

EN VUE D'UNE PUBLICATION OU D'UNE COMMUNICATION

Direction :
 Centre :
 Réf émetteur :

MIST
 (CNU)

NIG n° 316

Titre original du document : **GEO PROSPECTIVE : DES DONNÉES ACQUISES, AUX SCENARIOS**

Titre traduit en anglais :

ARRIVEE -
 27 MAI 94

Titre traduit en français :

ISSUJTN. FR 1600 439

AUTEURS	AFFILIATION	DEPT/SERV/SECT	VISA (d'un des auteurs)	DATE
BLANC P.A. E. DES ORRES P.	IPSN IPSN	DPEI / SERGI 9100 191 DES / SESID 9100968	P. Solans [Signature]	5 mai 94 5-05-94

Nature du document 2 :

PERIODIQUE
 CONF/CONGRES
 POSTER
 RAPPORT
 THESE
 COURS
 MEMOIRE DE STAGE
 OUVRAGE

Pièces jointes :
 RESUME
 TEXTE

CONGRES
 CONFERENCE

Nom : **GEO PROSPECTIVE**
 Ville : **PARIS** Pays : Date du : **18 / 09 / 94** au **19 / 09 / 94**
 Organisateur : **ANRPA, BRGM, ENSM, UNESCO**

PERIODIQUE

Titre :
 Comité de lecture : oui non

DOMAINES :

OUVRAGE

Titre :
 Éditeur :

LANGUE : **FRANCAIS**

THESE
 MEMOIRE DE STAGE
 COURS

Université / Établissement d'enseignement :

N° EPAC : **4,7 / 1,3**

SUPPORT : Disquette Papier

MOTS-CLES : **GEO PROSPECTIVE, SCENARIOS, GLACIATIONS, EROSION**

Les visas portés ci-dessous attestent que la qualité scientifique et technique de la publication proposée a été vérifiée et que la présente publication ne divulgue pas d'information brevetable, commercialement utilisable ou classée.

SIGLE	NOM	DATE	VISA	OBSERVATIONS	REF
-------	-----	------	------	--------------	-----

CHEF DE SERVICE	SESI D	GRENECHE	615/94	[Signature]	
CHEF DE DEPARTEMENT	DES	C. Duvetant	10.5.94	[Signature]	

DPEI

Date limite d'envoi du resume : .../.../...

Date limite d'envoi du texte : .../.../... Date limite d'envoi du poster : .../.../...

Destinataires:

Les correspondants publication des départements se chargent de transmettre à l'INSTN/MIST/CIRST (Suclay) copies des demandes d'autorisation de publication, du résumé et du texte définitif.

Entité d'appartenance de l'auteur. Ex. : CEA, CNRS, INSERM ...
 Cocher la case correspondante

VOL 27 N° 14

041001444

GEOPROSPECTIVE : DES DONNEES ACQUISES, AUX SCENARIOS.

P.-L. Blanc* & P. Escalier des Orres **

Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire,

* Département de Protection de l'Environnement et des Installations

** Département d'Evaluation de Sûreté

IPSN \ C.E.A., B.P. 6, 92265 Fontenay-aux-Roses CEDEX, France

ABSTRACT

The present paper discusses the relationships between the French regulatory safety rule for radwaste deep disposal (RFS n° III.2.f), the geological (external geodynamics) data available when the rule was discussed, and the present geoprospective studies and scenarios to be taken into account in the safety assessment of an underground disposal site.

INTRODUCTION

FONDEMENTS DE LA GEOPROSPECTIVE

Le concept de stockage profond de déchets radioactifs de haute activité ou à longue période de décroissance fait reposer la sûreté du stockage sur un système de confinement composé de trois barrières :

- barrière 1 : le colis, qui est composé de la matrice du déchet (verre borosilicaté, combustible usé non retraité...) et de son conditionnement extérieur (conteneur, surconteneur éventuel) ;

- barrière 2 : les ouvrages fixes recevant ces colis, les matériaux servant à leur construction (soutènement d'acier et bétons) et à les sceller (bentonite et/ou autres matériaux de colmatage) ;

- barrière 3 : le milieu géologique recevant les ouvrages.

La troisième barrière diffère nettement des deux autres, puisqu'elle n'est pas construite par l'homme, mais tout au plus sélectionnée ; elle en diffère aussi en ce qu'elle a une évolution propre, sur laquelle l'homme n'a que peu d'action, sinon ponctuelle et accidentelle.

L'évaluation à très long terme de la sûreté des projets de stockage souterrain de déchets radioactifs de haute activité ou à longue période de décroissance doit donc logiquement comporter, outre l'étude des propriétés immédiates et instantanées du milieu géologique concerné, la prise en compte

de modifications possibles de ces propriétés, sous l'action de phénomènes naturels, et de ceux qui peuvent être induits dans le futur par l'ensemble des activités humaines. C'est là le champ de la géoprospective, terme désignant une approche qui se veut à la fois naturaliste et quantitative.

Dans le domaine du stockage des déchets radioactifs, le concept de géoprospective s'est fait jour sous l'influence des programmes des communautés européennes, au début de la décennie 80 [1]. Il a ensuite été formalisé et développé dans les agences de déchets ou les organismes de sûreté de la plupart des pays ayant développé une industrie nucléaire.

En France, le BRGM a dressé l'inventaire initial des phénomènes susceptibles d'affecter la sûreté à long terme d'un stockage profond. Celui-ci comportait déjà la distinction entre phénomènes d'origine interne (mouvements verticaux, volcanisme, diapirisme, évolution du champ de contrainte) et d'origine externe (climatologie et glaciations, altération et érosion). Les auteurs tentaient également d'évaluer l'amplitude et la vitesse des phénomènes [2] puis d'en développer une modélisation [3].

