

Un exemple d'application des mesures du comportement des roches à température élevée : l'évaluation de la « charge thermique admissible » en formations géologiques pour l'évacuation de déchets radioactifs de haute activité

B. COME

Commission des Communautés Européennes, Direction Générale XII « Science, Recherche et Développement », Division du Cycle du Combustible Nucléaire, Bruxelles

1. INTRODUCTION

Les déchets radioactifs de haute activité provenant de l'industrie nucléaire doivent être isolés de l'environnement humain pendant une très longue durée. L'utilisation d'un système d'enveloppes multiples, et l'enfouissement profond dans des formations géologiques adéquates, semble être actuellement la méthode la plus prometteuse pour atteindre ce but. Il est cependant important de vérifier que la chaleur émise par ces déchets, suite à la décroissance radioactive, ne met pas en danger les propriétés de confinement de la roche-hôte.

Une étude conjointe de ces effets thermiques liés à l'évacuation géologique a été effectuée dans le cadre du Programme de recherche et développement de la Commission des Communautés Européennes sur la gestion et le stockage des déchets radioactifs. La recherche a été réalisée par plusieurs organismes en Belgique, en France, et en République Fédérale d'Allemagne. Le but en était de passer en revue les effets thermiques induits et d'évaluer leurs conséquences en terme de « charge thermique admissible » pour l'évacuation, et de gestion des déchets radioactifs en général [1].

Trois études parallèles ont traité séparément les trois types de formations actuellement retenues par le Programme communautaire: le granite (sous la direction du Commissariat à l'Energie Atomique français), le sel (pilote: la Gesellschaft für Strahlen-und Umweltfors-

chung, RFA) et l'argile (pilote: le Centre de l'Energie nucléaire de Mol, Belgique). Ultérieurement, un « Rapport de Synthèse » a permis la mise en ordre cohérente des résultats ainsi recueillis. Les trois études reposent sur une collecte des données disponibles dans la littérature spécialisée avant 1980, et sur des calculs d'ordinateur; elles n'ont pas donné lieu à des travaux expérimentaux.

Cette recherche a couvert l'ensemble des phénomènes induits par la chaleur; cet article se limitera aux effets thermomécaniques lors de la construction et de l'exploitation d'un dépôt souterrain, et après fermeture de celui-ci. Les valeurs numériques déduites des travaux sont à considérer comme des ordres de grandeur préliminaires, et ne sauraient en aucun cas être pris pour des règles générales et absolues.

2. LES SYSTÈMES D'ÉVACUATION CONSIDÉRÉS

L'étude ne concerne que les déchets de haute activité vitrifiés, revêtus d'une ou plusieurs enveloppes métalliques. Ces déchets sont évacués dans des dépôts souterrains profonds constitués de galeries parallèles où l'on accède par des puits verticaux; ils sont mis en place dans les galeries ou dans des forages de grand diamètre exécutés à partir des galeries; les forages, galeries et puits sont ensuite soigneusement rebouchés par des matériaux appropriés.

Les sites de dépôt sont situés sur la terre ferme (et non en mer ou au fond des océans). Après fermeture, on suppose qu'aucun phénomène brutal (faille, etc.) ne survient pour modifier radicalement les caractéristiques du site.

2.1. Caractères des déchets

Ce sont des produits du retraitement des combustibles de réacteurs à eau légère, conditionnés en matrice de verre borosilicaté. Les dimensions typiques d'un cylindre de verre sont: diamètre 30 à 35 cm, hauteur 120 à 150 cm. Ces verres émettent une certaine quantité de chaleur suite à la décroissance radioactive; un exemple de courbe d'émission thermique en fonction du temps est donnée en figure 1.

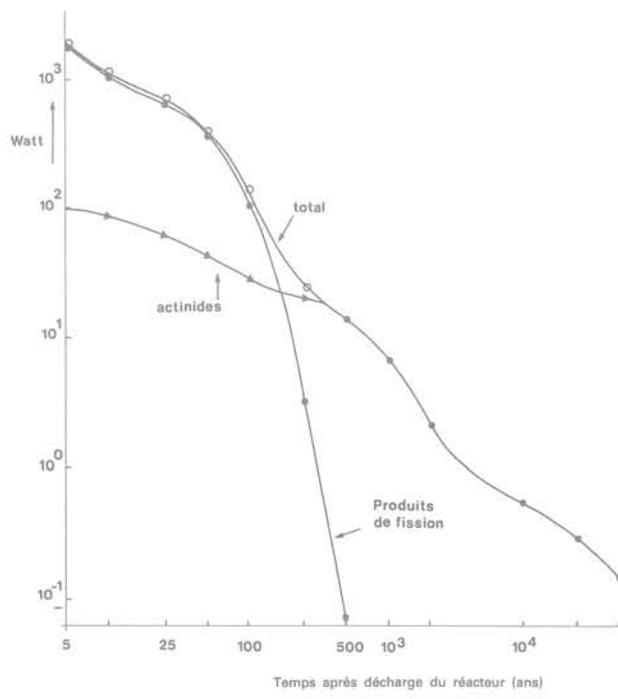


Fig. 1. — Puissance thermique (Watt) en fonction du temps pour déchets radioactifs de haute activité provenant du retraitement d'une tonne de combustible épuisé et correspondant à 100 l de verre, retraitement 5 ans après décharge du réacteur.

2.2. Les formations géologiques retenues

Aucun site réel n'est spécifié pour l'étude du granite, et les caractéristiques retenues sont celles d'une formation «moyenne» de type batholite. En ce qui concerne le sel, les travaux concernent la couche d'évaporite du Zechstein que l'on trouve dans le Nord de l'Allemagne, où est implanté par exemple la mine de Asse. Enfin, pour l'argile, on s'est limité à la couche plane d'argile plastique tertiaire de Boom sous le site du C.E.N. de Mol, Belgique. Celle-ci montre une épaisseur d'environ 100 m à 200 m sous la surface du sol; elle repose entre deux puissantes couches de sables aquifères. Les principales propriétés de ces trois types de roches sont regroupées dans le tableau I.

2.3. Cas de référence pour les dépôts souterrains

Le dépôt de référence pour le granite résulte d'une étude de conception menée dans le cadre d'un contrat communautaire [2].

Il consiste en un réseau de 82 galeries parallèles, \varnothing 5 m, d'entr'axe 26 m et de 2 200 m de longueur, à 1 000 m de profondeur (fig. 2). Dans le radier de ces galeries sont forés des puits verticaux \varnothing 1 m, de 100 m de profondeur, à 30 m d'entr'axe; chaque puits reçoit 5 conteneurs de déchets espacés de 20 m; les 6 000 puits prévus accueillent donc les 30 000 conteneurs du cas de référence.

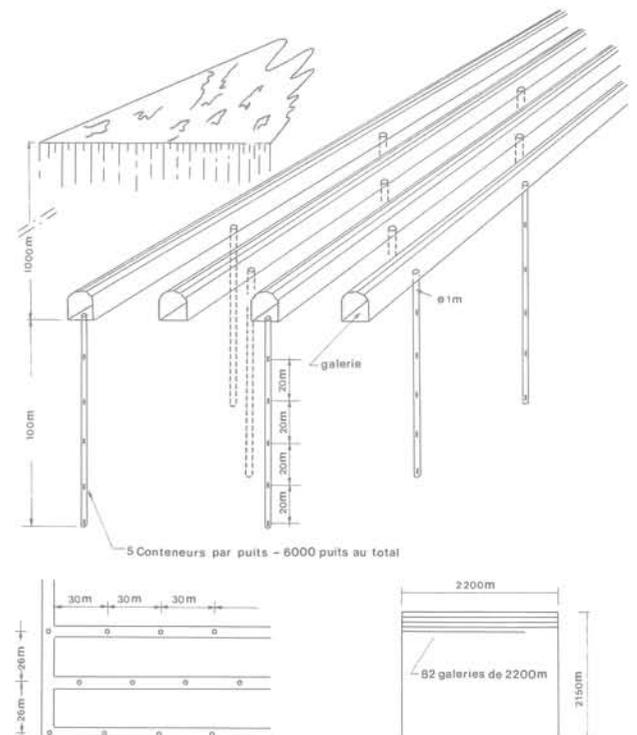


Fig. 2. — Concept d'implantation d'un dépôt final dans le granite.

Au moment de l'insertion dans le dépôt, chaque conteneur a une puissance thermique de 935 W, obtenue après un refroidissement préalable de 30 ans après vitrification du déchet. Le dépôt serait remblayé d'un mélange granite broyé + bentonite. Le creusement, l'exploitation et le remblayage du dépôt s'étalent sur 82 ans.

Dans le cas du sel, les caractéristiques d'un dépôt final ne sont pas fixées. On admet que les galeries seraient situées entre 750 et 1 000 m de profondeur dans un dôme de sel, et que le dépôt recevrait de petits conteneurs (\varnothing 20 cm; longueur 100 m) après une brève période de refroidissement (10 ans). Les puits verticaux de dépôts pourraient être espacés de 20 à 70 m, en un réseau hexagonal, et avoir une longueur de 50 à 300 m. Au moment de l'emplacement, chaque conteneur aurait une puissance thermique de 400 W. L'ensemble des vides serait remblayé de sel broyé.

