

Chapitre 1 : Implications de la recherche sur les normes de la dose, l'évaluation de la performance des scénarios et les facteurs externes ¹

Arjun Makhijani

Conclusions principales

Le choix par l'ANDRA du groupe critique pour son évaluation de la performance du site qui maintiendrait la dose en dessous de 0,25 mSV/an n'est pas l'option nécessairement la plus conservatrice.

Le choix par l'ANDRA de l'exutoire Marne-Rognon comme point d'évaluation de la performance n'est pas nécessairement conservateur. Le choix d'un puits utilisé par une famille d'agriculteurs en autarcie, situé entre l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon, pourrait s'avérer un choix plus prudent. Malgré l'affirmation par l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile que son évaluation de performance préliminaire s'appuie sur des hypothèses conservatrices, il apparaît des éléments non conservateurs dans l'évaluation de performance préliminaire de l'ANDRA. Par exemple, la production de gaz n'est pas intégrée. En outre, les calculs d'évaluation préliminaires de l'ANDRA effectués à des fins de démonstration de la méthodologie font apparaître l'éventualité d'une dépendance excessive de la performance par rapport à un élément unique, les scellements. S'il s'avère nécessaire d'ajouter des éléments au système de confinement, comme des conteneurs de déchets plus durables, ceci pourrait considérablement alourdir le programme de recherche.

L'ANDRA a réalisé une recherche utile des ressources géothermiques dans la zone du site Meuse/Haute-Marne et l'a ajoutée aux bases de données existantes. L'ANDRA n'a pas encore élaboré de programme de recherche destiné à réduire simultanément le risque d'une intrusion humaine accidentelle et celui de l'intrusion humaine délibérée. Ce problème n'est bien sûr pas propre à l'ANDRA. Il représente un aspect particulièrement difficile du confinement géologique. Il s'agit néanmoins d'une question qui doit être traitée.

L'ANDRA a participé à un programme de recherche, reflétant l'état des connaissances, sur le développement de méthodes d'évaluation de l'impact du changement climatique sur le confinement géologique (BIOCLIM). Malgré l'intégration des dernières connaissances en ce domaine, les travaux sont loin d'être parvenu à un point où des estimations régionales fiables peuvent être faites pour être utilisées pour une évaluation de performance et donc pour les implications des changements climatiques sur le programme de recherche, le modèle conceptuel et l'étude conceptuelle du système de confinement géologique sur le site de Meuse/Haute-Marne. Ce problème n'est bien sûr

¹ Certaines questions, initialement proposées pour le chapitre 1, notamment les principes globaux d'une recherche sur un site de stockage, sont maintenant traitées dans la préface.

pas propre à l'ANDRA. Toutefois, l'emplacement du site renforce l'importance d'une étude des effets des changements brutaux de la circulation thermohaline sur l'évaluation de la performance, le modèle conceptuel et l'étude conceptuelle. De nombreuses recherches sur le climat seront nécessaires avant qu'une approche fiable puisse être élaborée pour une application réelle à l'évaluation du site.

Recommandations principales

1. Hypothèse concernant l'emplacement du prélèvement de l'eau L'ANDRA devrait orienter ses recherches de manière à être capable de procéder à une évaluation de performance à partir des eaux souterraines prélevées entre la limite de l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon.

2. Clarification du scénario du fermier vivant en autarcie ANDRA devrait adopter le scénario du fermier vivant en autarcie et clarifier son intention d'utiliser une famille d'agriculteurs vivant en autarcie, y compris femme et enfants, pour ses évaluations de performances relatives à la limite de dose de 0,25 mSv. Si un autre scénario s'avérait plus conservateur du point de vue du respect des critères de dose, il peut être adopté, en prenant toutefois la précaution que des femmes et des enfants figurent dans le groupe critique.

3. Redondance Il existe des éléments non conservateurs dans l'évaluation préliminaire de performance de l'ANDRA. Les doses élevées estimées en cas de défaillance des scellements et de haut gradient hydraulique soulignent la nécessité pour l'ANDRA d'envisager des modèles conceptuels alternatifs et éventuellement d'inclure des conteneurs de déchets qui sont beaucoup plus durables que ceux actuellement prévus. Plus précisément, il serait souhaitable qu'un programme de recherche analyse la façon dont la fiabilité des évaluations de dose serait affectée si les conteneurs choisis étaient comparables à ceux du programme suédois (un million d'années) et le type de programme de recherche sur les colis de déchets qui devrait être mis en œuvre si l'option suédoise apparaissait souhaitable ou nécessaire. La recherche sur la façon dont les colis de déchets pourraient réduire l'impact des incertitudes d'importants changements climatiques sur la performance serait aussi souhaitable.

4. Recherches sur les ressources géothermiques L'ANDRA devrait effectuer des recherches plus intenses pour définir les ressources géothermiques pour pouvoir arriver à des conclusions plus définitives sur le potentiel de son utilisation dans la région et ses implications en termes d'intrusion humaine.

5. Marquages L'ANDRA devrait étudier la question des marquages et le conflit qu'ils pourraient éventuellement susciter entre intrusion humaine accidentelle et intrusion humaine délibérée. Cette étude devrait présenter une étude détaillée des alternatives aux marquages de surface.

6. Taille de l'emprise du stockage L'ANDRA devrait traiter les questions relatives à la taille de l'emprise du stockage. Elle devrait étudier l'adéquation du concept de stockage qu'elle prévoit à la fois dans le contexte du scénario de base et dans un contexte de risque d'intrusion humaine délibérée. Etant donné que l'exploration de surface des minéraux est déjà bien avancée, l'ANDRA devrait procéder à des recherches pour comparer les avantages et les inconvénients respectifs d'une vaste emprise horizontale, qui permettrait d'atteindre des températures plus faibles et d'une emprise plus restreinte qui pourrait réduire le risque d'intrusion humaine (à la fois accidentelle et volontaire, mais pas obligatoirement pour l'intrusion volontaire si l'intensité des anomalies thermiques et géomagnétiques est augmentée).

7. Recherches paléo-climatiques Nous recommandons que l'ANDRA complète sa recherche paléo-climatique au sein de BIOCLIM par un programme de recherche paléo-environnemental (portant sur la paléo-climatologie et la paléo-hydrologie) effectué à partir de spéléothèmes provenant de la région est du Bassin parisien, avec les méthodes les plus récentes.

8. Recherches sur le changement climatique spécifiques au site Dans la publication de la prochaine étape de son programme sur le changement climatique en 2005, l'ANDRA devrait intégrer un plan de recherches détaillé qui préciserait comment le travail effectué au sein de BIOCLIM sera développé pour fournir des estimations de paramètres climatiques spécifiques à la région et qui seront suffisamment fiables pour permettre une évaluation de performance avec des incertitudes évaluées sur une période allant jusqu'à 10 000 ans et avec des paramètres dont le caractère conservateur est démontré pour la période ultérieure. Un besoin de recherche tout particulier est nécessaire pour l'élaboration de l'impact régional des changements de la CTH induits par des phénomènes naturels et anthropiques.

1.1 Introduction

La gestion des déchets radioactifs à haute activité contenant des radionucléides à vie longue (les déchets de classe B et de classe C au sens de la réglementation française et le combustible usé) représente un immense défi à la fois conceptuel, scientifique, technique et social. Pour ce qui est de l'enfouissement en couche géologique profonde (« stockage » ou « stockage définitif »), il s'agit de la méthode de gestion à long terme la plus étudiée dans de nombreux pays. Les recherches lancées répondent à l'Axe 2 de la loi française de 1991 sur les déchets nucléaires.

Le concept de base consiste à mettre les déchets à haute activité et à vie longue et le combustible usé dans des conteneurs entourés par d'autres barrières ouvragées et les stocker en site géologique profond. L'ensemble formé par les colis de déchets, les barrières ouvragées et la roche géologique hôte est généralement qualifié de « système de confinement géologique » pour souligner le fait que les divers éléments du système doivent intervenir ensemble pour assurer l'objectif d'isoler les matériaux radioactifs de la biosphère. Nous avons déjà examiné dans la Préface le rôle de la recherche sur le

confinement géologique (et donc de son évaluation) dans ce dispositif global, de façon à offrir un contexte à la totalité du rapport, notamment pour ce chapitre.

L'objectif scientifique du programme de recherche et d'évaluation de la performance doit être capable d'aboutir à un jugement fiable sur la performance attendue du système. Il est nécessairement lié à des normes et des recommandations en matière de santé et d'environnement. Le principal critère pour l'évaluation du programme de recherche de l'ANDRA porte sur sa capacité à remplir cet objectif. Ainsi que nous l'avons évoqué dans la préface, ceci se fait dans le respect de l'objectif de la Règle III.2.f. L'évaluation technique détaillée des différents aspects du programme de recherche de l'ANDRA sont abordés dans les chapitres qui suivent. Les rapports spécifiques entre ce programme de recherche et les lignes directrices de la Règle III.2.f sont traités dans ces chapitres.

La première exigence en matière de caractérisation d'un site demande que la recherche soit suffisamment exhaustive pour pouvoir émettre des jugements raisonnablement sûrs sur l'impact du site de stockage sur la santé et l'environnement. La dose maximale pour l'évaluation de la performance est de 0,25 mSv par an pour une exposition prolongée, en préconisant par ailleurs que les doses soient maintenues, autant que raisonnablement possible, à un niveau inférieur à cette limite. Ces limites de doses doivent être obtenues dans l'hypothèse d'une absence de tout contrôle institutionnel. Par conséquent, il est essentiel que la caractérisation du site soit suffisamment rigoureuse pour maintenir les incertitudes à un faible niveau sur de très longues périodes de temps. Pour l'évaluation des incertitudes dans ce chapitre nous utiliserons la sélection de l'évaluation de performance faite par l'ANDRA dans le Dossier 2001 Argile.

La caractérisation du site même ne doit laisser la place qu'à de faibles incertitudes, notamment si certains résultats obtenus de l'évaluation de la performance indiquent que la limite de dose pourrait être dépassée. Ceci signifie, par exemple, que l'historique géologique, sismique et géochimique du site doit pouvoir être déterminée avec un degré de confiance acceptable par rapport aux normes de sûreté.

L'ampleur des incertitudes dans les estimations de doses sur de très longues périodes de temps dépend avant tout des incertitudes liées aux paramètres géologiques, aux aspects se rapportant aux barrières ouvragées, au climat et à une potentielle intrusion humaine. Ces facteurs, abordés dans la préface, sont reliés entre eux. Dans ce chapitre nous traiterons des questions sur:

- Les implications pour la recherche d'incertitudes se rapportant au respect de la norme de 0,25 mSv/an.
- La recherche sur les facteurs externes « déclenchants » pouvant affecter significativement l'évaluation de la performance.

Les facteurs externes « déclenchants » que nous considérons sont l'intrusion humaine et le changement climatique. Ces facteurs pourraient bien être les plus imprévisibles. Il est impératif de bien les comprendre puisqu'ils servent à définir le cadre d'une recherche rigoureuse pour les divers aspects du confinement géologique comme par exemple les

choix des colis de déchets. Par exemple, la limite annuelle de dose pour le public, provenant de toutes les sources radioactives artificielles (autres que les sources médicales) est de 1 mSv. La dose limite pour le site de stockage représente le quart de celle-ci. La caractérisation des paramètres géologiques doit donc être de nature à maintenir les incertitudes largement au-dessous d'un facteur 4. Cette marge est d'autant plus réduite que les incertitudes liées au changement de climat sont grandes. La réduction des incertitudes des effets du changement climatique sur la performance pourrait conduire à des changements dans le modèle conceptuel et par conséquent dans le programme de recherche, par exemple pour ce qui concerne les colis de déchets.

