

X Lição Manuel Rocha

A Décima Lição Manuel Rocha, intitulada “Utilisation des Roches Tendres et des Roches Dures pour L_isollement des Dechets Radioactifs”, foi proferida pelo Prof. Pierre Habib em 18 de Novembro de 1993, na Fundação Calouste Gulbenkian.

A apresentação do Prof. Pierre Habib foi feita pelo Prof. Dinis da Gama, do Instituto Superior Técnico:

Exm^o Senhor Director do LNEC

Exm^o Senhor Director da Associação de Geotécnicos Antigos Alunos da UNL

Exm^o Senhor Prof. Pierre Habib

Exm^a Senhora D. Maria Teresa Rocha

Senhoras e Senhores

Caros Colegas

É com grande satisfação que temos o prazer de vos saudar a todos nesta oportunidade em que vai ter lugar a X Lição Manuel Rocha, no cumprimento daquilo que já se pode considerar uma tradição na vida da comunidade geotécnica portuguesa.

Com efeito, desde 1984 que a Sociedade Portuguesa de Geotecnia, em conjugação de esforços com a Associação de Geotécnicos Antigos Alunos da Universidade Nova de Lisboa, organizam esta conferência, que tem como homenageado permanente o vulto notável que foi Manuel Rocha e que se caracteriza pela apresentação de uma lição de alto nível sobre um tema de interesse para a especialidade.

Nesta ocasião são também entregues, alternadamente, os prémios da SPG e da Revista Geotecnia, o que hoje acontecerá no final da Lição Manuel Rocha, relativamente ao Prémio SPG do biénio 91-92.

Até à data têm prestado a sua colaboração a esta iniciativa individualidades portuguesas e estrangeiras de renome internacional nos domínios da Mecânica dos Solos, da Mecânica das Rochas e da Geologia de Engenharia, todos eles bem presentes dentro das actividades da SPG, que como é do conhecimento geral é a representante de Portugal nas três Sociedades Científicas internacionais acima referidas.

A personalidade que convidamos para este ano nos brindar com uma conferência é o Professor Pierre Habib, figura ímpar dos meios geotécnicos francês e mundial.

Tal como Manuel Rocha, foi presidente da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas, tendo ambos sido companheiros e colegas de várias Comissões Técnicas e grupos de trabalho dessa Sociedade, assim como de outros organismos científicos internacionais.

O tema escolhido para a X Lição Manuel Rocha, da autoria do Prof. Pierre Habib, foi o da “Utilização das rochas brandas e rochas duras para o isolamento de resíduos radioactivos”, assunto de indiscutível actualidade e de grande interesse científico e tecnológico.

O facto de na totalidade dos países que produzem resíduos radioactivos ainda não ter sido encontrada uma solução definitiva para este problema parece dever-se em parte à sua complexidade, face à ausência de experiências antecedentes bem sucedidas neste sector, quer pelas suas características de novidade, quer pelo facto de as estruturas a construir para armazenar resíduos radioactivos se deverem manter estáveis e estanques por periodos da ordem dos 10.000 anos (que é o tempo de vida activa da maioria dos radionuclídeos).

Mas o principal obstáculo apontado parece residir na falta de vontade (ou de coragem) dos políticos a quem compete implementar tais decisões.

Apenas para citar o exemplo norte-americano, onde existem 84 centrais nucleares funcionando, e 56 em construção, todas elas produzindo resíduos radioactivos que se acumulam temporariamente em volta dessas instalações, ainda não existe nenhum local que receba estes sub-produtos a título definitivo.

O volume de resíduos aguardando destino final é assustador: só nos E.U.A. tal volume será no ano 2000 de 72.000 toneladas, e serviria para cobrir uma auto-estrada de 4.000 Km de comprimento, com uma camada de 1 m de espessura (dados de Bieniawski). Isto sem contar com o lixo radioactivo proveniente dos artefactos militares.

Mas o esforço de investigação e os investimentos para a solução deste problema não cessam. O exemplo da recente actividade do nosso conferencista desta tarde é especialmente característico, como teremos oportunidade de escutar dentro de momentos.

Prof. Pierre Habib



Pierre, Andre HABIB, né le 10 Janvier 1925 a Paris, Nationalité Française
Diplômes: Ingenieur de l'Ecole Polytechnique (X- 1945- 1948), Docteur des Sciences (1952)

Titres

- Ancien President de la Société Internationale de Mecanique des Roches.
- Président d'honneur du Comité Français de Mécanique des Roches
- Ancien Président du Comité Français de Mécanique des Sols
- Ancien Président du Groupe Français de Rhéologie
- Ancien Vice-Président de l'Association Française de Génie Parasismique
- Membre de la Commission Exécutive du Comité Français des Grands Barrages
- Fellow ASCE (American Society of Civil Engineers)

Position actuelle

- Président du Groupement d'Interêt Public pour l'étude des Structures Souterraines
- Conseiller Scientifique du Laboratoire de Mécanique des Solides (groupe commun Ecole Polytechnique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Laboratoire associé au CNRS) - (depuis 1990)
- Professeur a l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts (ENGREF) - (depuis 1966).

Carrière

Ingenieur puis Chef de Section Mécanique des Sols au C.E.B.T.P.

Ingenieur en Chef a la Direction Générale de la Recherche Directeur-Adjoint puis Directeur du Laboratoire de Mécanique des Solides à l'Ecole Polytechnique

Actuellement: Conseiller Scientifique du L.C.P.C., Conseiller Scientifique du CEMAGREF, Conseiller Scientifique de l'ENGREF, Conseiller Scientifique de l'AFME, Président du Conseil Scientifique de GEOPROGE (geothermie profonde), Directeur de la Revue Française de Geotechnique

- Auteur ou co-auteur de plus de 220 articles de revues, livres ou communications écrites presentees a des Congrès Nationaux ou Internationaux dans les domaines de la Mécanique des Sols (fondations, pieux, barrages en terre, talus, techniques de laboratoires, etudes théoriques, ouvrages de génie civil, expertises), de la Mécanique des Roches (propriétés mécaniques et permeabilité des massifs rocheux fissurés, contraintes naturelles dans les roches, fondations de barrages en béton, équilibre des talus, tunnels et ouvrages souterrains, stockages de dechets nucleaires, expertises), de la Rhéologie et des propriétés mécaniques des matériaux
- Directeur de plus de 30 Thèses de Doctorat.

UTILISATION DES ROCHES TENDRES ET DES ROCHES DURES POUR L'ISOLEMENT DES DECHETS RADIOACTIFS*

PIERRE HABIB**

RÉSUMÉ – Le principe de l'isolement des déchets radioactifs dans une formation géologique est simple. L'eau étant le principal vecteur de la migration des ions, il suffit de placer les radionucléides en profondeur au sein d'un milieu très peu perméable, dans une région où le gradient hydraulique est très petit – ce qui signifie, en général, sous une plaine – pour faire en sorte que les nucléides ne puissent s'échapper et rejoindre la biosphère qu'après un temps suffisamment long pour qu'ils aient perdu l'essentiel de leur activité, ce qui peut prendre 100 000 ou 1 000 000 d'années. Il faut ensuite que le milieu géologique garde son intégrité pendant toute cette durée; son ancienneté est évidemment garante de son avenir, mais il faut que les mouvements tectoniques, l'érosion, le climat ne viennent pas altérer son existence ni affecter ses structures. Avant ce long terme pour les déchets de haute activité, l'épisode thermique, avec les dilatations puis les contractions qu'il impose, est susceptible de bousculer les formations géologiques, et les effets thermomécaniques doivent être examinés avec soin pour chaque milieu hôte envisagé, avec une estimation de leurs propriétés rhéologiques à long terme et à très long terme, ce qui est assez inhabituel en Mécanique des Roches. Le cas des milieux plastiques (sel, argile) et celui des milieux cassants (granite, schiste) posent des problèmes différents et doivent être analysés indépendamment.

RESUMO – O princípio de isolamento de detritos radioativos numa formação geológica é simples. A água constitui o principal meio de migração de iões. Como tal, a deposição dos radionuclídeos num meio de baixa permeabilidade sob gradiente hidráulico reduzido situado a grande profundidade, normalmente sob planaltos, garante que os nuclídeos se escapem para a biosfera somente após a quase total dissipação da sua actividade radioactiva. O tempo envolvido neste processo será de 100 000 a 1 000 000 anos. Será indispensável para tal que o meio geológico permaneça estanque e estável sob a acção de movimentos tectónicos, da erosão e das variações climáticas. Durante o período activo dos depósitos a variação térmica inerente ao processo dissipativo induz alterações nas formações geológicas, as quais devem ser avaliadas por uma análise dos efeitos termomecânicos em que o comportamento reológico a longo e muito longo prazos seja devidamente tido em consideração. Tal análise é inusitada em Mecânica das Rochas. A análise de meios plásticos (sal, argila) ou frágeis (granito, xisto) coloca questões cuja resolução obriga a uma análise com metodologia diferente.

ABSTRACT – The principle of isolating radioactive waste in a geological formation is simple. Water being the principal vector of migration of ions, it suffices to place the radionuclides at depth within a medium of very low permeability, in a region where the hydraulic gradient is very low – which generally means under a plain – so that the nuclides can escape into the biosphere only after a period sufficiently long for them to have lost the essential part of their activity. This can take 100 000 or 1 000 000 years. The geological medium must retain its integrity during all this duration. Its very age is obviously the guarantee of its future, but tectonic movements, erosion, climate must not deteriorate it in any way nor break down its structure. Before this long lapse of time for highly active waste the thermal episode, with the expansions and contractions brought about, may upset the geological formation, and the thermomechanical effects must be examined with care for each host medium under consideration with an estimation of the long term and very long term rheological properties. This is rather unusual in Rock Mechanics. The case of plastic media (salt, clay) and brittle media (granite, shale) raises different problems which must be analysed independently.

