

## Chapitre 3. Aspects thermiques dans la conception et la construction des ouvrages d'enfouissement

George Danko

### Conclusions principales

Le concept de stockage de l'ANDRA's n'est pas étayé par un modèle numérique crédible, qui satisfait aux objectifs thermiques. Tout particulièrement, l'ANDRA n'a pas démontré dans ses travaux la corrélation entre (a) la conception de stockage, (b) la caractérisation du site, et (c) la modélisation.

Aucune évidence ne se trouve d'une évolution des modèles allant de modèles simples, puis de modèles d'ensemble, ou de modèles conceptuels pour aboutir à des modèles de conception du stockage et d'une évaluation du site. Les possibilités d'évaluer les modèles en les comparant aux résultats expérimentaux directs ont été omises. Les modèles simples décrits dans les documents ne semblent pas satisfaire à l'évaluation/la vérification des propriétés thermophysiques du site.

La raison pour laquelle les résultats de modèles unidimensionnels sont incorporés dans la modélisation inverse des expérimentations in situ n'est pas claire; l'écoulement de la chaleur est loin d'être un problème linéaire et unidimensionnel. Même le modèle analytique bidimensionnel pour un dispositif chauffant d'une longueur infinie s'avère être un modèle très médiocre pour un dispositif utilisant un élément chauffant de seulement 2 m de long. La grande différence entre les modèles bidimensionnels, analytiques, et les modèles tridimensionnels, numériques disqualifie les autres modèles. Il est même contestable que les conditions d'un modèle pour un domaine tridimensionnel qui postule des propriétés matérielles/physiques homogènes et isotropes soit satisfaisant, puisque la stratigraphie du site de Bure révèle des séquences dont les propriétés diffèrent selon les différentes directions.

La conductivité thermique, une des caractéristiques la plus importante du site thermophysique, n'a pas été proprement définie. L'écart-type de ce paramètre est exceptionnellement élevé. Il laisse donc une grande marge d'incertitude dans la capacité du site à dissiper la chaleur. Le nombre d'échantillons utilisés pour établir les propriétés thermophysiques du site à partir d'échantillons de laboratoire semble être trop petit, tout particulièrement quand la possibilité de variabilité spatiale des ces propriétés dans la zone prévue de stockage est prise en compte.

Bien que le régime des températures selon le concept de stockage de référence se situe en dessous du point d'ébullition, il n'est pas impossible d'avoir une situation où la température dépasse le point d'ébullition. Dans certaines circonstances le développement d'un système binaire stable – c'est-à-dire un système caractérisé par des températures soit au dessus, soit en dessous du point d'ébullition - dans la zone de stockage est tout à fait possible. La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, notamment si le matériau tampon de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones de condensation de la zone de stockage.

Puisque, dans la conception du stockage retenue, on peut s'attendre à des températures supérieures au point d'ébullition dans les modules de déchets de type C et de combustible utilisé pendant de longues périodes, ces modules peuvent développer des cycles de vapeur continus dans la zone de stockage et cela pendant des siècles. Cependant, aucun effort de réévaluation n'a pu

être trouvé dans la documentation traitant de la détermination "d'une charge thermique critique" (CTC) pour chaque colis de déchets dans son aire de stockage. La conception et l'exploitation d'une installation nucléaire de stockage dépassant la limite CTC au site de Bure semble être une contradiction en regard de la prévisibilité.

Il n'existe dans les documents aucune discussion et aucune étude justificative de modèle sur l'effet de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire potentielle pendant la ventilation, et l'extension de l'EDZ qui s'ensuit. L'exploitation souple de type entreposage est un vœu indiqué, mais les conséquences d'une telle souplesse en termes d'effets d'altération du site n'ont pas été établies.

## Recommandations

- 1. Propriétés thermophysiques de Bure:** Conduire une caractérisation plus détaillée du site de Bure concernant les propriétés thermophysiques, particulièrement celles des alvéoles dédiées au combustible usé
- 2. Des essais thermiques in situ:** Inclure les propriétés thermophysiques et la vérification du modèle thermique dans les essais de chauffage in situ à grande échelle sur le site de Bure
- 3. Des techniques informatiques plus avancées:** Employer des techniques numériques-informatiques de modélisation inverse plus sophistiquées pour l'évaluation des essais thermiques in situ sur le site de Bure.
- 4. Modes pour les processus thermiques:** Développer/adopter et vérifier des modèles numériques de base de conception pour les processus thermiques qui comprennent les domaines relatifs à l'échelle proche du colis de déchet, aussi bien qu'à l'échelle du massif. Coupler ces modèles aux effets thermo-hydrologiques et géomécaniques pertinents.
- 5. Limites de la CTC :** Établir les limites de la CTC pour les alvéoles dédiées à recevoir le combustible usé en utilisant les propriétés du site et les modèles couplés thermo-hydrologiques-vapeur/air pertinents.
- 6. La migration de la vapeur à haute température :** Étudier les effets éventuels (changements chimiques, minéralisation) de la migration à hautes températures de vapeur dans le matériau de remblayage comme dans les fractures de la zone endommagée dans l'argilite.
- 7. Effet de la ventilation pendant des durées prolongées:** Evaluer d'une façon critique les effets de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire qui en résulte et l'extension de l'EDZ tout particulièrement dans le contexte d'une stratégie d'exploitation d'une installation d'entreposage pour laquelle les galeries pourraient être maintenues ouvertes et aérées pendant des durées prolongées
- 8. Modèle thermique-hydraulique-de ventilation couplé .** Utiliser un modèle de simulation thermique-hydraulique-de ventilation couplé pour l'analyse de la température et des champs de désaturation dans et autour des galeries de stockage dans l'EDZ , ceci pendant la période précédant la fermeture.

### 3.1 Introduction

Quelque soit le site de stockage de déchets nucléaires à haute activité, l'effet thermique sur la sûreté et la performance de l'installation est une question de premier ordre. Dès le début de ce chapitre, il est nécessaire d'apporter quelques clarifications sur la nature des matériaux nucléaires exothermiques destinés à être évacués dans le site de stockage. On considère généralement qu'un matériau nucléaire à stocker pendant une période indéfinie (bien que réversible) dans un site de stockage géologique est un "déchets." Ce n'est toutefois pas le cas dans le programme français d'entreposage de déchets nucléaires. Dans toute la documentation de l'ANDRA, le terme «Déchet» se réfère spécifiquement aux matières nucléaires de types B et C. La chaleur émise par les déchets de type B est assez faible pour être insignifiante, alors que celle émise par les déchets de type C représente une charge thermique considérée de moyenne à élevée.<sup>1</sup> Une décroissance nucléaire intense à laquelle est associé un dégagement thermique élevé est le fait d'un autre matériau nucléaire : "le combustible usé" spécifiquement le MOX (Mixtes Oxydes) et l'UOX (combustible à base d'oxyde d'uranium) ainsi que l'URE (Uranium de retraitement réenrichi) qui sont les combustibles nucléaires du programme français. Dans le scénario de mise en place, S2 également appelé le modèle « de stockage direct » il est envisagé d'évacuer le combustible usé dans le site de stockage.<sup>2</sup> L'inventaire du combustible usé est significatif. Il représente plus de 60 % de l'ensemble des matériaux nucléaires à stocker dans le site de stockage proposé.<sup>3</sup> En raison de son important volume et puisque le stockage du combustible nucléaire fait partie du programme français de gestion de déchets, dans ce chapitre le terme "déchets" est employé dans un sens général pour tous les matériaux nucléaires évacuables.

L'importance des questions thermiques est sous tendue par trois raisons majeures:

1. Tout d'abord, avec l'impact des travaux de construction, la chaleur est la principale perturbation durable sur la formation hôte. Une fois les déchets mis en place et les cavités remplies de matériaux de remblayage et scellées, la couche hôte est reconstituée. Toutefois, la chaleur l'empêche de revenir à son état d'origine. Des milliers d'années s'écouleront avant que la charge thermique s'affaiblisse assez pour que les processus causés par la chaleur se dissipent.
2. Ensuite, l'effet de la chaleur, c'est-à-dire, l'élévation de la température du site de stockage se développe plus lentement. Par conséquent l'évolution de la température maximale peut être retardée de plusieurs centaines d'années. Une erreur de prédiction sur la charge thermique pourrait induire des effets permanents et mêmes impossibles à corriger.
3. Finalement, cette longue période de temps s'applique à une roche hôte de volume et dimensions importants, bien supérieurs en taille à la zone de travaux. D'un autre côté, les zones du champ proche, à proximité de la source de chaleur, ont une influence majeure sur le champ thermique. Cet aspect multidimensionnel du problème pose de grands défis pour la modélisation et la prédiction des réponses

---

<sup>1</sup> Voir la discussion dans ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt. A et Pt.B

<sup>2</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

<sup>3</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, Tableau VI.1-1

thermiques. En outre, l'important volume de la roche hôte soulève une question importante concernant l'hétérogénéité et la variabilité spatiale. Les variations spatiales de la charge thermique au sein de la zone de mise en place des déchets, ainsi que les variations des propriétés thermiques de la roche hôte ont comme effet de rendre plus complexes tant les tâches de modélisation que celles d'acquisition des propriétés du site

Quatre thèmes seront abordés ici :

1. le programme de caractérisation thermique du site et les données de base nécessaires pour la conception du site de stockage;
2. la démonstration des modèles analytiques destinés à évaluer la réponse thermo-hydrologique des barrières ouvragées et géologiques;
3. les méthodes d'évaluation/de mesures à employer pour déterminer les propriétés thermo-hydrologiques des éléments du système des barrières ouvragées notamment les scellements et les matériaux de remblayage ; et
4. le programme de gestion pour caractériser, mélanger, et, éventuellement laisser en entreposage des déchets nucléaires avant leur mise en place dans le site d'enfouissement.

### 3.2 Programme de caractérisation thermique du site et base des données de conception qui en découle

Le programme de recherche présenté dans le document *E-TER*<sup>4</sup> décrit un programme détaillé dont l'objectif est l'étude du comportement et des propriétés des argilites sous l'effet de la charge thermique. Dans le chapitre 2, le document explique les objectifs et les expérimentations à mener pour caractériser:

- «le comportement thermique, par la caractérisation des propriétés thermiques (conductivité ou diffusivité thermique et chaleur spécifique) ;
- le couplage thermomécanique : déplacement, dilatation, endommagement et fissuration thermique, modules d'élasticité et de résistance sous température ;
- les couplages thermohydraulique et thermohydromécanique : dilatation différentielle entre le fluide interstitiel et la matrice solide, désaturation, perméabilité, vaporisation, surpression et dépression interstitielles.»

Le document *E-TER* a été préparé en 2000 à partir des conclusions du programme de mesures en laboratoire mené entre 1994 et 1996. D'après les études de laboratoire décrites dans le document *Modèles rhéologiques des argilites de l'EST – bilan d'étape des études rhéologiques*,<sup>5</sup> il s'avèrerait que les couplages, c'est-à-dire, les interactions entre les systèmes mécanique-thermique (M→T) et hydraulique-thermique (H→T) sont négligeables. Il est donc possible de découpler l'équation thermique des équations mécaniques et hydrauliques.

