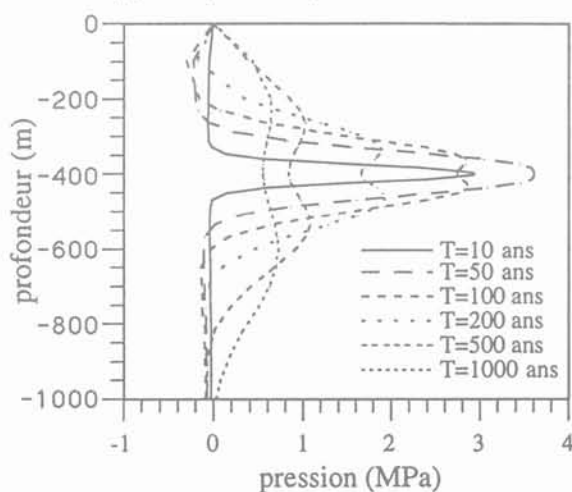
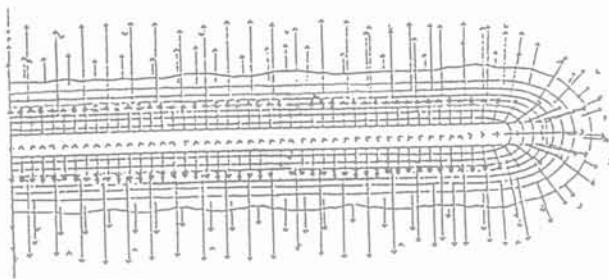
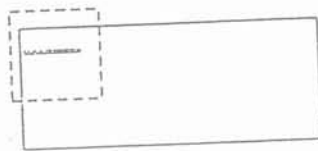
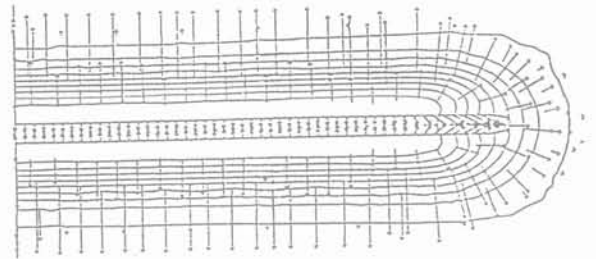


FIG. 5 Profils de température et de pression interstitielle le long de l'axe de symétrie pour les épaisseurs minimale ($h = 10$ m) et maximale ($h = 140$ m).
Temperature and pore pressure profiles along the axis of symmetry for the minimum ($h = 10$ m) and the maximum ($h = 140$ m) thicknesses.



(a) équipressions à $t=50$ ans
(a) isobars at $t=50$ years



(b) équipressions à $t=100$ ans
(b) isobars at $t=100$ years

FIG. 6 Équipressions à deux instants : $t = 50$ ans et $t = 100$ ans.
Isobars at two instants : $t = 50$ years and $t = 100$ years.

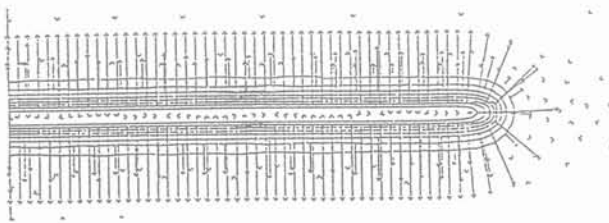


FIG. 7 Isothermes à $t = 50$ ans.
Isotherms at $t = 50$ years.

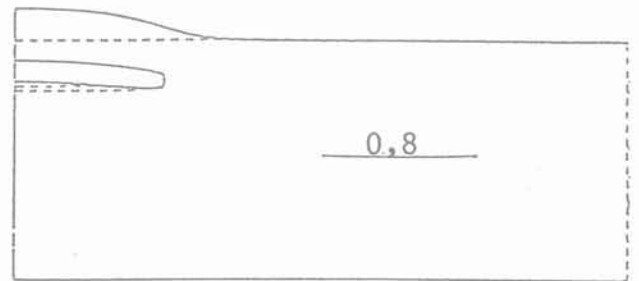
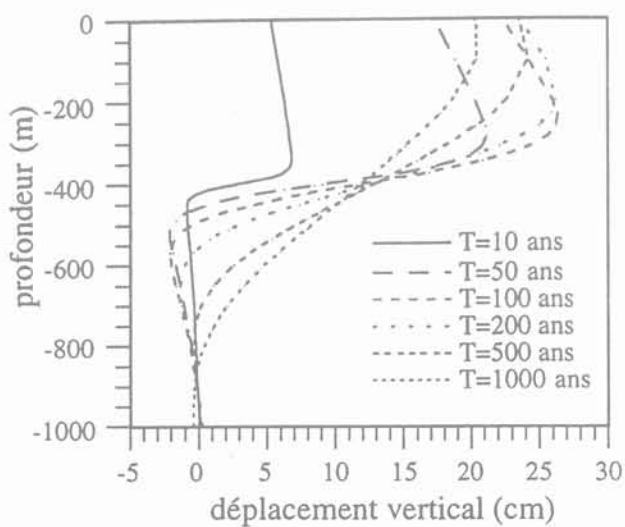
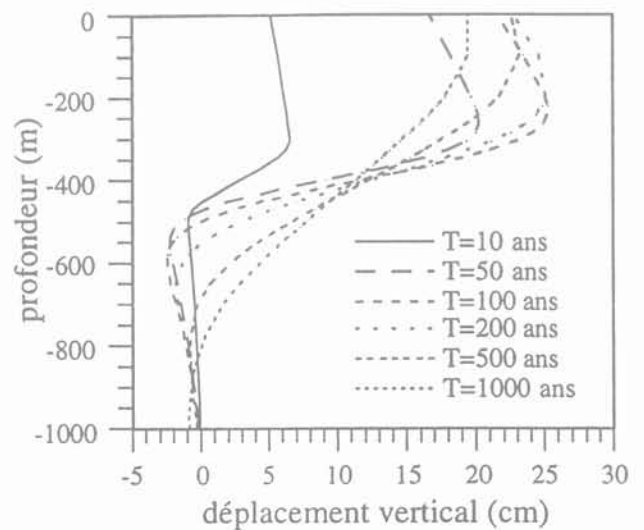


FIG. 9 Déformée des contours du maillage illustrant l'amplitude et le sens du champ de déplacement.
The deformed contour lines showing the displacement field. A global upheaval is observed.

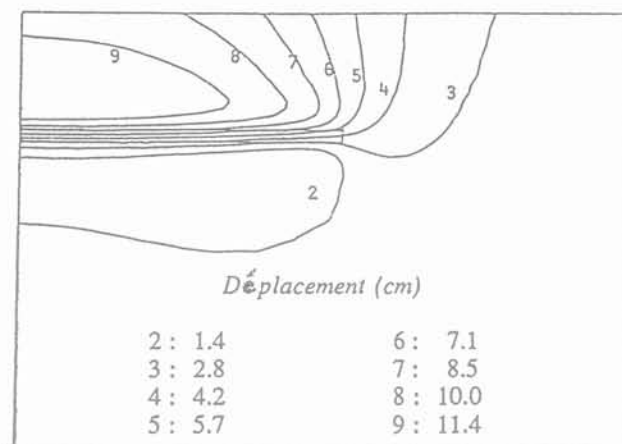


(a) $h=10$ m

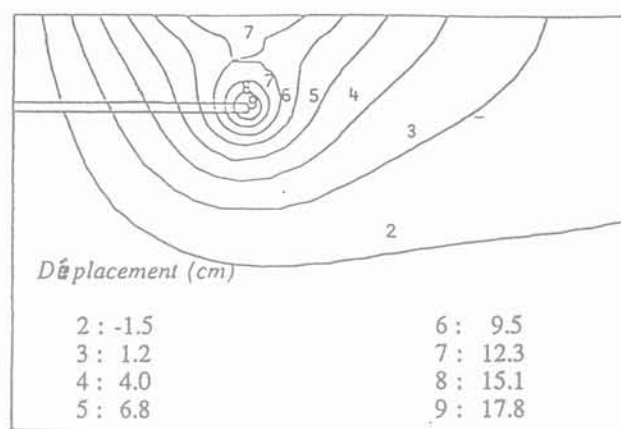


(b) $h=140$ m

FIG. 8 Profil du déplacement vertical le long de l'axe de symétrie pour les épaisseurs minimale ($h = 10$ m) et maximale ($h = 140$ m).
Vertical displacement profiles along the axis of symmetry for the minimum ($h = 10$ m) and the maximum ($h = 140$ m) thicknesses.



(a) Déplacement vertical
(a) Vertical displacements



(b) Déplacement radial
(b) Horizontal displacements

FIG. 10 Isovaleurs des déplacements verticaux et horizontaux dans le massif à $t = 50$ ans.
Isovalues of the vertical and horizontal displacements in the medium at time $t = 50$ years.

– pendant la phase de l'échauffement, plus le temps augmente plus le déplacement croît à la surface du sol. Il y atteint environ 23 cm à l'instant 200 ans, et ce quelle que soit l'épaisseur de la galette. Celle-ci influence très peu les résultats des déplacements verticaux : elle produit une différence d'un cm à peu près entre les épaisseurs minimale et maximale ;

– il se produit une diminution extrêmement lente des déplacements pendant la phase de refroidissement : à 1 000 ans, le déplacement est de l'ordre de 19,5 cm à la surface du sol et de 12 cm au centre du stockage ;

– le soulèvement de la surface du sol, libre de toute contrainte, intéresse une zone de rayon égal à 1 800 m environ (Fig. 9), ce qui dépasse largement l'extension horizontale de la galette ($r = 1\,000$ m). On remarque également sur la courbe des déformées des contours le caractère bidimensionnel des déformations.

