

Document Source
- en cours de réécriture

"just. rabilj"!

Soucis à Bure

**En creusant une argilite, on détruit son
imperméabilité relative.**

**Le panache de pollution voguera au grès des écoulements dans la
pile sédimentaire entre le fossé tectonique de Gondrecourt et le
fossé tectonique de la Marne**

Détérioration de l'argilite : c'est physique	2
EDZ de Bure : les prévisions officielles	3
Délicats travaux envisagés sur une partie de la EDZ	4
La EDZ dans les calculs de diffusion pour une eau immobile	5
Convection/advection : qu'est-ce qui fait couler l'eau ?	6
Le scénario 2001 qualifié de « <i>normal</i> » en quatre points	7
L'inévitable à Bure	8
Direction des écoulements	10
Aquifère Oxfordien	10
Aquifère Dogger	10
Gradients entre Dogger et Oxfordien	11
Les valeurs des gradients hydrauliques entre les deux aquifères ne sont pas fixes	12
Nouvelles preuves du rôle hydraulique essentiel des failles locales et diaclases/fractures	13
Annexe I : L'aquifère oxfordien	14
Annexe II : Résultats de quelques tentatives de datation des eaux avec des éléments en trace	15
Notes	16
Références	17

Détérioration de l'argilite : c'est physique

On commence à parler de l'EDZ ("Excavation Damaged Zone" et/ou "Excavation Disturbed Zone") dans les argilites à Bure, comme on l'a fait pour le tunnel du Mont Terri et à celui de Tournemire. La EDZ est la zone qui entoure une excavation dans un milieu peu résistant.

Un peu de physique. Les deux quantités fondamentales de la mécanique sont d'un côté les forces (la Statique), de l'autre les déplacements (la Cinématique). En milieu continu on utilise d'une part la contrainte, qui n'est autre que la quantité de force par unité de surface, et d'autre part la déformation qui est l'unité élongation (dérivée du déplacement). Dans la théorie de l'élasticité, on s'assure que les solutions (fonctions des conditions aux limites) garantissent un état d'équilibre pour ce qui concerne les contraintes, et un état dit de compatibilité (c'est à dire que la variation de la déformation soit continue) pour ce qui concerne les déformations.

Pour passer de l'une à l'autre de ces unités : contraintes à déformation, ou déformation à contraintes, on doit introduire des paramètres qui sont des propriétés du matériel⁽¹⁾.

L'excavation provoque localement un changement violent des contraintes (conditions aux limites !) auxquelles était soumise la roche confinée depuis des millions d'années à plusieurs centaines de mètres de profondeur.

Mais la déformation correspondante va être très dépendante du matériau : granite, calcaire ou argilite. Le granite est un matériau très rigide et particulièrement résistant à la rupture. La déformation résultante autour des puits et des galeries est donc très faible et stable. Cela sera encore en partie vrai pour un calcaire (à préciser vu ce qu'englobe ce terme). Mais on re-découvre que la situation est tout autre dans les argilites⁽²⁾. Ce type de roche est friable.

La résistance à la traction des argilites est vraiment plutôt petite et se forme un anneau de décompression autour de la cavité. Cela ne fera que s'accroître si on ne met pas dans les jours qui suivent un soutènement comparativement rigide. A Bure, pour le puits d'un diamètre de 6m, il est prévu de poser le plus rapidement possible une enceinte de béton de 45 cm d'épaisseur si bien que le diamètre utile tombera à 5m. Pour éviter des décollements des parois en attendant la mise en place de ce béton, l'agence annonce que seront mis tout de suite en place des boulons longs de 2 mètres (AND2, t.5 III p.5).