---

<sup>4</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>5</sup> ANDRA Modèles rhéologiques 1999 cité dans ANDRA Cahier des charges E-TER, Section 2.1.1

## 3.2.1 L'évaluation de l'interaction H→T

### 3.2.1.1 La question de la perméabilité

L'hypothèse de l'interaction H→T présentée dans le document E-TER se base essentiellement sur les résultats d'essais en laboratoire obtenus sur la perméabilité de la roche hôte. La conclusion est logique et semble pouvoir être acceptable puisqu'elle traite tout particulièrement de la très faible perméabilité de l'argilite. La littérature fait apparaître qu'un consensus est atteint sur le sujet de l'interaction H→T dans les roches hôtes de faible perméabilité. Une discussion sur ce sujet est présentée dans E-TER.<sup>6</sup> Selon la conclusion de Giraud présentée dans Cuisiat et Besnus,<sup>7</sup> le modèle hydrologique n'est pas nécessaire pour résoudre le problème thermique. Cependant, il n'est pas démontré que cette hypothèse sera également valable pour la zone perturbée autour des excavations résultant des dommages créés par le creusement des galeries et la fracturation de la roche hôte. L'analyse en laboratoire d'échantillons, même prélevés dans la zone endommagée, ne pourra pas forcément représenter fidèlement les conditions in situ. Par nature les échantillons sont de petites dimensions et ne peuvent pas préserver les caractéristiques des fractures. Par conséquent, il n'est pas évident que l'hypothèse sur l'interaction H→T demeurera valide pour la zone la plus importante de la roche hôte du site d'enfouissement proposé, c'est-à-dire, la zone à proximité immédiate de la galerie de mise en place pendant la phase thermique.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) étudie les propriétés de la formation d'argilite dans le laboratoire souterrain de Tournemire (France).<sup>8</sup> En raison de la conductivité hydraulique très faible de l'argilite, le coefficient de Darcy à travers cette roche devrait être très faible. Des traceurs comme le deutérium et le chlorure sont utilisés pour étudier l'écoulement liquide des eaux interstitielles. Les résultats indiquent que le mécanisme d'écoulement prépondérant est celui de la diffusion. Cependant il pourrait exister d'autres mécanismes de transfert à proximité des failles et des fractures. Alors que le modèle de transport par diffusion moléculaire apparaît valable pour une roche argileuse massive dépourvue de fractures, l'écoulement à proximité des fractures et des failles donne des résultats plus complexes et variés. Par conséquent, bien que l'on s'attende à un transport des traceurs surtout diffusif dans les argilites, un deuxième processus dans la zone perturbée pourrait renforcer la migration. L'important gradient thermique au sein et autour de la zone des colis de déchets pourrait engendrer un processus secondaire de cette nature.

On peut faire l'hypothèse que toute apparition d'humidité dans la matrice et les fractures de l'argilite causée par la charge thermique sera plus importante autour des alvéoles, là où le gradient thermique est le plus élevé. Cette zone coïncide avec la zone affectée et vraisemblablement endommagée par le creusement, dénommée Excavation Damaged Zone (EDZ). Il se peut que la désaturation ainsi que la ventilation de l'EDZ durant la

---

<sup>6</sup> ANDRA Modèles rhéologiques 1999 cité dans ANDRA Cahier des charges E-TER, Section 2.1.1 [ Cuisiat & Besnus 1999

<sup>7</sup> Cuisiat et Besnus 1999, citing Giraud 1993

<sup>8</sup> Patriarche 2001

phase de construction des ouvrages induisent des fissurations secondaires et une extension de l'EDZ. Le concept de réversibilité/flexibilité tient une grande place dans le programme français. Cependant il risque d'imposer de longues périodes de ventilation pour les galeries de mise en place. La description du concept d'exploitation d'un entreposage<sup>9</sup> réversible ne répond pas à la question de la durée maximale de la ventilation des galeries ouvertes qui pourrait éventuellement être de plusieurs dizaines ou même centaines d'années. Jusqu'où la zone de désaturation pourrait-elle pénétrer durant 50 ou même 100 ans de ventilation? Les fissurations causées par les effets simultanés de la chaleur et de l'assèchement par l'air chaud pourraient-elles compromettre la partie de la couche du Callovo-Oxfordien située au-dessus et en dessous de l'horizon du site de stockage ? Une meilleure compréhension des effets de la ventilation pourrait s'avérer nécessaire pour répondre à ces questions, mais nous n'avons trouvé dans les documents aucun modèle ou données sur ce sujet. Il se pourrait que la redistribution des eaux souterraines dans l'EDZ durant la période thermique, et tout particulièrement après la resaturation, induise des changements dans la composition chimique. Par conséquent, les processus de couplage relatifs au mouvement des eaux souterraines dans l'EDZ sont importants pour la performance du système de barrières ouvragées. Le développement potentiel d'un mouvement secondaire d'eaux souterraines causé par une telle poussée hydrostatique dans l'EDZ pendant la période thermique ne peut pas être écarté d'emblée. Ce genre de phénomène peut, ou peut ne pas être significatif pour le fonctionnement et la performance de confinement du site de stockage proposé. Néanmoins, il n'est pas possible d'accepter ou de rejeter l'hypothèse utilisée dans le document E -TER<sup>10</sup> tant que les implications ne sont pas mieux comprises.

### **3.2.1.2 La question de la saturation**

Concernant la teneur en eau de la roche à proximité immédiate de l'excavation, une interaction H→T est importante. Pendant plusieurs années, au minimum, et peut-être plusieurs décennies, la roche dans la zone endommagée ne sera peut-être pas entièrement saturée. Des investigations numériques ont établi les profils de désaturation attendus en supposant des conditions plausibles aux limites.<sup>11</sup> Une variation de la saturation causera certainement une variation de la conductivité thermique. L'EDZ est un domaine critique pour la modélisation puisque c'est dans cette zone que le gradient de la température, qui est inversement proportionnel au rayon, est le plus élevé. Cela se traduit par une élévation importante de la température près la paroi de l'alvéole. Par conséquent, l'évolution de la température critique et maximale est principalement affectée par la conductivité de la chaleur dans cette zone.

### **3.2.1.3 La question de la modélisation**

Des analyses de sensibilité numériques pourraient éventuellement être utilisées pour étudier l'effet des variations de la perméabilité sur les champs de température et les champs de flux thermique ainsi que sur la circulation des eaux par thermosiphon dans la

---

<sup>9</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A

<sup>10</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>11</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

zone endommagée sous l'influence de la charge thermique. Il faut cependant souligner que le modèle thermique utilisé dans le document, un modèle analytique simple qui n'incorpore que la conduction de la chaleur, ne serait pas suffisant pour ce genre d'étude. Un modèle plus complexe de transport thermique, de conduction-convection, serait nécessaire pour étudier la conduction thermique dans des conditions de circulation de l'eau simultanément dans les pores et les fractures de la roche. Par conséquent, une faiblesse potentielle affecte ce modèle. Celui-ci ne pourra être utilisé que pour un cas simplifié, mais il ne peut pas être utilisé pour tester la sensibilité du modèle aux variations des hypothèses de la modélisation.

Le modèle thermique présenté n'est pas assez général, même pour la conduction thermique, pour intégrer la totalité de la variabilité potentielle de la conductivité thermique, et de la diffusivité qui lui est associée, pour la prévision de la température ainsi que les études de sensibilité. Des modèles numériques capables d'intégrer de telles variations peuvent être trouvés dans le commerce sans problèmes, et l'importance du programme de l'ANDRA justifie certainement leur application à l'avenir. Malgré cela nous n'avons trouvé aucune application de modèles numériques thermo-hydrauliques avancés dans notre revue documentaire.

Une question de modélisation toute aussi importante est l'analyse du développement potentiel d'un mécanisme de conduction-convection-migration de la vapeur-condensation dans le système de la barrière ouvragée et de la zone endommagée pendant la phase de saturation partielle de l'opération. La figure 3.1 présente le schéma conceptuel de la circulation eau-vapeur-eau condensée dans un système schématique, fermé, à température variable. Il est possible de concevoir un cycle continu de vapeur entre les zones centrales du site, relativement chaudes, et celles éloignées, relativement froides. Bien que le régime de températures, selon la conception de référence, se situe en dessous du point d'ébullition, une température au-dessus de celui-ci n'est pas impossible. Il est tout à fait possible qu'il pourrait se développer un système binaire dans lequel:

1. soit un régime de températures en dessous du point d'ébullition prévaut si le remblayage et la roche peuvent se resaturer (et les conductivités thermiques augmentent pour atteindre des valeurs élevées de saturation d'eau engendrant des températures basses) ;
2. soit un champ de températures au-dessus du point d'ébullition se développe si le remblayage et la roche ne peuvent pas se resaturer (et les conductivités thermiques restent celles du remblayage désaturé et de l'EDZ)

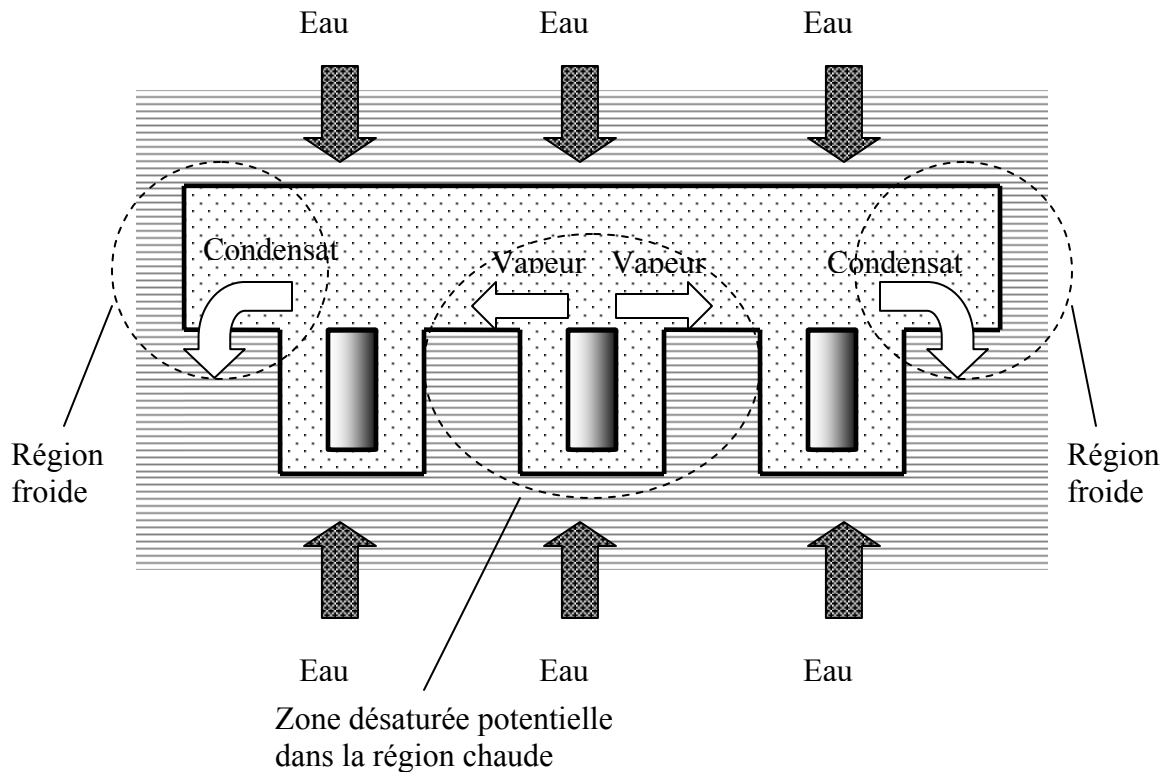


Figure 3-1. Schéma conceptuel des circulations des condensats eau-vapeur dans un système, fermé à température variable

La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, à savoir, si le matériau de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones froides de condensation du site de stockage.