RECONNAISSANCE ET OBLIGATIONS REGLEMENTAIRES

En même temps, deux commissions ministérielles d'experts successives (Commission Castaing [4], Commission Goguel [5]) eurent pour rôle, après une réflexion sur le problème des déchets, de définir les critères de choix de sites, y compris en regard de leurs évolutions futures.

Un groupe de travail SCSIN/ IPSN/ ANDRA définit ensuite une méthodologie d'évaluation, basée sur l'étude de scénarios d'évolution des stockages.

Il est à remarquer que cette méthodologie s'applique à l'évaluation de tous les types d'évolutions attendues, qu'elles soient naturelles ou causées par l'intervention humaine, ou intrinsèques au stockage.

Cette phase de réflexion était fondée sur des discussions entre les membres de ces commissions et de ce groupe de travail et avec les experts auditionnés. Les connaissances déjà acquises antérieurement ont eu un rôle déterminant dans l'établissement des scénarios à traiter, mais leur validation devra s'inscrire dans des programmes de recherche.

Ces travaux préliminaires ont trouvé un premier aboutissement dans la Règle Fondamentale de Sûreté n° III.2.f. [6], qui a défini :

" .. une situation de référence, correspondant à l'évolution prévisible du stockage au regard des événements certains ou très probables...

ainsi que :

... des situations hypothétiques correspondant à l'occurrence d'événements aléatoires /.../ qui se superposent à la situation de référence..."

Ces *événements aléatoires* peuvent être, soit des événements de même nature que ceux retenus dans la situation de référence, mais d'ampleur exceptionnelle, soit des événements très incertains quant à leur date d'occurrence et leur déroulement. Ils comportent les événements d'origine naturelle et ceux qui sont liés à l'activité humaine.

La démarche apparaît satisfaisante, mais, en l'état actuel des connaissances, elle doit s'appuyer largement sur des événements aléatoires dont il est difficile d'apprécier le degré de réalisme. Le hasard résultant d'une connaissance insuffisante du trop grand nombre de paramètres gouvernant les phénomènes en cause, le rôle de la géoprospective devient alors pour une part essentielle de réduire le champ des événements aléatoires pour les transférer dans les événements, sinon *certains ou très probables*, du moins prévisibles aux échelles de temps considérées, et d'autre part de définir des enveloppes raisonnables pour les événements dont l'ampleur n'est pas rigoureusement prédictible.

La RFS définit également les périodes de temps à considérer, qui sont :

*" ..une période "initiale" de 500 ans, correspondant à la conservation de la mémoire du stockage, permettant de rendre extrêmement peu probable l'intrusion humaine dans la zone du stockage. Elle correspond par ailleurs à une décroissance importante de l'activité des radionucléides à vie courte ou moyenne.
une période intermédiaire de 50 000 ans, caractérisée par l'absence de glaciation majeure,
une période postérieure à 50 000 ans dans laquelle on prendra en compte notamment l'occurrence de glaciations majeures. "*

Une borne intermédiaire, jugée nécessaire à la démonstration et placée à 10 000 ans, est fondée sur la recherche d'une assurance de stabilité relative du site tant que l'activité des déchets reste importante.

Dans le domaine de la géodynamique externe, la RFS demande, pour la dernière période, l'examen de deux événements particuliers : dans la *situation de référence*, est citée une glaciation du type Würm à 60 000 ans tandis qu'à la *situation hypothétique* figure une glaciation de type Riss ancien après 160 000 ans AP (after present), ce qui est *grosso modo* conforme aux prédictions de la théorie de Milankovitch, et aux travaux du Professeur Berger.

1. LES EVOLUTIONS PREVUES AU COURS DES DIFFERENTES PERIODES

PERIODE INITIALE.

Au cours de la période initiale, de 0 à 500 ans AP, aucun phénomène naturel n'est objet de scénario de géoprospective : seule l'évolution intrinsèque du stockage, c'est-à-dire la re-saturation en eau du milieu (où les écoulements auront été perturbés par un demi-siècle de pompage d'exhaure des ouvrages) et l'évolution thermique des déchets et ses conséquences mécaniques et hydrauliques sur le massif rocheux (et sur les autres barrières), devront explicitement être prises en compte.

En dehors de ces phénomènes liés au stockage lui-même, on n'attend pas d'évolution importante des conditions naturelles sur un site correctement choisi : seules paraissent possibles des modifications mineures du paysage, comme le changement local du cours d'une rivière, l'assèchement ou l'extension d'un lac, bien plus causés par l'activité humaine que par la dynamique terrestre (réchauffement par effet de serre et activité à caractère industriel, modification du mode d'occupation des sols). L'humanité pourrait finir d'exploiter les réserves connues et prévisibles de combustibles fossiles, et l'injection atmosphérique de gaz à effet de serre devrait avoir atteint son paroxysme à la fin de la période, mais cela ne devrait pas avoir d'effets directs sur le milieu profond.

Quant à l'intrusion humaine par inadvertance, elle est considérée comme très peu probable dans la mesure où l'on estime que la mémoire du stockage sera conservée au minimum pendant cette première période de quelques centaines d'années.

REGIME PERMANENT

Du seul point de vue géoprospectif, les seconde et troisième périodes, (de 500 à 10 000 puis 50 000 ans A.P.), n'en forment qu'une.

A l'intérieur même du volume rocheux, un régime permanent s'instaurera, tant du point de vue thermique qu'hydraulique, au début de la période.