1.2 Aspects relatifs à la sûreté, à la santé et à l'environnement

La réglementation établissant les objectifs à retenir dans les phases de conception et création d'un site d'enfouissement en formation géologique profonde pour les déchets radioactifs à haute activité a été adoptée le 30 juin 1991 (Règle N° III.2.f).² Les principales caractéristiques qu'elle prévoit pour un programme de recherche sur le système de confinement et l'évaluation de sa performance sont les suivantes :

- Il est nécessaire de procéder à une évaluation claire et précise de l'évolution dans le temps de la performance des barrières ouvragées, basée sur les modèles hydrogéologiques et le transport des radionucléides dans l'environnement souterrain.
- La caractérisation doit démontrer la stabilité de la barrière géologique (en fonction d'un critère de dose effective individuelle maximale de 0,25 mSv/an³) pendant au moins 10 000 ans "notamment sur la base d'études d'incertitudes *explicites*." (C'est nous qui soulignons)
- Au-delà de 10 000 ans, la limite de dose est maintenue. Par conséquent, le principe selon lequel le pic de dose ne doit pas dépasser la limite de dose (0,25 mSv/an) est implicitement maintenu. L'obligation d'une spécification quantitative des incertitudes est abandonnée pour la période au-delà de 10 000 ans et remplacée par une obligation d'estimation majorante de dose.
- L'occurrence des événements naturels qui pourraient perturber le site d'enfouissement doit être prise en compte sur la base d'une estimation pour une période de 100 000 ans, et au-delà, sur une base aléatoire.
- L'intrusion humaine accidentelle doit être prise en compte et prévenue grâce à la mémoire institutionnelle pendant au moins 500 années. Au-delà, ses conséquences pour différents scénarios, notamment pour les ressources en eau, doivent être étudiées.
- Les mesures de prévention contre l'intrusion humaine pour accéder aux ressources géothermiques ne sont pas prises en considération « parce que les

² La Règle ne mentionne pas spécifiquement le combustible utilisé. Dans ce rapport, nous supposons qu'elle peut être interprétée comme couvrant cette situation. L'ANDRA a inclus le combustible utilisé dans son évaluation préliminaire de performance.

³ Bien que la Règle parle d'équivalent de dose, il semble clair à partir du contexte qu'il s'agit de la dose efficace.

sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue. » (Annexe 2, paragraphe 3.1.5 de la Règle III.2.f)

- L'intrusion humaine (malveillante) délibérée n'est pas abordée en détail dans la Règle III.2.f, bien qu'il en soit fait brièvement mention dans le rapport numéro 6 de la Commission nationale d'évaluation (CNE).
- Le changement climatique doit être pris en considération dans les évaluations de la performance.

La Règle III.2.f constitue un guide pour la caractérisation plutôt que pour la procédure d'autorisation, et ne peut donc être directement comparée aux critères de dose réglementaires. Toutefois, la norme de 0,25 mSv par an qui y est spécifiée est plus ou moins comparable aux normes actuelles de radioprotection dans d'autres pays. Par exemple, la norme américaine d'exposition aux rayonnements est plus stricte (0,15 mSv par an) mais la durée est limitée à 10 000 ans. La limite de durée a toutefois été considérée comme nulle par une cour fédérale.⁴ Comme nous le notions plus haut, la Règle III.2.f n'indique pas de limite de durée dans sa recommandation de dose et est donc plus stricte de ce point de vue. La norme américaine contient également une disposition exigeant le respect de la réglementation sur l'eau potable (Safe Drinking Water regulations) à l'extérieur de la zone actuellement sous contrôle du gouvernement fédéral. La Règle III.2.f ne comporte pas de règle comparable. En Suisse, la limite de dose est de 0,1 mSv par an. La limite allemande est de 0,3 mSv par an.⁵ Les aspects particuliers des programmes de recherche nécessaires pour déterminer si les normes peuvent être respectées seront, bien sûr, différents pour chaque site, mais les principaux domaines de recherche, notamment ceux qui servent à réduire les incertitudes sur les estimations qui portent de longues périodes de temps, sont généralement les mêmes.

1.3 Relations entre recherche et respect des limites de dose

Un programme de recherche sur un site de stockage géologique doit être conçu de façon à pouvoir juger, de manière scientifique et crédible, si le système de confinement sera conforme à la limite fondamentale pour la dose⁶ de rayonnement. Ces jugements comporteront des conclusions relatives aux incertitudes sur les estimations de dose ou bien apporteront la démonstration que les paramètres choisis sont pessimistes et par conséquent conduisent à des estimations de dose majorantes.

Selon la Règle III.2.f., les estimations de dose pour des périodes inférieures à 10 000 ans doivent comporter une évaluation quantitative des incertitudes. Pour la période au-delà de 10 000 ans, des estimations conservatrices (« estimations quantifiées majorantes »⁷)

⁴ US Court 2004. L'Académie nationale des sciences américaine recommande que la réglementation soit basée sur le pic de la dose. NAS-NRC 1995

⁵ Il faut noter qu'il s'agit de valeurs limites ou cibles pour une installation distincte. Il est donc préférable dans ce cas de les définir comme des contraintes plutôt que comme des limites.

⁶ Ici « dose » signifie « dose efficace annuelle », sauf indication contraire.

⁷ Règle N° III.2.f, para 3.2.1

doivent être réalisées pour tenir compte de l'augmentation des incertitudes dans l'évolution des barrières ouvragées et de la géologie. La section 3.1 de la Règle III.2.f indique également que les doses doivent être maintenues à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (principe ALARA) à la fois en période d'exploitation et après la fermeture. Le principe ALARA doit être pris en considération dans l'estimation de tous les aspects de la performance du site de stockage.

L'ANDRA utilisera les données recueillies sur le site ainsi que d'autres informations pour alimenter les modèles qui serviront à estimer le terme source et la contamination de la biosphère pouvant résulter de la dégradation estimée des barrières ouvragées et du transport des radionucléides dans l'eau dans la roche hôte et les autres niveaux de la géosphère. Afin de mener à bien cette tâche, il est nécessaire de préciser quelles seront les personnes susceptibles d'être les plus exposées et comment elles pourraient faire usage de l'eau contaminée à la suite de la perte d'étanchéité des colis de déchets radioactifs stockés sur le site. Il est aussi nécessaire de procéder aux recherches pour déterminer les fourchettes des paramètres qui aboutissent à des estimations fiables du terme source dans le temps et du transport des radionucléides jusqu'à l'environnement humain. Nous abordons la question des personnes les plus exposées dans la mesure où elle affecte l'objectif du programme de recherche dans ce chapitre. La pertinence de ce problème dans cette phase de la recherche est évidente et elle a été étudiée à la fois par la CNE et par l'Andra. (Voir plus bas)

1.3.1 Recherche sur les scénarios d'exposition et le système de confinement

La précision avec laquelle des paramètres doivent être déterminés et délimités dépend pour une large part du choix des scénarios relatifs aux populations à protéger à l'avenir (souvent appelées « groupe critique »). Si le groupe critique est choisi à partir d'une population, pour laquelle on envisage une utilisation limitée de l'eau, notamment des eaux souterraines, des environs du site de stockage pour l'irrigation et la boisson, c'est à dire, si le groupe critique choisi n'est pas le plus exposé, alors de grandes incertitudes dans des paramètres du système de confinement tels que la performance des barrières ouvragées ou les coefficients de diffusion, peuvent paraître acceptables. Ceci provient du fait que même un terme source important qui entraîne une contamination locale des eaux ne débouche pas obligatoirement sur des doses élevées pour le groupe critique choisi, même avec des choix conservateurs pour les paramètres du système de confinement géologique. La démonstration du respect des normes peut alors être effectuée avec beaucoup moins d'efforts et de rigueur.

Une recherche bien plus importante est généralement nécessaire si le groupe critique est une famille de cultivateurs qui se servira des ressources en eaux souterraines disponibles localement pour la boisson et l'irrigation, particulièrement dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne où les calculs d'évaluation préliminaire n'indiquent pas systématiquement des doses très inférieures à la limite. Ce problème devient encore plus complexe si le changement climatique est pris en compte, étant donné en particulier que les incertitudes relatives aux effets des facteurs anthropiques du changement climatique

se superposent aux facteurs naturels. Il est donc essentiel d'avoir une claire spécification des scénarios d'exposition, non seulement pour démontrer le respect de la réglementation mais aussi pour le programme de recherche qui sous-tend la totalité de la procédure d'estimation à partir duquel se fait l'évaluation de la performance. Par exemple, en se concentrant sur le scénario du fermier vivant en autarcie, on insistera sur le niveau du transfert des radionucléides depuis les eaux souterraines vers les sols, les plantes et les animaux, dans un contexte agricole mixte faisant intervenir des pratiques de grandes cultures et d'élevage. Inversement, en privilégiant des populations industrielles on attachera probablement plus d'importance aux études sur la façon dont le régime d'écoulement des eaux souterraines et les voies de transfert des radionucléides pourraient être modifiées par un pompage depuis les aquifères à un rythme soutenable.

Un scénario de « fermier vivant en autarcie » a généralement été considéré comme une base raisonnable pour un programme de recherche dans la mesure où les hypothèses sur la structure sociale future ou le mode de vie peuvent être largement éliminées.⁸ La CNE, par exemple, a également approuvé l'approche du fermier vivant en autarcie dans son rapport n° 3. Un choix de groupe critique fait partie de la RFS III.2.f

« La biosphère est éminemment variable et incertaine dans le temps et l'espace et n'est pas globalement contrôlable, c'est pourquoi on est conduit à une biosphère type selon les climats. Dans cette biosphère, il faut ensuite choisir la taille du groupe hypothétique le plus exposé, liée à la disponibilité en eau et son autarcie vis-à-vis de l'alimentation. »⁹

La section I.4.4.1 du Dossier 2001 Argile indique que l'ANDRA aurait recours au scénario du fermier vivant en autarcie :

« Un modèle représentatif de la biosphère actuelle de la région du site Meuse/Haute-Marne a été développé. Ce modèle considère l'usage de l'eau d'un puits pour l'irrigation de cultures (céréales) et d'un jardin potager (légumes racines, légumes feuilles), l'abreuvement des animaux et la boisson...L'alimentation des animaux et l'abreuvement sont les sources de contamination des animaux. Les modes d'exposition de l'homme sont liés à l'ingestion d'eau et d'aliments contaminés, à l'inhalation de poussières remises en suspension lors des travaux agricoles et à l'exposition externe à la radioactivité présente dans les sols. Les principaux processus qui pilotent les transferts dans cette biosphère « agricole » du site Meuse/Haute-Marne ont été identifiés et certaines voies de transfert, jugées moins importantes, ont été simplifiées.»¹⁰

Cette spécification est celle d'un scénario de fermier vivant en autarcie. Toutefois, il semble que l'ANDRA laisse ouverte la possibilité d'utiliser d'autres scénarios, dans la

⁸ Gopal and Makhijani 2001, Pigford 1997, Pigford 1995.

⁹ CNE 1997, p. 90.

¹⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 104

mesure où elle fait référence à « une évolution possible du système actuel vers des systèmes plus industrialisés. »

«Il conviendra tout d'abord de vérifier que toutes les pratiques locales ont été bien prises en compte dans le modèle. Le développement de la biosphère a été effectué pour prendre en compte des activités agricoles qui mettent en jeu de nombreuses voies de transfert et qui sont donc supposées conduire à l'impact le plus élevé. Cependant, il conviendra de tenir compte dans l'évaluation de l'impact d'une évolution possible du système actuel vers des systèmes plus industrialisés. Par ailleurs, le développement à long terme de voies de transfert plus spécifiques d'un environnement plus urbanisé devra être étudié. De même, la contamination qui résulterait de l'usage de sources ou de cours d'eau plutôt que d'un puits sera examinée.»¹¹

Cette analyse ne précise pas que le scénario le plus conservateur sera utilisé. Des scénarios n'utilisant pas l'eau de puits retirée du point aval le plus proche du site de stockage dans le sens de l'écoulement, risquent de ne pas être conservateurs. Il est nécessaire d'être très circonspect en regard des scénarios basés sur des populations urbaines ou une agriculture ou une économie plus industrialisée.

Il est à noter que la Règle Fondamentale de Sécurité exige un choix conservateur du groupe critique :

« Par ailleurs, pour la modélisation de la biosphère, on retiendra des groupes critiques hypothétiques, représentatifs des individus susceptible de recevoir des doses les plus élevées parmi lesquels les individus vivent au moins partiellement en autarcie. »¹²

Il est généralement admis que le scénario d'un fermier vivant en autarcie répond à cette exigence de groupe critique. Dans le cadre de ce scénario, les enfants ont souvent des facteurs de conversion plus élevés entre l'incorporation et la dose, que ce soit par rapport à des organes spécifiques ou au corps entier. Par conséquent, il est nécessaire d'inclure les enfants dans le groupe critique.