• Isovaleurs des déplacements

Les isovaleurs des déplacements verticaux et radiaux donnent une idée plus globale de la répartition spatiale du champ de déplacement, qui conforte l'analyse et les commentaires précédents. On note que les isovaleurs de la composante radiale du déplacement s'organisent de manière concentrique, autour de la pointe de la galette et suivent en fonction du temps une expansion vers la surface du sol à l'aplomb de l'extrémité de la galette.

D'une manière générale, la composante verticale (le soulèvement) diminue beaucoup plus lentement que le mouvement radial que la galette transmet au massif. En effet celui-ci oppose à l'expansion de la galette une rigidité plus grande dans le sens radial plus que dans le sens vertical.

Du point de vue qualitatif, notons qu'à la différence des diffusions hydraulique et thermique qui s'effectuent de part et d'autre du centre de manière presque symétrique, on ne constate en mécanique qu'un soulèvement d'ensemble vers le haut. D'autre part, alors que la diffusion thermique et hydraulique est approximativement monodimensionnelle, les déplacements sont véritablement bidimensionnels.

On peut également remarquer que la diffusion est plus sensible à l'épaisseur de la galette que ne le sont les déplacements. Cela s'explique par une raison simple : les déplacements en un point dépendent de la distribution spatiale de la température et de la pression interstitielle, et de ce fait ils sont plus sensibles à l'énergie globale (constante) répartie dans la galette.

3.5.3

Évolution des contraintes

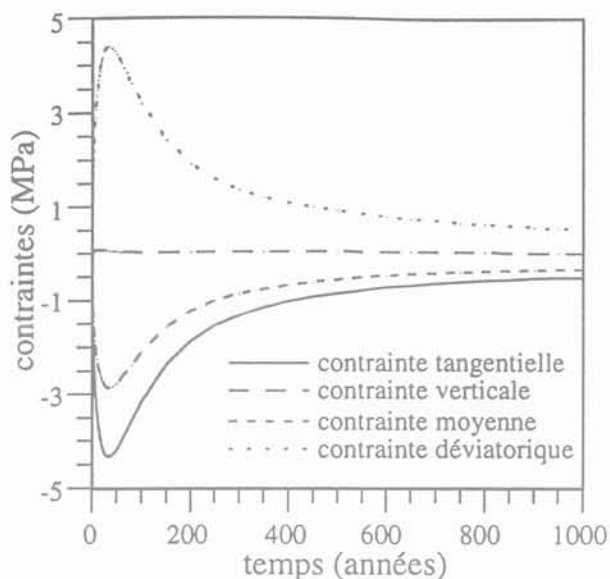
On s'intéresse particulièrement aux phénomènes au centre du stockage, lieu le plus chargé mécaniquement de la galette. La figure 11 donne l'évolution temporelle au milieu du stockage des quatre contraintes σ_θ (contrainte tangentielle), σ_z (contrainte verticale), σ_m (contrainte moyenne) et σ_{eq} (contrainte déviatorique de Von-Mises) pour les épaisseurs minimale et maximale de la galette.

Le point le plus remarquable semble être l'établissement d'un paroxysme mécanique, dont l'intensité varie légèrement avec l'épaisseur de la galette ; plus celle-ci est faible, plus le paroxysme mécanique est fort et se produit plus vite. Par exemple, pour une épaisseur de galette égale à 10 m, le déviateur maximal est de l'ordre de 4,5 MPa à l'instant 35 ans. Il est d'environ 3 MPa à l'instant 65 ans pour l'épaisseur $h = 140$ m. Il est intermédiaire entre ces deux valeurs pour les autres épaisseurs étudiées. Ces variations de paroxysme mécanique avec l'épaisseur répercutent l'évolution des diffusions thermique et hydraulique.

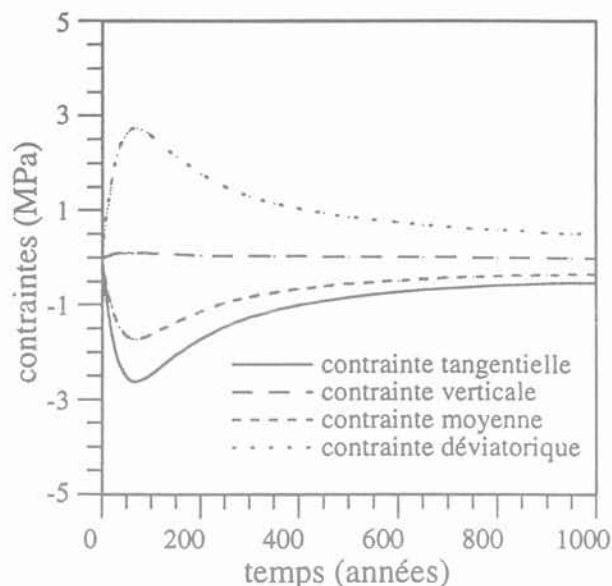
Remarquons qu'au centre du stockage, la contrainte équivalente de Mises s'identifie presque en valeur absolue à la contrainte orthoradiale. Pour une raison simple : au centre, le tenseur est naturellement diagonal $[\sigma = \text{diag} [\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta]]$, et dans ce cas σ_{eq} est donnée par la relation :

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2} ; \text{l'équilibre}$$

sur l'axe du stockage impose l'égalité des contraintes



(a) $h=10\text{m}$



(b) $h=140\text{m}$

FIG. 11 Évolution des quatre contraintes σ_θ , σ_z , σ_m et σ_{eq} au centre du stockage pour les épaisseurs minimale ($h = 10\text{ m}$) et maximale ($h = 140\text{ m}$).

Evolution of the four stresses σ_θ , σ_z , σ_m and σ_{eq} at the centre of the storage structure for the minimum ($h = 10\text{ m}$) and the maximum ($h = 140\text{ m}$) thicknesses.

radiale et tangentielle ; la contrainte verticale est presque nulle ($\sigma_z \sim 0$) ; il en résulte que : $\sigma_{eq} \sim |\sigma_\theta|$. Une conséquence directe de cette remarque fait que la contrainte moyenne vérifie une relation simple :

$$\sigma_m(t) \sim \frac{2}{3} \sigma_\theta(t), \text{ ce que l'on obtient bien (Fig. 11).}$$

L'importance relative du déviateur au centre de la galette nous conduit à nous poser la question de la plastification de l'argile dans ces zones chargées. Tout va dépendre en fait de la cohésion à long terme de l'argile raide considérée. Les essais effectués sur des argiles raides montrent à court terme une cohésion variant de 5 MPa à 7 MPa. Il est possible qu'en prenant en compte tous les termes de la puissance thermique dégagée par les déchets, on arrive à un déviateur de ce même ordre de grandeur. On examinera cette question dans la seconde analyse thermo-poro-plastique.

Le cisaillement se développe seulement à l'extrémité de la galette ($r = 1\,000\text{ m}$). La contrainte σ_{rz} s'annule dans le plan médian du stockage. Elle est de traction en dessous, de compression au-dessus de ce plan. On explique parfois l'amorce de la traction au voisinage de la limite latérale de la galette, par une analogie avec une poutre (Ghoreychi, 1990). En fait, la présence de la contrainte de cisaillement nous indique l'existence d'un mouvement bidimensionnel de la galette dans son extension latérale. La valeur du cisaillement en traction et en compression est de l'ordre de 0,8 MPa à 50 ans au voisinage de l'extrémité de la galette (Fig. 12).

3.6

Comparaison des résultats avec un modèle semi-analytique monodimensionnel

L'examen de l'allure des gradients thermiques et hydrauliques (Fig. 6 et 7) nous incite à comparer nos

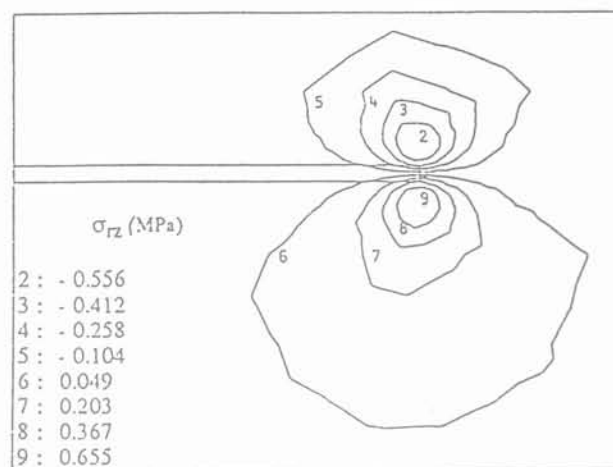


FIG. 12 Isovaleurs de la contrainte de cisaillement σ_{rz} à l'instant $t = 50\text{ ans}$ pour l'épaisseur $h = 40\text{ m}$.

The isovalues of the shear stress σ_{rz} at the time $t = 50\text{ years}$ for the thickness $h = 40\text{ m}$.

résultats avec ceux donnés par les modèles unidirectionnels. Certes, ces derniers ne prétendent pas décrire ce qui se passe au voisinage de la pointe de la galette, encore moins étudier les déplacements radiaux, ni non plus le cisaillement à la limite latérale du stockage. Mais dans l'axe du stockage ($r = 0$), on peut espérer qu'à court terme les résultats thermiques, hydrauliques et mécaniques (déplacement vertical, contrainte latérale) ne diffèrent pas beaucoup. On peut aussi évaluer le domaine de validité des modèles monodimensionnels : à partir de quel instant et de quel élanement de la galette l'écart entre les deux calculs devient significatif.