En dehors du stockage, du point de vue aspect du paysage et plus encore en ce qui concerne l'activité humaine et l'occupation des sols, il devient difficile de rien affirmer. Les combustibles fossiles seront soit totalement consommés avant même le début de la période, soit abandonnés avant épuisement, au profit de modes de captage de l'énergie plus performants, encore à définir. Le système climatique pourra alors récupérer de l'effet de serre, soit grâce à l'absorption du gaz carbonique par l'océan, soit grâce à la dégradation chimique des autres gaz. Mais de toute façon l'inertie du système océan-atmosphère est telle que ce n'est que vers la fin de la période que se fera le retour aux processus normaux, antérieurs à la période industrielle : bien qu'il ne s'agisse pas d'un événement naturel au sens strict, les modalités en sont susceptibles de prédiction et de modélisation.

L'hypothèse couramment admise est que la protection des populations vis à vis des stockages de déchets radioactifs ne pourra pas reposer sur la connaissance que ces populations en auront, du fait que l'existence même du stockage aura été oubliée. Il faut supposer au contraire que l'intrusion humaine deviendra possible par perte de mémoire du stockage.

La borne supérieure de cette période est en fait choisie pour éviter le premier changement important prévu dans les paramètres externes, c'est-à-dire la prochaine glaciation vers 60 000 ans (date qui pourrait être repoussée par le réchauffement consécutif aux activités humaines).

PERIODE ULTERIEURE

Malgré toutes les incertitudes qui s'attachent à la dernière période, en particulier en ce qui concerne les développements futurs de l'homme et de la civilisation, l'évolution géodynamique externe demeure globalement déterminée par les positions relatives des océans et des continents sur le globe (dont nous connaissons seulement les vitesses d'évolution, qui sont très lentes), d'une part, et par les équations astronomiques de l'orbite terrestre, d'autre part. En conséquence, il faut s'attendre à la poursuite d'oscillations climatiques du même type que celles qui ont marqué le Quaternaire.

C'est pour cette raison que la RFS demande expressément l'examen de ces deux événements particuliers : *une glaciation de type Würm à 60 000 ans, et une glaciation de type Riss ancien après 160 000 ans.*

2. L'AMPLITUDE DES GLACIATIONS QUATERNAIRES

On bute dès l'abord sur la difficulté qu'il y a de différencier ces deux glaciations : en Europe du Nord, les différences reconnues entre *glaciation du type Würm* et *glaciation de type Riss ancien* (figure 1) portent sur l'avancée extrême de moraines, qui pour chacune de ces deux glaciations ne sont même pas simultanées, et sur un grand nombre d'indices morphologiques, mais sans données fermes sur les dates, les durées de stationnement, les épaisseurs de glace, *a fortiori* sur l'extension des zones périglaciaires ou les températures. La différence entre Riss et Würm demeure cartographique, et n'est en tout cas pas immédiatement quantifiable.

L'impossibilité de chiffrer à partir des données d'observation la distinction entre glaciation du Würm et glaciation du Riss ancien, et de définir par rapport à ces glaciations l'événement exceptionnel, a amené l'IPSN, en collaboration avec le LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE ET GEOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT du CNRS à Grenoble, à tenter de tourner la difficulté en traitant le problème inverse : est-il possible, à partir de l'extension géographique des glaciers, et à l'aide d'un modèle glaciologique approprié, de remonter aux paramètres physiques du climat, ou même, en majorant les

extensions géographiques anciennes réellement observées, de définir cette " glaciation exceptionnelle ", dont on suppose qu'elle serait pénalisante pour le stockage ?

Cette étude avait été entreprise pour les deux situations les plus plausibles dans le contexte français [7]. Dans les deux cas, les situations extrêmes sont classiquement attribuées à la glaciation du Riss (âge supérieur ou égal à 140 000 ans), mais ces attributions pourraient être révisées.

- En ce qui concerne les glaciers alpins, on sait qu'un glacier de piedmont s'est avancé des Alpes jusque dans la région lyonnaise, et qu'un lac de retenue s'est formé en amont du barrage glaciaire constitué en butée sur les Monts d'Or : à l'époque où ce programme avait été défini, il était justement question d'investigations, en vue d'implantation d'un laboratoire souterrain, sur un site au nord de cette région.

- On sait également que le territoire français n'a jamais été atteint par l'inlandsis fennoscandinave : en revanche, la calotte glaciaire nord-européenne s'est avancée jusqu'en Angleterre (bassin de Londres) et en Hollande. ; il était également question, à l'époque de la mise en place de ce programme, d'investigations géologiques sur un site au nord de la Champagne, somme toute un des points du territoire français les plus proches de l'avancée extrême de la calotte glaciaire. Une érosion exceptionnelle, de type *tunnel-valley*, pourrait y résulter d'une avancée elle-même exceptionnelle de la marge de la calotte glaciaire fennoscandinave jusqu'au nord du bassin parisien. Dans ce cas la question serait de déterminer si un affouillement profond pourrait modifier sérieusement les écoulements et compromettre la sûreté.

[Rappelons que les tunnel-valleys sont des sortes de vallées sous-glaciaires, profondément surcreusées, et maintenant emplies de matériaux meubles : ces surcreusements, que l'on connaît en Hollande, Allemagne du Nord et Danemark, où on les attribue au Riss, se sont faits, semble-t-il, par écoulement d'eaux mises sous pression, juste sous la marge de la calotte glaciaire : c'est bien l'eau liquide qui constitue l'agent érosif, mais sous la marge d'une calotte glaciaire, et la notion de niveau de base ne s'y applique pas.]