Il est envisagé que le programme de modélisation E-TER offre l'opportunité d'un calibrage de modèle. Dans les conditions de charge thermique critique, les modèles simples présentés dans l'E-TER ne suffiront pas pour analyser les conditions complexes, tridimensionnelles, des écoulements partiellement saturés qui peuvent dominer la période la plus critique du fonctionnement allant de quelques décennies à plusieurs centaines d'années. La question de la modélisation sera plus approfondie dans les sections 3.2.3.2 et 3.3 de cette analyse critique.

## 3.2.2 L'évaluation des interactions M→T

### 3.2.2.1 La question de la saturation

Le champ de contrainte dans une roche poreuse et fracturée peut directement affecter le flux thermique et le champ thermique tout au long des changements dans la résistance de contact entre les grains de la roche ainsi qu'à l'ouverture des fractures. La pression/sensibilité à la contrainte de la résistance de contact entre les surfaces rugueuses est un phénomène bien connu qui peut avoir des effets significatifs, particulièrement dans la zone endommagée du site de Bure. Un autre effet, peut-être encore plus pertinent, peut être postulé vu les interactions  $M \rightarrow H \rightarrow T$  encore plus complexes et indirectes. L'ouverture capillaire change sous l'effet de la contrainte, influençant la saturation, et particulièrement la re-saturation de l'EDZ pendant la période la plus active thermiquement, de quelques centaines d'années. On peut se poser une question à propos de la stabilité : la rapide désaturation engendrée par la température peut-elle réduire la contrainte de compression et, ce faisant, accroître davantage l'ouverture des fractures, diminuer la rétention capillaire et réduire davantage la saturation et par conséquent diminuer la conductivité thermique et augmenter la température? La saturation a un effet majeur sur la conductivité thermique et sur le champ de températures qui en découle. Un mécanisme d'auto-aggravation avec une réaction positive, déstabilisante en retour est observé ici et sera traité dans le sujet de la stabilité. Par conséquent, il est important d'inclure les interactions indirectes  $M \rightarrow T$  qui sont importants et ne peuvent pas être d'emblée négligées. La discussion dans le document E -TER n'aborde pas l'interaction  $M \rightarrow H \rightarrow T$ . Quelques réflexions supplémentaires dans ce domaine pourraient mériter davantage d'attention.

### **3.2.2.2 La question de la conductivité**

A partir des informations fournies, il n'est pas évident si l'interaction directe  $M \rightarrow T$  a été jugée négligeable en raison des difficultés rencontrées dans l'évaluation de cet effet en laboratoire sur de petits échantillons, ou pour une autre raison. La variation de la conductivité thermique sous l'effet d'une contrainte variable est un phénomène connu, mais néanmoins peu compris. Cet effet est probablement beaucoup moins important dans une formation rocheuse de faible perméabilité et de faible porosité, du type de l'argilite de Bure, que dans une roche poreuse et grenue. Cependant, les valeurs in situ de conductivité de la chaleur obtenues à partir de mesures faites directement sur le terrain sont presque toujours plus élevées, parfois de 100 %, que les conductivités mesurées en laboratoire sur de petits échantillons provenant du même endroit mais avec une saturation significativement moindre et sans pression de confinement pendant les mesures de laboratoire. Il est difficile de séparer les effets combinés de la saturation (c'est-à-dire la teneur en eau) et de la contrainte mécanique. Le document E -TER,<sup>12</sup> dans la section 2.1.2, reconnaît l'existence d'une éventuelle incertitude dans la conductivité thermique due à la variation de la seule saturation. Les mesures in situ proposées dans les diverses zones géomécaniques sont présentées dans le document comme une solution pour ajuster le modèle thermique de la couche hôte pour le site de Bure. Cette approche est satisfaisante pour vérifier les hypothèses des modèles ainsi que pour établir les facteurs d'échelle entre le laboratoire et les mesures sur le terrain.

---

<sup>12</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

### 3.2.3 Le programme de mesure in situ sur le site de Bure

La nécessité de faire des mesures in situ est bien exposée et argumentée dans le document E -TER.<sup>13</sup> En plus des paramètres les plus pertinents pour la performance thermique, c'est-à-dire la conductivité et la diffusivité thermique, le document souligne l'importance de la vérification des coefficients de couplage dans le modèle THM dans l'équation (2) selon la théorie de Biot. Par exemple, le coefficient de dilatation et la compressibilité peuvent être ajustés, entre le modèle et les données de terrain, en se basant sur des mesures in situ. Une argumentation similaire est avancée pour l'identification du coefficient de Biot dans l'équation thermohydraulique de couplage pour la diffusion de la masse fluide dans l'équation (3), en utilisant une modélisation inverse basée sur des mesures in situ.

Il faut préciser que des modèles plus sophistiqués allant au-delà de la théorie de Biot ont été préconisés pour décrire les processus couplés. Par exemple, une formulation thermo-poro-élastique est décrite en utilisant le modèle numérique de type FLAC dans Berchenko, et al.<sup>14</sup>

Dans la section 2.1.5 du document E -TER,<sup>15</sup> un argument convaincant est avancé à l'appui du programme in situ de mesures pour l'identification des propriétés et des coefficients de couplage particuliers au site de Bure dans les modèles thermiques, thermomécaniques et thermohydrauliques. Bien que des mesures in situ ne puissent pas identifier directement ces paramètres, l'interprétation des mesures sur le terrain est décrite comme étant le moyen pour leur identification. C'est un programme bien conçu, souvent appelé modélisation inverse dans la littérature. Par exemple, l'iTOUGH, un logiciel du Laboratoire national Lawrence Berkeley,<sup>16</sup> est spécifiquement développé pour une identification inverse de la chaleur, de la masse, des propriétés du transport des contaminants et des coefficients dans la roche poreuse et fracturée. Le concept décrit dans le document E -TER est donc compatible avec les normes et les pratiques internationales.

Le Tome 5 du Référentiel Géologique<sup>17</sup> présente des arguments supplémentaires en faveur des mesures in situ, notamment pour l'extrapolation des données acquises en laboratoire au massif rocheux. Les essais thermiques TER sont mis en référence et brièvement passés en revue dans la section III.2.3. Deux parties sont décrites, TER/A, consacrée à la caractérisation de l'argilite dans les zones endommagées et dans les zones saines, et TER/B, dédiée aux mesures liées au couplage THM. Le rapport entre les programmes TER/A et TER/B décrits dans le Tome 5 du Référentiel Géologique<sup>18</sup> et le document E -TER n'est pas clair.<sup>19</sup> La méthode décrit une série de mesures prises dans un seul forage vertical de mesure avec une sonde chauffante de 2 mètres de long pourvue

---

<sup>13</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>14</sup> Berchenko et al. 1999

<sup>15</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>16</sup> Finsterle 2000

<sup>17</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

<sup>18</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

<sup>19</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

d'un capteur thermique. Le programme conceptuel de mesure comprend une période de chauffage d'un an suivie de deux années de refroidissement. Les résultats de la simulation en 1D, 2D et 3D sont donnés pour les mesures conceptuelles, en utilisant le calcul analytique et les modélisations numériques du programme CASTEM 2000, et sont représentés dans la figure 3.2-06 du Tome 5 du Référentiel Géologique.<sup>20</sup> Des observations sur la configuration du concept et les avantages attendus peuvent être faites concernant (a) le bien-fondé de l'organisation des mesures pour obtenir les propriétés thermo-physiques du site (examiné plus en détail dans la section 3.2.3.1) et (b) la question de la modélisation (examinée plus en détail dans la section 3.2.3.2). Ces observations sont basées sur l'information présentée dans le Tome 5 du Référentiel Géologique et le document E -TER,<sup>21</sup> des informations/documents complémentaires seraient utiles pour affiner l'analyse de cette revue critique.

Le document E -TER<sup>22</sup> décrit les modélisations prédictives de l'expérimentation dans la section 3.1, où sont décrites les étapes jusqu'en 2005. Dans un premier temps, les modèles mécaniques et hydromécaniques seront d'abord vérifiés et ensuite validés, et seront élargis pour inclure la zone endommagée. Deuxièmement, les modèles seront validés dans les galeries par des données acquises in situ, décrites dans le document SUG.<sup>23</sup> Alors que le programme insiste beaucoup sur les interactions entre les travaux de construction et les modèles mécaniques et hydromécaniques, on ne sait pas très bien si les effets sur les propriétés thermiques sont effectivement traités. On a l'impression que la modélisation thermique est considérée comme une question secondaire par rapport au processus de couplage des modèles mécaniques et hydromécaniques.

### **3.2.3.1 Le bien-fondé de l'organisation des mesures in situ**

Il est important de répondre à la question suivante : le dispositif pour obtenir in situ les propriétés thermophysiques à partir d'une modélisation inverse est-il efficace ? Les mesures de température prises sur la paroi du forage pendant le cycle de chauffage doivent être considérées comme erronées du fait des incertitudes dans le couplage thermique entre l'élément chauffant et la roche. En se fondant sur la description donnée dans le Tome 5 du Référentiel Géologique,<sup>24</sup> il semblerait qu'un simple élément chauffant pour un seul forage soit envisagé dans le programme. Une analogie peut être faite avec la mesure de la résistance électrique, où il est préférable de mesurer le potentiel sans que le courant passe par le point de contact. La prise en compte de cet aspect a conduit à l'élaboration de la méthode de mesure dite à quatre fils de résistance. De même, il serait préférable de mesurer la température de la roche dans un endroit neutre du massif, plutôt que juste au point de contact sous l'influence de l'élément chauffant. D'après la description il n'apparaît pas clairement que l'utilisation de sondes thermiques est prévue dans d'autres zones, par exemple, dans des forages parallèles à une certaine distance du forage chauffant

---

<sup>20</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

<sup>21</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001 ; ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>22</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>23</sup> ANDRA Cahier des charges SUG 2001

<sup>24</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

Pendant la phase de refroidissement, quand la puissance de l'élément chauffant est zéro, les mesures prises sur la paroi du forage peuvent être considérées exactes ; par conséquent, la courbe de refroidissement peut servir de réponse thermique à l'identification indirecte de la diffusivité thermique. Cependant, aucune autre information ne peut être extraite de cette mesure. Afin d'obtenir la conductivité et la diffusivité thermique, ou la chaleur spécifique, une autre information distincte est nécessaire. Cette information est présente sous la forme de la puissance thermique pendant la phase de chauffage; cependant le dispositif souffre d'un handicap pendant ce cycle, comme décrit plus haut, à cause du problème inhérent à la mesure de la température sous un flux thermique.