Le modèle monodimensionnel dont il est question ici, a été mis au point par Giraud (1993). Il suppose une extension infinie de la galette (élanement nul) : les

déchets sont ainsi confinés dans une couche semi-infinie d'argile saturée homogène isotrope élastique linéaire (tous les paramètres physiques sont constants). Considérons une couche d'argile d'épaisseur h , chauffante (dégageant une puissance volumique $Q_v(t) = Q_0 e^{-\omega t}$), dont le centre est à la distance H de la surface du sol (Fig. 13). A la surface du sol, libre de toute contrainte, une condition de drainage et une température nulle sont imposées (on raisonnera par rapport à un état thermo-hydro-mécanique initial en équilibre).

Dans ces conditions, Giraud montre que la solution du problème thermique (découplé de la mécanique et de l'hydraulique) permet d'obtenir, par combinaisons linéaires, l'expression analytique de la pression interstitielle et de la déformation volumique. La solution du problème mécanique (le déplacement vertical) s'en déduit par intégration numérique.

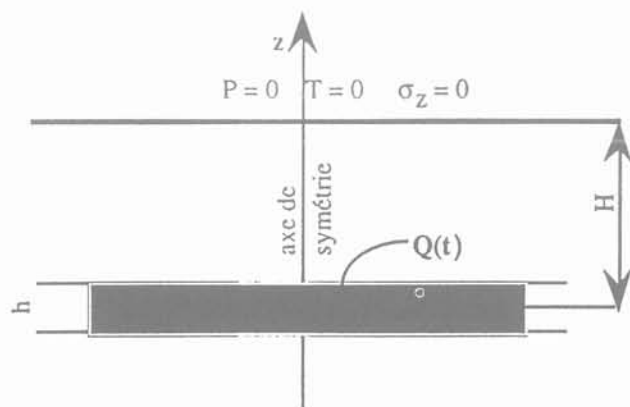


FIG. 13 Problème monodimensionnel de stockage (Giraud, 1993).
Monodimensional problem of the storage (Giraud, 1993).

• Résultats

On a tracé au centre de stockage (là où les grandeurs hydrauliques et thermiques doivent être les plus comparables) les pressions interstitielles ainsi que les températures (Fig. 14) et la contrainte latérale (Fig. 15) en fonction du temps pour différents élançements de la galette. Enfin, le déplacement axial à divers instants et pour les mêmes élançements est illustré sur la figure 16.

D'une façon générale, plus l'élançement est faible, plus les résultats des deux calculs se rapprochent et l'écart apparaît moins vite. Avant 30 ans, l'accord entre les résultats thermiques est très bon. Ils ne dépassent guère les 2 % de différence pour les élançements inférieurs à 0,02 et se rapproche de 8 % à 150 ans pour l'élançement 0,07. La diffusion hydraulique semble mieux répercuter l'importance de l'élançement mais là encore les différences n'excèdent pas 10 % pour les élançements étudiés.

L'écart se ressent plus vite aux grands élançements. Cependant, le modèle monodimensionnel surestime davantage les résultats mécaniques conduisant à une contrainte latérale majorée d'environ 15 % pour les plus grands élançements et à long terme. La différence entre les déplacements est significative pour tous les élançements étudiés puisqu'elle dépasse les 30 % à long terme à la surface du sol.

Ces différences s'expliquent : la couche infinie amplifie l'effet du dégagement de chaleur et génère plus de surpression interstitielle et majore la contrainte latérale. Le champ de déplacement étant obtenu par intégration le long de l'axe du stockage d'une combinaison de la pression et de la température, il cumule les différences entre les résultats des calculs mono et bidimensionnels.

On peut tout de même retenir que pour les premières dizaines d'années de stockage (environ 30 ans), les résultats que donne le modèle 1D (sur l'axe du stockage) sont pratiquement identiques à ceux obtenus par le modèle 2D, ce qui était prévisible. En effet, à court terme, on peut écrire : $\partial_r P / \partial_z P \approx \partial_r T / \partial_z T \approx h/R$.

Si l'élançement est faible (h/R petit devant l'unité), on peut négliger les gradients radiaux, devant les gradients verticaux et supposer alors que les diffusions sont uniquement verticales, ce qui constitue une approximation qui n'est pas justifiée à long terme.

4

Analyse thermo-poro-élastoplastique de l'enfouissement

4.1

Modélisation effectuée

On reprend la modélisation précédente (même cadre théorique et numérique, même géométrie, mêmes conditions aux limites), mais on examine cette fois-ci sous deux nouveaux aspects la réponse thermique, hydraulique et mécanique du massif : un comportement non linéaire élastoplastique de l'argile d'une part, et la variété des matériaux d'un site d'autre part. On introduit également la puissance thermique dans toute sa généralité et on profite de l'amélioration de nos connaissances sur la valeur de deux paramètres importants : le coefficient de dilatation linéique drainé et la conductivité thermique de l'argile. Bref, on s'approche davantage de la réalité de l'enfouissement.

4.1.1

Paramètres thermiques, hydrauliques et mécaniques des divers géomatériaux

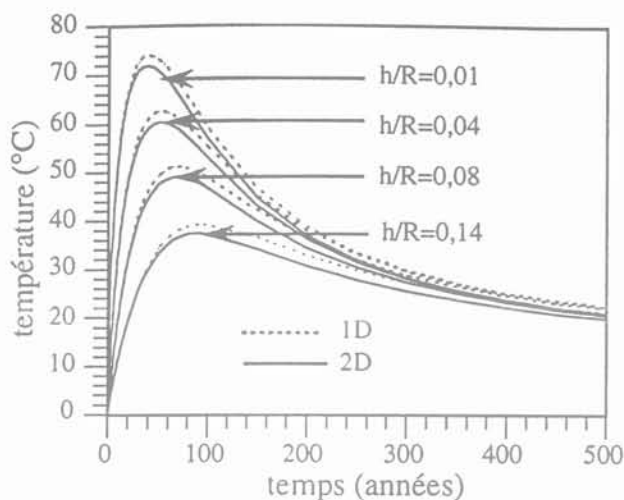
L'analyse de la coupe géologique du site type envisagé dans notre étude permet de distinguer dix géomatériaux. Le tableau III résume leurs caractéristiques thermiques, hydrauliques et mécaniques. On reviendra plus loin sur les paramètres de cisaillement pris pour l'argile.

4.1.2

Loi de dégagement thermique

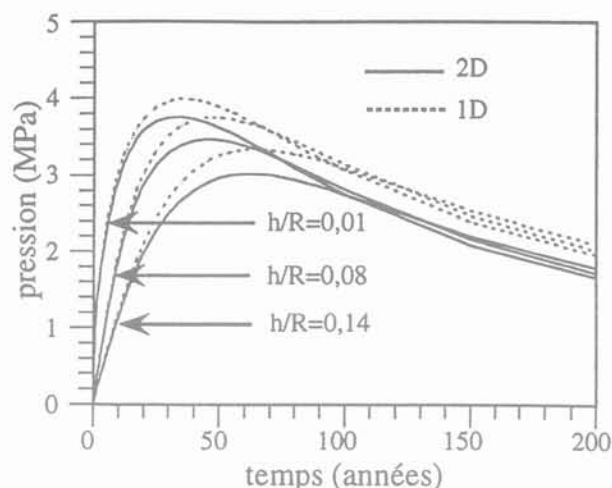
L'expression analytique la plus récente en provenance de l'ANDRA concernant la loi de dégagement thermique des déchets vitrifiés de catégorie C s'écrit en W par tonne de métal :

$$P(t) = 899 \exp[-t \log 2 / 29,15] + 24,07 \exp[-t \log 2 / 432] \\ + 0,59 \exp[-t \log 2 / 7380] \\ + 0,26 \exp[-t \log 2 / 24,10^3] + 0,037 \exp[-t \log 2 / 2,1 \cdot 10^6] \\ + 3,10^{-5} \exp[-t \log 2 / 10^9].$$



(a) Température

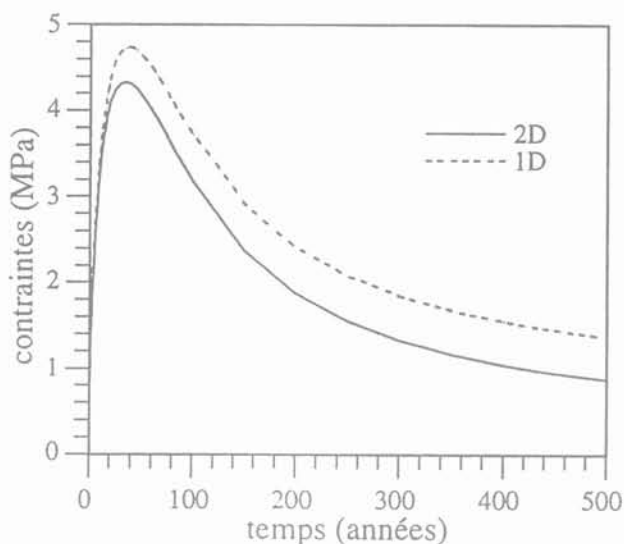
(a) Temperature



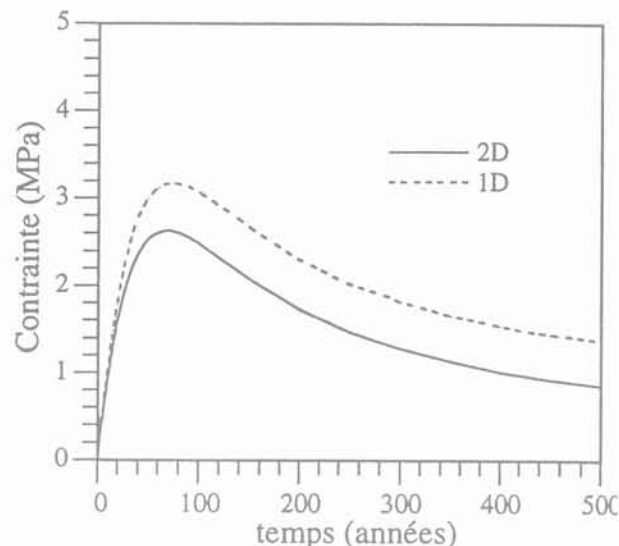
(b) Pression

(b) Pressure

FIG. 14 Évolution comparée de la température et de la pression interstitielle au centre du stockage.
Compared evolution of the temperature and the pore water pressure at the centre of the storage.