Tableau 1: Résumé des propriétés de base des roches hôtes

Propriété	Roche	Granite	Sel	Argile
<i>Description</i>		Générique	Sel (Na ₂) du Zechstein allemand	Argile de Boom à Mol (Belgique)
<i>Paramètres physique</i>				
Densité (kg/m ³)		2 700	2 160	2 040
Porosité (%)		0,2 - 0,4	0,5 - 4,3	≈ 40
Teneur en eau (%)		0,1 - 0,2	0,04 - 0,1	17,2 - 29,2
Perméabilité (m/s)		10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰	très faible	≤ 10 ⁻¹⁰
<i>Propriétés thermiques</i>				
Conductibilité thermique (W/m/°C)		2,5	5,2	1,7
Chaleur spécifique (J/kg/°C)		720 - 880	850 - 900	910 - 970
Coefficient de dilatation thermique (°C ⁻¹)		8.10 ⁻⁶	4,3 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁵ (sur échantillons secs)
<i>Propriétés géomécaniques</i>				
Module de Young (GPa)		45	14 - 26	0,1 - 0,3
Coefficient de Poisson		0,25	0,25	0,25 - 0,34
Résistance à la compression (MPa)		180 - 200	20 - 35	sans intérêt
Résistance à la traction (MPa)		7 - 15	1,4 - 2,5	sans intérêt
Cohésion non drainée (MPa)		sans intérêt	sans intérêt	0,3 - 1,3

Le dépôt dans l'argile a fait l'objet d'une étude détaillée (projet Hades, [3]). Ce travail conduit à un projet de dépôt consistant en trois galeries parallèles de 2 500 m chacune, Ø 3,5 m, distantes de 200 m à 225 m de profondeur (c'est-à-dire à peu près au milieu de la couche d'argile). A partir de ces galeries, des puits inclinés sont forés à 10 m d'entr'axe. Ces galeries sont revêtues de voussoirs de fonte et les puits sont tubés en acier. Chaque puits reçoit 12 conteneurs de puissance initiale 400 W, après un refroidissement adéquat (50-60 ans). Le colmatage des vides est assuré par un ou plusieurs mélanges réutilisant l'argile excavée.

3. PANORAMA GÉNÉRAL DES EFFETS DE LA CHALEUR

Immédiatement après leur emplacement dans le dépôt, les conteneurs de déchets émettent de l'énergie thermique qui va se propager dans la roche-hôte; l'échauffement qui en résulte doit être pris en compte pendant la phase d'exploitation du dépôt et après fermeture de celui-ci. On conçoit intuitivement qu'il faudra limiter cet échauffement à des valeurs compatibles avec le bon fonctionnement des différentes barrières isolantes: matrice de verre, enveloppes métalliques, matériaux de colmatage, roche-hôte.

Il s'agit en particulier d'éviter qu'une dégradation précoce sous l'effet de l'élévation de température ne leur ôte toute efficacité dans un avenir plus éloigné, lorsque l'échauffement aura diminué.

Les effets de la chaleur sur les composants du dépôt ne peuvent être correctement décrits qu'en terme

d'interactions multiples. Cependant, pour la simplicité de l'exposé, on a adopté une démarche séquentielle:

— d'abord, étude de la propagation de la chaleur dans l'environnement géologique;

— puis revue des effets induits:

- effets thermomécaniques sur la roche et ses discontinuités éventuelles;
- effets sur les fluides contenus dans les roches;
- effets sur les matériaux de colmatage, sur les enveloppes métalliques (corrosion) et sur la dégradation de la matrice, conduisant au relâchement des radionucléides évacués;
- effets sur la migration de ces radionucléides vers l'environnement de l'homme.

Dans la suite de cet article, on n'envisagera en détail que les deux premiers de ces aspects, tout en gardant à l'esprit que l'étude [1] a considéré l'ensemble des phénomènes.

4. EFFETS THERMO-MÉCANIQUES

4.1. Granite

En préliminaire au calcul des contraintes thermiquement induites, il s'agit de déterminer le champ des températures induites dans le massif rocheux par les déchets. L'analyse montre que seul le transfert de chaleur par conduction est à considérer pour ce calcul. Les sources de chaleur peuvent être individualisées (fig. 3), ou bien supposées réparties dans la zone du dépôt, on peut aussi tenir compte de la chronologie de leur emplacement. Dans tous les cas, on peut obtenir l'«histoire thermique» de la formation-hôte.

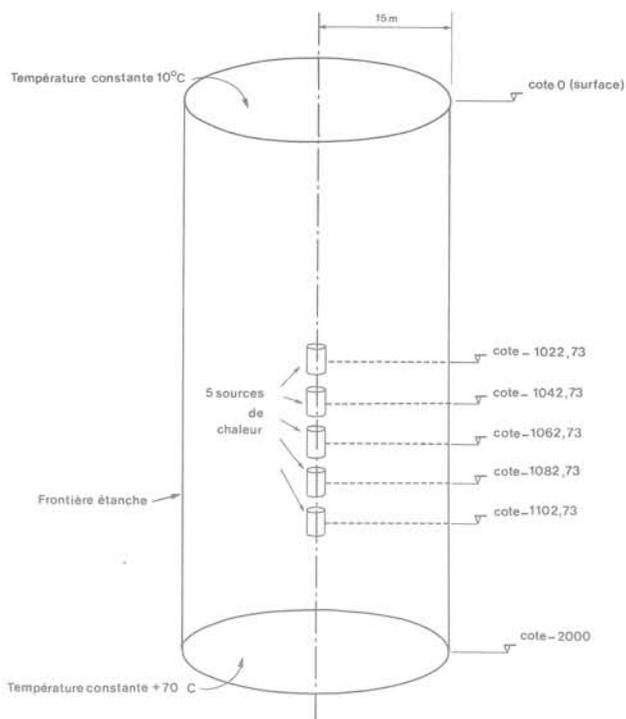


Fig. 3. — Schéma d'une « cellule » élémentaire pour le calcul des températures pour un dépôt en granite.

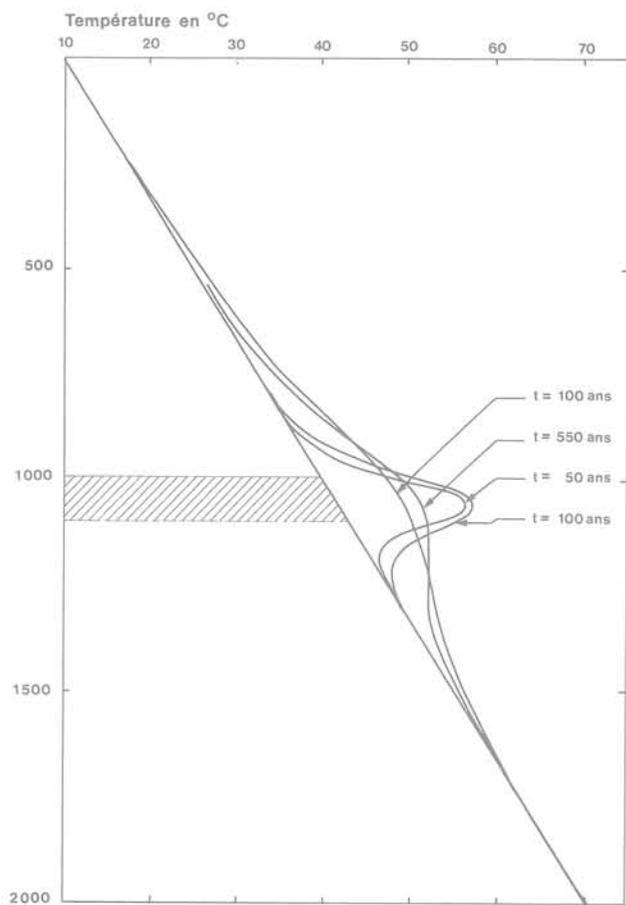


Fig. 4. — Evolution du profil thermique le long de l'axe de symétrie. (Les dates sont mesurées à partir de la fermeture du dépôt).

Les figures 4 et 5 ont été obtenues en supposant que le dépôt entier est rempli instantanément; on obtient ainsi des profils de température à différentes dates, on encore des cartes d'isothermes à des dates choisies. Le cas de référence conduit à un échauffement maximum d'environ 20 °C, 80 ans après fermeture.

Cet échauffement induit une dilatation du granite (coefficient de dilatation volumique: $22 \text{ à } 24 \cdot 10^{-6} \text{ vol/vol/}^\circ\text{C}$), laquelle, confinée, donne naissance à des contraintes thermiques. On ne s'attardera pas sur les effets « microscopiques » affectant le granite (microfissuration, etc.) pour se concentrer sur le comportement d'ensemble du massif, et sur celui des ouvertures qu'on y a réalisées (galeries, puits) supposées vides.