* Lição proferida em 18 de Novembro de 1993.

** Consultor G. 3S. Prof. da École Polytechnique, Palaiseau.

Ex-Presidente da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas.

Il y a une quinzaine d'années, j'avais été invité avec le Prof. Manuel Rocha pour présenter la leçon inaugurale du cours de Génie Civil de la "Escuela de los Puentes y Caminos" à Madrid. On nous avait demandé de parler de la Mécanique des Roches

Manuel Rocha avait été chargé de présenter les grandes avancées de nos techniques d'essais, in situ et en laboratoire, ainsi que les principales réalisations et applications de la Mécanique des Roches. De mon côté je devais parler de prospective, thème beaucoup moins périlleux car sur ce sujet les erreurs ne deviennent apparentes que vingt ans plus tard...

Nous avons évidemment coordonné nos exposés et grâce aux discussions que nous eûmes ensemble avant et après nos conférences j'ai mieux compris ce que la Mécanique des Roches contient de plus que la Mécanique classique.

Aussi, lorsque le Président Dinis da Gama m'a demandé de venir à Lisbonne présenter la X^e leçon Manuel Rocha c'est avec une grande émotion que j'ai accepté de rapporter une part de cet enrichissement intellectuel que chacun gagnait au contact de Manuel Rocha, en quelque sorte comme une modeste contribution en retour. Emotion bien sûr, mais aussi un peu d'inquiétude pour présenter un thème neuf et pour cela j'ai choisi de traiter un sujet de mécanique des roches qui porte sur un véritable problème de société, celui de l'isolement des déchets nucléaires dans les milieux rocheux, roches tendres ou roches dures.

1 – INTRODUCTION

Dès qu'on aborde le domaine de l'énergie, les risques sont très grand: la mine de charbon qui s'effondre ou prend feu, le barrage qui se rompt, l'incendie d'un dépôt de pétrole ou de gaz en zone péri-urbaine provoquent des victimes par dizaines ou par centaines. Sans parler des pollutions engendrées par les naufrages des pétroliers géants.

L'industrie nucléaire n'échappe pas à cette malédiction et de Three Miles Island à Tchernobyl chacun connaît les désastres économiques, et malheureusement humains, que cette source d'énergie est capable d'engendrer.

Il faut cependant savoir que les précautions prises actuellement dans l'énergie nucléaire sont beaucoup plus grandes que celles qui sont prises en général dans l'industrie et même dans des industries à risque technologique. Ainsi, on ne sait généralement pas que le taux d'irradiation toléré pour les travailleurs de l'industrie nucléaire est inférieur de moitié à celui que subissent naturellement certaines catégories de population par exemple celles qui vivent dans des pays granitiques ou qui habitent dans des maçonneries de granite ou encore ceux qui travaillent en souterrain – comme les métros – à cause du radon.

Dans tous les pays, la mise en service d'une installation nucléaire de base est examinée par les autorités de sûreté dans tous les détails de son organisation; de son fonctionnement et de son démantèlement. La démonstration de sûreté consiste à vérifier qu'à aucun moment de la vie de l'installation il n'y aura risque de dissémination des radio éléments dans la biosphère: c'est le cas des mines pour l'extraction puis pour l'enrichissement de l'uranium, de la métallurgie et de la chimie de l'uranium, des réacteurs nucléaires, ou des usines de retraitement des combustibles.

Or, toutes ces installations produisent des déchets radioactifs dont la décroissance est plus ou moins lente et, dans certains cas, il faut envisager de très longues durées, 10 000 ans, 100 000 ans, peut-être même davantage, avant qu'ils ne deviennent inoffensifs.

L'appréciation de la sécurité après de si grands nombres d'années est un problème inhabituel et qui ne peut évidemment pas faire référence à des réalisations du passé, que ce soit des réussites ou des échecs. De sorte que certains pays, où l'opinion publique n'accepte pas cette absence de référence à des expériences antérieures, ont refusé le dernier cycle de l'énergie nucléaire, c'est-à-dire celui des déchets et, par conséquent, toutes les analyses de sûreté des projets qui précèdent se sont effondrées comme des dominos, d'où le rejet de la production de l'énergie nucléaire. Mais il faut bien voir que cela condamne toute la politique de l'énergie actuelle (sauf les énergies renouvelables comme l'hydroélectrique ou le solaire) car les combustibles fossiles, pétrole et gaz d'abord, charbon ensuite, ne sont pas en quantités indéfinies et d'ailleurs ne sont pas exempts de pollution et de risques potentiels graves. L'énergie nucléaire paraît donc comme un passage obligé sauf à abandonner une grande part de nos modes de production et de notre confort. C'est en ce sens que l'élimination des déchets radioactifs est un véritable problème de société.

2 – PRINCIPE DE L'ISOLEMENT DES DÉCHETS DANS DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES

L'utilisation du sous-sol pour l'isolement des déchets radioactifs est probablement la façon la plus sûre pour protéger la biosphère contre les radionucléides les plus nocifs, sans parler des méthodes physiques de destruction des noyaux lourds en les irradiant dans un réacteur nucléaire, méthodes pour lesquelles il reste encore beaucoup de recherche à faire avant d'envisager le développement d'un processus industriel acceptable.

Le principe de l'isolement des déchets dans une formation géologique est relativement simple. Voici des roches qui existent depuis le début de l'ère tertiaire, depuis l'ère secondaire ou depuis l'ère primaire, c'est-à-dire depuis 60 millions d'années, ou depuis 100 millions d'années, ou depuis 500 millions d'années. La géologie nous enseigne qu'elles existeront dans le futur pour des durées du même ordre, durées qui sont beaucoup plus grandes que celles qui sont nécessaires pour la disparition de la radioactivité: l'ancienneté des roches est évidemment garante de leur avenir, mais il faut que les mouvements tectoniques, de surrection ou d'affaissement, que l'érosion actuelle, ou celles que pourront engendrer les changements prévisibles du climat, ne viennent pas altérer l'existence de ces roches, ou entailler profondément leurs structures géologiques et modifier le régime hydrologique des eaux souterraines. Il faut donc bien connaître l'activité géodynamique du pays pour choisir un site. La figure 1 donne quelques indications significatives pour la France. La figure 2 représente des données de la néotectonique et de la sismicité historique. La figure 3 représente l'évolution du climat au cours de la fin du tertiaire et au cours du quaternaire. La figure 4 représente l'extension de l'inlandsis du pôle nord au cours du quaternaire. La figure 5 indique l'extension de l'inlandsis des glaciations de Würm et de Riss en Europe de l'ouest et les contours de l'Europe de l'ouest en cas de glaciation. La figure 6 montre, à l'inverse, ce qui resterait de la France si la glace des pôles fondait complètement. Enfin la figure 7 représente ce qu'on prévoit pour l'extrapolation du climat actuel; on voit qu'on peut s'attendre à au moins une glaciation importante au cours des 100 000 prochaines années. Il est donc nécessaire de disposer d'une couverture de protection mécanique suffisante; d'après les estimations géoprospectives on admet généralement qu'un recouvrement de 200 à 250 m d'épaisseur est suffisant pour être à l'abri de tout accident (chute de météorite, érosion, glaciation etc....). Pour des raisons dont je parlerai plus loin, on placera cependant le stockage de déchets à plus grande profondeur, entre 400 et 600 m, pour avoir un meilleur confinement géostatique.

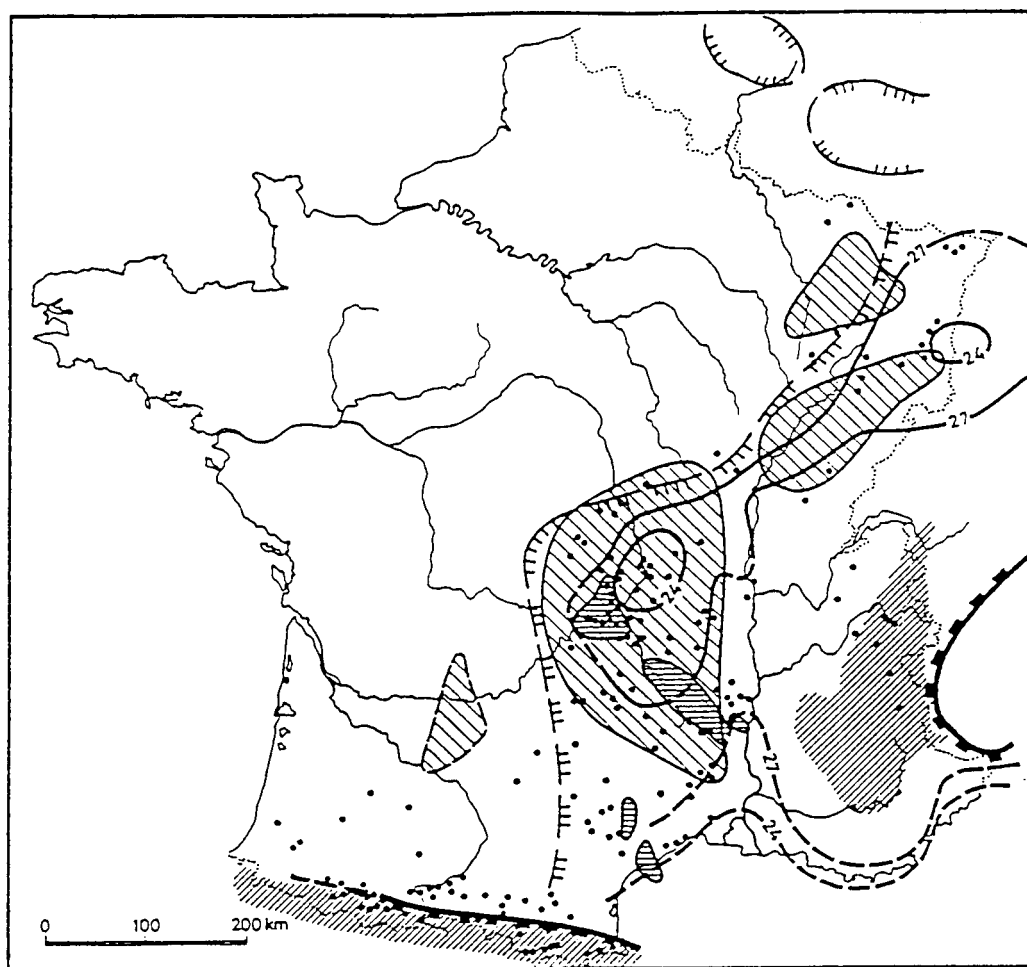


Fig. 1 – Quelques données significatives de l'activité géodynamique profonde en France (d'après Goguel et al)