LE MODELE DE GLACIER DE PIEDMONT

Un modèle de glacier de piedmont devait donc permettre de cerner les conditions d'avancée d'un glacier jusqu'à Lyon, avec formation d'un lac de retenue en amont du barrage glaciaire constitué en butée sur les Monts d'Or.

Les étapes nécessaires concernaient :

- l'établissement d'une relation entre les bilans de masse et les données climatiques pour la période actuelle, l'estimation de ces bilans de masse et de leurs fluctuations ainsi que celles de l'altitude de la ligne d'équilibre lors du dernier maximum glaciaire et au cours de la dernière glaciation [8] ;

- la réalisation d'un programme hypsographique des bassins versant des vallées alpines majeures : l'Arve à l'amont de Bonneville, l'Isère à l'amont d'Albertville, l'Arc à l'amont d'Aiguebelle, la Romanche à l'amont de Vizille [9].

Le développement de ce modèle s'est avéré beaucoup plus long et difficile que prévu, et si la plupart des difficultés rencontrées semblaient devoir trouver une solution, force est de reconnaître que la réalisation complète du modèle était encore assez éloignée lorsque cette action a été interrompue, et que l'on ne peut donc en tirer aucun enseignement général.

LE MODELE DE CALOTTE GLACIAIRE

Un modèle glaciologique d'inlandsis devait être appliqué à la solution du problème de l'extension maximale de la Fennoscandie. Le modèle employé par le LGGE est basé sur la conservation de la masse, et simule l'évolution d'un inlandsis en fonction du bilan de surface (précipitation et fonte) et de l'écoulement de la glace. L'enfoncement du lit rocheux sous l'influence du poids de la glace (isostasie) est également pris en compte. Un tel modèle est théoriquement utilisable pour n'importe quel inlandsis, sous réserve d'adapter les conditions aux limites sur les bords du domaine considéré.

Pour les premières expériences effectuées avec ce modèle, le bilan de surface était paramétré en fonction de la latitude, de l'altitude de la surface et de la distance à la mer. Les coefficients étaient déduits des données actuelles sur les glaciers de Scandinavie, des Alpes et du Spitzberg. Le résultat fut une croissance incontrôlée de l'inlandsis, ne s'arrêtant... qu'à la Méditerranée. Cette croissance excessive résultait d'une mauvaise prise en compte de l'effet continental (trop forte accumulation en altitude), et de précipitations trop importantes aux très basses températures [10].

Après une première reprise de la paramétrisation du bilan, imposant une accumulation beaucoup moins élevée, la croissance de la calotte glaciaire était plus vraisemblable, mais insuffisante vers l'ouest : les îles Britanniques n'étaient jamais englacées. A ce stade de développement du modèle, la calotte s'accroissait facilement dès que l'on diminuait la température, c'est-à-dire l'altitude de la ligne d'équilibre, ce qui correspond à une augmentation de l'accumulation et à une diminution de l'ablation. Or, si en réalité une baisse de température correspond bien à une diminution de l'ablation, en ce qui concerne l'accumulation cela correspond plutôt à une diminution, toutes autres choses égales. Une baisse de température ne conduit pas systématiquement à une glaciation, ni inversement une hausse de température à une déglaciation.

Un troisième modèle de bilan, reproduisant plus fidèlement la dépendance accumulation-température a donc été utilisé : pour cela, un modèle d'accumulation faisant le bilan de l'humidité de la colonne atmosphérique a été couplé avec un modèle d'ablation basé sur le calcul des degrés-jours positifs, ce

qui produit une nette amélioration par rapport à la paramétrisation du bilan : cela permet de prendre en compte l'effet de désertification (diminution des précipitations) des zones de haute altitude de la calotte, et conduit à une calotte dont la croissance n'est plus démesurée. La concentration des précipitations sur la façade ouest des reliefs exposés aux vents dominants (chaînes de montagne ou calotte glaciaire) est également bien reproduite, ce qui permet l'englacement des îles britanniques (figure 2, et réf.11).

Les résultats obtenus montrent qu'il est difficile d'avoir une calotte atteignant les dimensions du dernier maximum glaciaire (figure 3). La difficulté réside dans l'obtention des précipitations pour alimenter la calotte. Même en gardant un océan relativement chaud, et en réduisant l'écart saisonnier dans des limites vraisemblables pour une période glaciaire, la calotte reste cependant en deçà de l'extension attendue.

Plusieurs améliorations immédiates étaient envisagées lorsqu'il nous a fallu suspendre cette action :

- introduction de températures de la surface de la mer : cette température a une influence importante sur les précipitations.
- test du modèle d'accumulation sur le Groenland, ce qui permettrait de comparer les résultats du modèle avec les précipitations d'une calotte actuellement existante.
- utilisation d'une grille plus fine, qui permettrait une meilleure prise en compte du relief ; le temps de calcul sur le mini-ordinateur du LGGE deviendrait rédhibitoire (diviser la maille par deux revient à multiplier le temps de calcul par 16) et il aurait fallu envisager l'utilisation d'un Cray 2.

Au delà, et en fonction des résultats obtenus avec une grille plus fine, d'autres améliorations pouvaient encore porter sur :

- la simulation de la température de surface, grâce à un modèle radiatif simple (à une dimension verticale) qui prenne en compte l'albédo de la surface et l'insolation, dont la description physique dans le modèle précédent est très grossière. Ce calcul serait effectué tout au long de l'année afin de tenir compte des effets saisonniers.
- l'impact de la réaction isostatique, qu'il peut être intéressant de bien modéliser dans le cas d'un site en bordure de calotte glaciaire, en considérant une lithosphère élastique posée sur une asthénosphère visqueuse.