1.3.2 Implications pour la recherche des calculs de performance dans le Dossier 2001 Argile

Le Dossier 2001 Argile présente un certain nombre d'exemples différents pour lesquels ont été effectués des calculs sur la base du fermier vivant en autarcie. Outre une démonstration méthodologique, l'ANDRA a indiqué deux des objectifs de ces calculs de la façon suivante :

¹¹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p.105

¹² Règle N° III.2.f, Section 5.4.

« Le premier objectif du traitement du scénario d'évolution normale est d'évaluer les capacités de confinement du milieu géologique, en particulier de la formation du Callovo-Oxfordien. »¹³

« Un second objectif du traitement du scénario d'évolution normale est d'évaluer l'influence de la prise en compte des formations encaissantes (Oxfordien calcaire, Dogger, Kimméridgien et calcaires du Barrois) vis-à-vis du calcul de l'impact radiologique à long terme aux exutoires. »¹⁴

L'ANDRA voit ainsi dans ces calculs une analyse d'évaluation préliminaire pour tester son modèle conceptuel de confinement géologique sur le site. En outre, le Dossier 2001 Argile soutient que les paramètres adoptés pour les calculs sont « conservateurs » ce qui suppose une connaissance beaucoup plus approfondie des paramètres du site que dans le cas d'une simple démonstration méthodologique.

« Pour les deux scénarios, les valeurs retenues pour les paramètres correspondent soit aux valeurs phénoménologiques observées, soit, quand les incertitudes sont grandes, à des valeurs dites raisonnablement pénalisantes qui résultent d'une approche conservatrice. Compte tenu des incertitudes qui subsistent aujourd'hui, il est important de noter que le jeu d'hypothèses retenues apparaît très pessimiste sur l'ensemble des paramètres et comportements mis en jeu. Les évaluations conduites ne pourront donc prétendre être une prédiction réaliste. Elles seront par définition très pessimistes par rapport à l'évolution réelle. »¹⁵

Il apparaît clairement dans la citation ci-dessus que l'ANDRA met en avant que ses valeurs de paramètres dans un scénario « d'évolution normale » sont « raisonnablement pénalisantes » et que les résultats de l'évaluation de la performance sont donc « très pessimistes ». Les objectifs des calculs et les conclusions qu'en déduit l'ANDRA représentent un test d'évaluation préliminaire de son modèle conceptuel pour le site, qui était adapté à la phase à laquelle ce document a été écrit.

L'ANDRA a testé le modèle en trois points de prélèvement d'eau. Pour deux d'entre eux, la Meuse et le Tithonien, les estimations de dose effective sont très inférieures à la recommandation de 0,25 mSv. La dose la plus importante, qui s'avérerait légèrement supérieure à la limite de 0,25 mSv dans le scénario de base, était pour l'exutoire Marne-Rognon et concernait le stockage de combustible usé à l'oxyde d'uranium, avec un franchissement de la limite de dose au bout d'environ 700 000 ans après le temps

¹³ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 129.

¹⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 130.

¹⁵ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 121.

présent.¹⁶ Aucun calcul portant sur l'utilisation des eaux souterraines entre le site de Meuse/Haute-Marne et l'exutoire Marne-Rognon ne figure dans le Dossier 2001 Argile. L'ANDRA a aussi fait des études de sensibilité, en utilisant un coefficient de diffusion plus petit. Dans ces conditions, l'ANDRA estime à 0,018 mSv par an la dose maximale. Mais les paramètres n'ont été modifiés que dans un seul sens, probablement parce que l'ANDRA estime que les paramètres choisis pour le scénario de base sont « raisonnablement pénalisants ».

Selon le calcul de l'ANDRA, la fraction de l'iode-129 retenue dans le Callovo-Oxfordien est de 48 pour cent; la fraction retenue avant l'exutoire Marne-Rognon est de 92 pour cent.¹⁷ Ce résultat provient de l'hypothèse de l'ANDRA selon laquelle la circulation de l'eau est prédominamment diffusive. Par conséquent la dose de rayonnement estimée peut être plus élevée si on utilise les eaux souterraines entre le site de stockage et l'exutoire Marne-Rognon. Des puits situés entre l'exutoire Marne-Rognon et l'emprise du stockage peuvent fournir une méthode plus conservatrice et plus adaptée pour une évaluation préliminaire de la performance, spécialement compte tenu de l'affirmation de l'ANDRA selon laquelle l'approche globale est « très pessimiste ». En outre, les autres hypothèses retenues dans le scénario d'évolution normale ne sont pas toutes conservatrices. Par exemple, le scénario « d'évolution normale » ne prend pas en compte les effets de la génération et du transport des gaz,¹⁸ ce qui n'est pas une hypothèse conservatrice. En particulier, il est nécessaire de prendre en compte l'éventualité d'un rejet de carbone 14 sous forme gazeuse à partir du site d'enfouissement, et son transport vers la surface à travers des fractures naturelles ou induites, ou à travers des tunnels, des galeries et l'EDZ. L'aptitude de la roche hôte à supporter un flux de diffusion pourrait être affectée par la génération des gaz. Cet aspect est considéré comme un important domaine de recherche (voir au chapitre 4).

L'impact du choix du scénario sur le programme de recherche sur le site apparaît plus clairement dans le « scénario d'évolution altérée » de l'ANDRA qui fait l'hypothèse d'une défaillance des scellements. Dans ce scénario, les calculs de l'ANDRA indiquent que la recommandation de limite de dose effective de 0,25 mSv par an serait largement dépassée dans au moins certains cas (chlore 36 pour les déchets de type B, à 3 mSv par an, et l'iode 129 pour les déchets avec oxyde d'uranium à 15 mSv par an). Nous pouvons déduire de la Figure VI.4-13 que les doses relativement élevées dues à l'iode 129 pourraient intervenir au cours d'une période située approximativement entre 20 000 et 100 000 ans ou plus après la fermeture du site de stockage.¹⁹ Les calculs de sensibilité de l'ANDRA indiquent que si des zones présentant un gradient hydraulique inférieur de deux ordres de grandeur à celui qui est supposé dans les calculs initiaux peuvent être trouvées, l'impact de la défaillance des scellements est considérablement atténué et des doses « comparables » à 0,25 mSv par an sont obtenues (bien que l'ANDRA ne fournisse pas le détail de ces calculs dans le Dossier 2001 Argile) :

¹⁶ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, pp. 133-134.

¹⁷ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 134.

¹⁸ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 120.

¹⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 139. La courbe est relativement plate à cet intervalle de temps. Le pic réel indiqué se situe légèrement après 100 000 ans.

“Les calculs ont mis en évidence le rôle essentiel du scellement des puits et le rôle de la zone endommagée autour des ouvrages avec les hypothèses retenues (perméabilité de la zone endommagée augmentée de deux ordres de grandeur, forts gradients ascendants). Cette dépendance constitue une fragilité du stockage. Dans le même temps, les résultats montrent aussi les performances à garantir ainsi que les voies de progrès possibles tant en termes de positionnement du stockage dans les zones de faible gradient que de meilleure caractérisation de la zone perturbée. Les impacts radiologiques, estimés sur la base des hypothèses très pessimistes, se situent pourtant encore dans la gamme du millisievert. De plus, ils semblent pouvoir être réduits significativement par un ensemble de dispositions de conception à affiner. Au total, il ressort donc de l’analyse de sûreté que les impacts dus au scénario altéré (a priori pessimiste et moins probable) peuvent, sous réserve d’inventaire, être ramenés à des valeurs acceptables car comparables aux valeurs réglementaires. »²⁰

Les chercheurs de l’ANDRA ont plus récemment réaffirmé l’importance centrale de l’intégrité des scellements dans la performance du site de Bure ainsi que la nécessité d’aborder cette question dans le cadre de la recherche sur l’EDZ.²¹

Bien que la défaillance des scellements soit traitée comme un scénario « altéré », cela ne veut pas nécessairement dire que la probabilité de défaillance des scellements soit faible. Ceci montre au contraire que les conséquences radiologiques d’une défaillance des scellements sont importantes et, donc, que des recherches approfondies doivent être mises en place soit pour démontrer la fiabilité des scellements sur de très grandes échelles de temps, soit pour montrer que les impacts radiologiques d’une défaillance des scellements ont été considérablement surestimés.

De plus, il reste un travail considérable à réaliser pour valider l’hypothèse d’un maintien de conditions de rétention importante des radionucléides à vie longue comme le neptunium 237. C’est particulièrement important pour des radionucléides comme le neptunium 237, le technétium 99 et le sélénium 79 qui peuvent exister sous différentes formes chimiques dans les eaux souterraines ou de surface, selon le pH, le Eh et des aspects plus détaillés de l’hydrochimie (voir Chapitre 4).

Le rôle relatif et absolu de la recherche sur les scellements et les zones dans lesquelles les gradients hydrauliques pourraient être suffisamment faibles dépend en partie du choix du scénario et de la validité des autres hypothèses concernant les radionucléides à vie longue. Il est possible, voire probable, que même si des zones avec un gradient hydraulique de 0,01 mètre par mètre étaient découvertes, le maintien de l’intégrité des scellements soit un facteur plus crucial dans la recherche si l’on prend comme scénario de référence un prélèvement des eaux souterraines en amont de l’exutoire Marne-Rognon.

²⁰ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 137.

²¹ Bauer, Pépin, et Lebon 2003.

Ceci fait apparaître qu'il est essentiel d'envisager les liens entre les différents aspects de la recherche sur le confinement géologique et d'autres aspects de la création d'un système de confinement géologique, notamment l'évaluation de la performance à chaque phase, y compris au niveau de l'évaluation préliminaire. Nous avons analysé cette question dans la préface, dont l'objectif est de réunir les différents éléments de cette revue du programme de recherche de l'ANDRA. Il est important de rappeler ici que le concept multibarrières est crucial pour renforcer la confiance dans l'évaluation de la performance et pour réduire les incertitudes pour le respect des normes de la dose. Selon ANDRA 2000 :

« Rappelons que pour une défense en profondeur pleinement **multi-barrières**, il est souhaitable que la barrière géologique (y compris les scellements de puits) soit redondante des barrières artificielles, en ce sens que l'ensemble des barrières artificielles limite l'impact radiologique à 0,25 mSv/an dans le cas d'une situation de court-circuit partiel de la barrière géologique (inventaire radiologique correspondant au maximum à un module de stockage), tandis que l'effet de la barrière géologique doit permettre de limiter l'impact à 0,25 mSv/an pour l'ensemble de l'inventaire stocké pour les autres situations. »²²

Etant donné que la défaillance des scellements pourrait s'avérer un facteur déterminant dans l'évaluation de la performance, il est surprenant que le programme de recherche de l'ANDRA soit relativement faible dans le domaine spécifique de l'EDZ, d'une façon suffisamment réaliste pour évaluer la performance de l'installation de stockage après sa fermeture.

1.4 Intrusion humaine

La question de l'intrusion humaine comporte deux aspects: l'intrusion humaine accidentelle et l'intrusion humaine volontaire. Le débat sur l'intrusion délibérée et sa prévention est peut-être le plus difficile et le plus sujet à des spéculations. L'intrusion humaine accidentelle est en principe moins difficile à traiter parce qu'elle fait entrer en ligne de compte des questions comme, par exemple, la présence de ressources naturelles sur le site. Dans cette section nous analyserons brièvement des implications de la question de l'intrusion humaine sur le programme de recherche de l'ANDRA. Dans cette analyse nous traiterons tout particulièrement de la question des ressources géothermiques.

La question de l'intrusion humaine n'est pas toujours considérée comme un facteur essentiel dans la définition d'un programme de recherche sur le confinement géologique dans lequel l'accent est souvent mis sur la caractérisation du système du point de vue du transport des radionucléides dans les eaux souterraines, avec en plus une certaine prise en compte de la production des gaz et du transport en phase gazeuse. Néanmoins, elle a une incidence sur les conditions postulées pour la démonstration de la conformité

²² ANDRA Scellement 2001, c'est l'ANDRA qui souligne

réglementaire et donc sur l'estimation de la performance. L'évaluation de la performance, à son tour, influence la sélection des types de conteneurs et des barrières ouvragées et le caractère majorant des facteurs de sûreté intégrés dans les estimations de dose.