En élasticité linéaire, la différence de contrainte est la plus vive à la paroi même du puits et c'est là qu'il y aura fracture si fracture il doit y avoir. Mais une complication supplémentaire vient de ce que l'argilite n'est pas un matériau élastique linéaire. Celle-ci est en partie élastique pour une faible différence de contrainte puis devient plastique, dans le sens physique qu'il y a une déformation irréversible sans préfigurer de sa nature (cela est notamment des microfissures). On parle de comportement élastoplastique. La relation entre contraintes et déformation est moins simple en cas de rupture locale. Il y a une redistribution, un réajustement, des contraintes et on doit analyser les problèmes par des méthodes incrémentales numériques comme par exemple la méthode des éléments finis (le système est découpé en plein de petits éléments accolés)⁽³⁾. Le paramètre qui importe pour l'initiation des ruptures est la différence maximale des contraintes. De tels calculs numériques pour une cavité cylindrique indiquent que cette différence est moins vive qu'en élasticité linéaire mais aussi qu'elle se situe à l'intérieur du massif rocheux (Baker et al. 1970). S'il y a fracturation, celle-ci se produira donc à une certaine distance des parois de la cavité. Pour l'ancien tunnel ferroviaire de Tournemire d'un diamètre de 6 mètres dans une argilite raide, on observe un réseau de fractures parallèle à l'axe du tunnel sur une largeur de quelques mètres. "*Le tunnel vieux de 100 ans montre une Excavated Damages Zone (EDZ) très nette avec de grandes fractures qui pourraient drainer l'eau plutôt vite sur de grandes distances.*" (Bonin 1998, p. 326 et résumé).

Or des trois sites argilites étudiés, Mont Terri, Tournemire et Bure, seule la couche de Bure est immergée au sein d'un bassin sédimentaire saturé en eau circulante : le bassin parisien...

EDZ de Bure : les prévisions officielles

Pour l'argilite de Bure, les valeurs dites de référence de l'EDZ sont (D = diamètre de l'excavation) (AND2 t.1 II p.20; t.5 III p. 6 et tab. 3.2-10; AND3 B p.153, 195) :

□ jusqu'à 0,15 à 0,25 D : une "zone fracturée", en rupture, perméabilité accrue de 2 à 7 ordre de grandeur;

□ jusqu'à 0,5 à 1 D, une "zone endommagée", "irréversible (*microfissures*)", perméabilité accrue d'un à deux ordres de grandeur.

□ jusqu'à 3,5 à 4,5 D : "zone perturbée", déformation réversible (élastique), pas d'augmentation de la perméabilité [on appelle aussi cette zone : "zone d'influence"].

Il s'agit là de la décompression quasi immédiate, le soutènement prévu devant empêcher une aggravation avec le temps. Par ailleurs, à proximité des intersections entre puits et galeries et entre galeries, une extension de l'EDZ de 40% par rapport aux valeurs ci-dessus est attendue (AND3 B p. 153).

Il s'agit de prévisions : "... *des mesures sur échantillons, et sous différents états de contraintes mécaniques et de fissuration ont montré que la perméabilité à l'eau peut augmenter de 2 ordre de grandeur lorsque les argilites sont endommagées de manière diffuse. (...) les résultats acquis restent d'ordre qualitatifs.*" (AND3 B p.59). Et de fait le "2 ordre de grandeur" vient d'une unique expérience de 3 mesures sur un échantillon de quelques centimètres (AND2 t4 IV p. 29-32). Et, sans même parler de l'impressionnante différence d'échelle (du genre 10^{10}), cette expérience toute complexe et difficile qu'elle soit n'a pas grand chose à voir avec la variation de contraintes que la roche subira contre les excavations... Quand à la fourchette "2 à 7 ordres de grandeur" de la "Zone fracturée", il n'est pas précisé d'où elle vient.

Pour valider ou invalider ces prévisions officielles, va être conduite en 2005 l'expérience REP (**RE**ponse hydromécanique au creusement d'un **P**uits). Par le biais d'une quinzaine de petits forages, l'argilite est équipée avant le creusement du puits à des distances différentes de son axe. C'est pour cela que, malgré le calendrier expéditif de la loi Bataille, le creusement a du être interrompu dans le puits principal pour construire la niche à -445m dans les derniers niveaux plus résistants. Cette niche est dans la "zone A" de l'ANDRA capable de supporter un déviateur de contrainte à la rupture qui est presque le double de celui de l'argilite : 50 comparé à 27 MPa ("Valeurs de référence", confinement 10MPa; AND2 t.4 IV p. 10⁽⁴⁾). De cette niche les petits forages vont dans l'intervalle sommital des "Argiles de la Woëvre" soit entre -460 à -473m. Le fonçage reprend alors.