4.1.1. Effets d'ensemble

La figure 6 résume les hypothèses et conditions aux limites du calcul. Au niveau du dépôt, et négligeant la présence des galeries, l'échauffement induit de notables compressions horizontales excédentaires, d'environ 0,3 à 0,4 MPa/°C; la contrainte verticale supplémentaire est nettement plus faible. Ces calculs supposent le massif continu, ce qui peut paraître discutable; on verra plus loin comment introduire l'effet de discontinuités. Le « bombement » de la surface (soulèvement de quelques centimètres) correspond au développement, au niveau du sol, de contraintes de traction horizontales qu'on ne peut bien sûr obtenir qu'en supposant le massif continu. L'étude montre que l'amplitude de ces tractions dépend:

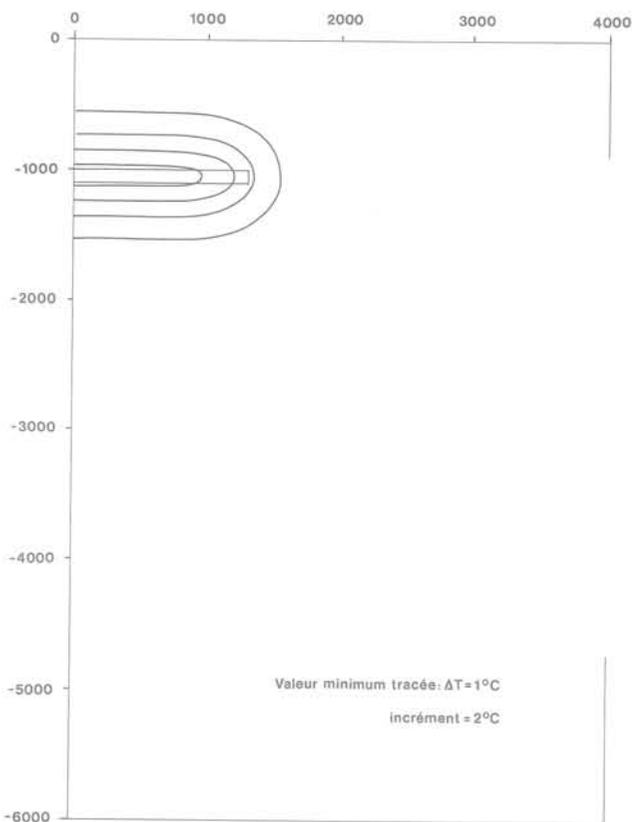


Fig. 5. — Carte des isothermes à T = 1000 ans. Elévation de température consécutive au dégagement calorifique du dépôt.

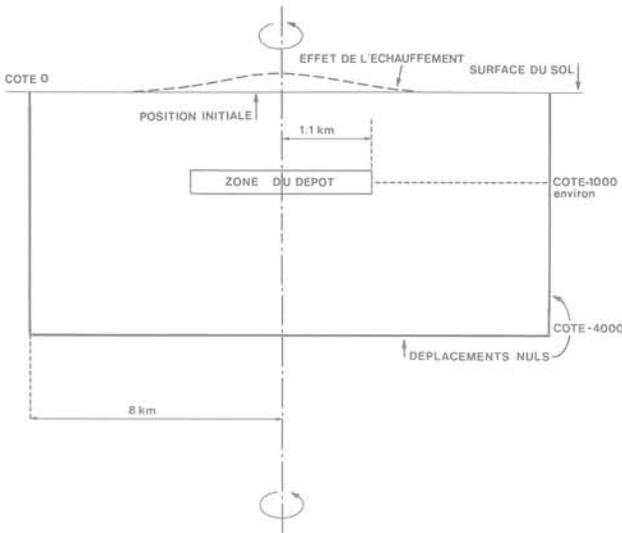


Fig. 6. — Dépôt dans le granite: conditions du calcul global thermomécanique (échelle non respectée).

- de l'échauffement maximum dans le dépôt;
- et surtout de la profondeur et de la forme du dépôt.

En particulier, elles peuvent augmenter notablement si on diminue la profondeur du dépôt, et si on lui donne une forme compacte; ces tendances sont illustrées par la figure 7.

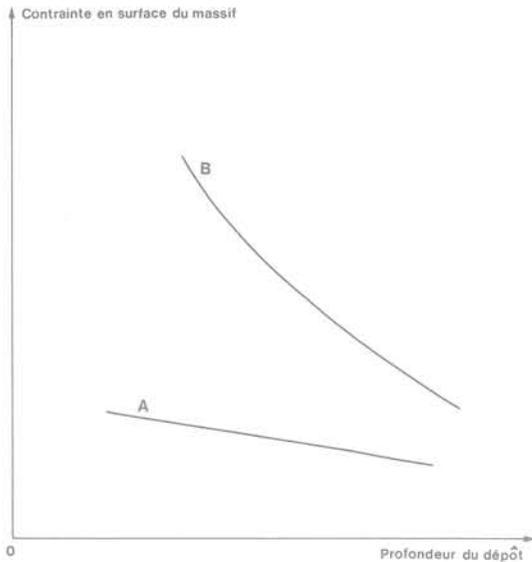


Fig. 7. — Variation des contraintes de traction en surface d'un massif de granite continu (allure qualitative).
A. Dépôt de référence (forme aplatie).
B. Dépôt sphérique (forme aplatie).
L'échauffement est supposé le même dans les deux cas.

4.1.2. Effets sur les ouvertures

Au stade de l'étude de conception de l'ouvrage, on a supposé que les galeries vides sont soumises aux contraintes thermiques maximales, ce qui ne correspond pas à la réalité, mais fournit une évaluation pessimiste, donc du côté de la sécurité. Pour ce faire, les valeurs de contraintes calculées globalement sans galeries, sont prises comme conditions aux limites pour les calculs locaux à plus petite échelle.

Connaissant les contraintes et déplacements d'ensemble préalablement déterminés, on peut effectuer ensuite un calcul de détail sur les galeries et sur les puits de dépôts (fig. 8). Pour ces derniers, on a porté attention à l'intersection galerie-puits en se limitant à la partie de galerie concernée par l'intersection; on a pu ainsi assimiler cette partie de galerie à une petite zone sphéroïdale, et traiter le problème en symétrie de révolution, alors qu'un calcul rigoureux aurait nécessité l'usage d'un maillage tridimensionnel. Avec les hypothèses adoptées, on a constaté que l'ensemble des galeries et des puits de dépôt (vides) restait dans le domaine élastique, même au moment de l'échauffement maximal; la stabilité d'un tel édifice paraît donc garantie. On a cependant noté que ces 20 °C d'échauffement ne pouvaient guère être excédés sans induire de ruptures à la paroi de ces ouvertures.

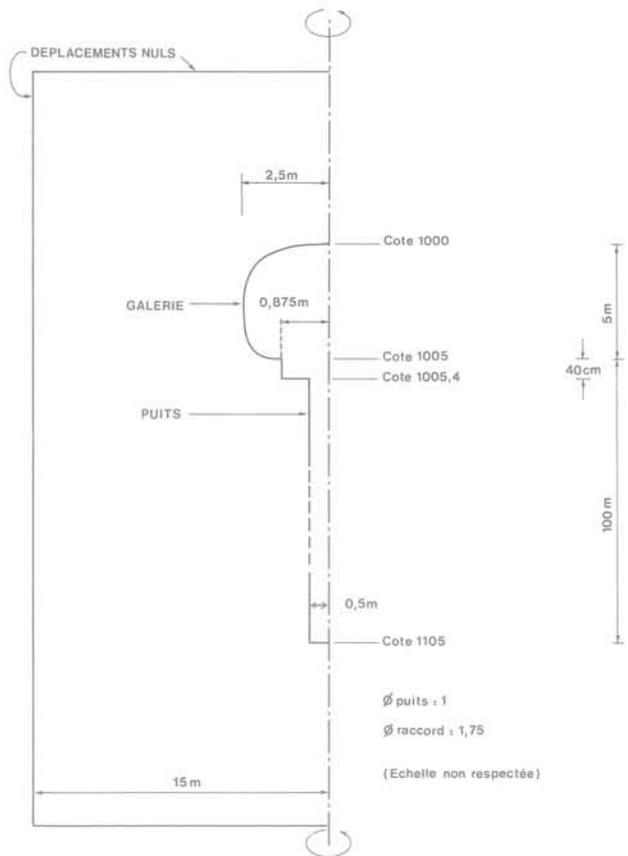


Fig. 8. — Modèle d'intersection galerie-puits de dépôt pour le calcul des contraintes locales. Dépôt dans le granite.

4.1.3. Modalité d'introduction des discontinuités

Il est connu qu'une formation granitique, même en profondeur, montre des discontinuités (fractures); il est intéressant de déterminer l'influence qu'elles pourraient avoir sur l'intensité des contraintes thermo-mécaniques. En l'absence de données spécifiques, on a utilisé une approche générique sur un massif parcouru par deux familles orthogonales de discontinuités d'épaisseurs différentes; le calcul est effectué en déformations planes. La distance entre fractures, uniforme, est notée a ; les discontinuités des familles x et y ont respectivement une épaisseur e_x et e_y (fig. 9a). On suppose que $e_x > e_y$.

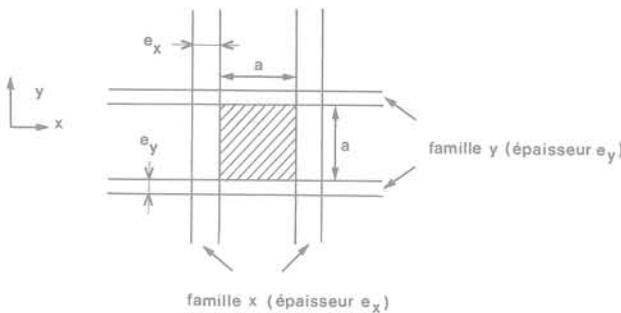


Fig. 9a. — Modèle de massif granitique fissuré.

La dilatation d'un bloc individuel aura d'abord lieu librement dans les 2 directions x et y ; il n'y a donc pas de contraintes, ceci jusqu'à ce que $\Delta y = \alpha \cdot a \cdot \Delta T = e_y$ (α = coefficient de dilatation linéaire, ΔT = échauffement); à ce moment, les blocs entrent en contact selon y , et les contraintes prennent la valeur d'équilibre (fig. 9b). La dilatation se poursuit ultérieurement jusqu'à ce qu'à son tour la discontinuité e_x soit refermée; les contraintes prennent alors leur valeur maximale. Avec les hypothèses adoptées, ce sont celles de la figure 9b. Dans la réalité, il y aura « écrasement » progressif de discontinuités non-uniformément ouvertes, et croissance progressive des contraintes, et non pas des variations brusques.