Dans l'éventualité d'une intrusion humaine, la Règle III.2.f ne précise pas explicitement une limite de dose différente de celle du scénario de référence pour le transport des radionucléides du site de stockage à la biosphère. L'absence d'une limite de dose explicitement différente indique que la même limite de dose annuelle de 0,25 mSv devrait s'appliquer dans l'éventualité d'une intrusion humaine. La réglementation des Etats-Unis pour Yucca Mountain est explicite à cet égard. Elle indique que le même degré de protection devrait s'appliquer aussi bien dans le cas des scénarios d'intrusion humaine que dans celui où le site de stockage n'est pas perturbé.²³ Il faut toutefois noter que les cas d'intrusion à prendre en compte dans le contexte de Yucca Mountain portent sur des perturbations du cheminement normal des eaux souterraines. Ils ne comprennent pas l'exposition des intrus aux déchets ou aux roches contaminées extraites au cours du forage de puits, qui est le mode d'intrusion pré-spécifié.

Il sera très difficile d'obtenir une estimation fiable sur le fait que les doses seront limitées à 0,25 mSv par an dans des situations d'intrusion humaine accidentelle dans l'horizon du site, particulièrement en cas de perforation d'un colis de déchets. Ce sera encore plus vrai après la re-saturation du site de stockage. Dans sa Publication 81, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) indique que les impacts radiologiques de l'intrusion humaine ne devraient pas être comparés à des contraintes de dose ou de risque dans la mesure où il n'existe aucun fondement scientifique pour prédire la nature ou la probabilité des actions humaines dans le futur. La Commission affirme que la démonstration de la protection vis-à-vis d'une intrusion humaine accidentelle est meilleure en prouvant que des mesures qualitatives adaptées ont été adoptées pour réduire la probabilité de tels événements. Néanmoins, une fois la démonstration faite que de telles mesures ont été prises, il convient d'évaluer les conséquences radiologiques d'un ou plusieurs scénarios d'intrusion humaine simplifiés, s'ils venaient à intervenir. Toutefois, comme ces évaluations dépendent de la survenue effective de cette intrusion, les conséquences radiologiques ne devraient pas être comparées avec les contraintes de doses ou de risques concernant des expositions qui interviendront à coup sûr. Il est suggéré d'effectuer les comparaisons avec des critères de dose adaptés à l'intervention. La signification de cette recommandation est interprétée de la façon suivante : si les scénarios aboutissent à des doses annuelles inférieures à 10 mSv, il n'est pas très utile de s'intéresser plus avant à réduire la probabilité d'occurrence des conséquences radiologiques. A l'inverse, au-dessus d'une dose annuelle de 100 mSv, des efforts considérables devraient être déployés pour réduire cette probabilité d'occurrence. A des doses annuelles situées entre 10 et 100 mSv, les moyens à mettre en œuvre dépendront de l'évaluation de la dose.²⁴ Dans son rapport n° 6, la CNE évoque cette analyse de la CIPR sans apporter de commentaires à son application en France (pages 130-131).²⁵

²³ 40 CFR 197, p. 74.

²⁴ ICRP 81.

²⁵ CNE 2000, pages 130-131

Cette notion d'assouplissement des normes en cas d'intrusion humaine n'est pas unanimement acceptée. Par exemple, l'Académie nationale des sciences américaines (NAS) a recommandé à l'Agence de protection de l'environnement (EPA) d' « exiger que le risque conditionnel résultant du scénario envisagé pour l'intrusion [humaine accidentelle] n'excède pas les limites de risque adoptés dans le cas d'un site de stockage intact. »²⁶ Comme nous l'avons indiqué plus haut, l'adoption d'une limite identique pour l'intrusion humaine, correctement appliquée, pourrait contribuer à une amélioration globale de la conception et de la performance du confinement géologique en renforçant la robustesse des barrières ouvragées. C'est une des raisons de sa prise en compte dans un programme de recherche sur un site de stockage.

1.4.1 Intrusion humaine accidentelle

Il est particulièrement important d'étudier l'intrusion humaine accidentelle de façon approfondie pour le site de Meuse/Haute-Marne, dans la mesure où il n'existe aucun obstacle naturel interdisant un habitat humain directement sur l'emprise du stockage après la perte du contrôle institutionnel. On peut d'ailleurs s'attendre, à long terme, à l'installation d'habitants dans au moins une partie de cette zone.

Un site argileux du type de celui qui est utilisé en Meuse/Haute-Marne ne dispose que d'un nombre limité de ressources utilisables qui pourraient aboutir à une exposition des êtres humains. Nous avons déjà traité de la nécessité d'évaluer les doses issues des eaux souterraines au point le plus proche entre l'emprise du stockage et l'exutoire Marne-Rognon où l'on peut envisager de retirer de l'eau potable. Des variantes de ce scénario devraient intégrer les paramètres de changement climatique d'un programme d'évaluation régionale approfondi (voir plus loin). On considère que l'autre élément essentiel à prendre en considération dans le cadre de l'intrusion humaine involontaire est la prospection ou l'exploitation de ressources géothermiques.

1.4.2 Les ressources géothermiques et l'intrusion humaine²⁷

Les ressources géothermiques sont susceptibles d'augmenter le risque potentiel d'intrusion humaine si elles sont présentes en qualité et quantité suffisantes. Il existe deux types de ressources géothermiques : des eaux à températures élevées et des roches à températures élevées qui se trouvent dans des couches où l'eau est absente.

Le Dossier 2001 Argile mentionne que les ressources géothermiques pourraient être l'un des facteurs susceptibles d'affecter la sûreté du site de stockage.²⁸ Un forage profond est identifié comme l'événement externe « le plus pénalisant » pouvant perturber le site de

²⁶ NAS-NRC 1995, p. 121. Les doses au public résultant des déblais de forage et les doses pour les foreurs ont été exclues de la recommandation.

²⁷ Arjun Makhijani et Yuri Dublyansky ont conjointement rédigé cette section

²⁸ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 115.

stockage et une défaillance de scellement comme l'événement interne le « plus pénalisant ». Nous avons déjà discuté ce dernier aspect. Le Dossier 2001 Argile n'analyse pas le premier parce qu'il avait déjà été traité :

« Le scénario d'intrusion par un forage n'a pas été pris en compte dans la présente étude, car il avait déjà été traité lors d'une phase antérieure des recherches et le reprendre avec les éléments actuellement disponibles n'aurait pas apporté de plus-value réelle. Sa pertinence et son mode de traitement devront être revus pour la seconde vérification de sûreté de 2004. »²⁹

Nous savons également que « le CLIS a souhaité faire procéder à une évaluation des moyens à mettre en œuvre pour déterminer et caractériser le potentiel géothermique de la région de Bure, et en particulier à l'intérieur de la zone de transposition d'un éventuel stockage de déchets radioactifs définie par l'ANDRA. »³⁰ L'ANDRA a aussi publié un rapport sur la question en 2004.³¹ Nous examinerons ici la question en termes d'implications pour le programme de recherche au vu de la présence physique de la ressource et de la pertinence de la faisabilité et l'opportunité d'exploiter les ressources du point de vue économique tel qu'on peut l'envisager aujourd'hui.

A une échelle régionale, les eaux souterraines de la partie orientale du Bassin parisien ont un certain potentiel géothermique. La ressource potentielle est située dans l'aquifère du Trias inférieur. Selon un rapport de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN):

« La carte des températures des « Grés inférieurs de Lorraine »,³² indique des températures de 70 °C dans le secteur de Bar-le-Duc et de 80 °C dans le secteur de St. Dizier. Les caractéristiques hydrodynamiques et la température moyenne de l'eau (50 °C) seraient probablement suffisantes pour la géothermie jusqu'à la Meuse à l'ouest, mais l'eau devient rapidement très salée à partir de cette limite. La profondeur de la formation (≥ 1500 m) la faible transmissivité et surtout la salinité très élevée (200 g/l au droit de Bar-le-Duc ; ≥ 300 g/l au droit de St. Dizier), rendent l'aquifère gréseux inexploitable pour la géothermie. »³³

Un inventaire exhaustif des ressources géothermiques de la région Champagne-Ardenne a été mentionné par le BRGM.³⁴ On peut trouver une compilation de données récentes à ce propos dans Gros (2003). En janvier 2004, l'ANDRA a publié de nouvelles données sur son propre travail de prospection des ressources en liaison avec les données précédemment publiées dans les sources citées.³⁵

²⁹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 118.

³⁰ CLIS : <http://www.clis-bure-com>

³¹ ANDRA Géothermie 2004

³² Housse et Maget 1976. Cite dans Gros 2003.

³³ Gros 2003, p. 8.

³⁴ Maget et Rambaud 1980. Cite dans Gros 2003.

³⁵ ANDRA Géothermie 2004

Les données de Maget et Rambaud comme celles de Gros³⁶ indiquent que deux aquifères qui doivent retenir l'attention sont situés sous la région où se trouve le site de Bure. Le premier est l'aquifère des carbonates du Dogger (température de l'eau entre 30 et 40 °C, salinité 20-30 g/l). Il est considéré que cet aquifère ne présente aucun intérêt géothermique dans la pratique. Le second aquifère est représenté par le « grès du Trias inférieur de Lorraine ». Les températures sont généralement de l'ordre de 55-60 °C. Toutefois, sur la carte présentée à la Fig. 4 de Gros (2003), le site de Bure est situé entre les isothermes 60 et 70 °C. En revanche, une partie des nouvelles données publiées par l'ANDRA, avec des puits à l'intérieur du secteur comprenant le site de Bure indiquent que les gradients thermiques sont moins élevés et que le potentiel géothermique dans cette zone particulière pourrait être inférieur à ce que suggère le contexte régional. Cependant les calculs de l'ANDRA sont basés sur l'extrapolation des mesures de la température pour la raison qu'aucun forage n'atteint le Trias inférieur. Quoiqu'il en soit, les températures sont néanmoins assez élevées pour présenter un intérêt pour l'exploitation des ressources géothermiques .

« La formation du Trias inférieur des « *Grès de Lorraine* » est donc le seul aquifère susceptible de présenter un potentiel géothermique intéressant au voisinage du secteur étudié par l'Andra. Si les températures estimées sont relativement élevées, la faible capacité à produire de l'eau mise en évidence et les fortes salinités sont des inconvénients majeurs à l'exploitation de cette ressource. L'IRSN préconise dans sa conclusion l'analyse économique et technique de cette ressource, fortement tributaire des facteurs évoqués précédemment. »³⁷

Le commentaire de l'ANDRA au sujet de la "forte salinité" de l'eau dans la région du site de Bure laquelle se situe entre 10 à 100g/L devrait être considéré dans le contexte. Elle est considérablement inférieure aux 200 à 300 mg/L des régions de Bar-le Duc et St. Dizier. De plus, les calculs de transmissivité de l'ANDRA dans les forages Montplonne 1 et Montplonne 2, situés à la limite de la région démarquant le site de Bure, d'au moins $2,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ et $1,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ respectivement sont d'un ordre de grandeur supérieur à la valeur la plus haute $\sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ rapportée par l'IRSN pour le Trias inférieur. Par conséquent la conclusion de l'ANDRA que ces facteurs « sont des inconvénients majeurs à l'exploitation de cette ressource » est, au mieux prématurée et, au pire, ne semble pas être justifiée pour l'instant.

On considère généralement que la faisabilité économique de l'exploitation de ressources thermiques du type de celles de Meuse/Haute-Marne dépendra de l'évolution du système énergétique à long terme, des caractéristiques de l'habitat humain et de l'évolution de la technologie. La salinité de l'eau ne peut être considérée comme suffisante pour empêcher à long terme l'exploitation de la ressource. Même si un forage à environ 1 500 m pour une ressource géothermique moyenne ne semble présenter aucun intérêt actuellement, ce ne sera pas obligatoirement le cas sur les longues périodes de temps

³⁶ Maget et Rambaud 1980. Cite dans Gros 2003

³⁷ ANDRA Géothermie 2004, p. 8.

concernées par l'évaluation de la performance du site de stockage. On peut raisonnablement supposer que l'évolution technologique à moyen et long terme pourrait modifier considérablement l'évaluation. Depuis plusieurs décennies, par exemple, les technologies de conversion de l'énergie thermique des mers sont en cours de développement et permettraient d'exploiter des différences de quelques dizaines de degrés entre les eaux océaniques profondes et de surface pour produire de l'électricité. Le chauffage avec des eaux à températures moyennes fait déjà l'objet d'un usage courant ; on peut même s'attendre à une baisse des températures économiquement exploitables avec une amélioration des matériaux pour un transfert thermique à partir de faibles différences de températures.