LES LEÇONS D'UN ECHEC RELATIF

Doit-on conclure à l'échec de cette tentative d'évaluation par modélisation de la différence entre glaciation de type Würm et de type Riss ancien ? Pas entièrement : ces deux modèles auraient probablement abouti, si le développement n'en avait pas été abandonné parce que les questions posées n'apparaissaient plus pertinentes, ou en tout cas moins urgentes que précédemment.

Les difficultés rencontrées dans l'élaboration du modèle de glaciers alpins et du glacier de piedmont ne résultaient pas d'erreurs méthodologiques, mais seulement de ce que le sujet était totalement neuf pour le LGGE, et qu'une bonne solution du problème posé demande un traitement très détaillé. C'est même là l'enseignement principal de cette action : si dans quelques cas les modèles nécessaires à l'évaluation, au moins préliminaire, de l'incidence de certains phénomènes sur la sûreté du stockage sont assez facilement disponibles, sur d'autres sujets, même au simple niveau du modèle descriptif, avant toute notion d'incidence sur la sûreté, un gros effort reste à faire.

Le modèle de calotte glaciaire a permis d'identifier le problème critique inhérent à l'idée même de glaciation exceptionnelle, qui est d'assurer des précipitations suffisantes à la calotte glaciaire en cours d'expansion : *une baisse de température correspond bien à une diminution de l'ablation, mais également à une diminution de l'accumulation, avec pour résultat qu'elle ne conduit pas systématiquement à une glaciation, ni inversement une hausse de température à une déglaciation.* Il faudrait donc, mais il ne s'agit là que de spéculations qualitatives, supposer, lors d'une glaciation exceptionnelle, des étés frais (pour diminuer l'ablation) et des hivers tièdes, avec incursions de perturbations océaniques, c'est-à-dire avec un océan chaud (toujours par rapport au climat glaciaire ordinaire type Würm). Nous n'avons pas d'analogues de tels climats pour nous aider à traiter le problème !

LES BESOINS DE L'EVALUATION DE SURETE

Par contre, les résultats obtenus obligent à s'interroger sur l'utilité réelle qu'il peut y avoir à distinguer entre glaciation type Würm et glaciation type Riss.

De l'examen des données anciennes, il découle que l'érosion glaciaire n'a jamais concerné nos latitudes (à l'exception des glaciers de montagne). Les difficultés rencontrées dans la mise au point du modèle glaciologique d'inlandsis, même pour lui faire reproduire l'extension de la calotte fennoscandinave au Würm, et à plus forte raison la difficulté à rendre compte d'un climat permettant l'alimentation hydrique d'une calotte glaciaire d'extension exceptionnelle, ne font que renforcer notre confiance dans l'improbabilité d'une telle situation.

Du point de vue de l'évaluation de sûreté, l'élément déterminant ne sera donc pas l'extension maximale de l'une ou l'autre glaciation, mais bien la prise en compte de leur caractère répétitif : en l'absence de borne supérieure à la durée de l'analyse de sûreté, ou si cette borne est déterminée *a posteriori* par l'inventaire des déchets et leur décroissance, il faut considérer comme une évolution normale, la répétition de cycles glaciaires- interglaciaires tous les 100 000 à 110 000 ans, et ce probablement sur plusieurs centaines de milliers d'années.

Dès lors, ce ne sont pas seulement l'influence sur les écoulements en profondeur d'une grande épaisseur du pergélisol ni celle d'un abaissement exceptionnellement prononcé du niveau des mers qui s'avéreront critiques, mais également le risque de diminution du recouvrement initial, par suite d'une érosion soit brutale, par suite d'un événement catastrophique, soit lente mais cumulée à chaque cycle climatique. Différents phénomènes naturels, externes et internes, pourront se combiner, en particulier de possibles mouvements verticaux, conditionnant la poursuite de l'érosion.

Dans les deux cas, la question demeure de déterminer si l'affouillement pourrait modifier sérieusement les écoulements et accélérer le retour de radionucléides vers la surface, affectant ainsi l'impact radiologique à long terme du stockage.

CONCLUSIONS

Les développements qui précèdent montrent qu'il nous reste beaucoup à faire :

- pour que les problèmes posés soient pertinents, et se fondent sur des distinctions objectives,
- pour qu'une fois bien posées dans le cadre de la géoprospective, les questions reçoivent des réponses quantitatives suffisantes pour étayer une évaluation de sûreté.

Dans de nombreux cas la modélisation de chacun des phénomènes est bien avancée, et les interactions entre ces différents phénomènes sont généralement bien comprises. Il apparaît illusoire de rechercher le couplage de tous les différents modèles phénoménologiques. Certains couplages partiels seront pourtant peut-être utiles, mais restent à définir en fonction des sites à évaluer.

Une part significative des efforts devra désormais porter sur les moyens de prise en compte des phénomènes reconnus comme potentiellement pénalisants pour l'intégrité d'un site de stockage, moyens qui sont encore assez mal définis, parce que nous n'avons pas toujours suffisamment de spécialistes ou d'équipes susceptibles de traiter certains problèmes.

Il ne semble pas facile d'obtenir un modèle déterministe de l'altération et de l'érosion : les modèles actuels fonctionnant par présence ou absence de ces phénomènes appliquent des vitesses moyennes reposant sur des mesures, voire des estimations, effectuées dans des conditions diverses et souvent imprécises.