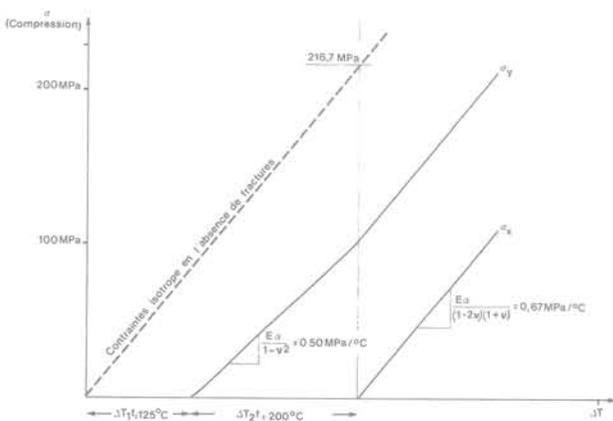


Fig. 9b. — Réponse thermomécanique du granite fissuré ci-dessus: courbe contrainte thermique-échauffement.

Néanmoins, le modèle simplifié montre que des discontinuités ouvertes pourraient notablement réduire l'amplitude des contraintes de compression dans la zone du dépôt.

Dans la couverture rocheuse, les discontinuités verticales voisines de la surface auront tendance à s'ouvrir sous l'effet du « bombement » déjà évoqué, relâchant ainsi les contraintes de traction. L'étude actuelle n'a pas introduit explicitement ces effets dans le calcul des contraintes; on peut seulement conclure que, si des discontinuités *ouvertes* étaient présentes en profondeur, l'intensité des contraintes thermomécaniques serait réduite. Il faut noter à ce propos que les reconnaissances par forages profonds dans des massifs réels montrent plutôt des discontinuités fermées ou colmatées; il se pourrait donc que le calcul en milieu continu soit le plus réaliste quant à l'aspect mécanique. Par contre, un effet pourrait être décelable sur la perméabilité de ces fissures. Ce point est évoqué plus loin.

4.2. Sel

Le calcul des répartitions de température dans le cas de référence est effectué de la même façon que pour le granite, à grande échelle d'abord, (émission thermique répartie dans la zone du dépôt), puis autour d'une « cellule » individuelle de conteneurs (fig. 10).

Ce dôme salin hypothétique est entouré de terrains avoisinants de caractéristiques thermiques distinctes. Avec les hypothèses du cas de référence, l'élévation de température est donnée sur la figure 11; on voit que l'échauffement maximal dépasse 170 °C (température du sel à 800 m: 210 °C), ceci 50 ans environ après la fermeture du dépôt. La chaleur se dissipe ensuite rapidement dans la masse du sel, vu la bonne conductivité thermique de ce matériau (5.5 w/m/°C à l'ambiante).

4.2.1. Effets mécaniques d'ensemble

Une fois connue la répartition de température, les contraintes et déformations sont calculées en tenant compte du fluage du sel. A partir d'essais de laboratoires réalisés préalablement à l'étude, un modèle de comportement du sel a été adopté, associant 5 composants (fig. 12a):

- La partie élastique (composant ①) reliant la pression hydrostatique à la variation de volume; le module d'Young part de 7 000 MPa à l'ambiante et décroît hyperboliquement avec l'élévation de température; le coefficient de Poisson, invariable, est pris égal à 0,25;
- La relation visco-élastique (composant ②) entre déviateur des contraintes et déviateur des déformations; le module de cisaillement dépend du temps selon une loi exponentielle classique, où intervient de plus une dépendance de la température sous forme de loi du type Arrhénius;
- La composante plastique instantanée (composant ③) obtenue dès que l'état de contrainte excède la frontière d'écoulement; cette dernière dépend également de la température;
- Les composantes plastique, de viscosité, et le fluage dit « stationnaire »; ce dernier s'exprime par une pro-

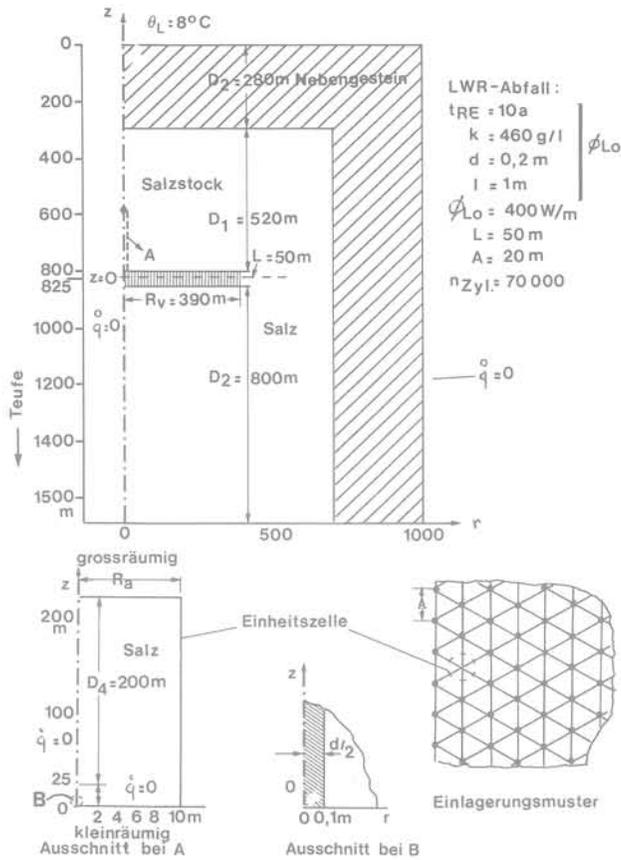


Fig. 10. — Schéma du dépôt dans le sel.
 Traduction : Nebengestein = terrain avoisinant
 Salzstock = dôme de sel
 LWR-Abfall = déchet de réacteurs à eau légère
 grossräumig = grande échelle
 kleinräumig = petite échelle
 Einheitszelle = cellule unitaire
 Ausschnitt = coupe
 Einlagerungsmuster = maille de dépôt

portionnalité entre la vitesse de fluage stationnaire et la puissance 5 de la contrainte appliquée; intervient également une dépendance de la température selon une loi d'Arrhénius (composants ④ et ⑤).

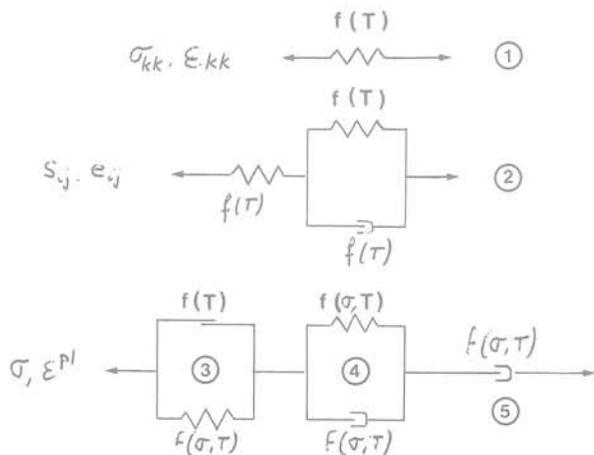


Fig. 12a. — Composants du modèle rhéologique du sel.

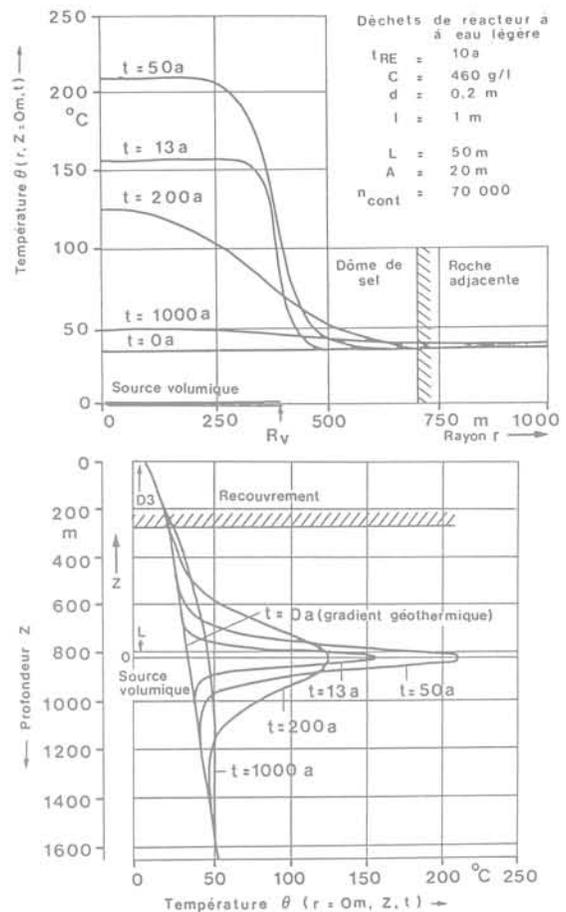


Fig. 11. — Distributions de la température dans le dépôt et dans l'ensemble de la formation à différents moments après l'évacuation des déchets.
 Evacuation dans le sel.