(a) $h=10\text{m}$



(b) $h=140\text{m}$

FIG. 15 Évolution comparée de la contrainte circonférentielle σ_θ au centre du stockage pour les épaisseurs $h = 10\text{ m}$ et $h = 140\text{ m}$.
Compared evolution of the circumferential stress σ_θ at the centre of the storage structure for the thickness $h = 10\text{ m}$ and $h = 140\text{ m}$.

Si on admet qu'un stockage correspond à peu près à 10^5 tonnes de métal uranium, la puissance volumique $Q(t)$ devient: $Q(t) = P(t+t_0) \cdot 10^5 / (\pi R^2 h)$ où t_0 représente le temps de refroidissement des déchets en surface (30 ans), R le rayon de la galette (1 km) et h son épaisseur (longueur des puits variable). C'est cette puissance Q que nous avons programmée comme chargement volumique dans le code CESAR-LCPC.

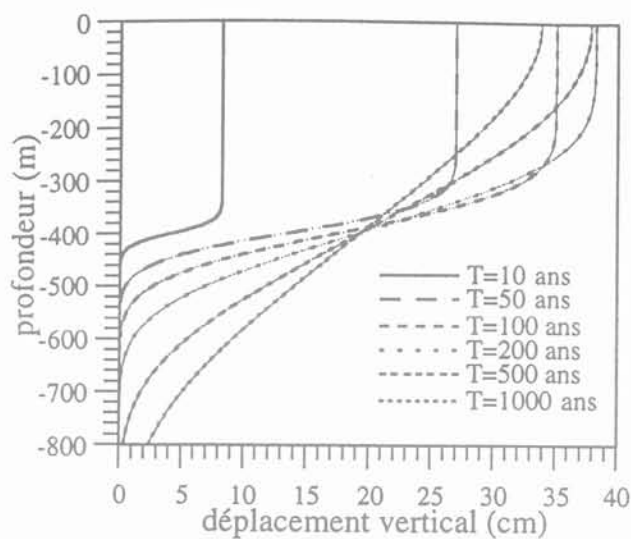
4.1.3

Loi de comportement de l'argile hôte

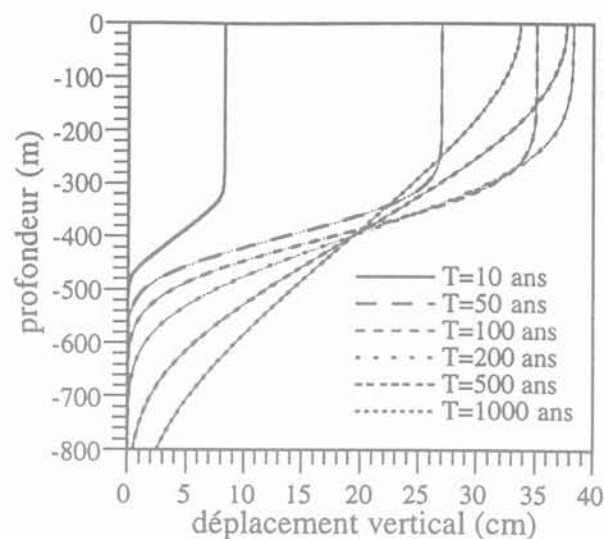
L'argile considérée possède un comportement relativement complexe. Elle est élasto-plastique à court

terme, fluante à long terme, écouissable dans les deux cas (Rousset, 1988). Il nous paraît raisonnable, avant de compliquer la modélisation, de partir d'un modèle simple, celui de Mohr Coulomb associé. Comme on s'intéresse à l'évolution du stockage sur une longue période, on a pris les paramètres de cisaillement à long terme suivants: $C=2\text{ MPa}$ et $\phi=4^\circ$.

Précisons cependant que ses valeurs ne sont qu'approximatives pour deux raisons au moins: les essais effectués jusqu'à présent sur les argiles profondes sont, pour la plupart, réalisés en conditions non drainées d'une part, et d'autre part, il a été prouvé (Rousset, 1993) que le déviateur à la rupture de cette argile chute sensiblement sous l'échauffement (écrouissage d'origine thermique).



(a) h=10m



(b) h=140m

FIG. 16 Profil du déplacement vertical le long de l'axe de symétrie pour les épaisseurs minimale ($h = 10$ m) et maximale ($h = 140$ m). Problème 1D.
Vertical displacement profiles along the axis of symmetry for the minimum ($h = 10$ m) and the maximum ($h = 140$ m) thicknesses. 1D problem.

TABLEAU III Caractéristiques thermo-hydro-mécaniques.

	$\gamma \cdot 10^{-3}$ MPa/m ³	E_0 MPa	ν_0	$\gamma_w \cdot 10^{-3}$ MPa/m ³	$1/M$ MPa ⁻¹	k_x m/s	k_y m/s	k_{xy} m/s	n	b	T_0 K	C_p J°K/m ³	λ_x W°K/m	λ_y W°K/m	λ_{xy} W°K/m	α_0 °K ⁻¹	K_0 MPa	α_m °K ⁻¹	C MPa	ϕ deg
Craie-marnes 0-112 m	18	250	0,25	10	$1,8 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-4}	0	0,20	1	293	10^6	0,9	0,9	0	10^{-5}	167	$2,88 \cdot 10^{-5}$	1	15
Sables-argile 121-131 m	19	66	0,25	10	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-10}	10^{-10}	0	0,25	1	293	10^6	2	2	0	10^{-5}	44	$2,98 \cdot 10^{-5}$	0	17
Sables-argile carbonatée 131-156 m	17	650	0,25	10	$3,36 \cdot 10^{-4}$	10^{-10}	10^{-10}	0	0,37	1	293	10^6	2,5	2,5	0	10^{-5}	433	$4,3 \cdot 10^{-5}$	5	30
Grès-argile 156-187 m	16	1620	0,2	10	$3,45 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}	10^{-7}	0	0,38	1	293	10^6	3	3	0	10^{-5}	900	$2,8 \cdot 10^{-5}$	5	30
Calcaire-argile 187-262 m	19	2000	0,25	10	$3,45 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}	10^{-7}	0	0,38	1	293	10^6	2,5	2,5	0	10^{-5}	1333	$4,4 \cdot 10^{-5}$	7	30
Calcaire 262-325 m	22	$14 \cdot 10^3$	0,27	10	$2,73 \cdot 10^{-4}$	10^{-7}	10^{-7}	0	0,3	1	293	10^6	2,5	2,5	0	10^{-5}	$1,01 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	7	30
Argile 325-478 m	20	2330	0,3	10	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-12}$	0	0,20	1	293	$2,85 \cdot 10^5$	1,3	1,3	0	$2 \cdot 10^{-5}$	1940	$2,45 \cdot 10^{-5}$	2	4
Calcaire 478-693 m	24	$44 \cdot 10^3$	0,2	10	$1,8 \cdot 10^{-4}$	10^{-6}	10^{-6}	0	0,29	1	293	10^6	2,5	2,5	0	10^{-5}	$2,44 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	15	40
Argile 693-864 m	21	3417	0,12	10	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	0	0,15	1	293	10^6	2	2	0	$2 \cdot 10^{-5}$	1498	$3,2 \cdot 10^{-5}$	5	15
Marnes-argile- calcaire 864-2000 m	21	3417	0,12	10	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	0	0,15	1	293	10^6	2	2	0	$2 \cdot 10^{-5}$	1498	$3,2 \cdot 10^{-5}$	5	15

4.1.4

Maillage et modèle numérique

Le modèle numérique utilisé est un modèle isotrope élastoplastique du type Mohr-Coulomb associé, appliqué au problème bi-dimensionnel axisymétrique présenté sur la figure 2. On prévoit 11 groupes d'éléments finis respectant la stratification des terrains telle qu'elle est donnée dans le tableau III. Le maillage (Fig. 17) est

constitué de triangles à 6 nœuds et de quadrilatères à 8 nœuds. Ces éléments isoparamétriques et quadratiques sont réputés adaptés aux calculs de diffusion et de mécanique non linéaire. On peut également dire que ce maillage est relativement dense ; sa finesse a été accrue dans la couche hôte du stockage pour deux raisons évidentes : conformité de la taille des éléments chauffants (11^e matériau) au calcul de chargement volumique thermique, niveau de la zone plastique potentielle.