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| | Profondeur du Moho (en km) dans les zones de croûte amincie | } Epaisseur de la croûte continentale |
| | Zones à croûte épaissie de plus de 35 km | |
| | Grandes failles continentales avec variation brutale et importante de l'épaisseur crustale. | |
| | Limite occidentale de la zone à lithosphère amincie (à l'Est) d'épaisseur inférieure à 100 km. | |
| | Zones à anomalies positives du flux géothermique (flux > 110 mW/m ² /s). | |
| | Zones à volcanisme d'âge inférieur à 4 M.A. | |
| | Sources hydrominérales à circuits de percolation plus profonds que -1 000 m). | |

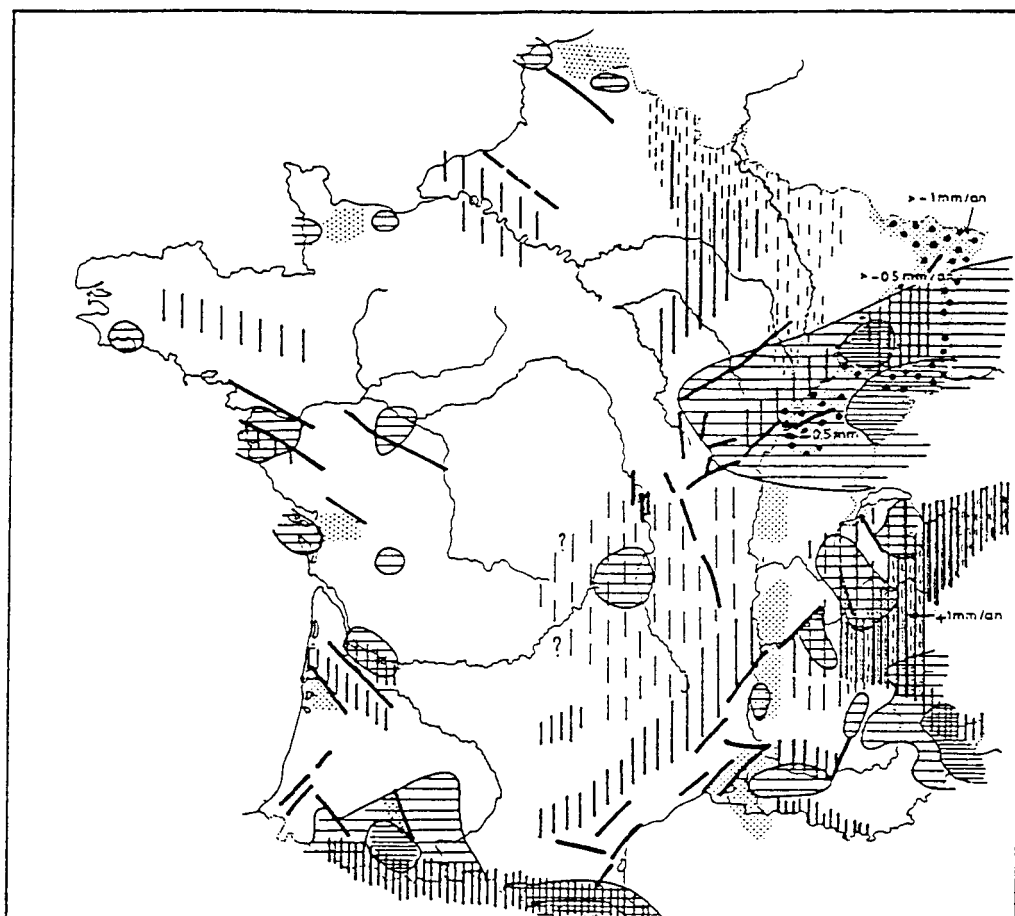
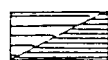


Fig. 2 – Néotectonique et sismicité historique (d'après Goguel et al)



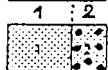
Sismicité : intensité MSK 7 et 8



Fautes à activité néotectonique



Mobilité verticale : soulèvement



Mobilité verticale : affaissement

1 : plioquaternaire

2 : actuel
($> \pm 0,5 \text{ mm/an}$)

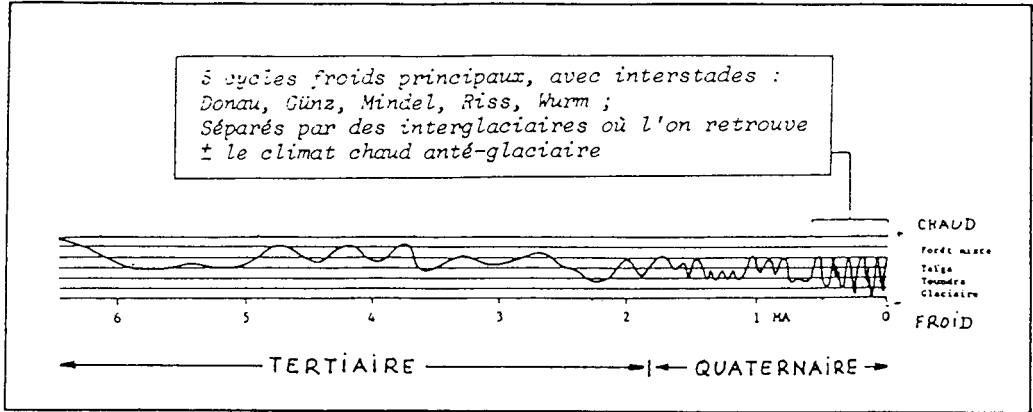


Fig. 3 – Le refroidissement tertiaire et quaternaire en Europe moyenne,
 d'après les études palynologiques (W. H. ZAGWIJN, 1974) qui permettent de reconstituer
 les types successifs de couvert végétal dans chaque région (d'après Goguel et al)

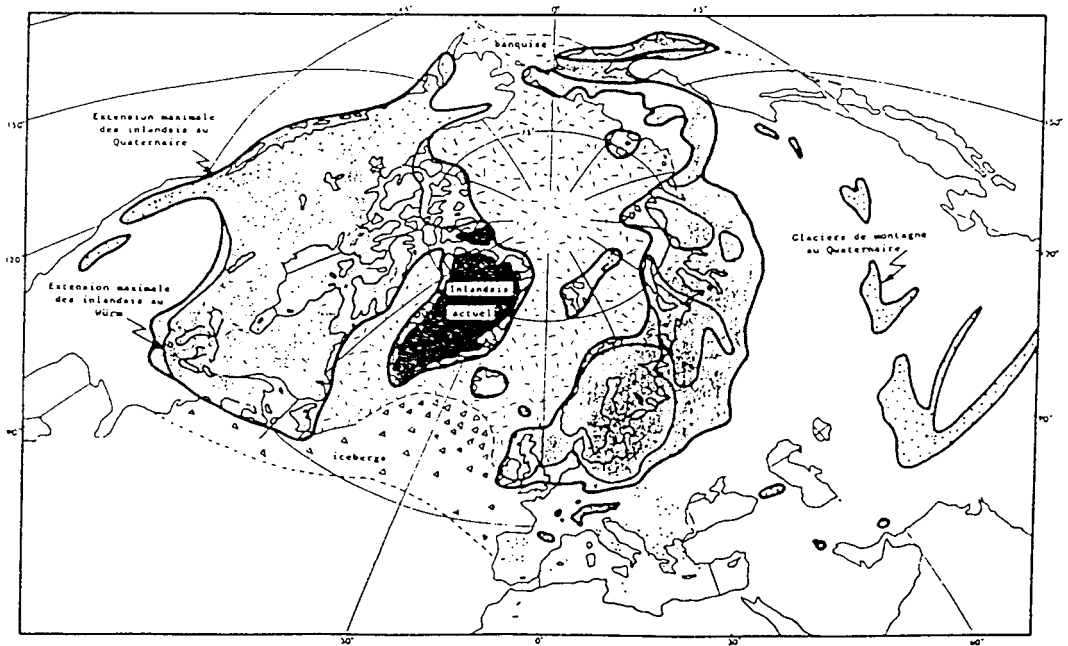


Fig. 4 – Extension des glaces quaternaires dans l'hémisphère nord (d'après Goguel et al)