En conclusion, le dispositif présenté dans le Tome 5 du Référentiel Géologique<sup>25</sup> ne paraît pas être un programme efficace ou assez précis pour la caractérisation in situ des propriétés thermophysiques. Une approche plus sophistiquée est présentée dans le document E -TER,<sup>26</sup> notamment dans la figure 2 qui représente des forages parallèles autour d'un élément chauffant. Cependant, on ne sait pas clairement si une évaluation des propriétés thermiques, comme par exemple des mesures in situ de conductivité et de diffusivité, sera faite. Le document SUG<sup>27</sup> décrit un programme détaillé d'évaluation des caractéristiques géologiques, géochimiques et géomécaniques, mais il ne porte pas sur les propriétés thermiques et leurs caractéristiques.

### **3.2.3.2 La question de la modélisation inverse**

La raison pour laquelle les résultats du modèle unidimensionnel sont inclus dans la fig. 3.2-06 du Tome 5 du Référentiel Géologique<sup>28</sup> n'apparaît pas clairement ; le problème n'a rien à voir avec un flux thermique unidimensionnel. L'hypothèse est faite que le résultat du modèle analytique 2D est la solution de l'équation du flux thermique cylindrique pour une longueur infinie de l'élément chauffant. Ce type de modèle est néanmoins très insuffisant pour un dispositif avec un élément chauffant de 2 mètres de long. La différence importante entre les modèles analytiques 2D, et les modèles numériques 3D élimine les autres modèles. La question se pose même de savoir si les conditions d'un modèle 3D du volume de la roche qui suppose des propriétés homogènes et isotropes des matériaux sont pertinentes. La stratigraphie du site de Bure se présente en couches avec des propriétés différentes selon les directions. Une préparation doit être faite pour tenir compte des anisotropies dans le modèle, par exemple, pour des différences dans les conductivités de la chaleur dans les directions verticales et horizontales. Si la mesure est faite dans la zone endommagée, on peut s'attendre à une variation de la conductivité thermique causée par les variations des contraintes et par la fracturation. Une variation spatiale plus importante peut même être présente, causée par la désaturation partielle dans la zone d'essais pendant la construction et la préparation de l'essai. Un tel scénario peut être pronostiqué en raison des courbes de la conductivité en fonction de la teneur en eau

---

<sup>25</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

<sup>26</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001

<sup>27</sup> ANDRA Cahier des charges SUG 2001

<sup>28</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001

pour l'argilite décrite dans le Référentiel Matériaux Tome 2,<sup>29</sup> Section IV.3.2.2, par exemple, dans la figure IV.3. 17 où sont décrites des variations de 300% à de 400% dans la conductivité pour une variation de teneur en eau allant de 0 à 30%. De façon similaire, une grande dépendance vis-à-vis de la saturation en eau est prévue pour la roche hôte du Callovo-Oxfordien, bien qu'aucune donnée explicite ne soit fournie dans le Référentiel Géologique Tome 4, dans le chapitre IV.8.<sup>30</sup>

### **3.2.4 Les mesures des propriétés thermophysiques sur échantillons de laboratoire**

Cette évaluation est basée sur le résumé des résultats de laboratoire présentés dans le Tome 4 du Référentiel Géologique, chapitre IV.8.<sup>31</sup> Les propriétés thermiques de l'argilite de la formation callovo-oxfordienne ont été mesurées sur des échantillons prélevés à partir des forages HTM 102 et EST 104 pendant la campagne de reconnaissance géologique 1994-1996. Des efforts ont été faits pour identifier l'influence de la température et de la teneur en eau des échantillons sur les propriétés thermiques, ainsi que l'anisotropie potentielle de ces propriétés. Selon le concept des mesures de laboratoire, la chaleur spécifique ( $c$ ), la densité ( $\rho$ ), et les diffusivités thermiques ( $a$ ) ont été directement mesurées et évaluées, quant aux conductivités thermiques ( $k$ ), elles ont été dérivées de la relation  $k = \rho * c * a$ . Des mesures complémentaires ont été également effectuées sur six échantillons prélevés pendant une nouvelle campagne de reconnaissance en 2000 sur le forage EST 205. Un nouveau concept d'évaluation a été utilisé pour la mesure directe de la conductivité sur les échantillons du forage EST 205. En raison de la nouvelle méthode employée, il n'a pas été possible d'évaluer l'effet de la température sur les propriétés thermiques pour les échantillons du forage EST205 ; cependant, il a été possible d'étudier l'effet de la contrainte axiale sur la conductivité thermique entre 5 MPa et 20 MPa.

#### **3.2.4.1 La chaleur spécifique**

Les résultats des mesures de laboratoire pour les valeurs de ( $\rho$ ), ( $c$ ), et ( $a$ ) se situent dans le domaine des valeurs attendues. Une variation relativement importante est observée pour les valeurs de la chaleur spécifique liée à l'emplacement de prélèvement situé le long du forage EST 104 : la variabilité atteint environ 100%. La différence entre les échantillons le long du forage HTM 102 est beaucoup plus faible, environ 30 %, à des températures plus basses. Néanmoins, la variabilité spatiale justifie plus d'études, particulièrement si l'on prend en compte que seuls deux forages ont été utilisés pour la caractérisation de cette importante propriété de la roche.

La valeur (moyenne) de la chaleur spécifique à température ambiante ne change pas de manière significative d'un forage à un autre, mais cela n'évite pas nécessairement de

---

<sup>29</sup> ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001

<sup>30</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

<sup>31</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

recourir à une caractérisation plus approfondie du site. Deux questions peuvent être soulevées :

- la cohérence entre les moyennes des deux forages est-elle statistiquement significative si l'on tient compte de la grande variabilité spatiale ? Afin de répondre à cette question, des analyses complémentaires pourraient être nécessaires.
- les variations spatiales des propriétés thermo-physiques permettront-elles de faire la moyenne des températures produites par la décroissance radioactive pendant la période thermique? Afin de répondre à cette question, une étude de sensibilité, avec un modèle numérique utilisant des propriétés thermo-physiques variables, pourrait être nécessaire.

#### **3.2.4.2 La diffusivité thermique**

Les diffusivités thermiques des forages EST 104 et HTM 102 ont été évaluées à différentes températures (20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C) sur des échantillons prélevés perpendiculairement à la stratification, et à température ambiante, mais à différents degrés de saturation (saturé et 6 degrés de désaturation), et trois directions d'anisotropie.

En outre, les diffusivités thermiques pour les échantillons provenant du forage EST 205 ont été évaluées à partir des mesures directes sur la conductivité (la densité et la chaleur spécifique étant connues) perpendiculairement et parallèlement à la stratification.

Les résultats d'ensemble de la diffusivité, rassemblés dans la figure 4.8-04 du Tome 4 du Référentiel Géologique,<sup>32</sup> indiquent une variabilité spatiale encore plus grande que celle obtenue pour la chaleur spécifique. Par conséquent, les questions soulevées à propos de la chaleur spécifique sont également applicables à la diffusivité thermique. L'analyse des facteurs de dépendance vis-à-vis de la température ainsi que de la saturation et de l'orientation ne diminue pas, mais, au contraire, renforce le besoin de répondre à ces questions.

L'anisotropie de la diffusivité thermique découverte dans tous les forages suggère une dépendance vis-à-vis de l'orientation d'environ 30 %. Cette valeur est assez importante pour considérer l'abandon de tous les modèles thermiques postulant un caractère isotrope de la roche.

#### **3.2.4.3 La conductivité thermique**

La conductivité thermique a été calculée à partir des mesures de (a), (rho), et (c) pour les forages EST 104 et HTM 102. La fourchette des valeurs obtenues pour ce type de roche, comparée aux valeurs de tableaux comparables trouvés dans les revues scientifiques, est acceptable. La variabilité des valeurs de conductivité reflète les variations spatiales des

---

<sup>32</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

diffusivités, soulevant une fois encore le doute pour des applications dans la conception thermique. L'incertitude dans la conductivité peut venir s'ajouter aux incertitudes des autres propriétés déjà abordées.

La conductivité a été directement mesurée sur des échantillons provenant du forage EST 205, soumis à des contraintes axiales situées entre 5 et 20 MPa. L'ANDRA doit être félicitée pour avoir fait état de la variation des contraintes axiales dans les mesures de conductivité. Les résultats de la dépendance de la conductivité vis-à-vis de la contrainte axiale n'ont pas été inclus dans le Tome 4, une omission qui enlève au lecteur la possibilité d'acquérir une compréhension plus complète du comportement de l'argilite. Les valeurs d'ensemble de la conductivité sont environ 30 % supérieures à celles obtenues à partir des mesures de la diffusivité et de la chaleur spécifique. Puisque ces mesures sont directes, on est tenté de les accepter et de rejeter les valeurs dérivées. Une déviation systématique de 30 % dans le résultat final est assez importante pour pouvoir compromettre la conception thermique des ouvrages et par conséquent l'utilisation économique de l'emprise disponible du site de stockage vis-à-vis de la limite de la charge thermique.

### **3.2.5 L'extrapolation des résultats de laboratoire au massif**

Plusieurs effets ou perturbations doivent être pris en compte lors de la transposition des résultats du laboratoire au massif. Le chapitre IV du Tome 4 du Référentiel Géologique<sup>33</sup> décrit les trois perturbations les plus importantes:

- « mécaniques, essentiellement fissuration en paroi des ouvrages souterrains, induites par le déconfinement mécanique de la roche (on parle alors d'endommagement),
- hydriques, essentiellement désaturation de la roche en paroi, induites par l'aération des ouvrages souterrains, qui peuvent provoquer une fissuration complémentaire,
- mécaniques et hydriques induites par la dissipation thermique des colis stockés.»

Il y a d'autres effets d'échelle supposés entre le laboratoire et les caractéristiques du site:

- La présence de grandes fractures et discontinuités qu'il ne serait pas possible d'avoir dans un petit échantillon. Autrement dit, il n'est pas possible de caractériser dans le laboratoire des échantillons brisés, traversés par des fractures.
- La complexité des conditions sur le site comparées aux conditions simples et contrôlées dans le laboratoire;
- Les variations simultanées de toutes les variables potentielles par rapport à quelques variables choisies dans les conditions de laboratoire.

Un essai thermique souterrain de grande échelle semble plus réaliste et plus fiable que d'essayer de modéliser numériquement la complexité du site. Nous recommandons fortement qu'une vérification expérimentale de la sorte soit prévue pour l'acceptation

---

<sup>33</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

finale des propriétés thermophysiques et autres obtenues dans le laboratoire pour le site de Bure.