Supposer systématiquement que, dans nos régions, l'altération des roches est toujours un héritage datant de temps très anciens n'est pas très réaliste : en climat périglaciaire en particulier, on peut penser que l'installation d'un pergélisol doit pouvoir entraîner une altération rapide et profonde, dont les

conséquences lors d'un dégel seraient difficiles à apprécier.

Sous nos latitudes, les eaux courantes sont l'agent principal d'érosion, et si le processus est lent lorsque les cours d'eau sont proches de leur profil d'équilibre, il est susceptible de fortes réactivations lorsqu'il y a abaissement de leur niveau de base, que la raison en soit climatique ou tectonique. Les surcreusements messiniens montrent qu'il est impossible d'assigner une borne supérieure à la vitesse de l'érosion linéaire au creux d'un thalweg : or on peut précisément penser que ce sont ces valeurs maximales d'érosion, au creux des thalwegs, qui pourraient avoir le plus d'influence sur la sûreté d'un stockage. Les valeurs moyennes mesurées sur les interfluves, qui sont précisément celles dont les modèles de première génération font usage, n'ont probablement pas de sens du point de vue de la sûreté, puisque ce ne sont pas elles qui détermineront les exutoires des écoulements à travers un stockage.

En fait, nous sommes toujours à la recherche d'une théorie unitaire et synthétique des relations entre le climat et les phénomènes d'altération et d'érosion : or on ne modélise que ce dont on comprend bien le déroulement physique. Il y aurait dans l'établissement d'une relation mathématique entre conditions climatiques et vitesse d'érosion un sujet de recherche quasi-fondamentale : si la question posée pouvait trouver une solution satisfaisante, l'effort consenti et les succès remportés dans le domaine de la modélisation climatique en seraient nettement valorisés par une application plus directe qu'actuellement aux problèmes de sûreté.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- [1] MASURE Ph., P. Godefroy & C. Imauven, (1983) : Les analyses de sûreté du confinement géologique des déchets radioactifs à vie longue. Revue critique des méthodes existantes et proposition d'approche prospective. EUR-8587, Eurooffice.
- [2] COURBOULEIX S. *et al.*, (1985) : Etude géoprospective d'un site de stockage. EUR-9866, (9 volumes), Eurooffice.
- [3] AFZALI H. *et al.*, (1989) : Géoprospective : développement de la modélisation. EUR-12503, (4 volumes), Eurooffice.
- [4] Ministère de la Recherche et de l'Industrie (1982-84) : Conseil Supérieur de la Sûreté Nucléaire : Rapport du groupe de travail sur la gestion des combustibles irradiés, déc. 1981- nov. 1982 ; Rapport du groupe de travail sur les recherches et développements en matière de gestion des déchets radioactifs, oct. 1983- oct. 1984.
- [5] Ministère de l'Industrie, des P. et T. et du Tourisme (1987) : Stockage des Déchets Radioactifs en Formations Géologiques Profondes, critères techniques de choix de sites. Rapport du groupe de travail présidé par le Professeur Goguel, juin 1985- mai 1987.
- [6] Ministère de l'Industrie et du Commerce Extérieur (1991), Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires, Règle Fondamentale de Sûreté : Règle n° III.2.f., Tome III, Chapitre II. 10 juin 1991.
- [7] BLANC P.-L., P. Escalier des Orres & J.-P. Vervialle (1991) : International approaches to studies of climate change and radioactive waste disposal : the French approach. *in* International workshop on future climate change and radioactive waste disposal, Norwich, 1-3 nov. 1989. Edit. by Univ. of East Anglia.
- [8] VALLON M. & J.-P. BENOIST (1990) : Modélisation de l'évolution des glaciers alpins : I - Estimation des bilans de masse, II - Reconstitution géométrique des glaciers de vallée. Contrat CEA-CNRS/LGGE N° BC 4514, rapport oct. 1990.
- [9] Anonyme (1993) : Evolution du glacier de piémont sur la Bresse dans des conditions climatiques sévères. Contrat CEA-CNRS/LGGE N° BC 5538, rapport d'arrêt au 1-10-1992.
- [10] LETREGUILLY A. & C. RITZ (1992) : Modélisation de la calotte fennoscandienne : Contrat CEA-CNRS/LGGE N° BC 4514, rapport avril 1992.
- [11] LETREGUILLY A. & C. RITZ (1993) : Modélisation de la calotte fennoscandienne : Contrat CEA-CNRS/LGGE N° BC 5538, rapport d'arrêt, septembre 1992.