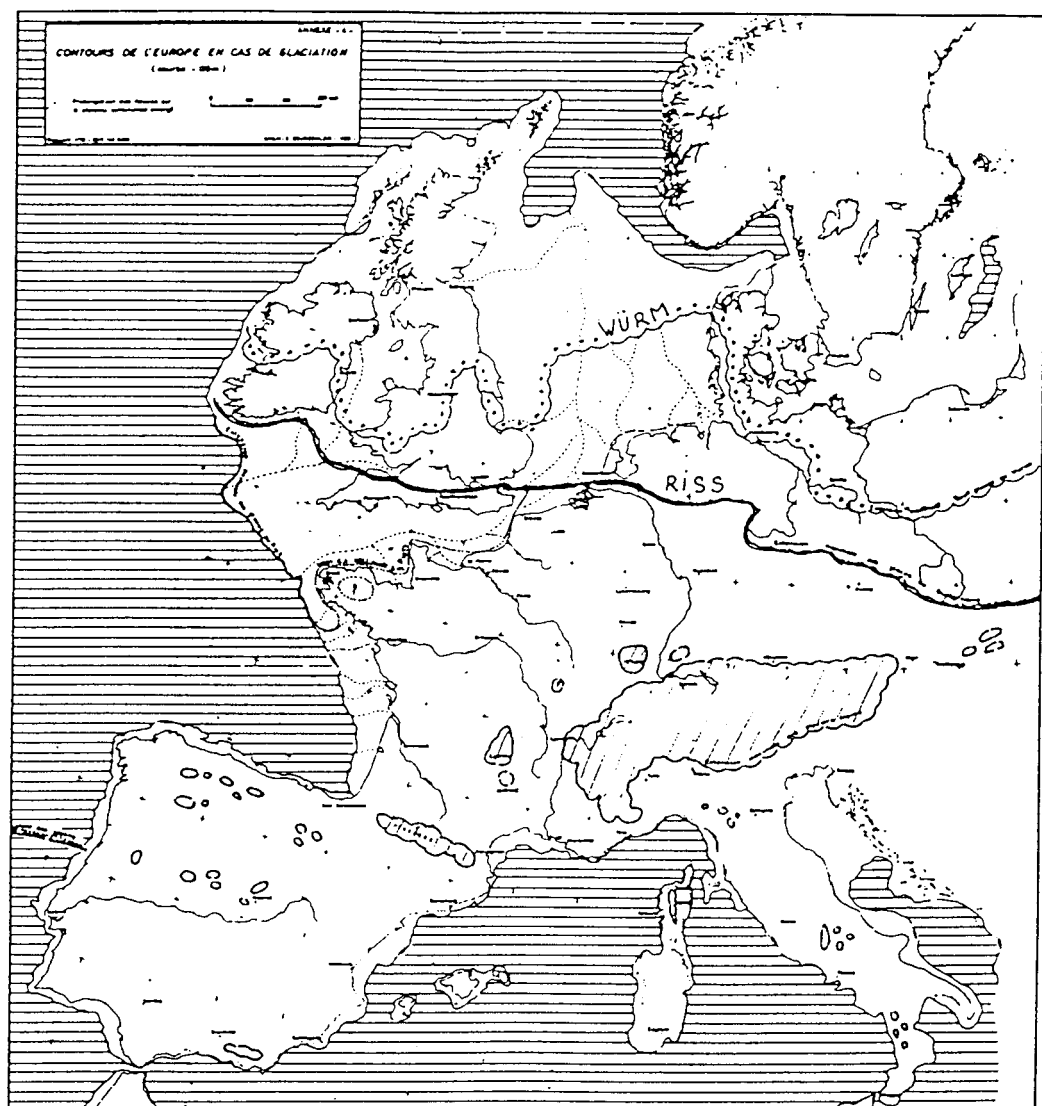


Fig. 5 – Nouveaux contours de l'Europe en cas de glaciation.
Le dessin est basé sur une baisse des eaux marines de - 120 m, équivalente à celle du Würm, voici - 18 000 ans (d'après Goguel et al)

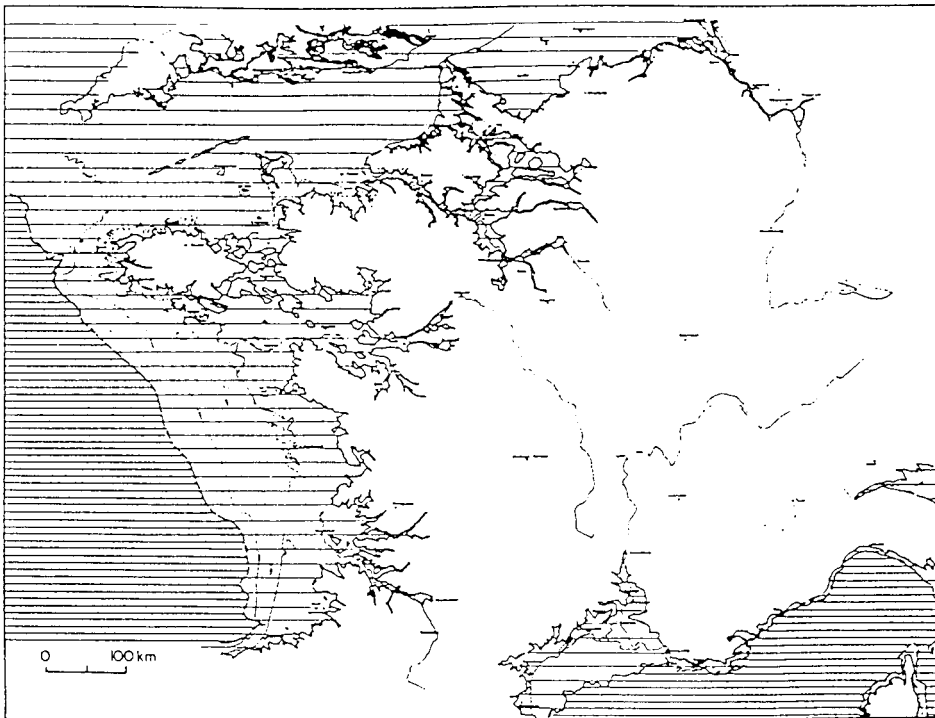


Fig. 6 – Contours de la France dans l'hypothèse d'une fonte totale des glaces terrestres (la mer atteint l'altitude actuelle d'environ + 80 m). Le domaine couvert de hachures lâche peut être alternativement plus ou moins découvert par la mer suivant les glaciations (d'après Goguel et al)

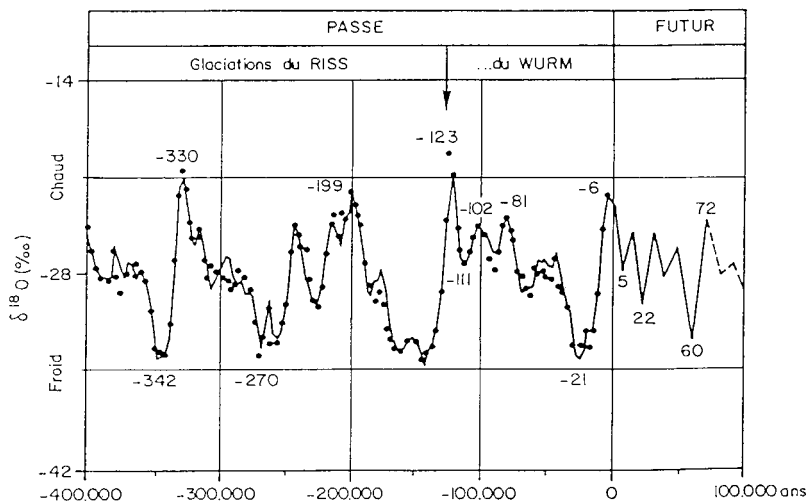
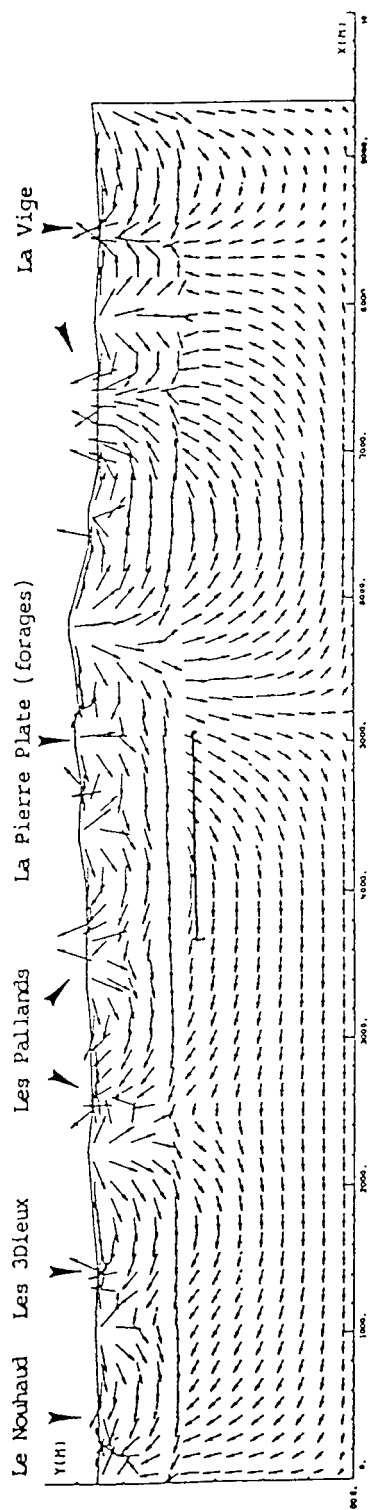