Le programme stratégique<sup>34</sup> présente l'utilisation des expériences in situ au site de Mont Terri en Suisse comme le moyen de valider le passage à une plus grande échelle et pour valider les modèles. Les résultats de ces expériences devraient être utilisés en 2005 pour la conception du site de stockage et de l'architecture des alvéoles/galeries. Il sera important d'employer des données et des modèles vérifiés pour le site de Bure lui-même. Les incertitudes rendront problématique la portabilité des données de Mont Terri à Bure. Le programme stratégique<sup>35</sup> demande que ces incertitudes soient réduites à l'aide d'analyses numériques et d'études de sensibilité, ainsi que de permettre une certaine souplesse dans les dispositions portant sur de futurs projets. La tâche visant à déterminer directement les propriétés thermophysiques du site de Bure semble être évitée et/ou retardée. Cependant, il est prévu que l'importance primordiale des propriétés thermophysiques du site sera identifiée pendant les exercices de conception. Des études de variations, d'optimisations et de sensibilité dans des travaux futurs peuvent dévoiler la nécessité d'un programme in situ complet pour caractériser le site pour répondre aux exigences thermiques pour la conception thermique des ouvrages. Il reste à savoir quand, où et comment ce problème sera planifié et exécuté.

### **3.2.6 L'applicabilité des résultats obtenus sur d'autres sites**

Beaucoup de questions peuvent être soulevées après avoir examiné les quelques documents communiqués. Le projet de Bure peut sous-estimer l'éventuelle différence entre les propriétés thermophysiques en laboratoire et in situ, particulièrement en raison des grandes variations. Les mesures du forage chauffant (avec peut-être un seul ou quelques forages) sur le site de Bure ne semblent pas être suffisantes pour vérifier les caractéristiques des matériaux analysés dans le laboratoire pour émettre un avis sur la sélection du site. Les lois d'extrapolation pour le passage du laboratoire au massif rocheux à partir d'une mesure in situ de petite taille seront-elles valables ? Des variations significatives des propriétés thermophysiques in situ ont été observées dans d'autres projets, par exemple celui de Yucca Mountain, aux Etats-Unis, pendant la période thermique.<sup>36</sup> Les différences entre les propriétés en laboratoire et in situ peuvent être bien plus significatives, particulièrement quand des variations de contraintes et de degré de saturation sont prises en compte.<sup>37</sup>

### **3.3. Modèles de conception/d'analyse thermique pour le site et la barrière ouvragée**

---

<sup>34</sup> Direction de la Technologie 2003

<sup>35</sup> Direction de la Technologie 2003

<sup>36</sup> Bahrami et Danko 2003

<sup>37</sup> Danko et Mousset-Jones 1989

La conception thermique d'un site de stockage pour des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue n'est pas une tâche banale pour quatre raisons principales:

- La géométrie est complexe, et les propriétés thermophysiques sont variables dans une roche hôte anisotrope et hétérogène
- Les processus de couplage THM seront présents dans tout le volume chauffé, mais particulièrement dans la zone à proximité des galeries et de la zone endommagée
- Les interactions entre les barrières naturelles et ouvragées et le couplage pourraient faire appel à des modèles analytiques spéciaux pendant la période thermique, différents de ceux qui sont utiles pour de longues périodes de temps et des températures faibles.
- La ventilation est présente pendant plusieurs dizaines d'années et peut-être même plus longtemps. Elle évacuera, par convection, une part importante de la chaleur issue de la décroissance nucléaire ainsi que l'humidité provenant de la roche hôte. Elle représente un problème couplé, multi-physique.

La géométrie complexe à laquelle est associée la variabilité des propriétés des matériaux nécessite un modèle numérique. Les défis qui se posent pour la sélection d'un modèle et la résolution du problème de la température et du champ thermique en 3D dans tout le site de stockage sont: le temps de simulation, la capacité informatique et les ressources. Alors qu'un modèle analytique peut d'une manière élégante permettre la résolution d'un milieu infini, un modèle numérique a besoin d'un ordinateur d'une importante capacité et/ou de temps informatique. Il n'est donc pas étonnant que les modèles employés par le programme présenté sont analytiques, quand une zone importante est étudiée, et numériques, quand seule une géométrie réduite et simplifiée est définie autour de la zone de mise en place.

### **3.3.1 La question des hypothèses et des erreurs dans la modélisation**

La démarche de modélisation présentée, bien que justifiable pour des raisons de simplicité, présente de multiples problèmes, et peut, à l'avenir, entraîner plus de complications que de simplifications. Un de ces problèmes est que les résultats obtenus d'un modèle simplifié seront erronés, sans rapport avec la réalité. Une erreur de prédiction peut, à son tour, affecter la sûreté, la performance à long terme, et le coût de l'installation. La température admissible de sûreté maximale peut par exemple dépendre de la densité retenue pour la mise en place des colis de déchets et dicter ainsi la capacité d'entreposage de l'installation. Il y a donc un lien direct, entre le coût de construction et la qualité de la conception thermique. La sûreté et la conception thermique sont également reliées. Les températures maximales sûres ne peuvent être garanties avec une marge d'erreur minimale que si les erreurs et les hypothèses de simplification des modèles sont minutieusement contrôlées. Par conséquent, la qualité du modèle thermique est d'une importance primordiale dans la conception d'un site de stockage de déchets nucléaires à haute activité.

Il n'y a pas dans les documents de description de solutions stratégiques pour ce problème complexe. Les modèles simplifiés, autonomes ou couplés, principalement analytiques, sont très valables pour les valeurs limites et les résultats explicatifs et préliminaires. De tels modèles et études sont présentés, dans les documents *E-TER, Référentiel Géologique Tomes 4 et 5. et Référentiel Matériaux Tome 2*<sup>38</sup> De même, des modèles simplifiés ont été employés avec compétence pour une évaluation préliminaire des réponses thermo-hydro-mécaniques dans le document *Evaluation préliminaire de la réponse Thermo-hydro-mécanique de l'essai E-TER*.<sup>39</sup> Ils sont très pertinents pour les calculs visant à estimer l'étendue du problème et aussi pour vérifier les sensibilités des paramètres d'influence. Cependant, les modèles figurant dans les documents ne peuvent pas être considérés comme satisfaisants pour servir de modèles de conception de base. Ce travail pourra demander plus d'attention à l'avenir, notamment pour les travaux de conception prévus pour 2005.

Les modèles d'analyse utilisés pour évaluer la réponse thermohydrologique de la barrière ouvragée pendant la période de temps critique de l'évolution de la température maximale ne peuvent aboutir à des conclusions que si des domaines 3D sont utilisés avec une hétérogénéité spatiale et une anisotropie. La sensibilité aux hypothèses des modèles et aux variations des propriétés du site pourra alors être évaluée numériquement, et être incluse dans le programme de vérification et de validation. Il faudra un autre modèle spécial pour le refroidissement convectif et les effets d'assèchement de la ventilation. Ce modèle de simulation devra inclure la simulation thermohydrologique dans le massif rocheux couplée au modèle de rayonnement (thermique) et de convection dans les galeries de mise en place des déchets.

Les hypothèses de simplification doivent être évaluées de façon critique dans les étapes suivantes qui porteront sur le domaine du modèle et la discrétisation spatiale nécessaire pour des simulations thermiques et couplées hydrologiques à différentes échelles, dans les champs proches et lointains. Deux questions principales doivent être soulevées (a) les hypothèses des modèles sont-elles pénalisantes pour déterminer les valeurs limites des températures maximales ? (b) Le modèle est-il trop conservateur en raison d'approximations/simplifications pour être acceptable, et, par conséquent, pour permettre « l'utilisation optimale des propriétés de confinement de la couche hôte » comme le demandent les principes de conception présentés dans le rapport Dossier 2001 Argile<sup>40</sup> On fera l'hypothèse qu'un équilibre sûreté/économie entre les deux questions est une démarche de modélisation sophistiquée, validée et vérifiée, approfondie sur le travail numérique et la validation du site, afin d'être le moins restrictif possible dans la conception et la réalisation des travaux.

---

<sup>38</sup> ANDRA Cahier des charges E-TER 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

<sup>39</sup> ANDRA E-TER 2001

<sup>40</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A, p.26.

### 3.3.2 La question de la compréhension des processus thermiquement induits

Les modèles sont des bancs d'essai expérimentaux peu coûteux pour étudier les processus dont l'étude expérimentale pourrait être difficile et coûteuse. Des scénarios plausibles, tels ceux de la figure 3.1, peuvent être expérimentés à l'aide de modèles numériques. Cependant, les modèles simplifiés présentés dans les documents passés en examens ne peuvent pas être directement employés pour ces études. Il semble que le champ d'application des modèles présentés dans les documents examinés se limite à des cas simples, et exclue la possibilité d'applications plus élaborées.

Le scénario pris en exemple est décrit dans la section 3.1.1.3 pour une géométrie de mise en place schématique indiquée sur la fig.3.1. L'éventualité du développement d'un cycle de vapeur peut être critique ou non pour la sûreté du stockage des déchets, mais elle est certainement plausible, bien que différente des processus décrits dans le document de programmation. Comme nous en ferons plus loin l'analyse, le développement de tels cycles autour de colis de déchets avec une dissipation thermique élevée, comme ceux qui contiennent du combustible usé, ne peut pas être rejeté d'emblée. Une conduction, ainsi qu'une convection-advection, peuvent être présentes pendant de très longues périodes dans les matériaux de remblayage et une partie de la zone endommagée. Les matériaux de remblayage ne pourront peut-être pas se saturer et la zone endommagée ne pourra peut-être pas se re-saturer en raison de la perte d'eau de la phase vapeur dans les zones froides de condensation du site de stockage. Les matériaux de remblayage secs, qui servent d'isolant thermique avec une valeur de conductivité peut-être deux fois inférieure à ce qu'elle est dans le cas d'une saturation totale, pourraient surchauffer pendant des dizaines d'années, suivant la dissipation thermique du conteneur des déchets. Des températures élevées, bien supérieures au point d'ébullition, sont observées dans la simulation numérique quand la conductivité thermique du matériau tampon est abaissée.<sup>41</sup> En même temps, une circulation plus importante engendrée par une pression interstitielle peut se produire dans la section éloignée du condensateur, c'est-à-dire, dans la zone autour de l'alvéole. Les conditions de ce type de scénario peuvent et devraient être étudiées avec une modélisation numérique.