Les récentes recherches de l'ANDRA et son analyse représentent des progrès notables dans le traitement de la question de l'intrusion humaine inadvertante. L'importance de cette question mérite une caractérisation intensive supplémentaire.

1.4.3 Intrusion humaine délibérée

La nature des signes, marquages, et structures qui pourraient être employés pour alerter les générations lointaines des risques de l'intrusion a fait l'objet de débats considérables dans le contexte de la conception d'un site de stockage. Le type de marquage qui survivra et restera compréhensible pour des durées bien plus longues que l'histoire de la civilisation, est l'un des éléments clés de ces débats. Un échec de communication avec les générations futures n'est cependant qu'un aspect du problème dans la mesure où un succès pourrait augmenter le risque d'une intrusion délibérée ou malveillante. Il ne semble pas que l'ANDRA ait jusqu'ici étudié en détail le problème de l'intrusion humaine malveillante. La question est mentionnée brièvement dans l'un des bilans de la CNE.³⁸

Une intrusion malveillante pourrait s'avérer difficile ou impossible si les zones sont densément peuplées, par exemple, mais elle est tout à fait possible si l'habitat est très dispersé à une époque très éloignée dans le futur, au-delà de la période de contrôle institutionnel. Cette période, qui s'étend de 500 ans à un million d'années, est si longue qu'on ne peut formuler aucune hypothèse sur le type d'habitat qui prévaudra à ce moment.

Puisque les marquages en surface peuvent en fait attirer une intrusion humaine malveillante, le problème de l'intrusion humaine délibérée et malveillante est peut-être, de toutes les questions à long terme associées à l'estimation de la performance d'un système géologique, la question conceptuellement la plus difficile. Quelques principes peuvent être décrits ici à titre de première approche :

- Les mesures de prévention d'une intrusion humaine délibérée devraient être compatibles avec les mesures visant à prévenir l'intrusion humaine accidentelle.

³⁸ CNE 2000, p. XI.

Cet argument plaide à l'encontre des marquages puisque, même s'ils peuvent prévenir l'intrusion accidentelle, ils peuvent, par contre, rendre l'intrusion délibérée plus probable.

- Une approche possible, dont l'étude doit être approfondie, serait de concevoir un système pour lequel le coût et la complexité de l'extraction et du raffinage des ressources à partir des déchets stockés dans le site d'enfouissement seraient plus importants que le coût de leur acquisition par d'autres moyens à long terme. Les concepts qui sont étudiés devraient partir des technologies prévisibles, comme c'est le cas dans les autres domaines de recherche sur le site d'enfouissement.
- Il vaudrait la peine de considérer si une réduction de la surface d'emprise du stockage pourrait réduire les risques d'intrusion accidentelle sans augmenter les risques d'une intrusion délibérée. Dans ce contexte, une emprise est la projection verticale du site de stockage à la surface dans lequel les déchets fortement radioactifs sont enfouis. L'emprise ne se rapporte pas aux installations de surface, construites seulement pour la période d'exploitation et de surveillance du stockage parce qu'elles sont présumées ne pas subsister au-delà de la période de contrôle institutionnel. De fait, il faudrait peut-être même envisager de les enlever après la fermeture permanente du site de stockage pour réduire le risque d'intrusion volontaire. Cependant, une emprise réduite peut créer d'autres problèmes, tels que des températures inacceptables. Une emprise réduite et des températures modérées pourraient être plus compatibles si plusieurs couches verticalement espacées pouvaient être aménagées sans risque dans un site de stockage. Il s'agit en soi d'une question de recherche d'une grande complexité.

Il faut admettre qu'une intrusion humaine délibérée ne serait pas nécessairement malveillante. Le site d'enfouissement aura une importante signature thermique, au moins pendant plusieurs milliers d'années, et constituera également une anomalie géomagnétique persistante. Il pourrait donc bien être identifié au cours d'études aéromagnétiques ou d'autres recherches géologiques. L'exploration de cette anomalie pourrait alors intervenir pour diverses raisons, que ce soit pour identifier d'éventuelles ressources (la présence d'un gisement riche), ou pour satisfaire une curiosité scientifique.

1.5 Changements climatiques

Concernant les changements climatiques, la Règle III.2.f établit une distinction entre changements d'origine naturelle et changements induits par l'activité humaine. Une glaciation causant une importante érosion en surface est envisagée à une échéance de 60 000 ans (paragraphe 1.2.1, annexe 2). Une érosion superficielle importante n'est pas prise en compte dans le contexte d'un changement climatique lié à l'activité humaine. L'étude d'événements stochastiques de glaciation sur une échelle de temps de 160 000 ans est également indiquée (Para. 2.1, annexe 2). En ce qui concerne les changements climatiques liés aux activités humaines, la Règle III.2.f exige la prise en compte des effets d'une élévation du niveau de la mer « dont les effets seront étudiés dans le cadre de

l'évaluation des conséquences liées aux changements climatiques d'origine naturelle (période interglaciaire). » (para 3.3. Annexe 2, Règle III.2.f)

La convergence des avis scientifiques et les nombreuses évidences du développement de changement climatique grave font d'une intégration complète des changements climatiques un élément essentiel du programme de recherche sur le site de stockage.³⁹ Il faut accorder à l'ANDRA que, en tant que membre d'un consortium international, elle a fait des travaux approfondis sur les changements climatiques. Nous examinerons d'abord une partie de ce travail et présenterons ensuite nos remarques sur les implications pour le site de Bure.

Le travail international de l'ANDRA porte sur l'évolution naturelle prévue pour le climat ainsi que sur certains effets éventuels de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. Plus précisément, l'ANDRA a effectué ce travail dans le contexte d'une collaboration internationale de trois ans, connue sous le nom de BIOCLIM, dans lequel les établissements responsables des programmes géologiques de confinement des déchets de haute activité ont analysé l'ampleur et les effets des changements climatiques sur leurs programmes. Ce programme a débuté en octobre 2000.

L'abréviation BIOCLIM signifie « Modelling Sequential BIOSphere system under CLimate change for Radioactive Waste Disposal ». C'est un programme EURATOM, coordonné par l'ANDRA. Les autres agences de gestion des déchets y participant sont : NIREX (R-U), GRS (Allemagne), ENRESA (Espagne), et NRI (République Tchèque). On y retrouve aussi des organismes spécialisés dans la recherche sur le climat. Ce sont le LSCE (CEA/CNRS, France), le CIEMAT (Espagne), l'UPMETSIMM (Espagne), l'UCL/ASTR (Belgique) et la CRU (UEA, R-U). L'objectif d'ensemble de ce projet est l'étude de l'impact des changements climatiques, naturels et liés aux activités humaines, sur les sites de stockage géologique et l'aptitude de ces derniers à contenir les déchets et à limiter les doses pendant des périodes allant jusqu'à un million d'années et au-delà.⁴⁰

Dans son DOSSIER 2001 ARGILE, l'ANDRA décrit ainsi le concept de recherches :

« Les changements climatiques qui se produiront dans le futur peuvent modifier les caractéristiques de la biosphère tempérée qui existe aujourd'hui sur le site Meuse/Haute-Marne et pour lequel un modèle a été construit. L'évolution des climats entraînera des modifications de la végétation, de la faune et de la flore, de la géomorphologie du site, de la nature des sols actuels mais aussi des pratiques humaines connues actuellement dans la région. D'une part, les pratiques humaines peuvent aussi modifier l'évolution naturelle des climats. C'est le cas de l'effet de serre, et d'autre part, l'homme est amené à modifier son environnement pour en extraire les ressources nécessaires à son développement.

³⁹ Il existe maintenant une littérature scientifique abondante sur les changements climatiques, notamment sur les changements anthropiques. Voir par exemple NAS-NRC 2002 et Clark et al. 2002.

⁴⁰ Texier et al. 2003. Les commentaires sur la recherche BIOCLIM sont tirés de cet article sauf indication contraire. Voir aussi BIOCLIM D1 2001.

L'ensemble de ces questions est étudié de manière à fournir des illustrations des différents futurs possibles de la biosphère sur le site Meuse/Haute-Marne. »⁴¹

L'intention de l'ANDRA était d'exécuter ce programme général de recherche en étudiant les changements climatiques du passé :

« Il est admis que l'évolution du climat sera similaire à celle qui a existé dans le passé, au cours du Quaternaire (depuis 2,4 millions d'années). Ainsi, les études ont montré qu'il existait une alternance de périodes froides (glaciaires) et tempérées (interglaciaires). L'Andra a donc engagé depuis plusieurs années des études pour connaître l'évolution de la végétation durant un cycle glaciaire-interglaciaire. »⁴²

La modélisation effectuée dans BIOCLIM correspond à ce concept général. Le Dossier 2001 Argile suppose que l'évolution naturelle du climat futur correspondra généralement aux cycles qui ont été observés par le passé avec des variations de l'insolation et du dioxyde de carbone qui sont les éléments moteurs, primaires et secondaires, des changements de température moyenne planétaire. Par conséquent on peut raisonnablement supposer que ceux-ci constituent également des fonctions de forçage pour le climat régional. On estime généralement que les prévisions climatiques régionales basées sur des fonctions de forçage globales sont beaucoup plus difficiles et incertaines. Le programme BIOCLIM tente de résoudre ces questions en employant des modèles de plus petite échelle pour obtenir des résultats régionaux à partir des prévisions globales du climat. Ces travaux de modélisation sont encore dans une phase préliminaire et nécessitent un approfondissement considérable.⁴³

Le programme BIOCLIM porte également sur les changements anthropiques de la composition de l'atmosphère, notamment les changements de la concentration de dioxyde de carbone. Ces changements sont superposés aux variations cycliques naturelles estimées afin d'obtenir des scénarios climatiques composites. Nous sommes généralement d'accord avec cette approche. Le projet BIOCLIM a effectué des travaux très intéressants sur certains ensembles de scénarios importants pour la performance du site d'enfouissement, avec des implications pour la recherche non seulement sur les changements climatiques, mais également sur l'évolution du modelé du terrain, de l'hydrogéologie, l'hydrogéochimie et d'autres disciplines. Ces scénarios font intervenir

⁴¹ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 105

⁴² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 105

⁴³ Par exemple, les résultats obtenus par modélisation des précipitations en Europe au cours du dernier maximum glaciaire (il y a environ 21 000 ans) en utilisant une réduction d'échelle, avaient tendance à indiquer des augmentations, alors que les reconstructions climatiques faisaient apparaître des diminutions, ce que BIOCLIM décrivait comme un « résultat décevant de réduction d'échelle. » BIOCLIM D8a 2003, p. 27. Ceci ne provient pas d'un manque de travail ou de compétence. Ceci vient du fait que les modèles, même les plus récents, sont eux-mêmes préliminaires et demandent beaucoup de travail. BIOCLIM D8b 2003 remarque qu' « alors que la méthodologie de réduction d'échelle a été développée soigneusement, il ne s'agit que de la première version d'une méthode plutôt nouvelle ; elle nécessite plus de validation et ceci suggérerait probablement des améliorations. » (p. 30).

des concentrations faibles ou élevées de dioxyde carbone. Ils intègrent les effets d'une fonte complète des calottes glaciaires.

1.5.1 Changements anthropiques dans la circulation thermohaline

BIOCLIM D1 2001 décrit certains des grands changements qui seraient induits dans le cycle hydrologique par l'alternance du gel et du dégel pendant une période glaciaire, ainsi que les changements dans les mécanismes d'érosion, les affleurements de surface, et les autres facteurs qui pourraient affecter l'évaluation de performance du site de stockage.

La durée et l'intensité d'un tel épisode de glaciation et de fonte présentent une certaine importance dans l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la performance du site d'enfouissement. Elles déterminent la profondeur de pénétration du pergélisol, qui peut influencer de diverses manières le transport des radionucléides notamment par des changements de la conductivité hydraulique et l'expulsion des solutés de la glace du sol, ainsi que par des perturbations mécaniques.