Le calcul aux éléments finis est appliqué à un dôme hypothétique (fig. 12b) et fournit une répartition de contraintes telle que la représente la figure 13. On constate que la contrainte totale (terrain + échauffement) ne dépasse pas 30 MPa, 11 ans après fermeture, pour un dépôt à 1 000 m de profondeur et un échauffement de 100 °C; la réduction des contraintes est bien sûr due au fluage du sel. En contrepartie, la surface du sol au-dessus du dôme se soulève notablement: de 60 à 100 cm selon les hypothèses.

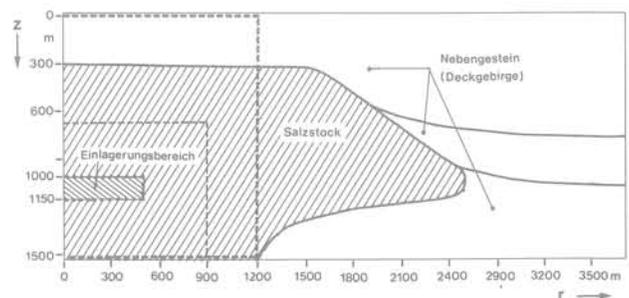


Fig. 12b. — Modèle du dôme de sel pour calculs mécaniques.

Traduction :
 Einlagerungsbereich = zone de dépôt
 Deckgebirge = recouvrement

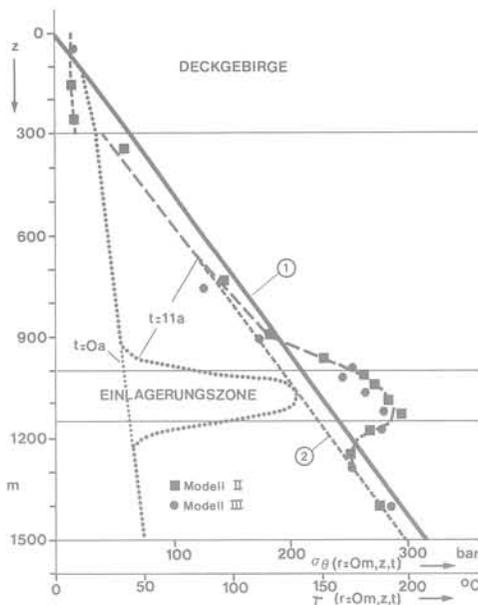


Fig. 13. — Réparation des contraintes horizontales dans le sel :

contrainte horizontale initiale-hypothèse hydrostatique 1 —
 contrainte horizontale initiale-hypothèse lithostatique vraisemblable 2
 contrainte totale thermomécanique (après 11 ans) ---
 température T

4.2.2. Effets locaux

Les calculs se sont bornés à évaluer la pression maximale que le sel chauffé exercerait sur un conteneur de déchets indéformable (les galeries, etc., étant supposées rebouchées). Le même modèle rhéologique a conduit à la conclusion que la pression maximale exercée sur un conteneur ne devrait pas excéder 35 MPa, dans les conditions du cas de référence.

4.3. Argile

A la différence des deux milieux ci-dessus, le comportement thermomécanique de l'argile est étroitement lié à sa teneur en eau et à ses variations. Il est connu qu'un échantillon d'argile non confiné se déshydrate, donc se contracte et voit sa conductivité thermique baisser sous l'influence d'un chauffage même modéré. Il apparaît cependant discutable d'adopter ce phénomène pour décrire le comportement de l'argile en place ; en effet, sauf au voisinage immédiat des galeries et puits, il est improbable que l'argile puisse se déshydrater notablement. La répartition des températures a donc été calculée en supposant les galeries rebouchées et une conductivité thermique invariable. Chaque source chaude est entourée d'une « cellule » d'argile, ce qui permet d'obtenir le champ de température local et général. On obtient, avec les hypothèses de référence, un échauffement près des sources de 80 °C, et, environ 50 ans après fermeture, une élévation maximale de 12 °C dans l'ensemble de la

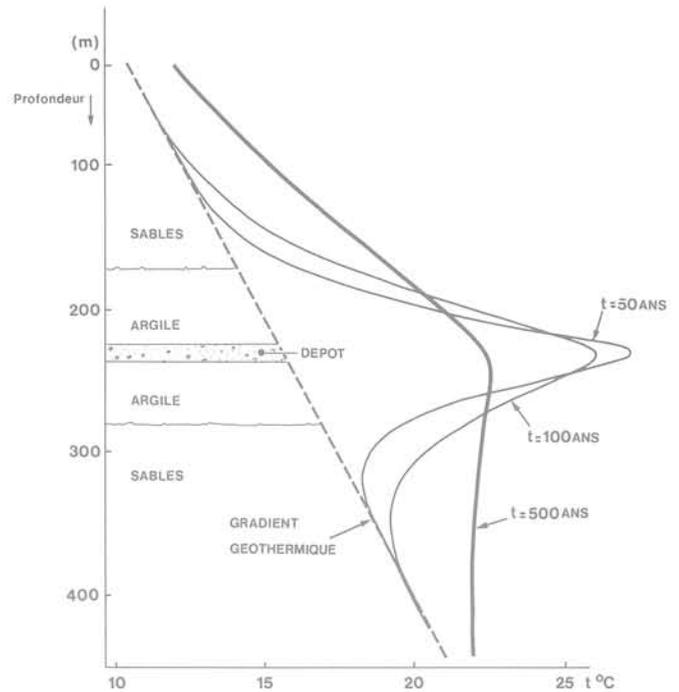


Fig. 14. — Distribution de la température dans le dépôt et dans l'ensemble de la formation à différents moments après l'évacuation des déchets. Evacuation dans l'Argile de Boom plastique.

zone du dépôt. A la limite entre l'argile et les aquifères, l'élévation de température atteint 5 °C après 160 ans environ (fig. 14).

4.3.1. Effet d'ensemble

L'étude n'a abordé le problème que de façon qualitative, en explicitant les mécanismes les plus probables, faute de données expérimentales suffisantes. Vu la teneur en eau élevée du matériau (40 % en volume) et la différence entre les coefficients d'expansion du squelette et de l'eau (respectivement $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), c'est la dilatation de l'eau interstitielle qui gouvernera le comportement de l'argile. La pression interstitielle obtenue dépendra entre autres de la perméabilité de l'argile et aussi des possibilités de drainage. Il semblerait, d'après des recherches analogues effectuées sur des sédiments marins, que l'augmentation maximale de pression interstitielle dans l'argile soit relativement faible, pour autant que l'élévation de température reste, elle aussi, faible [4].

4.3.2. Effets locaux

Les galeries et puits de dépôts étant revêtus respectivement de voussoirs en fonte et de tubes d'acier, le problème de la tenue des ouvertures sous l'effet de l'échauffement est mineur dans ce cas particulier. Le revêtement est en effet largement calculé pour rester stable lorsque les galeries sont vides (phases de construction et d'exploitation) ; de plus, le maximum de l'échauffement aura lieu à une époque où les ouvertures seront remblayées.

5. EFFETS INDUITS SUR L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

L'échauffement de la formation rocheuse concerne également l'eau contenue dans les discontinuités ou pores de la matrice. Cette eau voit sa masse volumique diminuer, ainsi que sa viscosité dans la zone du dépôt. Sous certaines conditions, des courants de convection peuvent prendre naissance. Bien entendu, les phénomènes sont différents dans le cas du sel, où il n'existe pas de circulation de fluides à proprement parler.

Dans ce qui suit et en ce qui concerne le granite et l'argile, on ne s'intéresse qu'aux mouvements de fluides induits; il n'est pas tenu compte d'une circulation régionale ou locale préexistante.

5.1. Cas du granite

On a vu précédemment que l'ouverture des discontinuités peut varier dans le granite chauffé, en fonction de la distance à la source chaude et du temps. Néanmoins, vu la difficulté de quantifier ce phénomène, on a procédé, dans un premier temps, à des calculs d'écoulements en supposant la perméabilité de la roche invariable. On donnera, pour finir, quelques aperçus sur la façon dont la variation de perméabilité pourrait être incorporée, et quelle serait son influence.

5.1.1. Calcul en milieu « poreux équivalent »

On suppose le massif doté d'une certaine perméabilité, K , prise paramétrique entre 10^{-8} et 10^{-10} m/s, et constante dans chaque calcul.

Le champ de températures présenté plus haut est à l'origine de la dilatation de l'eau; cette différence de densité est la force motrice qui engendre des circulations convectives. La surface du sol est prise comme condition aux limites de potentiel constant. En conséquence, des particules d'eau se trouvant initialement dans la zone du dépôt, à 1 000 m de profondeur, finissent par arriver à la surface du sol. Le calcul fournit un temps moyen de parcours, selon la plus courte distance, de 1 000 ans en moyenne (entre quelques centaines et quelques milliers d'années selon la valeur de K). L'allure générale des trajectoires des particules est donnée par la figure 15. On note que « l'effet de bout » se traduit par des « tourbillons » rallongeant considérablement le trajet de certaines particules.

5.1.2. Calcul dans les fractures individualisées

On suppose cette fois que le massif comporte une série de fissures verticales « infinies », espacées de 50 m, d'épaisseur 1 mm. La formation de courants de convection n'a lieu cette fois que dans l'eau de ces fissures, supposées planes et d'épaisseur invariable au cours du temps. On constate que les temps de parcours des particules, avec le même échauffement que précédemment, sont de l'ordre de quelques centaines d'années; l'allure générale des circulations est, en gros, analogue au cas « poreux équivalent », mais le résultat est peut-être plus réaliste (fig. 16).