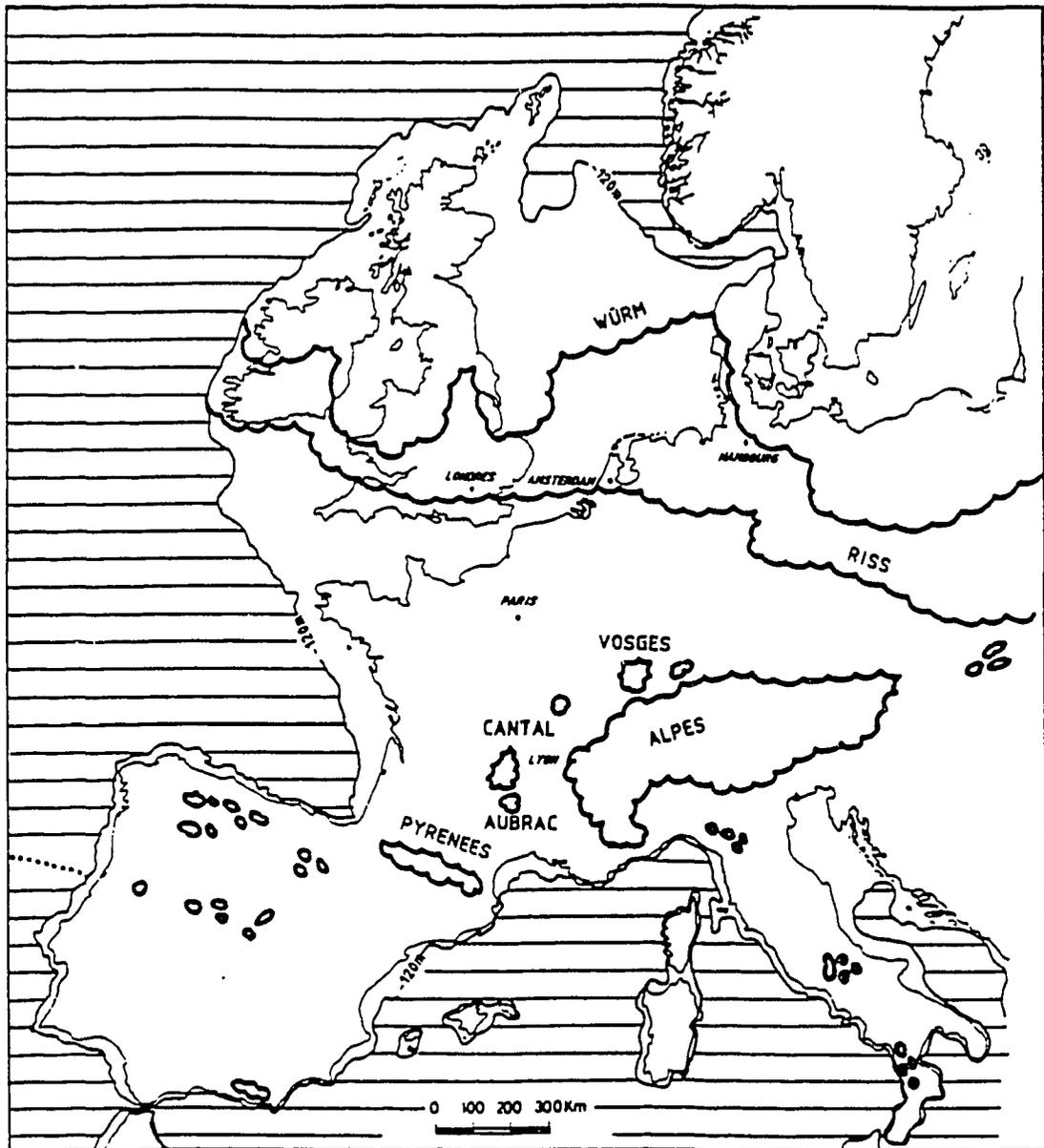


Figure 1 : CONTOURS DE L'EUROPE EN PERIODE GLACIAIRE

avec : Limites des glaces au Riss (maximum) voici 200 000 ans ;

Limites des glaces au Würm, voici 18 000 ans ;

Retrait des mers à -120 m.

(*extrait de S. Courbouleix, BRGM 87 SGN 739 GEO*).