Dans le Dossier 2001 Argile, l'ANDRA partait du principe que le *seul* résultat global plausible des émissions anthropiques de gaz à effet de serre sur le prochain cycle de glaciation serait de retarder le prochain maximum glaciaire et de réduire son intensité :

« Du fait de la production industrielle qui engendre l'émission de gaz à effet de serre, il est supposé que les activités humaines actuelles vont engendrer un réchauffement climatique qui perturbera l'évolution naturelle des climats. Un modèle climatique a été utilisé pour simuler l'évolution globale du climat sur le prochain million d'années. La concentration en CO₂ joue un rôle important car elle modifie l'amplitude de la réponse climatique au forçage solaire. Plusieurs scénarios mettant en jeu des concentrations variables en CO₂ ont été identifiés. Les premiers résultats montrent que la prochaine glaciation pourrait *n'avoir lieu que dans quelques centaines de milliers d'années au lieu des prochains 50 000 ans environ attendus*. Dans de telles conditions, les impacts des changements climatiques sur les modèles hydrogéologiques (absence de pergélisol.), la composition des groupes critiques et les modes de représentation des biosphères futures devront être revus afin d'être pleinement intégrés dans les calculs d'impact. »⁴⁴

Malheureusement, des recherches récentes indiquent qu'un retard de la prochaine période glaciaire n'est pas le seul résultat possible et que des conséquences bien plus défavorables sont possibles. Ces dernières années un nombre grandissant d'observations montre que la fonte du pergélisol et de la couverture glaciaire terrestre, en particulier de la calotte

⁴⁴ ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.B, p. 106. C'est nous qui soulignons.

glaciaire du Groenland, ainsi que l'accroissement des précipitations extratropicales dans l'hémisphère nord pourraient perturber de façon critique la circulation globale du courant chaud de l'océan Atlantique Nord et causer l'arrivée soudaine d'une mini période glaciaire dans la plus grande partie de l'Europe en un temps relativement court, et peut-être même rapide.⁴⁵

Sous l'effet de l'évaporation et du refroidissement, la flottabilité des eaux de surface de l'océan Atlantique diminue au fur et à mesure que celles-ci se dirigent vers le Nord. En s'approchant du Groenland, la densité de ces eaux augmente. Elles plongent donc entraînant ainsi l'arrivée d'autres eaux de surface provenant de l'océan Atlantique tropical. Cette eau s'écoule alors en profondeur comme un fleuve géant à travers les océans du monde reparaissant à la surface dans le Pacifique pour circuler à nouveau à la surface de l'océan Atlantique. Ce fleuve océanique global, dénommé, Circulation thermohaline (CTH), constitue une composante essentielle dans la répartition de l'énergie thermique sur l'ensemble de la planète. La formation des eaux profondes dans l'Atlantique nord constitue un maillon essentiel dans la circulation de cette CTH. L'augmentation de la flottabilité de cette composante de la CTH par un afflux d'eau douce pourrait ralentir, et éventuellement arrêter, cette redistribution globale d'énergie.

Les recherches réalisées ces dernières années indiquent que des changements dans la puissance de la CTH ont été accompagnés par des changements brusques du climat, en particulier en Europe qui est réchauffée par le transport des eaux tropicales dans l'Atlantique Nord. McManus et ses collègues au Woods Hole Oceanographic Institution ont en particulier constaté que la formation des eaux profondes s'est nettement réduite ou a complètement disparue, débutant aux alentours de -17 500 pour aboutir aux alentours de -12 700 ans à la période froide de Younger Dryas. Ce changement a coïncidé avec les intervalles de déglaciation les plus froids dans la région Atlantique nord. De plus, la reprise de la formation profonde de l'eau de l'Atlantique nord a coïncidé avec les deux événements de réchauffement régionaux les plus forts pendant la déglaciation.⁴⁶

Les résultats obtenus à partir des données hydrographiques enregistrées dans le détroit du Labrador indiquent que, ces dernières 40 années, l'Atlantique nord s'est refroidi à cause de la fonte des glaces et de l'augmentation des précipitations régionales.⁴⁷ Un article récent de Robert Gagosian, président et directeur du Woods Hole Oceanographic Institution aux Etats-Unis, indique qu'il est possible qu'un refroidissement régional brusque en Europe soit compatible avec une tendance à un réchauffement progressif de la planète :

« Il est important de clarifier que nous ne prévoyons pas une situation soit de refroidissement brusque soit de réchauffement global. Au contraire, le refroidissement régional brusque et le réchauffement global progressif peuvent se dérouler simultanément. En effet, l'effet de serre est un facteur

⁴⁵ Pour une analyse détaillée du risque que le changement climatique représente pour le « tapis roulant » océanique de l'Atlantique nord, voir Gagosian 2003, Rahmstorf et Ganopolski 1999.

⁴⁶ McManus et al. 2004

⁴⁷ Dickson et al. 2002.

déstabilisant qui rend plus probables les changements climatiques brusques. En 2002 un rapport de l'Académie nationale des Sciences des Etats-Unis rapporte que les éléments d'information disponibles suggèrent que des changements climatiques brusques sont non seulement possibles mais probables à l'avenir, et s'accompagneraient d'impacts potentiellement importants sur les écosystèmes et les sociétés. »⁴⁸

Il est difficile de se servir de techniques de « réduction d'échelle » pour évaluer ces brusques variations du climat régional provoquées par les « feedbacks » des augmentations globales de la température. Actuellement, les modèles climatiques à l'échelle planétaire n'incorporent pas les complexités du transfert thermique océanique avec assez de détails pour pouvoir caractériser l'affaiblissement la formation des eaux profondes dans l'Atlantique nord et l'impact qui en résulte sur le climat régional, du point de vue de l'évaluation de la performance du site d'enfouissement.

Les deux modèles décrits dans BIOCLIM par rapport à l'évaluation des effets de modèles climatiques globaux réduits à l'Europe de l'Ouest sont encore en cours d'élaboration et sont des simplifications des modèles climatiques globaux. Dans le premier, que BIOCLIM a adapté pour son usage, qui est appelé MoBiDic, « le modèle de calotte glaciaire est plutôt simple » ; le second, élaboré en partie sous les auspices de BIOCLIM et connu sous le nom de CLIMBER-GREMLINS, conjugue deux modèles. Son modèle de calotte glaciaire est « plutôt complet ».⁴⁹ Toutefois le couplage des deux modèles ne tient pas compte des flux d'eau douce qui proviennent de la fonte d'une calotte glaciaire. Dans la version actuelle du modèle, aucun flux correspondant n'alimente l'océan. »⁵⁰ De ce fait, le rapport intitulé *Continuous climate evolution scenarios over Western Europe (1000 km scale)* incite à la prudence en indiquant que « les résultats de modèle, particulièrement ceux de CLIMBER-GREMLINS, doivent être considérées comme des illustrations de différentes possibilités plutôt que comme des prévisions absolues de l'évolution climatique. L'approche novatrice des changements climatiques qui a été adoptée dans BIOCLIM s'appuie sur des outils de recherche en élaboration constante, notamment en ce qui concerne le modèle CLIMBER-GREMLINS. »⁵¹

Texier et al. ont décrit les effets d'un refroidissement hypothétique lié au ralentissement de la CTH (cependant sur des durées de 50 000 à 178 000 années). La température annuelle moyenne diminuerait de 5 °C. Beaucoup d'autres changements accompagneraient le refroidissement :

« Il faudra s'attendre à des changements substantiels des masses d'eau. Des hivers très froids engendreront la formation d'une couverture de neige étendue et les fleuves seront pris par les glaces. La fonte du printemps sera accompagnée de barrages de glace dans les rivières et de débits maxima très élevés. En conséquence, il y aura une reconfiguration considérable

⁴⁸ Gagosian 2003.

⁴⁹ BIOCLIM D7 2003, p. 7

⁵⁰ BIOCLIM D7 2003, p. 74

⁵¹ BIOCLIM D7 2003, p. 6

des lits des rivières. On s'attend à la présence d'un pergélisol discontinu, recouvert par une couche active saisonnière. On s'attend aussi à la formation de structures de sol telles que des fentes de glace, caractéristiques des régions froides. »⁵²

Dans ce contexte, une érosion rapide et grave et des modes imprévisibles d'occupations post-glaciaires des terres par les hommes sont tout à fait dans le domaine du possible. Les effets radiologiques de ces changements régionaux dépendront considérablement du moment où le changement climatique en question se produira. Des changements dans la CTH pourraient se produire plus rapidement et causer des refroidissements qui pourraient persister pendant des milliers d'années. Différents modèles fournissent des résultats différents

Les modèles utilisés par le groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique ne prédit pas de refroidissement sur l'Atlantique Nord dans l'éventualité d'une diminution rapide de la CTH.⁵³ Mais l'étude de 2002 de l'Académie nationale des sciences (NAS) déjà citée, qui s'appuie sur des modèles utilisés par le Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique, met en garde contre les limites de ces modèles :

« Toutefois, nous ne pouvons exclure la possibilité d'un refroidissement net sur l'Atlantique Nord si la CTH diminue très rapidement. Une telle rapidité du refroidissement exercerait une importante contrainte sur les systèmes naturels et sociétaux. La probabilité d'occurrence de cette situation est inconnue mais probablement très inférieure à celle des scénarios beaucoup plus progressifs inclus dans le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique....Il est bon de se souvenir que des modèles du type de ceux qui sont utilisés dans le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique sous-estiment systématiquement la taille et l'ampleur des anomalies relatives aux anciens changements de la CTH. Si cette sous-estimation résultait d'un manque de sensibilité du modèle, éventuellement lié à une résolution trop grossière ou à d'autres défauts plutôt qu'une spécification inadéquate du forçage, les anomalies climatiques à venir pourraient être étonnamment importantes. »⁵⁴

Dans ce contexte, il faut garder présent à l'esprit un autre problème de changement global pour lequel les prévisions des premiers modèles se sont révélées extrêmement erronées : la diminution de la couche d'ozone. Pendant les années 1970 et au début des années 1980, avant la découverte du trou de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique, les modèles d'appauvrissement de la couche d'ozone portaient d'une chimie en phase

⁵² Texier et al. 2003, pp. 209-210.

⁵³ NAS-NRC 2002, p. 109.

⁵⁴ NAS-NRC 2002, pp. 115-116; c'est nous qui soulignons.

gazeuse et d'une diminution progressive de la couche d'ozone du fait de l'accumulation des CFC dans la stratosphère. Aucune évaluation scientifique n'avait prédit qu'un trou dans la couche d'ozone de la taille d'un continent apparaîtrait au-dessus de l'Antarctique et que les mécanismes dominants feraient intervenir des aspects aussi complexes de la chimie des gaz, des liquides et de la surface des solides (cristaux de glace). Il a fallu réviser la théorie de l'appauvrissement de l'ozone après cette découverte.

Le problème du changement climatique global est beaucoup plus complexe. Il est peu probable que les effets les plus désastreux soient limités à une zone pratiquement inhabitée. Il est encore moins probable que la société humaine soit capable de prendre des mesures comparables à celles qui ont été adoptées pour le trou dans la couche d'ozone pour abandonner les activités polluantes et prévoir un retour au statu quo antérieur en l'espace de quelques décennies. Le fait que les modèles existants du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique soient loin de pouvoir reconstruire les effets historiques des importants changements liés à la CTH devrait conduire à beaucoup de réflexion et de prudence.

Il est à noter que les modèles du Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique cités dans l'étude de l'Académie nationale des sciences ne prennent pas en compte le forçage de l'eau douce résultant de la fonte des glaciers terrestres.⁵⁵ Le modèle de Rahmstorf et Ganopolski intègre ce facteur. En contraste des modèles du Groupe international d'experts le modèle de Rahmstorf et Ganopolski est capable d'estimer avec succès les événements de glaciation du passé. Par conséquent, les estimations de ce modèle sur les conséquences des changements de la CTH sont importantes et pertinentes.

Rahmstorf et Ganopolski présentent des scénarios divers sur les conséquences du forçage de l'eau douce pour l'Atlantique nord. Dans le scénario de fermeture de la CTH (avec une fermeture intervenant après 2100), ils indiquent que sur l'Atlantique Nord la température hivernale de l'air près de la surface à une latitude de 55 °N

« ...augmente de 3 °C jusqu'en 2100 puis chute de près de 3 °C en 40 ans pendant la phase de fermeture rapide de la circulation thermohaline. C'est un rythme de changement extrêmement rapide qui aurait de graves implications écologiques et socio-économiques. *Le refroidissement ne s'arrête pourtant pas là. Il continue jusqu'à la fin du millénaire suivant, à un moment où il fait 6 °C plus froid qu'à la période pré-industrielle.* »⁵⁶

La Figure 2(e) dans cet article indique que la température à la latitude 55 °N serait en l'an 2500 inférieure d'environ 3 °C à celle de l'époque industrielle.⁵⁷ Dans le cas précis des

⁵⁵ ICPP 2001, pp 562-563,

⁵⁶ Rahmstorf and Ganopolski 1999, p. 361-362, c'est nous qui soulignons. Les estimations de températures sont apparemment au-dessus de l'Océan Atlantique.