Il est possible de déterminer la charge thermique critique (CTC) pour chaque colis de déchets en utilisant des calculs de modèle numérique. Le modèle doit être en trois dimensions puisque c'est essentiellement un point chaud ponctuel qui est analysé, et il doit comporter la variation de la saturation avec son effet sur la variation de la conductivité thermique. Il s'agit donc essentiellement d'un modèle non saturé d'écoulement de la chaleur. Un tel modèle peut être configuré en utilisant les codes NUFT<sup>42</sup> et TOUGH,<sup>43</sup> tous les deux bien développés et testés pour le projet de Yucca Mountain aux Etats-Unis, dans le Nevada. Au-dessous de la CTC, aucun cycle de vapeur ne peut se former en raison de la conduction du refroidissement au-dessous de la température d'ébullition. Si la dissipation thermique d'un colis de déchets est plus élevée

---

<sup>41</sup> Cuisiat & Besnus 1999

<sup>42</sup> Nitao 2000

<sup>43</sup> Pruess 1987

que celle de la CTC, un cycle de vapeur se développera, et un modèle plus complexe sera nécessaire pour décrire les processus de couplage qui comprennent, en trois dimensions, l'échelle du massif rocheux, ainsi que le champ thermique à l'échelle des colis de déchets et un modèle hydrologique pour expliquer l'apport de l'eau. L'évaporation dans la zone à proximité des colis de déchets, le transport de vapeur dans les matériaux de remblayage partiellement saturés et la condensation devront être modélisés entre des colis de déchets, ou à un endroit plus éloigné en bordure de zone avec un modèle thermohydrologique couplé comme celui appliqué dans Bahrami et al.<sup>44</sup> Il faut préciser que la limite de la CTC doit être connue avec un niveau de confiance élevée, ce qui impose une haute qualité par rapport au modèle d'analyse.

La pertinence de tels modèles demande à être examinée. En un sens, la stratégie de la conception consiste à rester en dessous de la CTC, c'est-à-dire, en dessous de la température d'ébullition. C'est une position très satisfaisante puisque le problème, notamment celui de la modélisation, est ainsi grandement simplifié et mieux compris. Mais par ailleurs, la charge thermique maximale dans les colis de déchets n'a été indiquée que de façon approximative dans le Dossier 2001 Argile<sup>45</sup> et la conductivité thermique des matériaux tampon autour des colis de déchets enregistre une forte variation suivant la densité, le compactage, et la teneur en eau. Pour ces raisons, nous avons le sentiment que l'objectif de maintenir la température en dessous de la CTC n'a pas encore été traduit en conditions scientifiques qui doivent être satisfaites pour transformer cet objectif en réalité à Bure.

### 3.3.3 La question des priorités

Alors que les priorités du programme de caractérisation du site portent plus sur les interactions entre les travaux de construction et les modèles mécaniques et hydromécaniques, on ne sait pas très bien si le modèle thermique et ses propriétés thermiques sont correctement abordés, en fonction de leur importance. Il semble que la modélisation thermique est considérée comme une question secondaire comparée au processus de couplage dans les modèles mécaniques et hydromécaniques. Ceci pourrait s'avérer être une erreur puisque le processus moteur sera en premier lieu la dispersion de la chaleur, et en second lieu les processus induits. Sans établir une base de connaissance sur le développement du champ thermique, les autres modèles risquent de manquer de bases solides. La question de l'importance des divers modèles doit être posée et examinée. On peut émettre l'hypothèse que, par exemple, une erreur de 30 % dans la température maximale peut changer radicalement les processus d'une situation en dessous du point d'ébullition à une situation d'ébullition, tandis qu'une erreur de peut-être 100 % dans le champ de contraintes pourrait n'avoir aucun effet dans le fonctionnement du site de stockage remblayé. Les modes de défaillance et les scénarios de contrainte/déformation critique doivent être analysés à l'avenir afin de comprendre la pertinence d'une contrainte et d'un fluage induits par la chaleur dans le site de stockage pendant la période thermique.

---

<sup>44</sup> Bahrami et al. 2004

<sup>45</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

Une attention spéciale devrait être apportée à (a) la période d'évolution de la température particulièrement longue des températures maximales ainsi que (b) la finalité de la situation. La question de la flexibilité peut être liée à une future correction et une action réparatrice dans l'éventualité de résultats inattendus, mais l'irréversibilité de la charge thermique rendra difficile les mesures palliatives pour corriger les erreurs de la conception thermique. Quelles sont les actions envisagées dans l'éventualité où la température excéderait, par exemple, le point d'ébullition, ou semblerait augmenter trop rapidement, augurant la violation de la limite d'ébullition ? Une telle observation durant la phase de surveillance ne pourrait que susciter des inquiétudes sans qu'aucune mesure correctrice ou d'intervention ne soit disponible.

### **3.3.4 Les questions de la charge thermique et du dimensionnement**

En dernière analyse, l'application des concepts thermiques/modèles d'analyse pour un site de stockage de déchets à haute activité sert à identifier les solutions à trouver pour résoudre les questions de la charge thermique et du dimensionnement. Nous supposons que, pour le site de Bure, des calculs numériques ont été faits pour les exercices de dimensionnement thermique, bien que nous n'ayons trouvé aucun document sur ce sujet au cours de notre revue critique. Le Dossier 2001 Argile Partie B<sup>46</sup> contient des concepts d'ingénierie et des résultats sur le dimensionnement thermique. Le module du combustible utilisé est le plus important pour les calculs du dimensionnement thermique, comme le montre la section II.5.4.1 dans le Dossier 2001 Argile Partie B<sup>47</sup> puisque la puissance à la mise en stockage de l'UOX (CU1) est de 2200 W et celle du MOX (CU2) est de 1500 W. La configuration du concept d'ingénierie pour le module de stockage est présentée dans la figure II.5-13. La disposition longitudinale du combustible utilisé dans un caveau de stockage est présentée dans la figure II 5-14. Le calcul que nous avons fait en utilisant un espacement de 28,33 m entre les galeries et de 7.5 m entre les colis, présentées dans les figures II.5-13 et -14, donne une surface moyenne de stockage par conteneur de 212,5 m<sup>2</sup>/colis. Cette valeur ne correspond que grossièrement à la densité de mise en place présentée dans le tableau de la page 149. Le tableau indique une densité de 25 colis/ha pour le combustible CU1, ce qui correspond à une surface de stockage par conteneur de 400m<sup>2</sup>/colis. Cette différence est significative. Il est possible que la densité de 25 colis/ha soit une moyenne générale dans laquelle la surface entre les modules, qui n'est pas utilisée pour stocker les conteneurs, soit aussi incluse. Par conséquent, la valeur la plus faible de surface de stockage par conteneur de 212,5 m<sup>2</sup>/colis est utilisée pour traduire une densité de charge thermique de 10,35 W/m<sup>2</sup> pour le combustible CU1 pour l'évaluation du dimensionnement thermique.

Puisque nous n'avons pas de calcul de référence à l'appui, nous avons fait une simple comparaison avec des résultats connus pour le site de stockage proposé de Yucca Mountain en guise de vérification. La densité de mise en place à Yucca Mountain (YM) avec des espacements de 5,6 m entre les colis et de 81 m entre les galeries est de 453,6 m<sup>2</sup>/colis. La ligne moyenne de charge thermique est de 1450 W/m, ce qui donne 7975 W par colis de 5,5 m de longueur. À partir de ces chiffres la densité moyenne de charge

<sup>46</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

<sup>47</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

thermique est calculée comme étant de 17,58 W/m<sup>2</sup> pour le site de stockage proposé à YM pour lequel la température maximum de la paroi de galerie de stockage de 155 °C est obtenue par calcul numérique.<sup>48</sup> L'extrapolation de la température maximale de la paroi de galerie de YM au module de Bure peut être faite linéairement avec le rapport des densités de charge thermique correspondantes et réciproquement avec la moyenne, des conductivités thermiques correspondantes (en choisissant 2,1 W/(m °C) pour YM, et 1,65 W/(m °C) pour Bure) :

$$T_{\max} = 10,35/17,58 * 2,1/1,65 * 155 = 116,14^{\circ} \text{C}$$

Ce résultat correspond très bien à l'objectif de conception des ouvrages pour une température de fonctionnement maximum d'environ 90 °C pour Bure. Cependant, il faut préciser que des températures dépassant de beaucoup 90 °C sont attendues dans le radier en béton et à l'intérieur de la galerie avec des matériaux de remblayage faisant apparaître à cet endroit une température d'exploitation à un régime supérieur au point d'ébullition. Beaucoup de facteurs peuvent encore affecter le champ thermique et les dimensions nécessaires pour un fonctionnement thermique correct. Des valeurs de conductivité thermique inférieures à la conductivité thermique de référence de 1,65 W/(m °C) augmenteront la température maximale attendue de la roche. Un autre facteur est celui du refroidissement par aérage qui fait partie du résultat de la température de 155 °C importé de l'exemple de YM. On ne sait pas très bien comment le refroidissement par aérage pendant la période précédant la fermeture sera intégré à l'exploitation du site de Bure, et quand les matériaux de remblayage seront introduits. Ces facteurs devront être définis afin de les modéliser correctement et pour évaluer l'évolution du champ thermique. En attendant, on peut conclure que le calcul de dimensionnement thermique présenté dans le Dossier 2001 Argile Partie B<sup>49</sup> semble atteindre l'objectif thermique seulement pour une exploitation restant généralement en dessous du point d'ébullition dans les strates de la roche du site de Bure, avec probablement des zones au sein même des galeries de stockage au dessus du point d'ébullition.

Une brève description de la sélection des ouvrages est présentée dans le rapport Synthesis, Report on Studies and Activities 2002.<sup>50</sup> La conception théorique des ouvrages dans ce rapport postule des températures maximales de 100 °C pour le combustible utilisé et de 90 °C pour les déchets de type C à l'interface de la roche hôte avec la paroi horizontale du forage des alvéoles de stockage. L'augmentation des températures aux interfaces par rapport aux précédents objectifs thermiques inférieurs dans le Dossier 2001 Argile Partie B<sup>51</sup> aura certainement comme conséquence de créer des conditions au-dessus du point d'ébullition dans les alvéoles, particulièrement quand un remblayage artificiel d'argile gonflante sera mis en place. Le rapport Synthesis, Report on Studies and Activities 2002<sup>52</sup> indique qu'"il est aujourd'hui difficile de démontrer l'absence de condensats dans l'alvéole..." pendant l'étape thermique qui est prévue de durer plusieurs siècles pour les

---

<sup>48</sup> Danko et Bahrami 2004, pp. 10-13

<sup>49</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

<sup>50</sup> ANDRA BET 2002 Synthesis

<sup>51</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

<sup>52</sup> ANDRA BET 2002 Synthesis, p. 36

déchets de type C. Le mode thermique probable de fonctionnement multi-phases sera évidemment plus long dans les modules de stockage de combustible usé. Cependant, aucun calcul de modèle justificatif n'est présenté pour examen, et il est difficile de comprendre comment les effets de convections associés à la migration de la phase de vapeur peuvent affecter la performance.

### 3.4 Eléments du système des barrières ouvragées

On suppose que les éléments du système de barrières ouvragées seront examinés en surface et dans les laboratoires souterrains. La description de la caractérisation du laboratoire dans tous les documents<sup>53</sup> est complète, satisfaisante, et convaincante, en supposant que la température de chaque colis de déchets individuel est en dessous de la CTC. Puisque la nature des matériaux de remblayage est beaucoup plus simple que celle de la roche hôte avec des propriétés presque homogènes et isotropes, les méthodes décrites plus haut pour la mesure thermophysique de propriétés seront applicables.