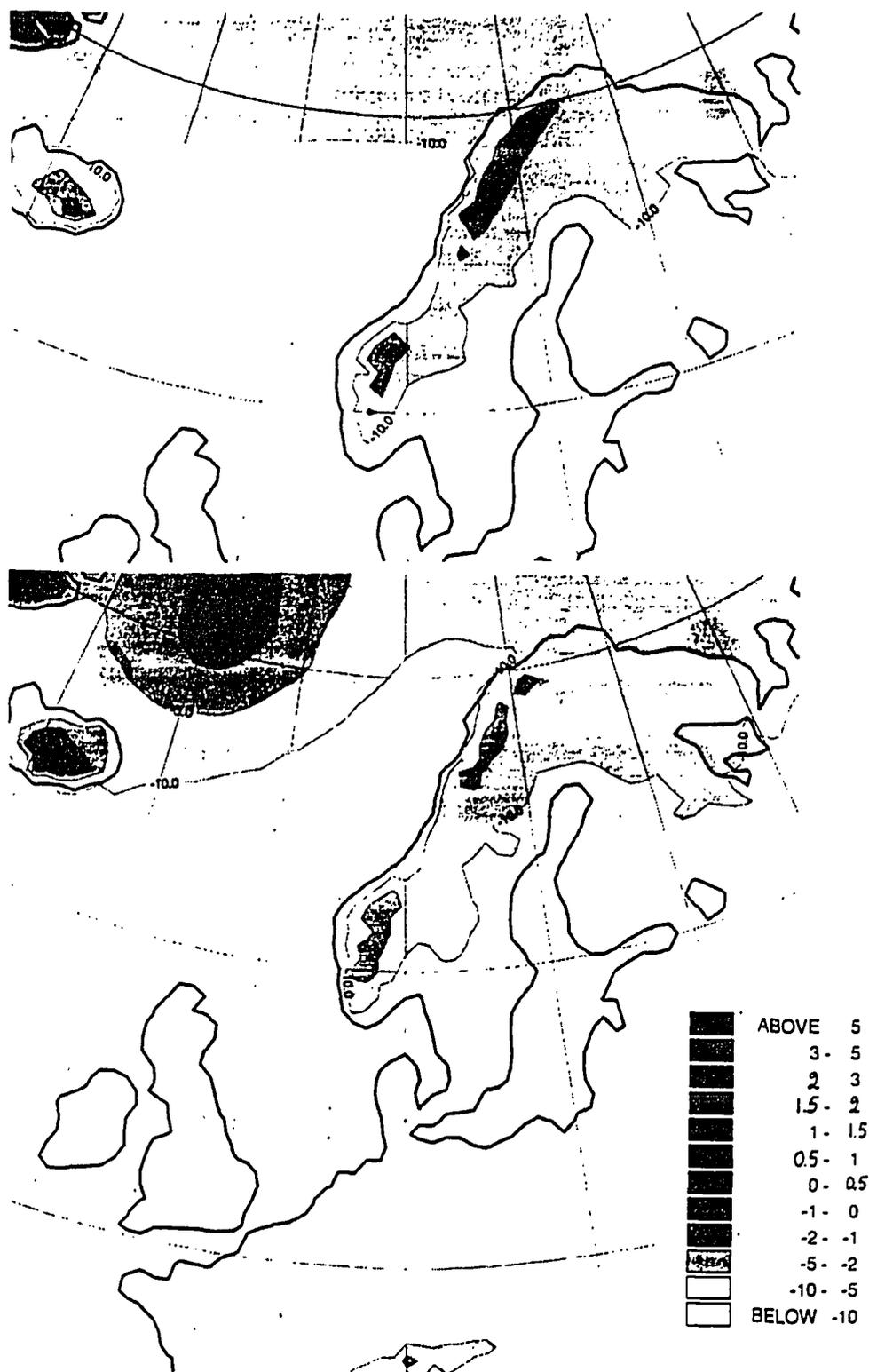


Figure 2 : COMPARAISON DES BILANS DE MASSE OBTENUS :
 haut.- avec la paramétrisation basée sur les mesures du glacier Nigardsbreen,
 bas.- avec les modèles d'accumulation et d'ablation pour l'Europe du Nord
 (troisième modèle de bilan de masse, climat présent). (Extrait de réf. 11).

*Les Planches 2 et 3 sont remises
 en couleurs à réception des données.*

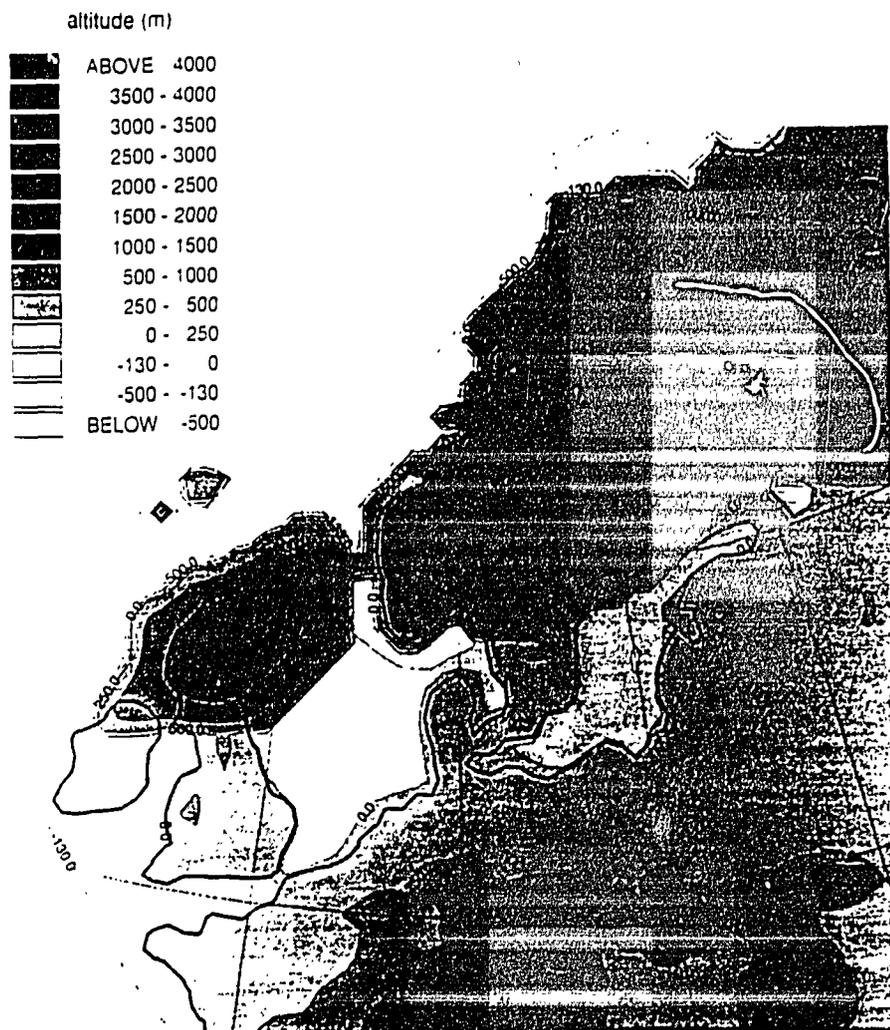


Figure 3 : TOPOGRAPHIE DE L'EUROPE DU NORD OBTENUE AVEC LE TROISIEME MODELE DE BILAN DE MASSE, MONTRANT LE DEVELOPPEMENT DE LA CALOTTE FENNOSCANDIENNE A 50 000 ANS.

Variation de la température moyenne annuelle continentale $\Delta T_m = -10^\circ\text{C}$,
 Variation de la température de juillet $\Delta T_j = -13^\circ\text{C}$,
 Variation de température moyenne annuelle à la surface de l'océan $\Delta T_s = -2^\circ\text{C}$,
 Niveau des mers SEA = -130 m.
 (Extrait de réf. 11).

Les Pl. 2 et 3 seront remises en couleur à réception des clichés