Fig. 7 – Variations climatiques à long terme au cours de 400 000 dernières années et prévisions pour les 100 000 prochaines. On constatera la bonne corrélation entre la courbe d'insolation calculée d'après les paramètres astronomiques de l'orbite terrestre (trait continu) et les "mesures" de température des eaux océaniques à partir des compositions isotopiques de l'oxygène des carbonates de coquilles d'organismes marins fossilisées dans les sédiments océaniques quaternaires carottés (points noirs) (Berger, 1981)

L'eau est le principal vecteur de la migration des ions: il suffit donc de placer les radionucléides en profondeur dans un milieu très peu perméable, dans une région où le gradient hydraulique est très petit pour faire en sorte que la vitesse de percolation de l'eau soit tellement faible que les radionucléides ne puissent pas s'échapper, ou tout au moins que le temps de transit jusqu'à la biosphère soit suffisamment long pour qu'ils aient perdu l'essentiel de leur activité. Avec une perméabilité de 10^{-10} m/s et un gradient hydraulique de 1%, la vitesse de transit est de l'ordre de 10^{-4} m/an, c'est-à-dire qu'il faut 100 000 ans au liquide interstitiel pour parcourir 10 m de barrière géologique. Comme la topographie est le moteur essentiel des écoulements souterrains et que le toit des nappes phréatiques suit généralement le relief, cela signifie qu'on s'écartera des régions montagneuses pour choisir de préférence des plaines ou des plateaux. La figure 8 représente le champ des vitesses de percolation dans un massif granitique lié aux gradients hydrauliques en surface. Dans cet exemple la vitesse naturelle des eaux d'infiltrations auprès d'un éventuel dépôt situé à 600 m de profondeur serait de l'ordre de 2 mm/an. On évitera aussi les zones sismiques, car en dehors des aspects destructeurs des tremblements de terre (qui n'ont pas une grande influence sur les structures souterraines) ils peuvent provoquer des modifications de la perméabilité des massifs rocheux et des changements hydrogéologiques.

Dans les roches dures (granites, schistes, ...) il faut trouver des milieux peu fracturés ou tout au moins tels que les fractures soient peu perméables parce qu'elles sont fermées, par exemple par les contraintes géostatiques, ou colmatées par des argiles de décomposition. Pour les roches plastiques ou susceptibles de fluer, on envisage surtout l'argile et le sel; ce dernier doit son existence à la présence d'une couche protectrice au-dessus de lui (argile ou marne). La perméabilité du sel est d'ailleurs une grandeur malaisée à caractériser. Elle est extrêmement faible mais, comme pour toutes les roches, elle peut dépendre de la fracturation du milieu, fracturation qui se développe sous l'effet des contraintes.

La présence d'argiles dans le milieu hôte ou autour du milieu hôte est tout à fait bénéfique, car les argiles sont capables de piéger des ions par échange de bases et donc de fixer momentanément les radionucléides, donc de retarder beaucoup leur mouvement. L'échange ionique est en effet réversible et tout se passe un peu comme si dans le métro un voyageur descendait à chaque station pour prendre le train suivant: sa vitesse de transport en serait évidemment fortement ralentie. Il faut, bien entendu, qu'il y ait assez d'argile pour que les sites ne soient pas saturés, auquel cas le mécanisme de retardement n'aurait plus d'effet. Et c'est une différence qui existe entre un milieu rocheux fissuré, dont les fissures contiennent peu d'argile, et un milieu poreux continu comme une marne ou une formation contenant des zéolithes qui peut au contraire contenir beaucoup de sites de capture.



Cote (m)	Vitesse de pore (m/an)	Cote (m)	Vitesse de pore (m/an)
470	22	-200	$0,17 \cdot 10^{-2}$
380	$0,14 \cdot 10^{-1}$	-340	$0,15 \cdot 10^{-2}$
260	$0,12 \cdot 10^{-1}$	-450	$0,13 \cdot 10^{-2}$
140	$0,94 \cdot 10^{-2}$	-600	$0,11 \cdot 10^{-2}$
20	$0,91 \cdot 10^{-2}$	-700	$0,99 \cdot 10^{-3}$
-100	$0,19 \cdot 10^{-2}$	-1000	$0,84 \cdot 10^{-3}$
	(situation approximative du dépôt)		

Fig. 8 - Auriat: champ des vitesses de pore (d'après Goguel et al)

3 – QUELQUES PRÉCISIONS SUR LES DÉCHETS RADIOACTIFS, LEUR PRODUCTION ET LES PROJETS DE STOCKAGE ACTUELS DANS LE MONDE

Il est d'usage actuellement en France de classer les déchets radioactifs en trois catégories:

- Les déchets A ou déchets technologiques. Il s'agit de résidus radioactifs de courtes durées de vie d'origines diverses: traceurs d'utilisation médicale, émetteurs γ faibles pour travaux industriels, blouses, vêtements contaminés, surbottes, gants des travailleurs de l'industrie électronucléaire etc. En France, on en produit environ 30 000 m³/an et la solution adoptée est la conservation en surface par une isolation dans des tumulus très sophistiqués pendant une durée de 300 ans, délai au bout duquel les dépôts seront abandonnés et les sites banalisés. Le délai de 300 ans correspond à une possibilité raisonnable de conserver les dépôts et de faire appliquer des consignes réglementaires d'interdiction. Actuellement il existe en France deux sites de stockage, le Centre Manche à la Hague dans le Cotentin qui est en phase de fermeture et le Centre de l'Aube à Soulaines. Le stockage en surface est beaucoup plus économique que l'enfouissement dans des excavations spécifiques souterraines comme cela a été fait en Suède, dans du granite sous la mer Baltique. En Allemagne, une ancienne mine de sel à Asse a été utilisée dans ce but et c'est certainement une excellente solution, mais il faut avoir l'opportunité d'une mine de sel arrivée au terme de son exploitation et acceptable vis-à-vis des conditions de sûreté, ce qui n'est pas toujours le cas. Aux U.S.A. une mine spécifique a été creusée et utilisée à cet effet (Waste Isolation Pilot Plant - WIPP).
- Les déchets B, appelés aussi déchets α , qui ont aussi une faible ou moyenne activité, mais qui contiennent des corps radioactifs à vie longue qu'il faut isoler de la biosphère pendant une durée de 100 000 ans peut-être même 1 000 000 d'années. Ils sont caractérisés par une teneur en radionucléides émetteurs α supérieure à 3,7 GBq/t, ainsi que par une activité spécifique faible à moyenne. Les rayons α sont peu pénétrants et même dans l'air sont rapidement absorbés. Ces déchets proviennent des coques et embouts obtenus par cisailage des gaines de combustibles irradiés ou du traitement des effluents. Ces déchets sont enrobés dans une matrice de béton, ou de bitume, elle-même coulée dans des conteneurs en béton ou en acier de différentes dimensions. Ils représentent avec leur conditionnement un volume de 2,5 m³ pour l'équivalent d'une tonne de combustibles irradiés. Pour un programme électronucléaire de 60 GWe installés, comparable à celui de la France, une estimation raisonnable de la production de déchets B est de l'ordre de 2 à 3000 m³/an, c'est-à-dire environ dix fois moins que celle des déchets A. Il faut y ajouter les déchets d'origine militaire et pour certains pays – comme les U.S.A. ou l'ex U.R.R.S. – cela peut faire de grandes quantités, d'autant plus qu'il y aura peut-être aussi demain des déchets provenant de la destruction des mêmes armements. A l'heure actuelle il existe un certain nombre de projets de stockage de déchets B, en Allemagne, à Morsleben dans une ancienne mine de sel, actuellement autorisée pour des déchets A, en cours d'examen pour les déchets B, à Konrad dans une ancienne mine de fer pour les déchets A et B, à Gorleben dans un dôme de sel pour des déchets B (et peut-être aussi pour des déchets C), en Angleterre dans un tuf éruptif, au Canada, en Finlande, en Suède (à Aspö) dans du granite, aux U.S.A. dans du sel (WIPP) et dans un tuf éruptif (Yucca Mountain). Dans ce dernier pays la situation est un peu compliquée. Le WIPP avait été conçu pour tous les déchets militaires, le site de Yucca devant être

utilisé pour les déchets civils sous la tutelle du Department of Energy (ou Ministère de l'Energie). Actuellement les installations du WIPP sont autorisées à recevoir des déchets A et quelques catégories de déchets de type B contenant des transuraniens, mais les installations existantes de manutention de déchets plus "durs" restent en attente. D'autre part, les militaires américains, depuis quelques années déjà, ont suspendu le retraitement et ne produisent plus de déchets C, de sorte que ceux-ci sont entreposés provisoirement et pourraient aller dans le site de Yucca Mountain, qui n'est d'ailleurs pas encore en développement.

- Enfin, les déchets C appelés aussi déchets de haute activité, qui eux aussi ont une vie très longue mais qui au début de leur existence ont une forte émission γ ; ils libèrent alors une quantité de chaleur importante et par conséquent ils ont tendance à chauffer. Cet épisode thermique est pratiquement éteint après 300 ans. Ces déchets proviennent du retraitement des combustibles irradiés. Ils représentent, pour l'équivalent d'une tonne de combustible, un volume de $0,13 \text{ m}^3$ soit, avec les mêmes hypothèses que pour les déchets B, la production d'un volume de $100 \text{ m}^3/\text{an}$. Les déchets C se présentent en France sous la forme de conteneurs cylindriques en acier inox de 43 cm de diamètre et de 135cm de haut, remplis à chaud par du verre dans lequel les radionucléides sont dissous. La figure 9 d'après Come (1988) montre l'évolution de la puissance dissipée en fonction du temps. Ce n'est pas une simple exponentielle, d'une part parce qu'il s'agit d'un mélange initial de corps radioactifs de périodes différentes et d'autre part parce que les produits de filiation peuvent être eux-mêmes radioactifs. On peut admettre pour la puissance dissipée pendant les premiers siècles l'approximation suivante:

$$q(t) = q_0 e^{-\beta t} \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$$

où q_0 représente la puissance dissipée initiale et β une constante égale à $0,024 \text{ (an}^{-1}\text{)}$.