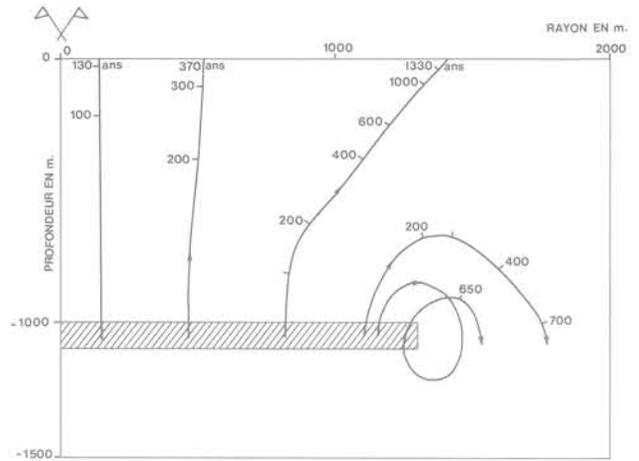


Fig. 15. — Trajectoires de quelques particules libérées dans le plan médian du dépôt à $t_L = 1000$ ans. ($k = 10^{-8}$ m/s)

N.B. : Les trajectoires sont graduées en années correspondant au temps de transfert des particules d'eau.

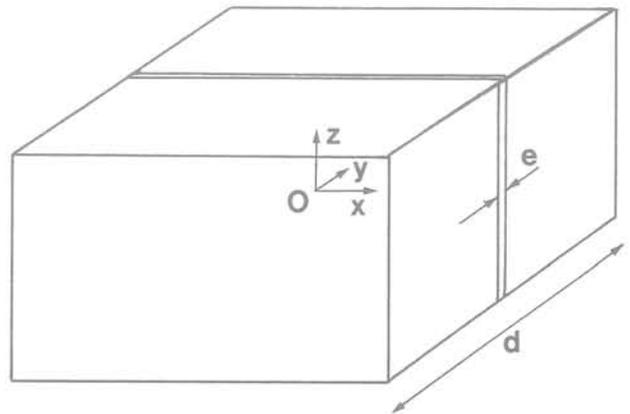


Fig. 16a. — Géométrie du système de fracture.

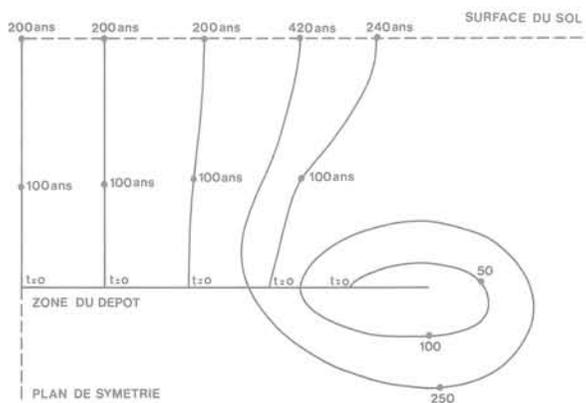


Fig. 16b. — Trajectoires des 6 particules dans le plan de la fracture. Leur position est indiquée aux dates 50, 100, 200, 240, 250 et 420 ans après leur libération à $t = 0$.

Perméabilité équivalente $k_e = 10^{-14}$ m²

5.1.3. Prise en compte de variation d'ouverture des discontinuités

Cet aspect n'a pas été introduit dans les calculs; l'étude a cependant fourni des indications sur la façon dont les résultats ci-dessus pourraient être influencés.

Au laboratoire, on a étudié la variation de transmissivité (perméabilité \times épaisseur) d'une fissure intersectant une éprouvette de longueur invariable, lorsqu'on fait varier la température [5]. On a ainsi établi que cette transmissivité décroît exponentiellement avec l'échauffement relatif.

Ce résultat est intéressant mais difficilement transposable tel quel à un massif réel.

C'est pourquoi on a également approché le problème par un modèle théorique simplifié, dans lequel le massif est supposé parcouru de discontinuités également espacées (espacement b) et d'ouverture uniforme e . On admet que b est invariable lors de l'échauffement (fig. 17). La perméabilité équivalente du massif est alors:

$$k(T) = \frac{g}{12\nu(T)} \cdot \frac{e^3(T)}{b}$$

avec: g = accélération de la pesanteur;
 ν = viscosité cinématique de l'eau;
 T = température.

On peut d'autre part écrire que:

$$e(T) = e_0 - \alpha(T - T_0)b$$

avec: e_0 = ouverture initiale à T_0 ;
 α = coefficient de dilatation du granite

$$\text{ainsi: } k(T) = \frac{g}{12\nu(T)} \cdot \frac{e_0^3}{b} \left[1 - \frac{\alpha b}{e_0} (T - T_0) \right]^3$$

Il apparaît donc que le comportement du massif, au moins soumis à des compressions, est à relier à sa densité de fracturation. Si la roche est notablement fracturée ($\frac{\alpha b}{e_0}$ petit), la perméabilité globale peut augmenter si la viscosité diminue, ce qui est le cas, par

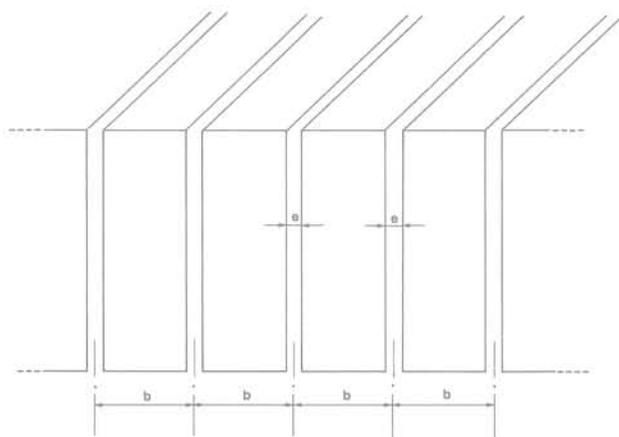


Fig. 17. — Assemblage de blocs réguliers:
 — fissures d'épaisseur e
 — d'espacement b

exemple, pour un échauffement de 30 à 50 °C; si $\frac{\alpha b}{e_0}$ est grand (b grand), la perméabilité diminuera de façon importante.

Enfin, d'autres phénomènes non mécaniques, tels que dissolution et reprécipitation de silice, peuvent contribuer à des variations locales de perméabilité. Ils n'ont pas été considérés dans le cadre de cette étude.

5.2. Sel

Le sel ne montre pas de circulations de fluides au sens strict. Cependant, des inclusions de saumures ou gaz y sont présentes en quantité variable selon les sites. Ces dernières peuvent être mises en mouvement par un gradient thermique et migrer vers les conteneurs chauds. On a estimé qu'avec les hypothèses retenues, une zone de 1 m de rayon concentrique aux forages de dépôt serait affectée et, qu'au maximum, 3 litres de saumure (par mètre linéaire de forage) pourraient atteindre les conteneurs. Cette saumure resterait au contact des sources chaudes, vu l'imperméabilité du sel. Seul, le cas d'inclusions de liquide, obéissant au processus ci-dessus, a été considéré en détail.

5.3. Argile

Une série de calculs préliminaires ont été effectués sur la configuration de référence, supposant établi un régime de convection dans la couche. Avec les hypothèses retenues, le temps de parcours d'une molécule d'eau du dépôt vers les aquifères supérieurs serait de plusieurs dizaines de milliers d'années.

6. APERÇU SUR LES AUTRES EFFETS

Les conteneurs de déchets, et les matériaux de remplissage qui les entourent, sont soumis à une élévation de température supérieure à celle qui affecte la roche-hôte.

6.1. Matériaux de remplissage

Il est essentiel que les matériaux de remplissage (à base d'argile gonflante pour les dépôts en granite et en argile) conservent leur imperméabilité et leur continuité pour retarder le plus possible la mise en contact des déchets avec les eaux souterraines, lorsqu'elles circulent. On a montré que les matériaux argileux gardent leurs propriétés tant que leur température n'excède pas 200-300 °C. Il n'y a, bien sûr, pas de limite particulière pour le remplissage de sel broyé prévu pour le colmatage du dépôt dans le sel.

6.2. Enveloppes métalliques

L'eau souterraine du granite ou de l'argile est susceptible de corroder les emballages métalliques des déchets, une fois qu'elle a traversé le matériau de remplissage; il en est de même pour la saumure des inclusions qui auront migré vers les conteneurs à travers le sel. L'élévation de température accélère les vitesses de corrosion des matériaux envisageables pour

l'emballage des conteneurs (cuivre, plomb, aciers, alliages de titane, etc.); à cette influence s'ajoute celle du rayonnement gamma. Les études disponibles montrent que les taux de corrosion augmenteraient rapidement au-delà de 200-300 °C, il n'est cependant pas encore possible de fixer des limites spécifiques.

6.3. Verre borosilicaté

Si le débit d'eau souterraine ou de saumure est suffisant, la lixiviation du verre borosilicaté peut s'initier. Au préalable, on s'efforce de minimiser la fracturation du verre en réduisant les contraintes thermiques qui peuvent y prendre naissance suite au gradient de température entre le centre du cylindre de verre et sa paroi. La fracturation ne se produirait pas pour des températures inférieures à 450 °C au centre du verre; la prise en compte de l'initiation et de la propagation lente des fractures dans le verre pourrait conduire à recommander une température limite de 200 °C. Enfin, les études montrent que le taux de lixiviation du verre et des radionucléides augmente systématiquement avec la température pour les trois milieux lixivants considérés: eau granitique, saumure et eau argileuse.