⁵⁷ Selon l'ANDRA cet article « quantifie la température en France dans les années 2500 dans le cas d'un arrêt de la CTH la température hivernale resterait de 1 à 2 °C supérieure à sa valeur pré-industrielle (années

résultats de sorties de modèles en question, l'article indique que « la faible résolution de notre modèle n'autorise pas des précisions au niveau régional, mais les éléments de la Figure 1 ne laissent guère de doute sur le fait que le grand refroidissement situé au-dessus de l'Atlantique nord toucherait les zones nord-ouest de l'Europe. »⁵⁸ Néanmoins, l'article ne précise pas l'extension de cette zone de refroidissement à l'intérieur de l'Europe ou comment ces effets de refroidissement pourraient diminuer progressivement en allant vers le sud. Enfin, l'article affirme qu'« [a]vec les plages d'incertitudes actuelles, les deux résultats du pic anthropique du taux de CO₂ atmosphérique *ont la même probabilité* : un déclin et une reprise ultérieure ou un effondrement complet de la circulation thermohaline atlantique. »⁵⁹

L'ANDRA a effectué des travaux utilisant des techniques de pointe sur les changements climatiques. Mais il est clair que l'état des connaissances est loin de pouvoir fournir des paramètres des changements climatiques qui s'intégreraient à une évaluation fiable du changement climatique sur une échelle de temps de plusieurs milliers d'années, et encore moins sur un million d'années.

1.5.2 Reconstructions paléo-climatiques

L'approche de l'ANDRA qui consiste à examiner le passé climatologique ainsi qu'à rechercher des environnements analogues dans le présent pour comprendre les futurs environnements possibles, est globalement robuste.⁶⁰

Une information détaillée sur le paléo-climat et le paléo-environnement, en particulier leurs caractéristiques hydrogéologiques, est indispensable au cours du développement des scénarios prédisant l'évolution du site et les changements associés à la dynamique du transfert des radionucléides. La reconstruction locale précise du climat, de l'hydrologie, de la végétation, etc. est très importante parce qu'elle fournit les deux contraintes et moyens de validation pour la modélisation associée au développement des scénarios de l'évolution future de la biosphère.

A en juger par les documents publiés qui décrivent les projets de recherche de l'ANDRA (ANDRA, 2002-2005, ANDRA, 2002), les recherches de l'agence sur cette question insistent pour le moment sur la modélisation plus que sur des recherches spécifiques au site. Sur la période 2000-2003, la recherche a été effectuée principalement dans le cadre du projet international BIOCLIM qui avait pour objectif principal de développer des modèles climatiques à différentes échelles. Des informations paléo-climatiques « concrètes » ont été obtenues à travers deux thèses de doctorat soutenues par l'ANDRA et une collaboration avec le LSCE de l'UMR CEA-CNRS sur deux sources d'informations potentielles (1) la séquence climatique du Bassin de Saint-Omer (Pas-de-

1800). » ANDRA 2004, p. 17. Cependant cela est une misinterprétation du scénario d'un arrêt de la CTH dans Rahmstorf et Ganopolski 1999, lesquels ne mentionnent pas la France .

⁵⁸ Rahmstorf et Ganopolski 1999, p. 362.

⁵⁹ Rahmstorf et Ganopolski 1999, p. 354, c'est nous qui soulignons.

⁶⁰ Les paragraphes suivants de l'étude sur le paléo-climat ont été écrits par Yuri Dublyansky.

Calais) et (2) les dépôts lacustres du lac d'Annecy (Haute-Savoie). Dans le Bassin de Saint-Omer, des informations palynologiques et micro-paléontologiques ont été utilisées pour reconstruire les fluctuations climatiques au cours de l'Holocène. L'objectif de l'étude du lac d'Annecy était de développer une courbe paléo-climatique de haute résolution pour la France à partir des propriétés isotopiques des sédiments du lac.

Ces activités de recherche de l'ANDRA sont pertinentes et importantes. Cependant il faut savoir que la transposition des informations paléo-climatiques de ces deux sites de référence à la région de Bure ne sera pas simple. Les facteurs déterminant le climat français sont nombreux, de sorte qu'un site de référence éloigné ne sera pas nécessairement représentatif du climat sur le site concerné.

« ... la France se situant dans une région soumise à la fois aux influences atlantiques, méditerranéens et continentales, en plus de l'incidence directe de la latitude et des reliefs, il s'agit d'estimer les valeurs des corrections à apporter aux données issues des séquences climatiques de référence (telle que La Grand-Pile ou Le Velay qui sont situées dans des contextes géographiques différents) pour l'application au site. »⁶¹

L'ANDRA paraît parfaitement consciente de cette difficulté :

« ... toute analyse précise et plausible des conditions climatiques et de leur évolution, pour un site (une région), ne peuvent pas être effectuées par simple extrapolation des enregistrements qui servent de références globales, obtenus aux hautes latitudes et en milieu océanique ... A ce jour, les corrections réalisées pour l'application à un site donné sont restées empiriques. »⁶²

Il est crucial de disposer d'informations paléo-climatiques dérivées localement. Les remplissages (spéléothèmes), une importante source d'informations paléo-climatiques et paléo-environnementales, constituent une source précieuse pour des informations spécifiques au site. Cette source d'information a été étudiée de façon assez exhaustive au cours des trente dernières années. Les avantages des études à partir des spéléothèmes ont été résumés par McDermott.⁶³

De nombreuses possibilités de recherche pour les études sur les spéléothèmes sont disponibles, y compris des études spécialisées de pétrographies⁶⁴, des études de distribution spatiale des éléments trace,⁶⁵ et des études sur la composition des éléments stables de l'eau dans les inclusions fluides.⁶⁶ De telles études peuvent fournir des données d'une très haute résolution temporelle (annuelle et même sous

⁶¹ ANDRA BET 2002, p. 222

⁶² Brulhet 2001, p. 11

⁶³ McDermott 2004

⁶⁴ McDermott et al. 1999; Frisia et al. 2000

⁶⁵ McDermott et al. 1999; Frisia et al. 2000

⁶⁶ Serefiddin et al. 2002; McGarry et al. 2004

annuelle,⁶⁷, impossible à obtenir pour d'autres types de « milieu enregistrant » du paléoclimat.

« Si on s'appuie sur la connaissance des évolutions climatique passées, il convient de noter que les événements brefs, notamment saisonniers, ne sont en général pas accessibles à l'échelle des enregistrements climatiques du passé, qui servent de calage pour les estimations du future, dans lesquels ces variations sont lissées.

En effet, les dépôts sédimentaires enregistreurs du climat ne donnent qu'exceptionnellement accès à cette échelle de temps (laminés annuels des dépôts lacustres dans le meilleur des cas) et les possibilités de reconstructions climatiques classiques, basées sur les analyses polliniques notamment, n'atteignent en général pas ce niveau de précision. »⁶⁸

Une datation absolue précise est une condition indispensable pour des études paléoclimatiques des spéléothèmes. Dans le cadre des recherches doctorales soutenues par l'ANDRA, quelques 51 datations radiométriques ont été obtenues à partir de spéléothèmes prélevés dans cinq grottes de l'Est du Bassin parisien.⁶⁹ Toutefois, cette tentative pour obtenir des informations de paléoclimatologie par comparaison des âges radiométriques de spéléothèmes de l'est du Bassin parisien, avec un enregistrement $\delta^{18}\text{O}$ généralisé de coraux marins, SPECMAP⁷⁰ ne correspond pas à des pratiques reflétant l'état des connaissances. Ces informations ne contiennent même aucune donnée se rapportant à l'indicateur standard du paléo-climate, $\delta^{18}\text{O}$.

L'ANDRA devrait mener des recherches paléo-environnementales approfondies, avec des techniques de pointe (dont le paléo-climat et la paléo-hydrologie) sur la base d'information spéléothermique régionale (partie Est du Bassin parisien). Cette recherche, conjuguée avec les résultats de datation déjà disponibles,⁷¹ pourrait permettre une reconstruction substantiellement détaillée du paléo-climat et de la paléo-hydrologie dans cette partie de la France pour les derniers 100 000 ans environ, et encore même plus détaillée pour l'Holocène (les derniers 10 000 ans).

1.5.3 Programme de l'ANDRA sur les changements climatiques pour le site de Bure

L'ANDRA a décrit son approche des changements climatiques dans les parties A et du B du Dossier Argile ainsi que dans BIOCLIM 2001 D1, Annexe A. Le Dossier 2001 Argile envisage un programme séquentiel d'incorporation des effets du changement climatique :

⁶⁷Treble et al. 2003

⁶⁸ Brulhet 2001, p. 6

⁶⁹ Pons-Branchu, 2001

⁷⁰ Pons-Branchu, 2001, p. 156

⁷¹ Pons-Branchu, 2001

« L'objectif des études consiste, à partir de la compréhension des mécanismes de transfert de la radioactivité dans l'environnement, à construire une représentation de la biosphère qui servira à calculer l'impact d'un éventuel stockage sur l'homme et son environnement. Jusqu'à présent, il a été admis que l'homme constituait l'espèce la plus sensible du point de vue des rayonnements ionisants et que le protéger revenait aussi à protéger les autres espèces vivantes. Cette affirmation a été récemment nuancée conduisant à élargir le champ des recherches. Ces dernières visent à identifier les principaux processus de transfert dans un système biosphère de type agricole représentatif du site Meuse/Haute-Marne, à modéliser leur impact sur le long terme, puis à prendre en compte les conséquences de l'évolution climatique future sur les mécanismes de transfert et les modèles de biosphères. »⁷²

La création d'un modèle qui permettrait une estimation des changements climatiques à un niveau régional (par exemple au niveau de la France) résultant de la conjugaison des forçages d'origine naturelle et anthropique à un niveau de détail qui serait pertinent pour l'estimation des impacts sur un site d'enfouissement présente d'immenses difficultés. Notamment les éventuelles modifications de la CTH dans les quelques siècles à venir introduisent non seulement une incertitude sur le sens du changement climatique à un niveau régional ou local, mais aussi sur l'ampleur de ce changement. La façon dont des oscillations à court terme ou des impacts à long terme sur des milliers d'années pourraient affecter les performances sur des durées pertinentes en termes de migration des radionucléides est une question difficile qui demande des travaux supplémentaires considérables. Comme nous le remarquons plus haut, BIOCLIM, qui a effectué un travail reflétant l'état des connaissances sur l'estimation des impacts régionaux, reconnaît les importantes limites de ses modèles et son caractère préliminaire et évolutif. La fonte de la calotte glaciaire induite par les activités humaines et les changements de la CTH d'une façon qui peut être traduite en paramètres de l'évolution de performance ne sont pas encore intégrés.

La fourchette des possibilités en terme de baisse ou d'élévation des températures ne peut pas encore être décrite ou bien comprise, particulièrement dans le contexte d'une fonte rapide de la calotte glaciaire et des changements importants dans la CTH qu'elle peut induire. L'ANDRA envisage d'élaborer un programme de recherche sur le changement climatique spécifique au site en 2005. Ce programme spécifique au site devrait étudier les conséquences potentielles des changements de la CTH, ses effets sur la direction et la magnitude du changement de climat à l'échelle régionale ainsi que sur l'aptitude du site de Meuse/Haute-Marne d'assurer le confinement de déchets radioactifs. De telles recherches seront essentielles pour intégrer la gamme des changements de climat possibles dans une évaluation future de la performance. Tout aussi important, elles peuvent aider à définir les besoins de la recherche, par exemple pour la question de colis de déchets plus robustes dont les caractéristiques pourraient contribuer à réduire les incertitudes se rapportant aux effets du changement climatique sur la performance du système de confinement géologique dans son ensemble.

⁷² ANDRA Dossier 2001 Argile Pt.A, p. 79.