Le stockage des déchets C est celui qui pose le plus de problèmes à cause du dégagement initial de chaleur. Il faut au début les refroidir, au moins pendant un certain temps, pour éviter que leur température à coeur ne dépasse pas 450° , auquel cas il pourrait se produire une

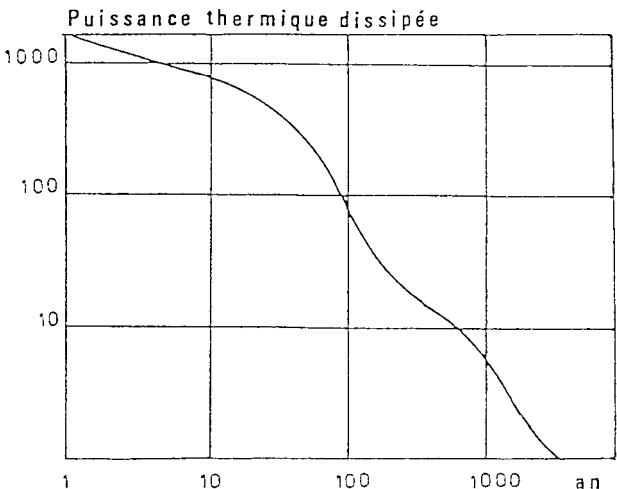


Fig. 9 – Puissance thermique dissipée $q(t)$ en fonction du temps

dévitrification et le confinement des radioéléments serait beaucoup moins bon. Ultérieurement, dans un enfouissement dans une couche géologique, ce dégagement de chaleur peut engendrer des effets thermo-mécaniques qu'il faut maîtriser. C'est essentiellement du stockage de ces déchets dont on parlera ici. Il n'existe nulle part encore de stockage de déchets de type C.

On estime actuellement que d'ici l'an 2000 il y aura dans le monde 220 000 t de combustibles irradiés (c'est-à-dire des déchets de type B) et qu'en 2025 il y en aura de l'ordre de 700 000 t auxquels il faudra ajouter les déchets radioactifs d'origine médicale, industrielle et militaire.

Il existe dans le monde un certain nombre de "laboratoires souterrains" et de projets qui ne sont pas finalisés (Grimsel en Suisse dans le granite, Mol en Belgique dans l'argile, etc...) ou abandonnés (Expérience "Climax" aux U.S.A. dans le granite). Au Canada le laboratoire souterrain de Pinawa qui est en cours d'examen approfondi a actuellement simplement pour but de valider le concept de stockage dans le granite du bouclier canadien. Comme on peut le voir, même si les solutions envisagées par différents pays sont pratiquement voisines pour des buts voisins, les circonstances géologiques locales, la sensibilité des populations, la maîtrise de la propriété foncière (appartenant à une autorité nationale ou fédérale) engendrent des situations qui peuvent être extrêmement différentes.

En France, nous avons la chance d'avoir une situation géologique riche et très variée, de sorte que nous disposons d'un grand nombre de sites possibles dans des formations hôtes très diverses: des granites en Bretagne, des schistes en Anjou, des argiles en Champagne ou en Aquitaine, du sel en dôme ou du sel en couche, notamment dans l'Ain et l'on peut choisir entre différentes solutions, à l'encontre d'autres nations qui n'ont pas autant de flexibilité. Il est évident par exemple qu'on trouve plus facilement du granite que des formations argileuses ou salifères dans les pays nordiques que dans les pays plus au Sud de l'Europe où des formations secondaires ou tertiaires existent autour des Alpes. Il n'est donc pas étonnant qu'en Suède ou au Canada les sites dans le granite soient regardés attentivement. Il est certain aussi que l'acceptation par les populations est une chose importante. Elle est évidemment plus facile à obtenir dans une zone désertique ou quasi-désertique, mais cela ne doit pas occulter les problèmes physico-mécaniques qui restent à résoudre, ni la définition des critères permettant de choisir la meilleure solution technique pour le long terme parmi plusieurs possibilités.

La configuration générale de ce que pourrait être un stockage de déchets radioactifs est indiquée sur la figure 10. Dans une couche géologique jugée convenable, plusieurs quartiers sont définis; ils contiennent des galeries de circulation et des épis permettant le stockage. L'entreposage définitif peut se faire dans des chambres horizontales ou dans des puits verticaux. Le transport des colis radioactifs se fait par des puits depuis la surface du sol où sont installées les unités de dernier conditionnement. D'autres configurations peuvent évidemment être envisagées avec des descenderies au lieu des puits ou des dispositions différentes au fond, mais de toutes façons les déchets de haute activité doivent être traités à part des déchets de classe B. En effet, en plus d'une manipulation plus délicate, les déchets de classe C dégagent de la chaleur ce qui engendre des effets thermomécaniques dans la mine.

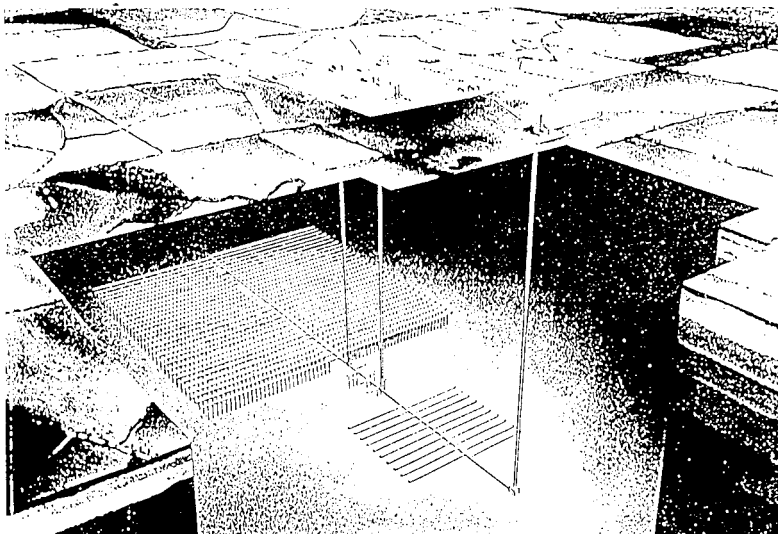


Fig. 10 – Schéma de principe d'un stockage de déchets radioactifs en formation géologique (Document ANDRA)

3 – LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT DU SOL

La chaleur dégagée par les déchets C engendre une augmentation de température du milieu hôte. La dilatation thermique provoque des contraintes dans le milieu dont les effets peuvent être nuisibles. Le dégagement de chaleur par les déchets de haute activité est un phénomène assez lent. La propagation de la chaleur dans les sols ou les roches est un phénomène extrêmement lent. Ainsi, 300 ans est l'ordre de grandeur de la durée au cours de laquelle le principal de l'énergie est émis, alors qu'il faut de l'ordre de 10 000 ans pour que la chaleur dégagée soit dissipée à la surface du sol. Les effets à distance des contraintes liées aux dilatations, par contre, sont des phénomènes pratiquement instantanés. L'énergie dissipée dans un stockage de déchets C est de l'ordre de 6.10^{16} Joules sur 300 ans ou encore de 3.10^6 Joules sur 30 ans. À titre de comparaison une bombe A à 20 kt dissipe une énergie de $1.4.10^{14}$ Joules, une bombe H de 10Mt 5.10^{16} Joules. Enfin, l'énergie mise en jeu dans une éruption volcanique est équivalente à celle d'une à cent bombes H.

L'évolution de la température du milieu est un problème bien connu et il n'y a pas de difficultés mathématiques majeures pour résoudre une équation de Fourier même en régime transitoire avec une source dont la puissance est variable en fonction du temps. Des calculs comparatifs ont été faits en Europe, dans le cadre de la Commission des Communautés Européennes, et ont donné des résultats tout à fait voisins avec les codes de calcul développés par divers Instituts ou Centres de Recherche. L'accord avec des expériences en vraie grandeur est d'autre part tout à fait satisfaisant, et d'ailleurs les techniques de stockage de la chaleur, ou du froid dans le sol, sont des problèmes actuellement bien maîtrisés par les ingénieurs.