Soulignons enfin, pour fixer les idées, qu'avec ce maillage type, on résout un système non linéaire (itératif) et transitoire d'environ 8000 équations.

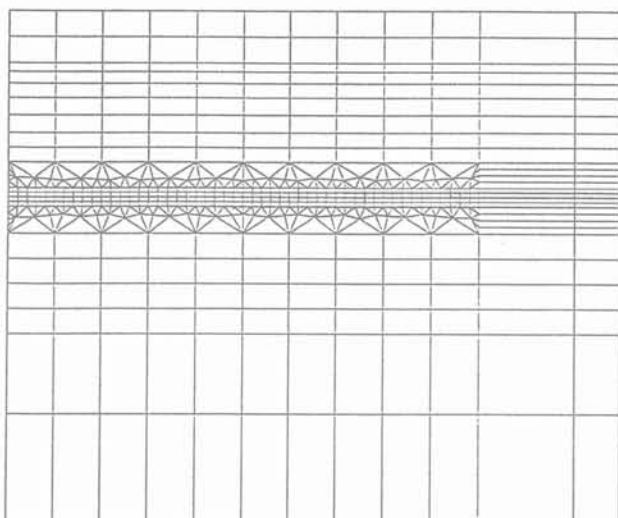


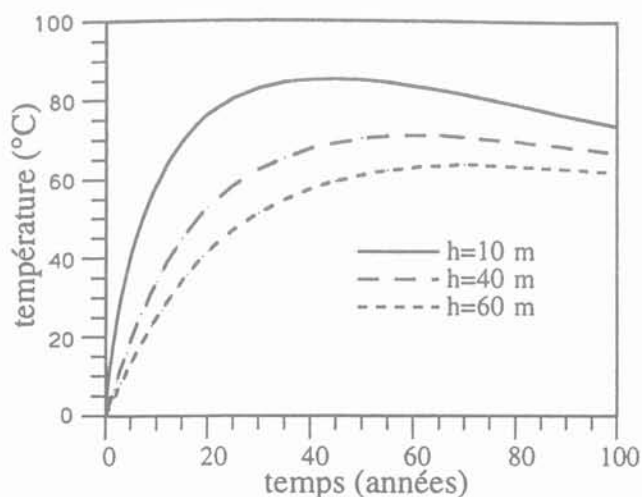
FIG. 17 Maillage d'éléments finis servant à l'étude thermo-poro-plastique.
The finite element mesh for the thermo-poro-plastic study.

Ce système est implémenté sous forme algorithmique dans le module MPNL (milieux poreux non-linéaires) du code de calculs par éléments finis CESAR-LCPC. Son traitement de la plasticité repose sur les idées suivantes : schéma totalement implicite pour l'intégration dans le temps, un schéma dit de « contraintes initiales » pour le calcul des efforts internes (résidus) et un procédé itératif du type Newton pour la résolution du système global matriciel.

4.1.5

Conditions aux limites et conditions initiales

En ce qui concerne les conditions aux limites, aucune modification n'est apportée par rapport à



(a) Température
(a) Temperature

l'étude thermo-poro-élastique (Fig. 3). Par contre, l'état initial est nécessairement différent, car il faut pour un calcul plastique (itératif) initialiser les contraintes (état de contraintes non nul).

Pour continuer de raisonner en terme de variation de pression, de température et de déplacement, on adopte la méthode simple suivante :

On sait que l'état initial est un état hydrostatique ; la pression hydrostatique comme chargement mécanique ajoutée aux contraintes initiales équilibrent le poids total des terres.

Au lieu de déclarer donc trois types de chargements différents, on enlève le poids volumique de l'eau directement du poids volumique total, on obtient ainsi un poids total déjaugé qui permet de construire un état de

contraintes effectives initiales : $\underline{\sigma}'(z,0) = - \left(\int_0^z \gamma(u) du \right) \underline{1}$.

Insistons tout de même sur un point : cette initialisation ne doit pas nous faire oublier le rajout, à tout instant, aux résultats de contraintes et de pression interstitielle, de la pression hydrostatique : $P1 = \gamma_w (z-z_0) \underline{1}$.

4.2

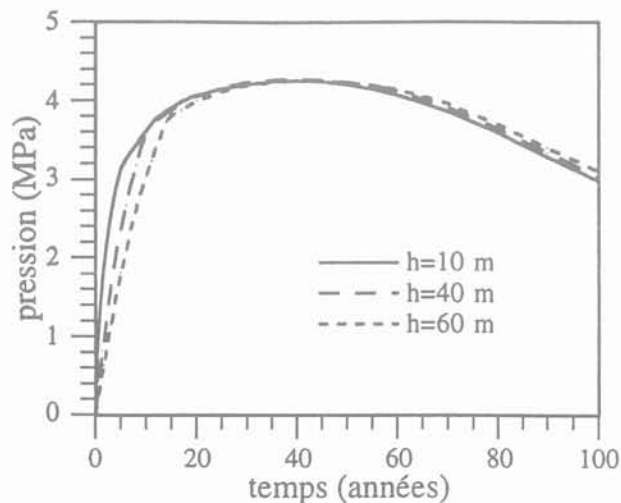
Résultats et analyse

4.2.1

Évolution du champ de pression et de température

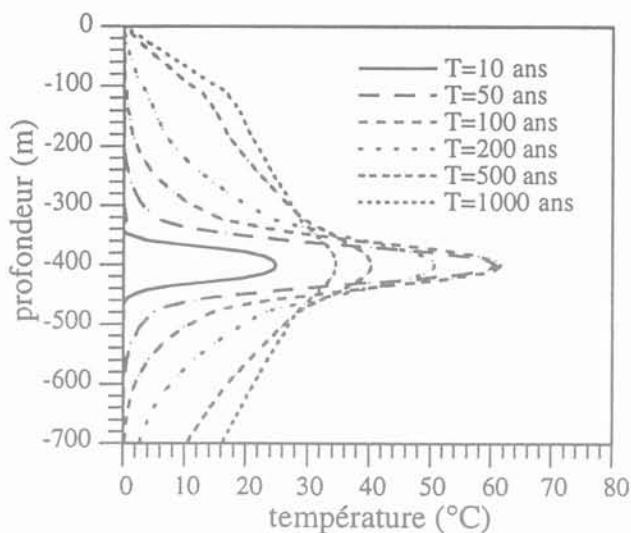
Dans le même esprit de présentation faite pour l'étude thermo-poro-élastique, on donne l'évolution de la température et de la pression au centre du stockage, en fonction du temps (Fig. 18), pour les différentes épaisseurs étudiées. La figure 19 illustre l'évolution spatiale, le long de l'axe du stockage ($r = 0$), de la température et de la pression interstitielle.

L'effet combiné d'une plus faible conductivité thermique de l'argile et de la prise en compte de tous les termes de la puissance de dégagement thermique est net : le paroxysme thermique est de l'ordre de 85 °C au

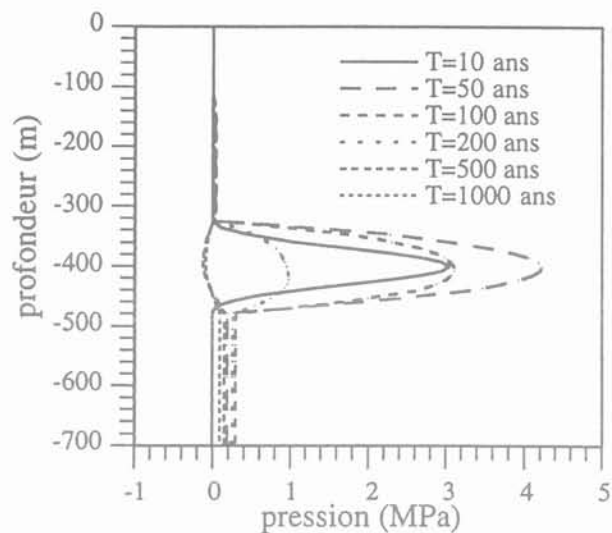


(b) Pression
(b) Pressure

FIG. 18 Évolution de la température et de la pression interstitielle au centre de la galette.
Evolution of the temperature and the pore water pressure at the centre of the cake.



(a) Profil de température pour h=60m
(a) Temperature profile for h=60m



(b) Profil de pression pour h=60m
(b) Pore pressure profile for h=60m

FIG. 19 Profils de température et de pression interstitielle le long de l'axe de symétrie pour l'épaisseur h = 60 m. Temperature and pore pressure profiles along the axis of symmetry for the thickness h = 60 m.

lieu de 72 °C obtenus dans l'étude thermo-poro-élastique pour l'épaisseur h = 10 m. Si on ajoute à cette variation la température initiale, on obtient un ordre de grandeur proche de 120 °C.

Par ailleurs, on ne constate pas (Fig. 18a) sur l'évolution thermique une influence d'origine mécanique. C'est un résultat tout à fait prévisible : l'aspect thermique est presque découplé des aspects hydrauliques et mécaniques.

Par contre l'évolution de la pression (Fig. 18b) semble bien indiquer une influence d'origine mécanique notamment dans la plage 15-50 ans correspondant en fait, comme on le verra plus loin, à une nette plastification de la zone centrale du stockage. Pendant ce temps, on constate deux tendances :

- l'effet de l'épaisseur de la galette est quasiment nul entre 15 et 50 ans, ce que l'on n'a pas observé en thermo-poro-élasticité ;
- une inversion des effets de l'épaisseur de la galette : avant la charge plastique c'est la plus faible épaisseur qui conduit au maximum de pression, ce qu'on a obtenu en thermo-poro-élasticité ; après la plastification du centre, c'est le phénomène inverse : la plasticité joue sur la vitesse de dissipation des pressions interstitielles.