6.4. Migration des radionucléides

Dans le granite et l'argile, l'eau souterraine mise en mouvement par les courants de convection thermique, décrits précédemment, va transporter des radioéléments relâchés après lixiviation du verre. C'est alors que la barrière «géologique» va jouer son rôle: le granite (et surtout les produits d'altération présents dans les fissures conductrices d'eau) et l'argile possèdent d'efficaces propriétés de rétention vis-à-vis des radionucléides.

C'est ainsi que, dans les deux cas de référence considérés, le temps de retour à la surface pour des radioéléments non spécifiques serait au minimum de plusieurs centaines de milliers d'années. L'influence de la température sur cette rétention des radioéléments est difficilement quantifiable; de plus, à la date où aura lieu cette migration, la température de la roche-hôte et des formations environnantes sera pratiquement revenue à sa valeur initiale.

Dans le sel, compte tenu de l'absence de mouvements de fluides, les radioéléments peuvent migrer par diffusion dans le sel ou dans ses vides; les distances parcourues sont très faibles (quelques mètres en plusieurs centaines de milliers d'années); l'influence de la température sur ces processus demande à être mieux connue.

7. ÉVALUATION DE LA CHARGE THERMIQUE ADMISSIBLE

7.1. Définition

Sur la base de l'aperçu des effets de la chaleur, donné précédemment, on peut dire que tous ces effets sont liés (a) à l'amplitude et (b) à la durée de l'augmentation de température provoquée par les déchets.

Comme la plupart des effets sont directement fonction de l'augmentation maximale de température, cette dernière devient l'un des paramètres-clé dont il faut évaluer les conséquences.

Des calculs simples montrent — et les modèles sur ordinateur de calculs thermiques précédemment décrits confirment — que cette augmentation maximale de température dans la roche-hôte est fonction des caractéristiques des sources (âge, diamètre, concentration des produits de fission, longueur, espacement, par exemple) et des propriétés thermiques de la roche-hôte.

C'est pourquoi l'augmentation de température et, partant, les effets de la chaleur, peuvent être caractérisés par une combinaison judicieuse des caractéristiques de la source (énergie thermique émise) et du volume de roche dans lequel se produit cette émission; le terme «charge thermique» de la formation rocheuse peut servir à décrire ce concept.

7.2. Procédure d'établissement de la charge thermique admissible

En premier lieu, il faut s'efforcer de fixer les *limites de température* au-delà desquelles les effets dus à la chaleur ne sont plus admissibles. A cette fin, des critères «à court terme» (d'exploitation) et «à long terme» (de sûreté) doivent être considérés pour chaque roche-hôte et chaque concept d'évacuation.

Une fois que ces limites sont connues, les études conceptuelles des dépôts doivent être faites d'une manière *paramétrique*, pour que l'on puisse sélectionner le ou les paramètres et dispositions qui sont conformes aux limites de température fixées.

D'éventuelles rétroactions peuvent s'imposer pour la réalisation de cet objectif car il ne faut pas oublier que l'analyse de systèmes aussi complexes exige souvent un procédé par itération.

7.3. Limites de température établies sur la base des travaux effectués

Chaque composant des systèmes d'évacuation a été examiné dans le cadre de l'étude [1], et les limites obtenues sont regroupées dans les paragraphes qui suivent.

La température du verre doit rester inférieure à 450 °C après vitrification pour éviter toute fissuration due aux contraintes thermiques, et une lixiviation trop rapide après dégradation de l'enveloppe. On a tendance actuellement à rester à tout moment en-dessous de 200-250 °C. Etant donné la complexité du processus de lixiviation, aucune limite de température n'a encore été fixée pour l'altération hydrothermique.

Pour la plupart des enveloppes métalliques considérées, les taux de corrosion augmentent rapidement au-delà de 200-300 °C dans chacune des roches-hôtes. Il est jugé souhaitable de ne pas dépasser ces valeurs, bien qu'aucune valeur spécifique ne soit disponible.

Les matériaux argileux sont envisagés comme matériaux-tampon et de remblayage. Il faut tenir compte des possibilités de changements minéralogiques et des modifications de propriétés physiques au-delà de 250-300 °C.

La présente étude conclut que, par sécurité, il est souhaitable de fixer à la température maximale une limite supérieure de 200 °C.

La même limite peut s'appliquer au remblayage de sel.

En ce qui concerne la formation géologique, les critères sont très différents selon chaque type de roche :

Granite : Bien qu'aucun site ne soit spécifié, l'augmentation globale de la température doit être maintenue à un niveau modéré pour éviter a) la fracturation de la roche et b) des courants de convection trop prononcés dans les fissures remplies d'eau.

Dans ce sens, une limite de 100 °C au voisinage des conteneurs peut être considérée comme souhaitable.

Sel : Le danger de rupture de la roche et de mouvement des fluides étant pratiquement négligeable dans la couche de halite, les critères spécifiques doivent être rapportés aux aspects typiques de la formation du Na₂ du Zechstein. Une limite de 135 °C est ainsi fixée à 40 m des zones de stockage, pour exclure tout impact significatif sur la couche de camallite voisine de la zone du dépôt.

Il faut également rester attentif au soulèvement des formations sus-jacentes qui pourraient fracturer la roche de couverture («cap-rock») et les formations adjacentes; la dissolution du sel par les eaux environnantes ne serait pas exclue dans ce cas. Pour l'éviter, il est conseillé de ne pas dépasser 200 °C dans la couche de halite.

Argile : Les effets à grande échelle et à long terme de chaleur sur l'argile de Boom n'ont pas encore été évalués intégralement, mais on pense qu'ils seront négligeables pourvu que certaines limites de température soient respectées.

C'est pourquoi, les critères thermiques simples ci-après ont été retenus pour la fixation de limites de température dans l'étude d'évacuation faite sur le site de Mol :

- éviter tout séchage de l'argile à proximité des sources de chaleur pour empêcher que des phénomènes d'instabilité des structures souterraines ne se manifestent. La limite actuelle de 100 °C pour la température totale à 1 m des conteneurs est acceptable;
- limiter l'influence sur les aquifères situés au-dessus grâce à une augmentation maximale de la température de 5 °C à la limite entre l'argile et le sable (≈ 50 m au-dessus du dépôt);
- limiter l'augmentation de la température à la surface (≈ 225 m au-dessus du dépôt) à un niveau négligeable. Moins de 0,5 °C sont considérés comme acceptables.

Dans ces limites et compte tenu de la faible surcharge (< 50 bars) ainsi que d'une période d'échauffement

relativement courte (quelques siècles), on ne s'attend pas à des effets à long terme, tels que changements de la minéralogie de l'argile.

7.4. Méthodes pour respecter les limites de température

Les limites ci-dessus sont combinées d'une manière légèrement différente et regroupées sous deux grandes rubriques.

7.4.1. Les sources de chaleur et leur environnement immédiat

La distribution de la température dans les sources de chaleur et aux alentours est essentiellement fonction :

- de l'émission thermique de la source (en Watt), suivant l'âge et la concentration des déchets;
- de la conductibilité thermique du matériau tampon et de la roche-hôte;
- du rayon des puits de dépôt (dans le cas du granite);
- de la présence ou de l'absence d'un suremballage métallique (non envisagé dans le cas du sel).

On peut maintenir ces valeurs au niveau voulu principalement en réduisant l'émission de chaleur par :

- la sélection de conteneurs de petit diamètre ou la réduction de la concentration des déchets (paramètres technologiques);
- la sélection d'une longue période de refroidissement entre la phase de la préparation des déchets et celle de leur évacuation.

La première possibilité est retenue dans le cas de la conception allemande du dépôt: une température élevée étant admissible, l'émission thermique spécifique au moment de l'évacuation est élevée (12 000 W/m³ de verre), ce qui correspond à 10 ans de refroidissement seulement. Par contre, le diamètre des conteneurs est réduit (20 cm dans le cas de référence); l'émission thermique qui en résulte au moment de l'évacuation n'est que de 400 W/m linéaire.

Pour les systèmes d'évacuation granitique et argileux, la taille des conteneurs est comparable (diamètre de 30-35 cm). Comme les conductibilités thermiques des roches-hôtes sont très différentes, l'émission thermique initiale (donc les périodes de refroidissement nécessaires) le sont également pour le granite et l'argile. Les conceptions de référence présentées ci-dessus peuvent être considérées comme admissibles :

pour le granite: émission thermique initiale = 6 000 W/m³ de verre (900 W/conteneur), après une période de refroidissement de 30 ans.

pour l'argile: émission thermique initiale = 3 900 W/m³ de verre (435 W/conteneur), période de refroidissement = une soixantaine d'années.

7.4.2. Zone de dépôt et environnement géologique

Il faut faire ici une distinction très nette entre a) les milieux dans lesquels les nucléides peuvent être transportés par l'eau s'écoulant sous l'influence de la

chaleur et b) les milieux dans lesquels le transfert des fluides joue un rôle limité.

— Granite

Ce type de roche relève de toute évidence de la catégorie a) ci-dessus et peut être qualifié de « milieu humide à eau mobile » en ce qui concerne l'eau des fractures. L'étude permet d'affirmer que :

- le fait d'éviter les problèmes de stabilité dans les galeries et les forages de dépôt pendant la phase opérationnelle limite l'augmentation de la température à 20 °C environ, ainsi que le montrent les calculs géomécaniques faits pour le cas de référence. Il limite aussi la possibilité de fracturation de la roche de couverture sous l'influence des efforts de traction thermiques à la surface ;

- compte tenu des effets sur le rythme d'écoulement de l'eau vers la surface, on peut dire que l'augmentation de température est également admissible, bien que des valeurs plus faibles soient de nature à réduire les effets.