Ce qu'il faut retenir des études thermiques, c'est qu'en tout point du stockage la température commence par croître, passe par un maximum, puis décroît au fur et à mesure de la diminution de la puissance de la source de chaleur. Ce maximum est d'autant moins élevé et il se produit d'autant plus tardivement que le point est loin de la source de chaleur. La figure 11 donne

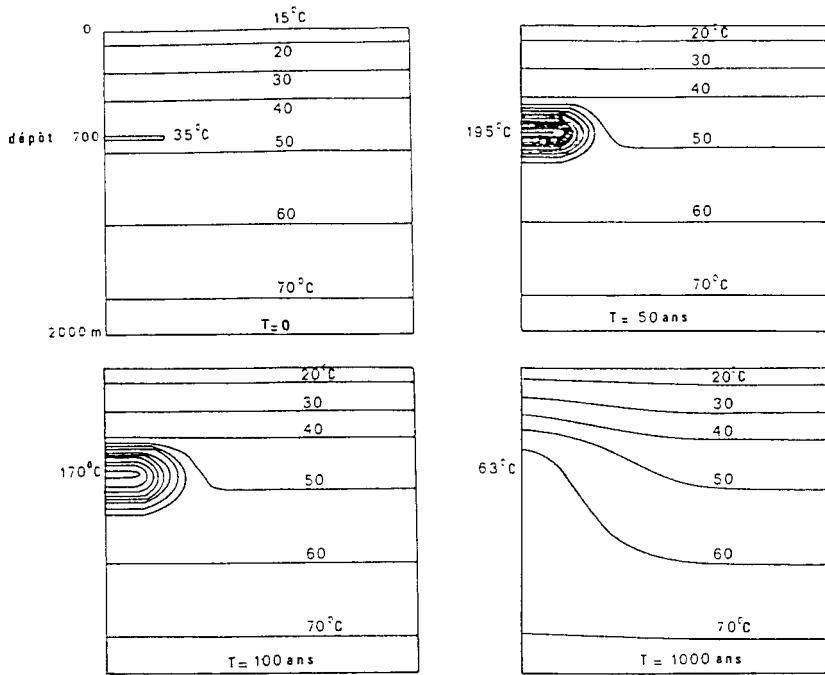


Fig. 11 – Evolution de la température en fonction du temps au voisinage d'un stockage de déchets radioactifs dans du sel (d'après M. Ghoreychi et P. Bérest, 1989)

l'évolution de la température autour d'un stockage à 700 m de profondeur dans du sel gemme. Le dépôt est assimilé à un disque circulaire plat avec une densité de puissance dissipée constante dans l'espace (mais diminuant en fonction du temps comme indiqué sur la figure 9). À l'état initial les isothermes sont des plans parallèles à la surface du sol. Le gradient géothermique est plus faible dans le sel que dans les terrains de couverture, car le sel est un bon conducteur de la chaleur.

Les températures indiquées correspondent à des hypothèses réalistes, mais si l'on diminuait la puissance thermique (par une densité spatiale plus faible des déchets ou par un refroidissement en surface de plus longue durée), on pourrait obtenir des températures plus faibles. Au bout de 50 ans la perturbation thermique n'est vraiment sensible qu'entre 200 m en-dessus et en-dessous du stockage. Au bout de 100 ans la perturbation ne dépasse pas 250 m. Enfin, après mille ans, le champ thermique est encore perturbé bien que l'épisode de chauffage soit pratiquement terminé depuis 700 ans. Il faudra attendre 10 000 ans pour que le gradient géothermique revienne à un état proche de l'état initial.

Examinons maintenant l'aspect mécanique. Au début du dégagement de chaleur, il se produit une forte compression des roches au voisinage du stockage due à la dilatation thermique dans un milieu confiné et, par conséquent, des contraintes de traction au loin avec risque de fissuration. Plus tard lorsque la température commence à baisser dans la source et plus tard encore lorsqu'elle commence à s'abaisser à une certaine distance du voisinage de la source il se produit une diminution de la dilatation, ce qui est analogue à une contraction, c'est-à-dire avec compression au loin et traction près du stockage avec risque de fissuration dans le champ proche. Il faut évidemment éviter que ces réseaux fissuraux ne se rejoignent au risque de voir

se développer une circulation d'eau sous l'effet du gradient hydraulique naturel ou par thermoconvection. Le champ géostatique de compression dû au poids propre du milieu rocheux est évidemment favorable puisqu'il s'oppose à l'ouverture de cette fissuration et il suffit de placer le dépôt plus profond pour augmenter le serrage.

Il faut maintenant faire une distinction entre les différentes roches et même, on pourrait dire, entre les différents sites car avec les effets de la dilatation thermique en champ proche et en champ lointain, c'est-à-dire dans la formation hôte et dans le recouvrement on voit qu'il faut étudier une structure dans sa globalité, le réceptacle géologique et sa couverture. Dans tous les cas, l'analyse doit être faite pour chaque milieu spécifique envisagé, mais il faut distinguer les roches tendres et les roches dures.

Les roches tendres

Il s'agit essentiellement du sel gemme et de l'argile, deux roches qui ont tendance à fluer sous fortes contraintes mais cette propriété qui est gênante pour le mineur est intéressante pour le stockage des déchets car elle permet une cicatrisation des blessures engendrées par les opérations minières. Par exemple, il est bien connu que l'argile autour du tubage d'un puits pétrolier est pressée sur le métal par les contraintes géostatiques et en quelques années une étanchéité correcte est rétablie. Le sel est composé de cristaux élémentaires bien plus gros que les grains d'argile, puisque le volume de certains d'entre eux peut dépasser le centimètre cube. Ces cristaux sous contraintes se fissurent mais ils sont suffisamment ductiles pour qu'au bout d'un certain temps les fissures sous pression se referment. Mais surtout les propriétés de viscosité du sel sont très affectées par la température. On peut dire que la déformation du sel est un phénomène fortement non-linéaire par rapport au déviateur des contraintes et par rapport à la température. Par exemple, si le déviateur des contraintes $\sigma_1 - \sigma_3$ croît de 7,5 à 11,5 MPa à 100 °C, la déformation au bout d'un temps donné augmente de près de 10 fois, de quelques millièmes à quelques pourcents. Mais sous un déviateur de 7,5 MPa un changement de température de 100 °C à 200 °C provoque l'augmentation de la déformation de fluage par un facteur voisin de 15. Les opérations de mines et de mines profondes sont donc délicates mais une pratique ancestrale pour l'exploitation du sel de bouche a initié les mineurs aux subtilités de ces travaux. La figure 12 montre l'évolution en fonction du temps du déviateur des contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$) autour d'un stockage de déchets C ayant

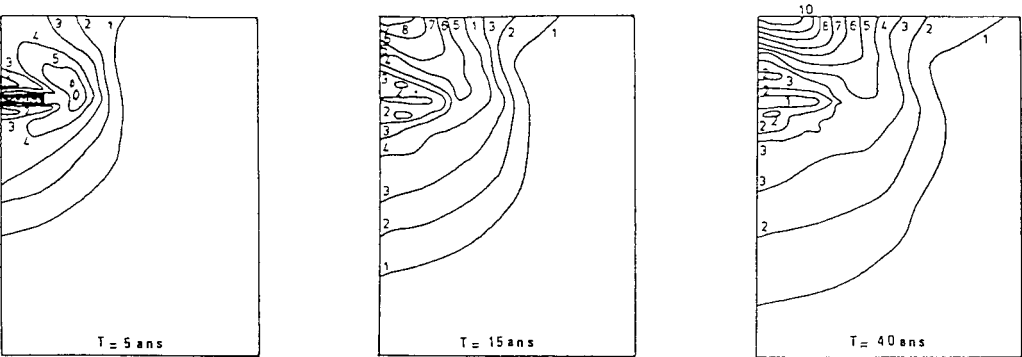


Fig. 12 – Evolution du déviateur des contraintes autour d'un stockage de déchets radioactifs dans du sel (les lignes sont cotées en MPa)

la forme d'un disque plat situé à 500 m de profondeur au cours du début de l'épisode thermique. La relaxation des contraintes de cisaillement au voisinage du stockage, grâce au fluage du sel, y est nettement visible entre 0 et 40 ans et ce phénomène est bénéfique puisqu'il adoucit progressivement les sollicitations au voisinage du stockage.

On trouve des effets de même nature pour l'argile même si le rôle de la température n'y est pas si important encore qu'il soit différent du fait qu'il s'agit d'un milieu à deux phases, l'eau et les grains minéraux, dont les dilatations thermiques sont différentes. Ceci crée des difficultés pour l'étude mécanique du milieu (avec l'apparition de gradients de pression interstitielle et mouvements de l'eau pour le retour à l'équilibre). Dans l'argile il paraît aussi souhaitable d'éviter de dépasser la température d'ébullition de l'eau ce qui, entre autres, pourrait modifier la conductivité thermique du milieu: l'argile sèche est en effet beaucoup moins conductrice de la chaleur que l'argile humide. On est donc amené à choisir une température maximale dans le stockage plus petite pour l'argile que pour le sel: il faut donc un stockage plus étendu.

Pour définir les dimensions du stockage, on doit tenir compte de la conduction thermique, du coefficient de dilatation thermique, de l'effet du temps c'est-à-dire du fluage, pour évaluer les contraintes et les effets sur les matériaux, et aussi pour calculer le gonflement de la surface du sol. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques des différents matériaux. Il met bien en évidence la différence qui existe entre roches dures et roches tendres, encore que pour différents matériaux de même appellation les propriétés thermomécaniques ne sont pas rigoureusement les mêmes et doivent être mesurées en laboratoire pour chaque roche spécifique envisagée.