Il reste néanmoins un point à clarifier : pourquoi la hausse de température n'a-t-elle pas entraîné une augmentation du paroxysme hydraulique, qui a conservé pratiquement la même valeur que dans l'étude précédente.

La réponse à cette question réside dans l'influence de la plasticité sur l'écoulement hydraulique, là encore. En effet, l'étude comparée d'un calcul élastique (on prend une cohésion artificiellement élevée pour l'argile pour que celle-ci demeure élastique) montre que la plasticité contribue à un emmagasinement hydraulique supplémentaire (de l'ordre de 20 %), comme l'illustre la figure 20.

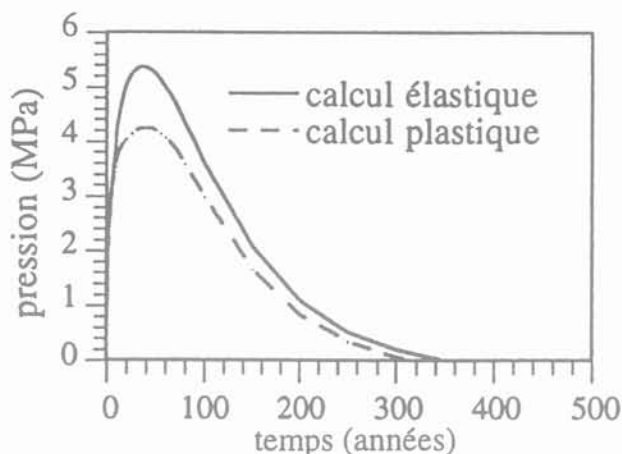


FIG. 20 Influence plastique sur l'évolution de la pression interstitielle au centre du stockage (h = 10 m). Plastic influence on the evolution of the pore pressure at the centre of the storage (h = 10 m).

Cet emmagasinement hydraulique de provenance mécanique trouve son origine dans le terme (2) de l'équation (2) : il y a en effet une contribution de déformation volumique plastique, le critère plastique étant dépendant de la contrainte moyenne ; autrement dit :

$$b \frac{\partial e}{\partial t} = b \left(\frac{\partial e^e}{\partial t} + \frac{\partial e^p}{\partial t} \right).$$

D'autre part, l'hétérogénéité du site a une influence marquée sur l'évolution spatiale de la température et de la pression (Fig. 19). C'est normal : la continuité des flux impose à la traversée de deux couches sous-jacentes i, j :

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial r}$$

$$k_i \frac{\partial P_i}{\partial r} = k_j \frac{\partial P_j}{\partial r}$$

$$\text{donc } \frac{\left| \frac{\partial T_i}{\partial r} \right|}{\left| \frac{\partial T_j}{\partial r} \right|} = \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \quad \text{et} \quad \frac{\left| \frac{\partial P_i}{\partial r} \right|}{\left| \frac{\partial P_j}{\partial r} \right|} = \frac{k_j}{k_i}$$

Il y a donc une réfraction de la température et de la pression à chaque traversée de banc de terrain. Il se trouve que les matériaux avoisinant l'argile hôte sont tellement perméables que le rapport des perméabilités est pratiquement infini. Il en résulte un drainage presque instantané en dehors de la couche argileuse, comme si on avait ramené la condition à la limite de la surface du sol et à la base du modèle aux niveaux supérieur et inférieur de l'argile hôte.

Le peu de différence de perméabilité entre le calcaire supérieur (10^{-7} m/s) et inférieur (10^{-8} m/s) semble suffisant pour opérer une dissymétrie de l'écoulement par rapport au centre. La pression augmente plus dans le calcaire inférieur, qui est moins perméable (Fig. 19).

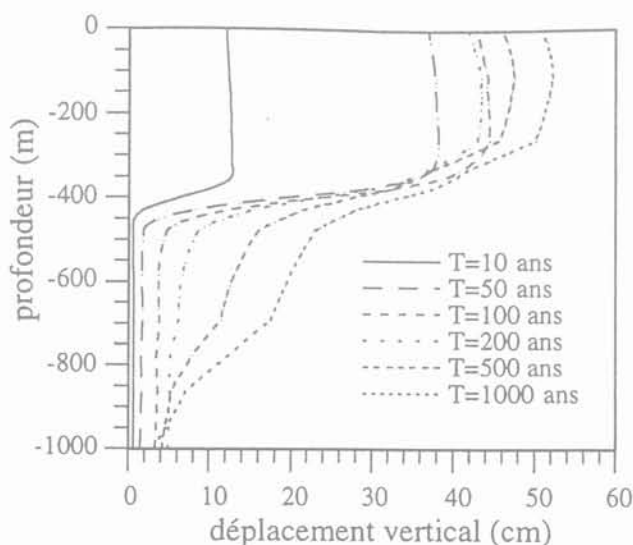
De plus, on constate de très légères surpressions négatives à long terme. C'est un effet exclusivement dû au site et non d'origine rhéologique, comme le montrent d'ailleurs la figure 19 et les résultats du calcul homogène (Fig. 5).

4.2.2

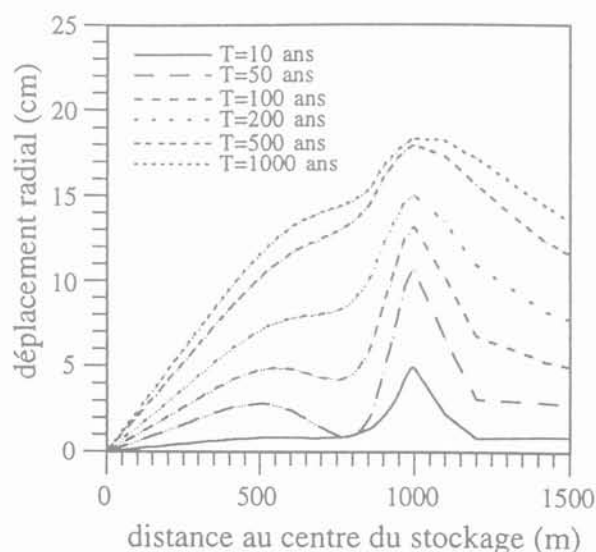
Évolution des déplacements et des contraintes

• État des déplacements

On a tracé pour les différentes épaisseurs, la répartition spatiale du déplacement vertical suivant l'axe du stockage ($r = 0$) à divers instants et du déplacement radial suivant la coupe au milieu du stockage ($z = 400$ m) aux mêmes instants (Fig. 21).



(a) Profils du déplacement vertical
(a) Vertical displacement profiles



(b) Profils du déplacement radial
(b) Horizontal displacement profiles

FIG. 21

Profils des déplacements vertical le long de l'axe ($r = 0$) et radial le long de l'axe médian de la galette ($z = 400$ m) pour l'épaisseur $h = 60$ m.
Vertical and horizontal displacement profiles respectively along the axis ($r = 0$) and along the radius of the median plane ($z = 400$ m) for the thickness $h = 60$ m.

Ces figures sont à comparer à celles déjà obtenues en thermo-poro-élasticité.

Ces figures nous permettent de formuler les points suivants:

a) le déplacement vertical est beaucoup plus important que celui obtenu pour le calcul thermo-poro-élastique précédent, pour plusieurs raisons qui se conjuguent: l'échauffement est plus important dans le calcul thermo-poro-plastique, la plastification et la nature du critère favorisant la dilatance, la faible rigidité des matériaux supérieurs (grès, sables et surtout la craie) et la quasi-absence d'écoulement dans les formations supérieures (à cause de leurs fortes perméabilités) tendant à augmenter les contraintes effectives dans le recouvrement, et surtout l'effet de la nouvelle valeur de la dilatation linéique introduite (celle-ci a été doublée);

b) l'influence des divers terrains, responsables d'une réfraction du déplacement vertical, liée à l'hétérogénéité du site est nette; plus le module Young est faible, plus la tendance au soulèvement est accentuée;

c) le déplacement radial répercute surtout l'influence de la plasticité (Fig. 21). A l'instant 10 ans où la plastification n'a pas encore joué un rôle prépondérant, on voit une évolution analogue à celle obtenue en thermo-poro-élasticité: croissance monotone en fonction de la distance au centre du stockage, pic à la pointe de la galette. En revanche, au fur et à mesure du développement de la plasticité, se dégage une contribution de déformation radiale non négligeable dont résulte un deuxième pic situé entre le centre du stockage où le déplacement radial est nul (axe de symétrie) et la pointe de la galette, lieu du maximum de déplacement radial aussi bien en élasticité qu'en plasticité. Ces deux pics coexistent même à long terme;

d) à 1000 ans, le soulèvement de la surface du sol est toujours croissant (pas d'amorce de tassement). L'ordre de grandeur de ce soulèvement est de 50 cm tout au long d'un rayon égal à 800 m environ. Il faudra bien évi-

demment en tenir compte pour certaines activités de génie civil à la surface du sol (constructions de canaux, de lignes de chemin de fer...), et ce pour une durée apparemment bien plus longue que celle de notre calcul (1 000 ans). Le déplacement radial même s'il continue de croître après 1 000 ans, a une importance toute relative : il ne dépasse guère les 20 cm en profondeur et n'intéresse pratiquement que la zone de stockage, comme le montre la figure 22 des déformées.