Les méthodes d'évaluation/de mesures dont il faut se servir pour la détermination des propriétés thermo-hydrologiques des éléments du système de barrières ouvragées, dont les scellements et les matériaux de remblayage, font partie d'un programme bien conçu. L'examen des résultats acquis sur d'autres sites de stockage procure un haut niveau de confiance dans le programme français pour ce sujet.

Le processus de mouillage des matériaux de remblayage pourrait être une période d'opération critique notamment quand la charge thermique des colis de déchets est près de, ou au dessus de la limite de la CTC dans un endroit particulier. Les essais à haute pression et à haute température (au dessus du point d'ébullition) pourraient être nécessaires pour caractériser le gonflement et les autres propriétés du matériau tampon en présence de vapeur surchauffée.

Le système des barrières ouvragées comprend un réseau de "fractures" de construction, c'est-à-dire les vides entre les blocs tampons préfabriqués ainsi qu'entre les blocs et les parois des tunnels et des galeries, illustrés dans la figure 3.2. La caractérisation de la perméabilité au gaz de ces fractures pourrait être utile pour la modélisation la circulation de l'air/la vapeur dans le matériau tampon de remblayage pendant le cycle sec/partiellement saturé de l'opération au-dessus de la limite de la CTC.

---

<sup>53</sup> ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001, ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001, ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001

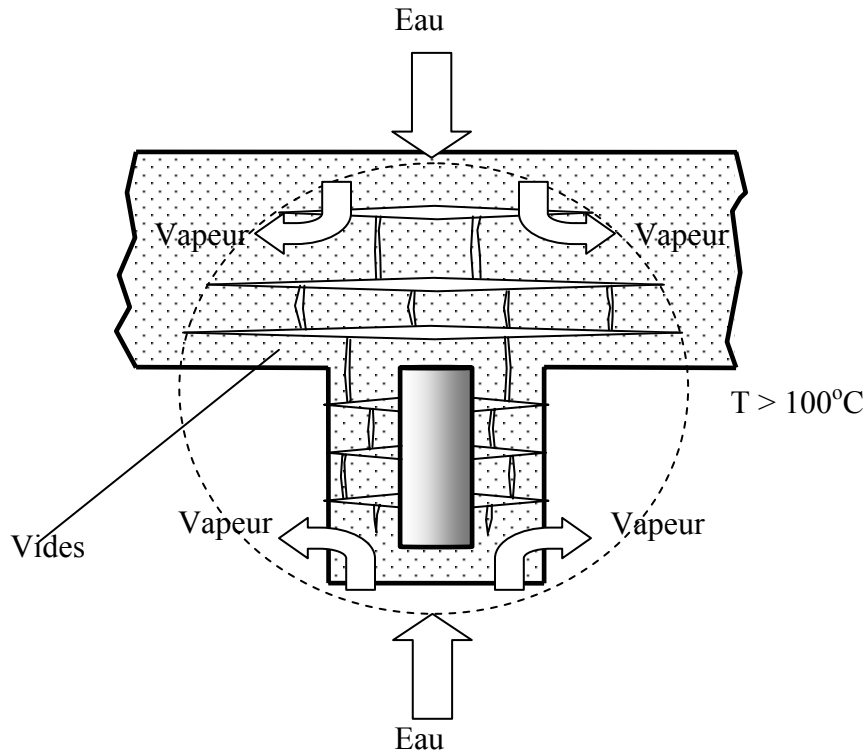


Figure 2. Vides de construction dans le remblayage sec

Les questions de corrosion peuvent apparaître en conditions partiellement saturées avec des températures potentiellement élevées autour et particulièrement au-dessus de la limite de la CTC

Il est intéressant de faire l'hypothèse que le processus de remouillage sera d'autant plus critique que les caractéristiques géologiques du site sont bonnes. Une perméabilité très basse peut retarder le retour de l'eau et permettre une longue période de phase intermittente de se développer pendant laquelle des altérations et minéralisations chimiques pourraient modifier de manière permanente les propriétés du matériau de remblayage. Une autre question qui se pose est de savoir comment la flexibilité durant l'exploitation pourra affecter la performance du site de stockage. Existe-t-il une limite technique pour la durée de l'aéragé des galeries ouvertes pour empêcher la déstabilisation de la roche causée par la désaturation et les fissures secondaires? Sur quelle distance l'EDZ peut-elle se propager dans la couche callovo-oxfordienne durant une période prolongée d'aéragé? Quelles limitations faudrait-il placer sur les éléments de la barrière ouvragée, tels que l'aéragé, et quels programmes de surveillance et de confirmation pourraient être utilisés pour vérifier ces limitations? Il faudra répondre à ces questions dans les phases futures du projet de Bure.

### 3.5 Caractérisation de la charge thermique

Le plan de gestion pour caractériser l'inventaire des déchets est décrit dans le document *Stratégie et programme des recherches*.<sup>54</sup> Le mélange de différents lots de déchets dans un module de stockage ne semble pas être envisagé. Le programme stratégique suppose la séparation des différents types de déchets pour leur mise en place dans différentes alcôves. Cette solution devrait s'avérer excellente tant pour permettre une flexibilité dans l'exploitation que pour optimiser les méthodes de stockage, spécifiques aux différents types de déchets: B, C, UOX, ou MOX, et pour pallier les variations à l'intérieur de chaque alcôve.

Les questions thermiques ne sont pertinentes que pour le combustible usé, UOX et MOX. On ne sait pas très bien si le mélange de combustibles usés avec des taux de combustion et de dissipation thermique initiale différents est envisagé. Une installation extérieure pourrait être nécessaire pour la réduction de la dissipation thermique, des combustibles usés avant leur mise en place dans le site de stockage.

Il est trop tôt pour dire si la limite de la CTC sera d'une importance primordiale puisqu'aucune étude sur cette question n'a été évaluée. Il est également trop tôt pour déterminer si l'espace de stockage disponible à Bure peut être utilisé de façon optimale et efficacement sans pré-conditionnement et mélange des déchets, puisqu'il reste à répondre à la question de la limite de la CTC ainsi qu'à celles de l'architecture du site de stockage et du système à développer.

Ces questions doivent être traitées. On peut formuler l'hypothèse que le site de Bure aura une installation de surface dotée d'une capacité de préconditionnement et de mélange suffisamment importante pour éviter des grandes variations de charge thermique entre les colis de déchets, et pour équilibrer les charges individuelles en dessous de la limite de la CTC.

### 3.6 Relevé de conclusions

1. Alors que les objectifs thermiques de l'ANDRA ont évolué au cours des années pour l'entreposage à long terme des matériaux nucléaires exothermiques (type déchets C et combustible usé), les méthodes pour réaliser ces objectifs n'ont pas été établies/documentées. La conception théorique des ouvrages ne s'appuie pas sur un modèle numérique crédible permettant une évaluation, démontrant l'adhésion objectifs thermiques.
2. L'ANDRA n'a pas démontré dans ses travaux la corrélation entre (a) la conception théorique des ouvrages, (b) la caractérisation du site, et (c) la modélisation. L'absence de description des modèles et de leur utilisation pour l'évaluation du site ainsi que de conception théorique des ouvrages représentent deux lacunes dans les travaux présentés.
3. Lors de notre examen critique du concept théorique des travaux et de l'évaluation du site, nous n'avons trouvé aucun élément confirmant l'existence d'une évolution des modèles allant de modèles simples, puis de modèles d'ensemble, ou de modèles conceptuels pour aboutir à des modèles

---

<sup>54</sup> Direction de la Technologie 2003

de conception des ouvrages et à une évaluation du site. Les possibilités d'évaluer les modèles en les comparant aux résultats expérimentaux directs ont été omises. Les expérimentations décrites dans E -TER n'ont pas répondu aux attentes puisque les modèles simplifiés décrits dans les documents ne semblent pas être satisfaisants pour l'évaluation/la vérification des propriétés thermophysiques du site. La raison pour laquelle les résultats de modèles unidimensionnels sont incorporés dans la modélisation inverse des expérimentations in situ n'est pas claire ; l'écoulement de la chaleur est loin d'être un problème linéaire et unidimensionnel. Même le modèle analytique bidimensionnel pour un appareil chauffant d'une longueur infinie s'avère être un modèle très médiocre pour un dispositif utilisant un élément chauffant de seulement 2 m de long. La grande différence entre les modèles bidimensionnels analytiques et les modèles tridimensionnels numériques disqualifie les autres modèles. Il est même contestable d'affirmer que les conditions d'un modèle pour un domaine tridimensionnel qui postule des propriétés physiques homogènes et isotropes soient satisfaisantes, puisque la stratigraphie du site de Bure révèle des séquences dont les propriétés diffèrent selon les différentes directions.

4. La conductivité thermique, une des caractéristiques thermophysiques les plus importantes du site, n'a pas été proprement établie. L'écart-type de ce paramètre est exceptionnellement élevé. Il laisse donc une grande marge d'incertitude dans la capacité du site à dissiper la chaleur.
5. Le nombre d'échantillons utilisés pour établir les propriétés thermophysiques du site à partir d'échantillons de laboratoire semble être trop petit, tout particulièrement au vu de la variabilité spatiale de ces propriétés dans la zone de stockage prévue.
6. Le rôle que la zone d'EDZ joue dans la performance couplée thermique-hydrologique dans des conditions de charge thermique n'a pas été assez bien étudié pour être efficacement intégré à l'évaluation. Aucun résultat concernant le site ou des modèles de cette zone n'a été trouvé pour cette revue critique.
7. Bien que l'objectif pour le régime des températures selon le scénario de référence se situe en dessous du point d'ébullition, il n'est pas impossible d'avoir une situation où la température dépasse le point d'ébullition. Le développement d'un système binaire est tout à fait possible dans lequel: soit (1) un régime de températures en dessous du point d'ébullition prévaut si le remblayage et la roche peuvent se re-saturer (et les conductivités thermiques augmentent pour atteindre des valeurs de saturation de l'eau élevées engendrant des températures basses) ; soit (2) un champ de températures au-dessus du point d'ébullition se développe si le remblayage et la roche ne peuvent pas se resaturer (et les conductivités thermiques restent celles du remblayage désaturé et de l'EDZ). La création d'un cycle de vapeur est par conséquent possible dans certaines conditions de charge thermique, à savoir, si le matériau de remblayage ne se sature pas et que la zone endommagée ne se re-sature pas en raison de la perte d'eau dans la phase de vapeur causée par les zones froides de condensation du site de stockage.