TABLEAU
Caractéristiques physiques de différents milieux

	Chaleur massique ρC (J/m ³ .°C)	Conductivité thermique K (W/m.°C)	$\frac{1}{\sqrt{\beta K \rho C}}$	Coefficient de dilatation thermique α (°C ⁻¹)	Puissance dissipée initiale q_0 (W/m ²)	Température maximale au centre du stockage ΔT_{\max} (°C)	Volume du soulèvement en surface v (m ³)
Argile	2040 . 940	1,5	20,9	10.10 ⁻⁶	2,5	16,5	0,94.10 ⁶
Granite	2700 . 800	2,5	15,3	8.10 ⁻⁶	6,67	32	0,66.10 ⁶
Sel	2150 . 850	5,2	11,5	43.10 ⁻⁶	> 50	181	4,2.10 ⁶

Comme on peut le voir sur ce tableau, les chaleurs massiques (produit de la masse volumique ρ par la chaleur spécifique C) sont peu variables d'une roche à l'autre. Par contre, les conductivités thermiques sont différentes, le sel étant le plus conducteur. Le stockage étant considéré comme un disque plat homogène, d'épaisseur négligeable, la température maximale en son centre vaut:

$$T_{\max} = \frac{0,315 \, q_0}{\sqrt{\beta K \rho C}}$$

La colonne $1/(\sqrt{\beta K \rho C})$ montre donc qu'à puissance égale le sel s'échauffe moins que les autres corps. Mais, comme on peut lui faire supporter une température très supérieure à celle de l'argile, on peut choisir un très grand q_0 , c'est-à-dire qu'on peut choisir un stockage moins étendu. Comme le coefficient de dilatation α du sel est quatre fois plus grand que celui de l'argile ou du granite, le volume soulevé en surface est plus grand. Egalement, un stockage dans le sel étant plus compact que dans les autres milieux, la hauteur maximale de soulèvement à la verticale du centre du stockage est beaucoup plus grande. Ainsi pour une énergie totale dissipée au bout de 300 ans de 6.10^{16} Joules le soulèvement en surface, au droit du centre du stockage, est de l'ordre du mètre pour le sel alors qu'il est décimétrique pour l'argile ou pour le granite.

Les roches dures

Ce sont essentiellement les formations éruptives, comme les granites, les basaltes, ou les tufs volcaniques. La propagation de la chaleur dans ces matériaux engendre des effets tout à fait analogues à ceux qui se produisent dans les roches tendres mais les roches dures sont toujours fissurées, ce qui ne modifie pas trop la propagation thermique tant que les fissures sont fermées (ou colmatées). En général les problèmes de construction, de génie civil ou de génie minier y sont plus faciles à résoudre que pour les roches tendres: des tunnels autoroutiers de grandes sections ont été creusés sous des recouvrements de plus de 600 m dans des granites (tunnel du Mont Blanc) dans des calcschistes (tunnel du Fréjus) dans les calcaires (tunnel de l'Epine). Dans les mines d'or en Afrique du Sud des profondeurs beaucoup plus grandes ont été atteintes et on peut considérer que les techniques de creusement en souterrain en roches dures sont bien au point. Mais la difficulté principale est celle de l'étanchéité des massifs rocheux, c'est-à-dire de la perméabilité du réseau fissural. Comme la perméabilité est fonction du degré de fermeture des fissures, c'est-à-dire des contraintes normales qui s'appliquent sur elles, on voit apparaître la nécessité de calculs mécaniques et hydrauliques couplés, et si des fissures ouvertes sont susceptibles de modifier la conductivité de la chaleur, de calculs couplés thermiques, mécaniques, hydrauliques qui deviennent extrêmement lourds et nécessitent des efforts expérimentaux importants pour les déterminations in situ des paramètres mécaniques, hydrauliques ou thermiques des massifs rocheux.

Mais le plan d'une fissure naturelle n'a aucune raison d'être perpendiculaire à une direction principale des contraintes naturelles. Il contient donc une contrainte de cisaillement. Cela a d'ailleurs été vérifié expérimentalement. De sorte que lorsque la dilatation qui se produit autour du stockage bouscule l'édifice fissuré d'un massif rocheux, des glissements relatifs peuvent se produire entre les parties adjacentes des fissures. Mais les fissures dont les lèvres ont bougé peuvent être beaucoup plus perméables après le mouvement qu'avant. Il faut donc éviter les situations où des mouvements peuvent se produire. Pour calculer ce risque il faut que la reconnaissance des fissures des massifs de roches dures, de leurs orientations, de leurs critères de glissement soit faite avec précision et la mesure des contraintes in situ, auxquelles se superposent des contraintes liées à la dilatation thermique du stockage, est un élément indispensable pour le choix d'un site destiné à l'enfouissement des déchets radioactifs.

4 – DERNIERS COMMENTAIRES

Le principe de l'isolement des déchets dans le sous-sol doit être considéré comme assez bien maîtrisé à l'heure actuelle. Il existe déjà de par le monde des stockages pour les déchets radioactifs les moins toxiques et bien entendu une réflexion approfondie pour les autres projets, compte tenu des dangers à long terme de tels produits.

Mais il existe d'autres déchets industriels qui sont aussi extrêmement dangereux. L'homme est devenu depuis longtemps un acteur géologique important: les silex taillés ou polis sont des marqueurs géologiques qui datent l'ère quaternaire à quelques centaines d'années près, comme le seront demain les restes des automobiles de notre époque. L'homme est aussi un producteur d'énormes remblais: terrains gagnés sur la mer, barrages en terres, retenues hydroélectriques comblées de sédiments etc... il s'agit chaque fois de millions de m³.

L'homme est aussi un grand fabricant de déchets. En France, on évalue à 150 Mt/an la masse des déchets industriels qui sont produits, dont 100 Mt de déchets inertes (déblais, stériles miniers, gravats...) et 50 Mt de déchets industriels dont 12 Mt font l'objet d'une valorisation, dont 28 Mt peuvent être mis en décharge mais dont 10 Mt doivent être détruits. Parmi ces derniers, il y en a 1500 à 3000 t/an dont la destruction n'est pas satisfaisante et pour lesquels l'élimination géologique est la bonne solution.

Les réflexions et recherches qui ont été faites à l'occasion des problèmes liés à l'élimination des déchets radioactifs sont un guide particulièrement utile pour résoudre cet autre problème de société que représente l'élimination des déchets industriels hautement toxiques et les sévères problèmes de pollution et d'environnement correspondants.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABOU-EZZI N. E., GHOREYCHI M., SCHMITT N. — *Modélisation thermomécanique de champ proche d'un stockage de déchets radioactifs en milieu salifère*, 7e Cong. Int. Méc. Roches, Aachen. 1991.
- BÉREST P. — *Les problèmes de Mécanique associés au stockage souterrain*. Thèse ENSM Paris. 1989.
- BÉREST P., HÉTUIN E., BLUM P. A., SALEH B. — *Mesure en place du module élastique des terrains de surface*, Congrès Européen de Mécanique des Sols, Florence. 1991.
- BERNAUD D., ROUSSET G. — *La nouvelle méthode implicite pour l'étude du dimensionnement des tunnels*, Revue Française de Géotechnique, Juillet. 1992.
- COME B. — *Revue Française de Géotechnique*, n.° 40, 3e trimestre 1987, p. 23. 1987.
- COME B. — *Aspects thermomécaniques liés à l'évacuation des déchets radioactifs dans : la thermomécanique des roches*, Bérest P. et Weber Ph. Eds., Publication du B.G.R.M., n° 16. 1988.
- GHOREYCHI M., BÉREST P. — *Thermomechanical modeling of radioactive waste disposal in salt formations*, X. SMIRT, Anaheim, Août 1989.
- GOGUEL J., ET UN GROUPE DE TRAVAIL — *Stockage des déchets radioactifs en formation géologique. Critères techniques de choix de site*. Publication du Ministère de l'Industrie, Paris. 1987.

- HABIB P., BÉREST P. — *Rock mechanics for underground nuclear waste disposal in France*. Comprehensive Rock Mechanics. Volume 5, Brown, Fairhurst and Hoek Eds., Pergamon. 1994.
- HABIB P. — *Aspects thermomécaniques de l'enfouissement des déchets radioactifs de haute activité dans des formations géologiques*, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, La vie des sciences. Tome 7, n° 4-5. Juillet - Octobre. 1990.
- HUNSCHE U. — *Measurement of creep in rock salt at small strain rate*. Second Conf. on the Mechanical Behaviour of Salt, 1984, Hanover, Trans. Tech. Pub., 1988.
- LANGER M. — *Rheology of rock salt and its application for radioactive waste disposal purposes*, Proc. of the Symp. on Engineering in Complex Rock Formations. Beijing China. Science Press, 1986.
- MARSILY G., FEUGA B. — *Approche théorique et expérimentale de la perméabilité d'un massif fracturé*, Journée sur le Granite 26 Juin 1984, Orléans La Source, Document du B.G.R.M.. 1984.
- MUNSON D. E., FOSSUM A. F., SENSENY P. E. — *Approach to first principles model prediction of measured WIPP in situ room closure in salt*, Proc. of the 30th U.S. Rock Mechanics Symp., Balkema, Rotterdam, p. 673-680. 1989.
- ROUSSET G. — *L'enfouissement de déchets radioactifs en formation géologique profonde. Problèmes de recherche associés*. Annales de l'I.T.B.T.P. Octobre. 1992.
- SPIERS C. J., LISTER G. S., ZWART H. J. — *The influence of fluid rock interaction on the rheology of salt rock on ionic transport in the salt*, Periodic Report, Contrat n.° WAS 153807N(N), C.C.E., Juil.-Déc. 1982 et Janv.-Juin 1983. 1982-1983.
- SCHMIDTBAUER B. — *L'état du stockage définitif dans la République Fédérale d'Allemagne et dans un domaine international*. Tome III pp. 1463-1467 - 7ème Congrès Int. de Mécanique des Roches, Aachen, 1991.
- WITTKKE W. — *Problème de mécanique des roches pendant la conception du magasin final "Konrad"*. Tome III pp. 1469-1477, 7ème Congrès Int. de Mécanique des Roches, Aachen. 1991.
- Atelier 5 : Mécanique du sel gemme. 7ème Congrès Int. de Mécanique des Roches, Aachen. 1991.
- "Mechanical Behaviour of Salt"
- 1st Conference – 1981 Penstate University (U.S.A.).
 - 2nd Conference – 1984 B.G.R. Hannover (Germany).
 - 3rd Conference – 1993 École Polytechnique - Palaiseau (France).