1.6. Références

40 CFR 197, 2004	United States. Environmental Protection Agency. <i>Code of Federal Regulations: Protection of the Environment</i> . Title 40, Part 197: Public health and environmental radiation protection. Washington, D.C.: Office of the Federal Register, National Archives and Record Service; U.S. Government Printing Office, 2004. Searchable on the Web at http://www.gpoaccess.gov/cfr/index.html .
ANDRA 2002-2005	ANDRA (2002-2005). <i>Projet HAVL-Argile Programme Scientifique 2002-2005</i> .
ANDRA 2004	ANDRA. <i>Commentaires sur le rapport provisoire de l'IEER</i> . 12 novembre 2004.
ANDRA BET 2002	ANDRA (2002) <i>Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux</i> . 392 p. (Section Reconstructions Paléo-environnementales et Paléo-climatiques, Scénarios d'évolution future, pp. 221-233)
ANDRA Dossier 2001 Argile	ANDRA. <i>Dossier 2001 Argile, sur l'avancement des études & recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde. Partie A et Partie B</i> . Châtenay-Malabry: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre 2001.
ANDRA Géothermie 2004	ANDRA. <i>Site Meuse/haute-Marne: Géothermie: Inventaire de nouvelles données</i> . Indentification: C.NT.ASMG.04.0001. Date d'origine: 18/03/2004.
ANDRA Scellement 2001	ANDRA. <i>Projet HAVL: Scénario de défaut de scellement et/or de transfert par la zone endommagée autour des scellements et des bouchons de BO: Definition</i> . Indentification: SUR NT ADSU 00-038/B. Date d'origine: 24/07/00. Rév. B : 30/03/01
Bauer, Pépin, and Lebon 2003	C. Bauer, G. Pépin and P. Lebon. <i>EDZ in the performance assessment of the Meuse/Haute-Marne site: conceptual model used and questions addressed to the research program</i> . European Commission - EDZ cluster conference, November 3-5, 2003. [Conference: Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories.] ANDRA C.TR.ADSU.03.031.B. On the Web at http://www.sckcen.be/sckcen_en/activities/conf/conferences/related_sck/20031103/Lectures/IC6.pdf .
BIOCLIM D1 2001	BIOCLIM. <i>Deliverable D1, Environmental Change Analysis</i> . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2001. On the web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d1.pdf .
BIOCLIM D7 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D7: Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000km scale)</i> . Work package 2: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d7.pdf .
BIOCLIM D8a 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D8a: Development of the rule-based downscaling methodology for BIOCLIM Workpackage 3</i> . Work package 3: Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d8a.pdf .

BIOCLIM D8b 2003	BIOCLIM. <i>Deliverable D8b: Development of the physical/statistical downscaling methodology and application to climate model CLIMBER for BIOCLIM Workpackage 3.</i> Work package 3. : Simulation of the future evolution of the biosphere system using the hierarchical strategy. . Châtenay-Malabry: ANDRA, 2003. On the Web at http://www.andra.fr/bioclim/pdf/d8b.pdf .
Brulhet 2001	J. Brulhet. (2001) Analyse des variations climatiques possibles a l'échelle des prochains 20 000 ans. Projets Nouveaux. Stockage des déchets radifères. Note techniques. ANDRA. (Identification: F NT AGE 01-017). Date d'origine : 09/02/2001.
Clark et al. 2002	Peter U. Clark, Nicklas G. Pias, Thomas F. Stocker, & Andrew J. Weaver. "The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change." <i>Nature</i> 415 , 21 February 2002, pp. 863-869.
CLIS	Comité local d'information et de suivi du laboratoire de Bure. Réunions et colloques. Bar-le-Duc, France. See the CLIS website at http://www.clis-bure.com/cadres/c_reunions.html .
CNE 1997	Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs. <i>Rapport d'Evaluation N° 3</i> . Paris: CNE, Septembre 1997.
CNE 2000	Commission Nationale d'Evaluation Relative aux Recherches sur la Gestion des Déchets Radioactifs. <i>Rapport d'Evaluation N° 6</i> . Paris: CNE, Juin 2000.
Dickson et al. 2002	Bob Dickson, Igor Yashayaev, Jens Meincke, Bill Turrell, Stephen Dye & Juergen Holfort. "Rapid freshening of the deep North Atlantic Ocean over the past four decades." <i>Nature</i> 416 , .25 April 2002. pp. 832-837, 2002. On the Web at http://asof.npolar.no/library/pdf/dicksonetal.pdf .
Frisia et al. 2000	Silvia Frisia, Andrea Borsato, Ian J. Fairchild, and Frank McDermott. "Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and southwestern Ireland." <i>Journal of Sedimentary Research</i> 70 (5) September 2000, pp.1183-1196.
Frisia et al. 2003	Silvia Frisia, Andrea Borsato, Nereo Preto, Frank McDermott, (2003) Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> 216 (2003) pp. 411-424.
Gagosian 2003	Robert B. Gagosian, "Abrupt Climate Change: Should We Be Worried?" prepared for a panel on abrupt climate change at the World Economic Forum, Davos, Switzerland, January 27, 2003. Woods Hole, MA: Woods Hole Oceanographic Institution, 2003. On the Web at http://www.whoi.edu/institutes/occi/images/Abruptclimatechange.pdf .
Gopal and Makhijani 2001	Sriram Gopal and Arjun Makhijani. <i>Setting Cleanup Standards to Protect Future Generations: The Scientific Basis of the Subsistence Farmer Scenario and Its Application to the Estimation of Radionuclide Soil Action Levels (RSALs) for Rocky Flats</i> . Takoma Park, MD: Institute for Energy and Environmental Research, December 2001. On the Web at http://www.ieer.org/reports/rocky/toc.html .
Gros 2003	J.C. Gros. <i>Etat des connaissance sur la présence de ressources géothermiques dans le sous-sol du Site de l'Est</i> . IRSN/DPRE/SERGD. Rapport DPRE/SERGD 03-12 bis. Fontenay-aux-Roses: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Département de protection de l'environnement, Mai 2003.

Housse et Maget 1976	B. Housse et Ph. Maget. <i>Potentiel géothermique du Bassin Parisien. Compte rendu de fin de contrat d'une étude réalisée par le BRGM et Elf Aquitaine</i> , Financée par la DGRST (Comité: A.C.C. Géothermie) - Contrat no 74-7-0990, 125 p., 29 pl. Hors-texte, Mai 1976. As cited by Gros 2003.
IAEA BIOMASS 6	IAEA. <i>"Reference Biospheres" for solid radioactive waste disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme</i> . Part of the IAEA Co-ordinated Research Project on Biosphere Modelling and Assessment (BIOMASS). IAEA-BIOMASS-6. International Atomic Energy Agency, July 2003.
ICRP 81	International Commission on Radiological Protection. <i>Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste</i> . Annals of the ICRP, v. 28, no.4. ICRP Publication 81. Kidlington, Oxford, UK ; Tarrytown, NY, December 1998.
IPCC 2001	Intergovernmental Panel on Climate Change. <i>Climate Change 2001: The Scientific Basis</i> . Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and D. C.A. Johnson. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. On the Web at http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1 .
Kautsky et al. 2000	Ulrik Kautsky, Allan Hedin, Fredrik Lindström, Lena Morén, Tönis Papp, Patrik Sellin & Jan-Olof Selroos. "The Safety Assessment of High Level Waste in Sweden- SR97." T-18-3, P-5-337. On the Web at http://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00422.pdf . From the reports of the Topical Session: T-18: Management of Long-Lived and High-Level Radioactive Waste, of the 10th Congress of the International Radiation Protection Association, 14 – 19 May 2000, Hiroshima, Japan.
Maget et Rimbaud 1980	Ph. Maget et D. Rambaud. Possibilités géothermiques de la région "Champagne-Ardenne" – II Etude hydrogéologique de sites. Société Nationale pour l'Application de la Géothermie / GEOCHALEUR. Rapport BRGM / SGN no. 80 SGN 649 GTH / CHA, septembre 1980As cited by Gros 2003.
McDermott 2004	Frank McDermott. (2004) Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. <i>Quaternary Science Reviews</i> 23 (2004) 901–918.
McDermott et al. 1999	Frank McDermott, Silvia Frisia, Yiming Huang, Antonio Longinelli, Baruch Spiro, Tim H.E. Heaton, Chris J. Hawkesworth, Andrea Borsato, Eddy Keppens, Ian J. Fairchild, Klaas van der Borg, Sophie Verheyden, Enrico Selmo. (1999) Holocene climate variability in Europe: Evidence from $\delta^{18}\text{O}$, textural and extension-rate variations in three speleothems. <i>Quaternary Science Reviews</i> 18 (1999) 1021-1038.
McGarry et al., 2004	Siobhan McGarry, Miryam Bar-Matthews, Alan Matthews, Anton Vaks, Bettina Schilman, Avner Ayalon. "Constraints on hydrological and paleotemperature variations in the Eastern Mediterranean region in the last 140 ka given by the δD values of speleothem fluid inclusions." <i>Quaternary Science Reviews</i> 23 (2004) 919–934
McManus et al. 2004	J.F. McManus, R. Francois, J.-M. Gherardi, L.D. Keigwin & S. Brown-Leger. "Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes." <i>Nature</i> 428 , 834-837 (2004) <i>Letters to Nature</i> . Summary on the web at http://www.nature.com/cgi-taf/DynaPage.taf?file=/nature/journal/v428/n6985/abs/nature02494_fs.html .

NAS-NRC 1995	National Research Council. Committee on the Technical Bases for Yucca Mountain Standards. , <i>Technical Bases for Yucca Mountain Standards</i> . Committee on the Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 1995.
NAS-NRC 2002	National Research Council. Committee on Abrupt Climate Change. <i>Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises</i> . Committee on Abrupt Climate Change, Ocean Studies Board, Polar Research Board, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 2002. Summary on the Web at http://www.nap.edu/books/0309074347/html .
Pigford 1995	Thomas H. Pigford. Appendix E: Personal Supplementary Statement of Thomas H. Pigford. In <i>Technical Bases for Yucca Mountain Standards</i> , by the Committee on Technical Bases for Yucca Mountain Standards, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council. Washington, DC: National Academy Press, 1995. pages 161-185.
Pigford 1997	Thomas H. Pigford. “The Yucca Mountain standard: proposals for leniency.” <i>Science for Democratic Action</i> , v. 6, no. 1, May 1997.
Pons-Branchu 2001	Edwidge Pons-Branchu (2001) <i>Datation haute résolution de spéléothèmes (²³⁰Th/²³⁴U et ²²⁶Ra/²³⁸U)</i> . Application aux reconstitutions environnementales autour des sites du Gard et de Meuse/Haute-Marne. Thèse de l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille. GdR FORPRO CNRS-ANDRA G0788. 12 décembre 2001
Rahmstorf et Ganopolski 1999	Stefan Rahmstorf and Andrey Ganopolski. “Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model.” <i>Climatic Change</i> 43 (1999) pp. 353–367.
Règle N° III.2.f	Règle N° III.2.f (10 juin 1991) <i>Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que reacteurs Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides</i> .
Schwartz et Randall 2003	Peter Schwartz et Doug Randall. <i>An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security</i> . October 2003. On the Web at http://www.ems.org/climate/pentagon_climatechange.pdf . Report commissioned by the United States Department of Defense.
Serefiddin et al. 2002	F. Serefiddin, H.P. Schwarcz, and D.C. Ford. Paleotemperature reconstruction using isotopic variations in speleothem fluid inclusion water. . <i>Geochimica et Cosmochimica Acta</i> , 66 . Special Supplement. Abstracts of the 12th Annual V.M. Goldschmidt Conference, Davos, Switzerland, August 18-23, 2002, p. A697.
Texier et al. 2003	D. Texier, P. Degnan, MF Loutre, D. Paillard and M. Thorne. “Modelling sequential BIOSphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal. Project BIOCLIM.” In 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference, March 30-April 2, 2003, Las Vegas, Nevada. Chicago: American Nuclear Society, 2003. pp. 202-212. A copy on the Web at http://www.andra.fr/bioclim/publications/LasVegas.pdf .

Treble et al. 2003	Pauline Treble, J.M.G. Shelley, John Chappell. Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. <i>Earth and Planetary Science Letters</i> 216 (2003) 141-153.
US Court 2004	United States Court of Appeals for the District of Columbia Circuit, No. 01-1258, Nuclear Energy Institute, Inc. <i>contre</i> Environmental Protection Agency, Débat du 14 janvier 2004, Décision du 9 juillet 2004. On the Web at http://www.epa.gov/radiation/docs/yucca/dc_circuit_ruling.pdf .