En conséquence, la « densité de puissance » ou « densité d'empilement » du cas de référence peut être considérée comme admissible. On y parvient en entourant chaque source de chaleur d'un grand volume de granite (hauteur : 20 m, diamètre : 30 m). Cela correspond à 15 m³ de roche par Watt initialement déposé (quelque 14 000 m³ de roche par conteneur déposé).

- Les calculs thermiques montrent qu'un dépôt plat et large favorise la dissipation de la chaleur hors de la zone d'évacuation ; en outre, les temps de parcours des courants de convection sont plus longs dans le cas d'un dépôt « plat » que dans celui d'un dépôt « compact », les augmentations de température étant prises identiques dans les deux cas, comme le montrent des études de même nature.

Il semblerait donc que l'arrangement spatial des « cellules » individuelles précitées joue un rôle important dans les effets thermiquement induits et que ces derniers puissent être minimisés si l'on donne au dépôt une géométrie plane plutôt que cubique.

Une fois de plus, le cas de référence peut être considéré comme admissible, cette condition se trouvant remplie.

A partir des dimensions globales, on peut estimer que la « densité de puissance surfacique » (ou son inverse) est de 6,6 W/m², ou 150 m² par kW initialement déposé.

- Des considérations supplémentaires résultent de l'influence sur l'écoulement d'eau. L'étude montre que la réduction de la profondeur du dépôt à 500 m (au lieu de 1 000 m) diviserait le temps de remontée de l'eau par un facteur supérieur à 2 et multiplierait les efforts de traction dans la couverture par un facteur 4 à 5. Des profondeurs plus grandes sont donc préférables. Par contre, la difficulté des opérations de creusement augmente avec la profondeur. L'étude conclut que la profondeur la plus appropriée (d'un point de vue purement technique) serait plus proche de 1 000 que de 500 m pour le dépôt dans le granite.

— Sel

L'absence d'effets adverses dans ce milieu sec (catégorie b) ci-dessus) rend admissible une température et partant, une densité de puissance élevées. L'étude montre que les sources de chaleur peuvent être disposées à proximité les unes des autres pour créer un champ thermique homogène ; les calculs du cas de référence conduisent à des densités de puissance admissibles (charge thermique) de 0,5 à 1 W/m³ de sel ou 1 à 2 m³ de sel par Watt déposé.

Les considérations ci-dessus valent aussi pour les conditions surfaciques et les valeurs de 50 à 300 W/m² peuvent être considérées comme admissibles.

— Argile de Boom

Les calculs thermiques faits dans le cadre de cette étude spécifique montrent que l'augmentation de la température à la limite supérieure de l'argile (à 50 m du dépôt) est le paramètre restrictif. Étant donné l'espace limité disponible, le dépôt est du type « aplati » et la charge thermique peut être adéquatement décrite par une densité de puissance surfacique. La considération qui précède amène à la limiter à 2,5 W/m² ou 25 kW/ha, soit une surface nécessaire de 400 m² par kW initialement déposé.

Cette valeur peut être considérée comme admissible en ce qui concerne les courants de convection thermiquement induits dans l'argile, étant donné qu'il a été démontré que l'influence de ces courants sur la migration des radionucléides est assez faible.

7.5. Résumé

Le tableau II ci-après résume les principaux chiffres permettant de caractériser la charge thermique admissible, telle qu'elle résulte des études envisagées ici.

7.6. Observations

Tous les chiffres relatifs à la charge thermique admissible n'ont qu'une valeur indicative et sont, en outre :

- spécifiques du site dans le cas de l'argile de Boom à Mol ;
- spécifiques de la formation dans le cas du sel Na₂ du Zechstein ;
- « génériques » dans le cas du granite, c'est-à-dire qu'ils doivent être précisés cas par cas.

On vient de voir que les conceptions en matière de dépôts envisagées dans cette étude peuvent être considérées comme admissibles, bien que toutes fassent intervenir un volume de roche considérable pour héberger la quantité de déchets hautement radioactifs dont il est question.

Il faut se rappeler néanmoins que l'étude porte sur des critères thermiques uniquement et que les résultats ne permettent de comparer les formations hôtes que dans cette optique.

En particulier, certains problèmes très importants, tels que la stabilité des anticlinaux salins (diapirisme), la

Tableau II : Charge thermique admissible - Résumé des principaux chiffres
(valeurs indicatives uniquement)

	Granite	Sel Na ₂	Argile de Boom
<i>Paramètres des conteneurs :</i>			
Diamètre (cm)	35	20	30
Hauteur (cm)	150	100	150
Volume (l)	150	30	100
<i>Emission thermique des déchets au moment de l'évacuation</i>			
en Watt/conteneur	935	400	435
en Watt/m ³ de verre	6 000	12 000	3 900
<i>Cellule rocheuse élémentaire</i> (m ³ de roche/kW initialement déposé)	15 000	1 000 - 2 000	sans intérêt (dépôt plat)
<i>Surface spécifique du dépôt</i> (m ² /kW initialement déposé)	150	3 - 20	400
<i>Temps de refroidissement des conteneurs avant évacuation</i> (années)	30	10	60

solubilité du sel dans l'eau, le potentiel de fracturation de l'argile, etc., n'ont pas été pris en considération.

Enfin, une étude de sûreté complète doit encore être faite pour chacune des conceptions et chaque type de roche-hôte.

8. CONCLUSION

La propagation de la chaleur et certains de ses effets sont prévisibles en l'état actuel des connaissances et ce, avec un degré de fiabilité satisfaisant. En particulier, le présent article a montré comment cet aspect «température» peut être pris en compte pour la conception correcte d'un dépôt souterrain profond.

La charge thermique est déterminée par l'émission thermique et la densité de puissance et peut être maintenue dans certaines limites grâce au changement des paramètres du dépôt et de l'émission thermique des déchets, afin de laisser une marge de sécurité suffisante par rapport aux limites critiques. La fixation de limites de température justifiées présuppose une parfaite connaissance de tous les processus en jeu et des effets de l'émission de chaleur par les déchets radioactifs de haute activité.

Plusieurs questions restées en suspens à propos des déchets de haute activité ont reçu une réponse. Le gros du travail restant à faire consiste en expériences en place pour parvenir à une modélisation thermique, mécanique, hydrogéologique et géochimique adéquate. Des recherches plus poussées et notamment l'élaboration d'analyses de sûreté en fonction des diverses options peuvent conduire à un réajustement des niveaux de température admissibles. Ces travaux permettront de réduire la marge d'incertitude qui subsiste encore, mais les conclusions générales formulées ici ne s'en trouveront sans doute pas affectées profondément.

RÉFÉRENCES

- «Charge thermique admissible en formations géologiques. Conséquences sur les méthodes d'évacuation des déchets radioactifs», 4 volumes (Synthèse - Granite - Argile - Sel) Rapport C.C.E. n° E.U.R. 8179, Luxembourg, 1983.
Etude réalisée sous contrats avec la Commission des Communautés Européennes par :
— Le Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N./S.C.K.), Mol, Belgique, et l'Institute of Geological Sciences (I.G.S.), Royaume-Uni, pour la synthèse ;
— Le Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.-I.S.P.N.-C.S.D.R et C.E.A.-D.E.M.T.), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.), Orléans, l'Ecole des Mines de Paris, la société Géostock, Paris, et la Société Générale pour les Techniques Nouvelles (S.G.N.), Saint-Quentin-en-Yvelines pour la partie «granite» ;
— Le Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N./S.C.K.) et la société Tractionel, Bruxelles pour la partie «argile» ;
— La Gesellschaft für Stahlen-und Umweltforschung (G.S.F.), Braunschweig, R.F.A., l'Institut für Metallphysik de l'Université de Göttingen, R.F.A, la Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (R.W.T.H.), Aix-la-Chapelle, et le Hahn-Meitner Insitut (H.M.I.), R.F.A., pour la partie «sel».
- «Etude de conception générale d'une installation d'évacuation de déchets radioactifs en formation granitique», 2 volumes (texte, figures et plans). Rapport C.C.E. n° E.U.R. 7620, Luxembourg, 1982.
Etude réalisée sous contrat avec la Commission des Communautés Européennes par la société Geostock, Paris, et la Société Générale pour les Techniques Nouvelles (S.G.N.), Saint-Quentin-en-Yvelines.
- Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (C.E.N./S.C.K.), Mol, Belgique — «Programme de R & D

- relatif au rejet de déchets radioactifs en formations géologiques profondes. Etude d'une formation argileuse en Belgique*.
Rapport C.C.E. n° E.U.R. 7650, Luxembourg, 1982.
4. RAE, J.; ROBINSON, P.C.; WICKENS, L.M. — «Coupled heat and groundwater flow in porous rocks». Theoretical Physics Division, A.E.R.E. Harwell, U.K.
Report T.P. 944, June 1982.
5. COUDRAIN, A.; HOSANSKI, J.M.; LEDOUX, E.; VOUILLE, G. — «Etude des incidences du dégagement thermique en milieu fissuré suite à l'enfouissement de déchets nucléaires». Ecole des Mines de Paris, Centre de Recherches de Fontainebleau (F).
Rapport C.C.E. n° E.U.R. 8186, Luxembourg, 1982.