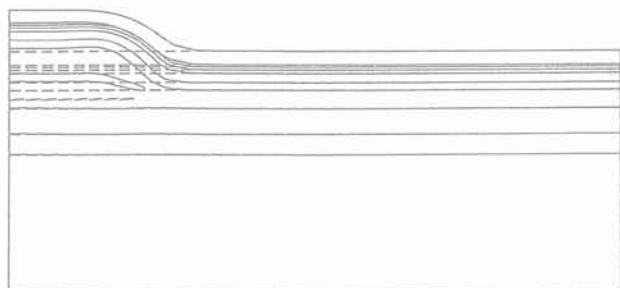


FIG. 22 Déformée des contours du maillage illustrant l'amplitude et le sens du champ de déplacement.

The deformed contour lines showing the displacement field. A global upheaval is observed.



FIG. 23 Évolution et extension de la zone plastifiée du stockage ($h = 10$ m).

The evolution and the extension of the plastified zone of the storage ($h = 10$ m).

On s'intéresse maintenant à un aspect particulier du problème, à savoir l'évolution de la zone plastique et de son extension. Pour cela, on trace à divers instants les points plastiques (Fig. 23).

Quelques enseignements se dégagent :

- la plastification commence à se manifester à partir de 5 ans environ ;
- la plasticité s'amorce d'abord dans l'axe du stockage et se répand radialement dans le plan médian de la galette ; ainsi à 5 ans, 880 m de la galette sont plastifiées, à 10 ans, il ne reste qu'une vingtaine de mètres non plastifiés de la galette ;
- l'extension verticale, relativement plus lente et moins importante, dépend de l'épaisseur de galette étudiée. Mais d'une façon générale, elle ne dépasse guère la

couche argileuse (partie en zoom autour du stockage (Fig. 23)) ;

– à partir de 50 ans environ, la zone plastique reste gelée (identique à tout instant ultérieur) collant ainsi au régime transitoire thermique (pas de déformations plastiques supplémentaires pendant la phase post-paroxysme thermique) ;

– l'écoulement plastique est clairement bidimensionnel, les modèles mono-dimensionnels seraient donc insuffisants.

• État des contraintes

L'état des contraintes est sous-jacent à l'analyse déjà faite à propos notamment de l'évolution des pressions interstitielles et des déplacements. On a cependant cherché à expliciter davantage l'évolution du déviateur et de la contrainte moyenne intervenant directement dans l'expression du critère plastique. La figure 24 donne leur évolution pour les différentes épaisseurs. On voit sur les courbes du déviateur et de la contrainte moyenne l'inversion de l'effet de l'épaisseur de la galette. Pendant la phase élastique ($t < 50$ ans) c'est l'épaisseur la plus petite qui conduit au déviateur maximal. Après la phase plastique (> 50 ans) c'est l'inverse qui se produit.

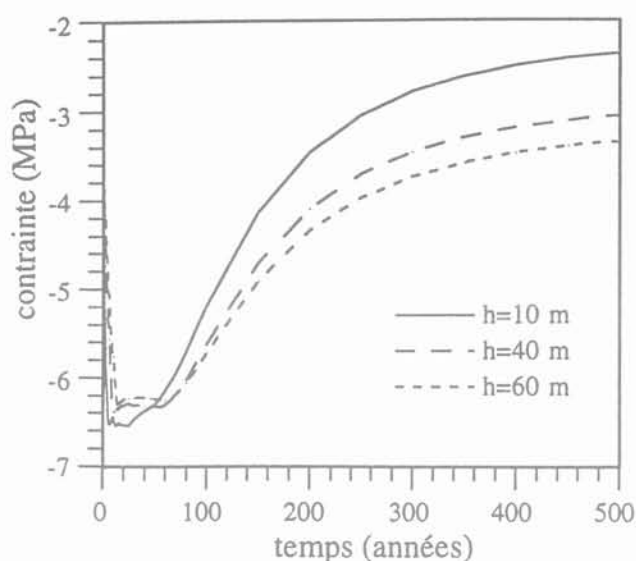
Pendant le temps de la charge plastique ($\epsilon^p > 0$) située entre environ 5 ans et 50 ans, l'influence de l'épaisseur de la galette est pratiquement négligeable.

De plus, on note les tendances suivantes :

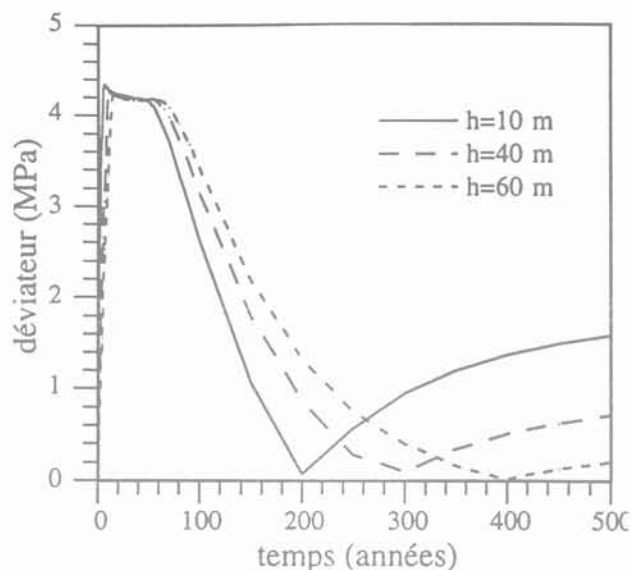
- le déviateur $\sqrt{3}J_2$ au centre croît rapidement en fonction du temps jusqu'à l'instant où se déclenche la plasticité (instant qui dépend légèrement de l'épaisseur de la galette) passe par un palier pendant la charge plastique ($5 \leq t \leq 50$ ans) et chute jusqu'à sa valeur initiale nulle avant de croître lentement après. Le temps où s'annule le déviateur, dépend également de l'épaisseur de la galette (200 ans pour $h = 10$ m), (300 ans pour $h = 40$ m), (400 ans pour $h = 60$ m) ;
- comme l'ordre des contraintes principales évolue au centre de la galette, c'est sans doute la raison de la reprise de croissance du déviateur après sa chute ;
- la contrainte moyenne semble se stabiliser à long terme à une valeur relativement plus faible que sa valeur initiale hydrostatique déjaugée, autrement dit elle subit une variation positive à long terme (+ 2 MPa, pour $h = 10$ m, par exemple). Mais elle reste de compression puisqu'il faut lui rajouter la pression hydrostatique initiale (– 4 MPa).

Pour bien montrer que ces tendances trouvent leur explication dans la rhéologie adoptée, on a fait une comparaison entre un calcul thermo-poro-élastique (on met artificiellement dans le jeu de données une forte cohésion pour l'argile) et un calcul thermo-poro-plastique. La figure 25 donne les courbes de variation dans le temps du déviateur et de la contrainte moyenne pour une épaisseur de galette fixée ($h = 10$ m).

On voit bien que pendant la phase élastique, il s'agit de la même variation. Mais dès que s'amorce la plasticité ($t \sim 5$ ans) le déviateur devient constant pendant toute la phase de charge plastique. Sa valeur, qui déclenche la plasticité, est proche de 2C (déviateur de Tresca), car l'angle de frottement est relativement faible. Il chute pendant la phase de décharge plastique où le centre entame son refroidissement et reprend à l'issue de cette phase post-paroxysme thermique, du



(a) contrainte moyenne
(a) Mean stress

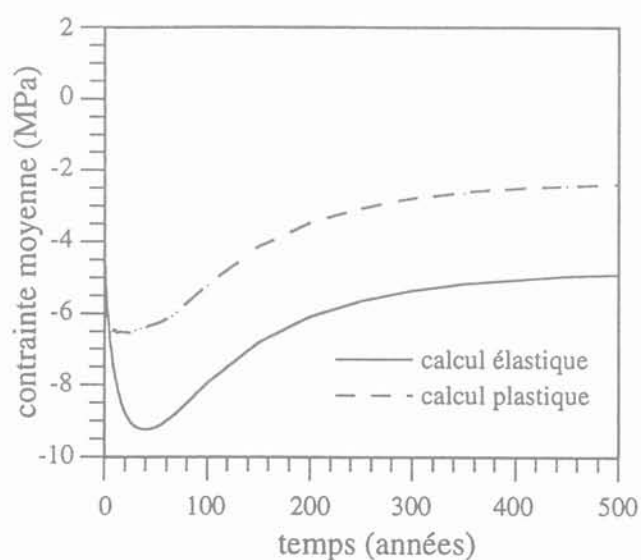


(b) contrainte déviatoire
(b) Deviator stress

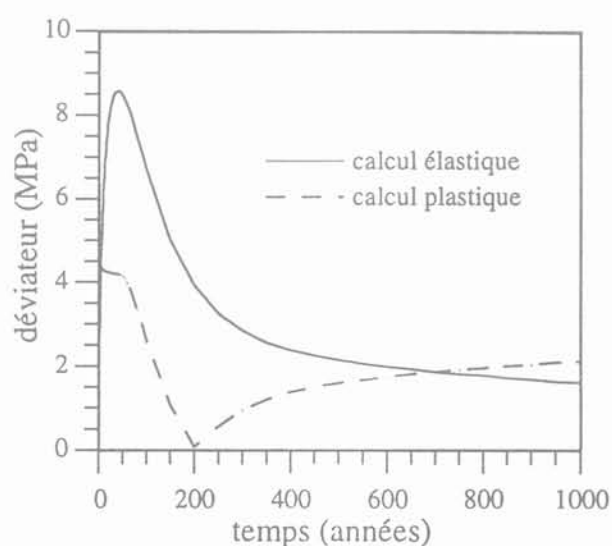
FIG. 24

Évolution des contraintes moyenne σ_m et déviatoire σ_{eq} au centre du stockage pour les épaisseurs étudiées.