8. La conception théorique des ouvrages présentée dans le rapport Bilan des études et travaux 2002<sup>55</sup> postule des températures maximales de 100° C pour le combustible usé et de 90° C pour les déchets de type C à l'interface de la roche hôte avec la paroi horizontale du forage des alvéoles de stockage. L'augmentation des températures aux interfaces par rapport aux précédents objectifs thermiques inférieurs dans le Dossier 2001 Argile<sup>56</sup> aura certainement comme conséquence de créer des conditions en dessous du point d'ébullition dans les alvéoles, particulièrement quand des matériaux de remblayage argileux ouvragés seront mis en place. Le rapport ANDRA<sup>57</sup> déclare qu' "il est aujourd'hui difficile de démontrer l'absence de condensats dans l'alvéole..." pendant l'étape thermique qui est prévue de durer plusieurs siècles pour les déchets de type C. Le mode de fonctionnement thermique à étapes multiples/multiphase sera évidemment plus long dans les modules de stockage de combustible usé que dans ceux des déchets de type C. Cependant, aucun calcul de modèle justificatif n'est présenté pour examen, et il n'est pas évident comment les effets de convections associés à la migration de la phase de vapeur peuvent affecter la performance.
9. Puisque l'on peut s'attendre à des températures supérieures au point d'ébullition dans les modules de déchets de type C et de combustible usé pendant de longues périodes dans la conception des ouvrages privilégiée selon le Synthesis rapport Bilan des études et travaux 2002,<sup>58</sup> ces modules peuvent développer des cycles de vapeur continus dans la zone de stockage et cela pendant des siècles. Cependant, aucun effort de réévaluation n'a pu être trouvé dans la documentation traitant de la détermination "d'une charge thermique critique" (CTC) pour chaque colis de déchets dans son aire de stockage. La conception et l'exploitation d'une installation nucléaire de stockage dépassant la limite CTC au site de Bure semble être en contradiction avec le concept de prévisibilité.
10. Il n'existe dans les documents aucune discussion et aucune étude justificative de modèle sur l'effet de la ventilation sur la désaturation de roche, la fissuration secondaire potentielle pendant la ventilation, et l'extension de l'EDZ qui s'ensuit. L'exploitation souple, de type « entrepôt » est un vœu indiqué, mais si l'objectif déclaré est une exploitation souple de type « entrepôt », les conséquences d'une telle souplesse en termes d'effets d'altération du site n'ont pas été établies.

### 3.7 Sommaire des recommandations principales

1. Procéder à une caractérisation plus détaillée du site de Bure concernant les propriétés thermophysiques, particulièrement celles des alvéoles dédiées au combustible usé.

---

<sup>55</sup> ANDRA BET 2002 Synthesis

<sup>56</sup> ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B

<sup>57</sup> ANDRA BET 2002 Synthesis

<sup>58</sup> ANDRA BET 2002 Synthesis

2. Inclure les propriétés thermophysiques et la vérification du modèle thermique dans les essais de chauffage in situ à grande échelle sur le site de Bure.
3. Employer des techniques numériques-informatiques de modélisation inverse plus sophistiquées pour l'évaluation des essais thermiques in situ sur le site de Bure.
4. Développer/adopter et vérifier des modèles numériques de base de conception pour les processus thermiques qui comprennent les domaines relatifs à l'échelle proche du colis de déchet, aussi bien qu'à l'échelle du massif. Coupler ces modèles aux effets thermo-hydrologiques et géomécaniques pertinents.
5. Établir les limites de la CTC pour les alvéoles dédiées à recevoir le combustible utilisé en utilisant les propriétés du site et les modèles couplés thermo-hydrologiques-vapeur/air pertinents.
6. Étudier les effets éventuels (changements chimiques, minéralisation) de la migration à hautes températures de vapeur dans le matériau de remblayage comme dans les fractures de la zone endommagée dans l'argilite.
7. Evaluer d'une façon critique les effets de la ventilation sur la désaturation de la roche, la fissuration secondaire qui en résulte et l'extension de l'EDZ tout particulièrement dans le contexte d'une stratégie d'exploitation d'une installation d'entreposage/de type « entrepôt » dans laquelle les galeries pourraient être maintenues ouvertes et aérées pendant des durées prolongées.
8. Utiliser un modèle de simulation thermique-hydraulique-de ventilation couplée pour l'analyse de la température et des champs de désaturation dans et autour des galeries de stockage dans l'EDZ, ceci pendant la période précédant la fermeture.

### 3.8 References

ANDRA BET 2002 Synthesis	Andra – 2002 Synthesis report on studies and activities, Research on the disposal of high-level long-lived radioactive waste. January 2004. Based on the Recherches pour le stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue. Bilan des études et travaux 2002.
ANDRA Cahier des charges E-TER 2001	Andra – Rapport no C CC AGEM 00-063/B – Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne. Cahier des charges de réalisation E-TER, Réponse de l'argilite a des sollicitations thermiques, Objectifs scientifiques et résultats attendus. Émetteur: DS/GM. Date d'origine 30/07/2000. Rév. B, 08/06/2001.
ANDRA Cahier des charges SUG 2001	Andra – Cahier des charges de réalisation du suivi scientifique du creusement des galeries du laboratoire souterrain : SUG, Objectifs scientifiques et résultats attendus. Identification: C CC ADS 00-001, Émetteur: DS, [Bure] : ANDRA, Date d'origine. 17/12/99. Rév. B: 12/11/2001.

ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.A	Andra – Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse. [Partie A] Décembre 2001. Running title: Dossier de synthese 2001 – Partie A.Dossier 2001 Argile.
ANDRA Dossier 2001 Argile, Pt.B	Andra – Dossier 2001 Argile sur l'avancement des etudes & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de dechets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde - Rapport de synthèse Partie B. Compléments scientifiques et techniques. [Châtenay-Malabry?]: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Décembre, 2001.
ANDRA E-TER 2001	Andra – Rapport no D RP 0G.3S 00-12/B – Evaluation préliminaire de la réponse Thermo-hydro-mécanique de l'essai E-TER, date of origin 17/03/2000. Rév. B, 30/30/2001.
ANDRA Modélisation numérique 2002	Andra – Rapport D RP 0 LML 02.001/B – Modélisation numérique du couplage thermohydromécanique du site de l'Est. Etude de la désaturations et de la resaturation avec prise en compte de l'endommagement induit et des déformations plastiques. Influence des interactions avec la barrière ouvragée. Rapport final. Date d'origine 04/02/2002. Rév. B, Mars 2002
ANDRA Référentiel Géologique Tome 4, 2001	Andra – Rapport no A RP ADS 99-005 – Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne. Tome 4. Le Callovo-Oxfordien. Émetteur: Direction Scientifique, Date d'origine Janvier 1999. Rév. B, 16/07/2001.
ANDRA Référentiel Géologique Tome 5, 2001	Andra – Rapport A RP ADS 99-005 – Référentiel Géologique du site de Meuse/Haute-Marne, Tome 5, Etat d'avancement de la modélisation. Émetteur: Direction Scientifique. Date d'origine Janvier 1999. Rév. B, 03/09/2001.
ANDRA Référentiel Matériaux Tome 2, 2001	Andra – Rapport C.RP.AMAT.01.060 – Référentiel Matériaux, Tome 2. Les Matériaux argileux. Émetteur: Direction Scientifique, Service Matériaux. Date d'origine Novembre 2001.
Bahrami et Danko 2003	Bahrami, D., and Danko, G., 2003 – “In Situ Thermophysical Properties Variation at Drift Scale Test, Yucca Mountain,” Proceedings of 10th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM), March 30-April 2, 2003, Las Vegas, Nevada. pp. 1251-1258. La Grange Park, IL: American Nuclear Society, 2003.
Bahrami et al. 2004	Bahrami, D., Danko, G., Croisé, J., Leister, P. and Poppei, J., 2004, “Underground, long-term storage of spent fuel using the Twin-Tunnel Concept with natural ventilation.” Proceedings of DisTec 2004, International Conference on Radioactive Waste Disposal, Berlin, April 26.--28.4., 2004,organized by Federal Office for Radiation Protection, Salzgitter, Germany,(2004) pp. 526-539
Berchenko et al. 1999	Berchenko, I., Detournay-Piette, C., and Detournay, E., 1999 – “Solution of thermoporoelastic problems using FLAC.” In FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics (Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, 1999). C. Detournay and R. Hart, Eds. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999, pp. 133-145.

Cuisiat et Besnus 1999	Cuisiat, F.D.E., Besnus, F., 1999 – “Near and far field thermal calculations for nuclear spent fuel disposal in deep geological formations.” In <i>FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics</i> , (Proceedings of the International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics, Minneapolis, 1999). C. Detournay and R. Hart, Eds. Rotterdam. Balkema, 1999. pp. 317-324.
Danko et Bahrami 2004[	Danko, G., and Bahrami, D., 2004, “Coupled, Multi-Scale Thermohydrologic-Ventilation Modeling with MULTIFLUX.” In <i>Society for Mining, Metallurgy, and Exploration . 2004 SME Annual Meeting, February 23 – 25, 2004, Denver, Colorado. Preprints. Preprint 04-144.Proceedings, ....</i>
Danko et Mousset-Jones 1989	Danko, G. and Mousset-Jones, P., 1989, "A Simultaneous Measurement of In-Situ Measurement of the Heat Conductivity and Thermal Conductivity and Diffusivity at the Waldo Mine," in <i>Proceedings of the 4th U. S. Mine Ventilation Symposium</i> . Malcolm J. McPherson, ed. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy & Exploration. pp. 287-296.
Direction de la Technologie 2003	Direction de la Technologie, 2003 – Stratégie et programmes des recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue (au titre de l'article L542 du code de l'environnement, issu de loi du 30 décembre 1991) - Edition 2003. On the Web at <a href="http://www.recherche.gouv.fr/technologie/energie/spr2003.pdf">http://www.recherche.gouv.fr/technologie/energie/spr2003.pdf</a> .
Finsterle 2000	Finsterle, S., <a href="http://www-esd.lbl.gov/ITOUGH2/Bibliography/PostScript/LBL_UseGui.pdf">iTOUGH2 User's Guide</a> . Report LBNL-40040. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2000. On the Web at <a href="http://www-esd.lbl.gov/ITOUGH2/Bibliography/PostScript/LBL_UseGui.pdf">http://www-esd.lbl.gov/ITOUGH2/Bibliography/PostScript/LBL_UseGui.pdf</a> .
Giraud 1993	Giraud, A. 1993 –Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les milieux poreux peu perméables : application aux argiles profondes. Thèse de Doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. As cited by Cuisiat and Besnus 1999.
Nitao 2000	Nitao, J., 2000. “NUFT, Flow and Transport code V3.0s.” Software Configuration Management, Yucca mountain project- STN:10088-3.0S-00. Prepared at Lawrence Livermore National Laboratory.
Patriarche 2001	Patriarche, D., 2001. Caractérisation et modélisation des transferts de traceurs naturels dans les argilites de Tournemire. Thèse. - Docteur de l’Ecole des Mines de Paris. 13 septembre 2001. On the Web at at <a href="http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/53/52/tel-00005352-00/tel-00005352.pdf">http://tel.ccsd.cnrs.fr/documents/archives0/00/00/53/52/tel-00005352-00/tel-00005352.pdf</a> .
Pruess 1987	Pruess, K., TOUGH Users Guide, Report Nureg/CR-4645, Nuclear Regulatory Commission (also report LBL-20700, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, Calif.), 1987.
Règle N° III.2.f	Règle N° III.2.f (10 juin 1991) Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs. Tome III: production, contrôle et traitement des effluents et déchets. Chapitre 2: Déchets solides...