Evolution of the stresses σ_m and σ_{eq} at the centre of the storage structure for the studied thicknesses.



(a) contrainte moyenne
(a) Mean stress



(b) contrainte déviatoire
(b) Deviator stress

FIG. 25

Influence de la plasticité sur l'évolution des contraintes moyenne et déviatoire au centre du stockage pour l'épaisseur $h = 10$ m.

Influence of the plasticity on the evolution of the mean and deviator stresses at the centre of the storage for the thickness $h = 10$ m.

fait de l'évolution de l'ordre des contraintes principales au centre du stockage. Par contre, en thermo-poro-élasticité il y a une évolution quasiment réversible, caractérisée par un « paroxysme mécanique » unique.

5

Conclusion et perspectives

On a effectué une étude numérique paramétrique en thermo-poro-élasticité et une étude en thermo-poro-plasticité appliquées à un enfouissement de déchets radioactifs exothermiques dans une argile raide saturée, grâce au code de calculs par éléments finis CESAR-LCPC (modules MPLI et MPNL).

Par une approche globale (modèle de galette), bidimensionnelle et axisymétrique, on a étudié l'influence de l'épaisseur de la galette sur la réponse thermo-hydro-mécanique à long terme du massif. A l'issue de cette modélisation thermo-poro-élastique, il se dégage les principaux points suivants :

1) Plus l'épaisseur de la galette est faible, plus les paroxysmes thermique, hydraulique et mécanique (déviateur, contraintes radiale et orthoradiale) sont forts en intensité et se produisent plus vite. A l'inverse, si l'épaisseur est importante les paroxysmes diminuent en intensité et sont différés.

Pour tous les élançements étudiés, les maximums de température, de pression et de déviateur au centre du stockage sont atteints au cours de la première centaine d'années du stockage. Leurs valeurs (une variation de température de 72 °C, une surpression de 4MPa et un déviateur de 5MPa, pour l'épaisseur minimale) sont *a priori* compatibles avec la sécurité de l'enfouissement ;

2) le soulèvement de la surface du sol est maximal à 200 ans (25 cm environ) presque indépendamment de l'épaisseur de la galette. Le tassement pendant la phase de refroidissement est extrêmement lent (1 cm tous les 100 ans). La valeur du déplacement vertical à la surface du sol est très peu affectée par l'élançement de la galette ;

3) quelle que soit l'épaisseur de la galette, il s'établit systématiquement, pendant la phase du refroidissement de la zone centrale de stockage, deux écoulements dont un secondaire se dirigeant vers le centre du stockage (région refroidie) et un plus important se dirigeant vers le massif encore chaud. Cela explique le fait que le centre du stockage n'est pas nécessairement le lieu du paroxysme hydraulique à tout instant. La naissance de cet écoulement vers le centre du stockage agit dans le sens de la sécurité de l'enfouissement, puisqu'il tend à limiter la migration des particules fluides contenant des radioéléments ;

4) les calculs monodimensionnels sont pratiquement valables dans l'axe du stockage sur une période de temps qui varie en fonction de l'élançement de la galette. Les écarts entre les résultats des calculs monodimensionnels et bidimensionnels sont réduits en ce qui concerne la diffusion thermique, modérés en hydraulique et significatifs à long terme en mécanique. Les résultats 1D majoraient systématiquement les résultats réels.

5) les valeurs des déviateurs obtenues nous ont incité à poursuivre la modélisation en thermo-poro-plasticité.

On s'est rapproché davantage de la réalité de

l'enfouissement des déchets à l'occasion de la modélisation thermo-poro-plastique : prise en compte des principaux matériaux du site, de toute la puissance thermique des déchets, de la non-linéarité du comportement mécanique.

Cette dernière étude a mis en évidence les points suivants :

1) L'intensité de la chauffe est relativement plus importante, une augmentation d'environ une quinzaine de degrés (20 %) due à la fois à l'influence des autres termes de la puissance thermique des déchets et surtout à la nouvelle valeur de la conductivité thermique, plus faible ; aucune différence en ce qui concerne les tendances liées à l'effet de l'épaisseur de la galette, la variation qualitative en fonction du temps, mais seulement dans l'espace où l'hétérogénéité thermique semble plus favorable, dans l'ensemble, à une meilleure diffusion.

2) Contrairement à la température, la pression interstitielle est bien affectée par la mécanique (couplages hydro-mécaniques). Une chute de pression interstitielle au centre de la galette se produit du fait de la plasticité ; l'emmagasinement hydraulique d'origine mécanique est de l'ordre de 20 %. Le drainage des bancs supérieur et inférieur à la couche d'argile hôte est lié à leur forte perméabilité. L'influence du site est évidente sur la répartition du champ de pression.

3) Pour tous les jeux d'épaisseurs étudiées, il y a une plastification dont l'étendue dépend de la valeur de l'épaisseur. Cette plastification reste limitée dans la couche argileuse.

4) Le déplacement vertical de la surface du sol a pratiquement doublé pour diverses raisons (plasticité, faible rigidité des matériaux de surface,...) mais surtout à cause de la nouvelle valeur double introduite du coefficient de dilatation linéique drainé α_v . Le soulèvement du sol est important, il dépasse le demi-mètre et est toujours croissant dans la période étudiée.

5) La plasticité commence toujours à se développer au niveau de l'axe du stockage, demeure tributaire de l'ampleur de l'échauffement (charge plastique pendant la période du paroxysme thermique et décharge pendant le refroidissement) et semble responsable d'un mouvement radial du stockage.

En terme de perspectives, il nous semble important de poursuivre la modélisation du champ lointain sous deux angles nouveaux :

1) l'effet de la *variation de la cohésion en fonction de la température*. Si la cohésion chute en fonction de la température, comme cela est confirmé par les essais, on risque d'avoir une plastification plus amplifiée dans ses effets et dans son extension aux couches avoisinantes ;

2) l'effet d'un couplage convectif lié à la présence d'un écoulement transversal de la nappe souterraine. Ce courant d'eau peut, compte tenu des perméabilités fortes du recouvrement, empêcher la diffusion thermique verticale et minorer ainsi les effets thermo-mécaniques du stockage.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude envers l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs, 92266 Fontenay-aux-Roses, France) pour son support à ce travail de recherche.

- Bérest P. – Les problèmes de mécanique associés au stockage souterrain. Thèse ENSM, 1989, Paris.
- Biot M.A. – General theory of three dimensional consolidation. *J. of App Physics*, 12, 1941, pp. 155-164.
- Côme B. – Aspects thermomécaniques liés à l'évacuation des déchets radioactifs dans la thermomécanique des roches. P. Bérest et Ph. Weber, Eds. Publication du BRGM, n°16, 1988.
- Coussy O. – Mécanique des milieux poreux, 1991, Paris, Eds. Technip.
- Dangla P., Coussy O. – Méthodes de résolution numérique en thermo-poro-anélasticité. Étude et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Série Sciences de l'Ingénieur SI1, 1992, LCPC, Paris.
- Ghoreychi M., Bérest P. – Thermo-mechanical modeling of radioactive waste disposal in salt formations. 10th Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT), 1990, California, USA.
- Giraud A. – Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les milieux poreux peu perméables : application aux argiles profondes. Thèse de Doctorat ENPC, 1993, Paris.
- Habib P. – Aspects thermomécaniques de l'enfouissement des déchets radioactifs de haute activité dans des formations géologiques. Comptes rendus de l'académie des Sciences, Tome 7, Série Générale, n° 4-5 juillet-octobre, 1990.
- Humbert P. – CESAR-LCPC : Un code général du calcul par éléments finis. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 160, 1989.
- Ould Amy M. – Modélisation numérique du champ proche d'un stockage de déchets radioactifs. Application au sel gemme. Conseil scientifique de G.3S, École polytechnique, 1992, pp. 119-133.
- Ould AMY M. – Modélisation thermo-hydro-mécanique d'un enfouissement de déchets radioactifs exothermiques en massif argileux. Rapport interne G.3S, n° 621 RP G.3S 94-001, Palaiseau, France, 1994.
- Ould Amy M., Rousset G. – Thermo-hydro-mechanical modelling of an underground radioactive wastes disposal. Third European Conference on numerical methods in geomechanics, 1994, Manchester, UK.
- Picard J.-M., Tchiye G. – Coupled thermo-hydro-mechanical modeling of *in situ* heating experiments in Boom clay. ISMES, 1993, Bergamo, Italy.
- Rousset G. – Le stockage de déchets radioactifs dans les argiles profondes, *in* Stockage en souterrain, Presses des Ponts et Chaussées, 1990, p. 207-228.
- Rousset G. – Comportement mécanique des argiles profondes. Application au stockage de déchets radioactifs. Thèse de Doctorat ENPC, 1988, Paris.
- Rousset G. – L'enfouissement des déchets radioactifs en formations profondes. Problèmes de Recherche associés. *Annales de l'ITBTP*, n° 507, 1992, pp. 101-113.
- Skoczylas F., Shahrour I., Shao J.-F., Henry J.-P. – Solution of thermo-poro-elastic problems by the finite element method. *Numerical Models in Geomechanics*, Volume 1, 1992 pp. 501-508.