Et comme les valeurs prévisionnelles ont été obtenues par des calculs de statique (raisonnement physique présenté plus haut), au niveau de ces 13 mètres de l'expérience REP, le puits sera creusé par "*des méthodes mécaniques (brise roche)*" (AND2 t.5 III p.5).

Mais si le type principal d'excavation à la dynamite est repris postérieurement dans l'argilite pour retirer les millions de mètres cube pour établir le dépôt, l'extension de l'EDZ sera plus grande. Il faut apparemment ajouter aux valeurs de référence ci-dessus, de l'ordre de 0,15 D à 0,5 Diamètre avec des plans de tir adoucis, beaucoup plus avec des plans de tir à la dynamite normaux (AND2 t.5 III p.8-9).

En pratique, l'EDZ sera le plus souvent elliptique autour des puits parce que les contraintes principales in situ de la roche (ce sont les contraintes qui sont modifiées par l'excavation) ne sont pas égales⁽⁵⁾. Par exemple, elle est prévue d'une étendue de 0,4 à 0,6 D dans une direction (plan parallèle à la contrainte principale majeure) et 1 à 1,5 D dans la direction perpendiculaire (plan parallèle à la contrainte principale mineure; AND2 t.5 tab. 3.2-04).

Notons qu'à l'étape du dépôt, puits et galeries sont prévus d'un diamètre de jusqu'à 12 mètres (AND3 B p. 151; AND4 synthèse p. 32). Une extension de l'EDZ de l'ordre de 18 mètres (1,5 D) est donc attendue dans le massif rocheux et d'un coté et de l'autre du puits ou galerie selon l'une des directions (et plus encore s'ils sont creusés à l'explosif).

Retenons pour simplifier que l'EDZ est prévue être large de un diamètre. La formule de la surface du cercle montre que la section de l'EDZ [$\pi(3R)^2$ dont on retire πR^2] est 8 fois plus grande que celle du puits (πR^2). Le rebouchage des puits à l'abandon du dépôt, même si on admettait qu'il soit imperméable grâce au "savoir faire" de ceux qui auront à le faire, ne résoudrait donc nullement le problème de la détérioration de la perméabilité de la roche environnante qui résulte de l'intervention anthropique.

Comme il est logiquement avoué (AND4 p. 266) :

"..les analyses préliminaires de sûreté indiquent que la création d'une zone fissurée et/ou endommagée (EDZ..) autour des ouvrages souterrains d'un stockage peut constituer une voie de transfert privilégiée court-circuitant la barrière géologique en dépit des ouvrages de scellements des galeries et des puits." (c'est moi qui met en gras)

Déliçats travaux envisagés sur une partie de la EDZ

Il a été admis dans le confort de la salle d'ordinateur, pour toutes les modélisations 2001 (AND3), que la "zone fracturée" de l'EDZ (0,15 à 0,25 diamètre, d'une perméabilité accrue de 2 à 7 ordre de grandeur), a pu être supprimée sans affecter le moins du monde le reste de la EDZ. Les modélisateurs de l'agence ont décidé de lui affecter la perméabilité donnée au scellement de l'ancien puits en lui-même (AND3 A p.124; B p.153, 255, 257). Si ce scellement est sensé être celui de la bentonite imperméable par ex., c'est cette perméabilité très faible qui a été attribuée en modélisation à la "zone fracturée". Il ne reste donc qu'une EDZ de 0,5 à 1 Diamètre, d'une perméabilité $\times 100$.

Ce qui est pourtant sûr, c'est qu'on a pas actuellement le "Savoir faire" pour exaucer ce vœux. Une seule expérience un peu proche est en cours de réalisation dans l'argile de Boom à Mol en Belgique, avec la participation du CEA. Elle concerne un puits d'un diamètre de 2,2 m excavé en 1984 vers -225m. Le revêtement était épais de 40cm, le diamètre utile du puits étant de 1,4 m. Pour faire un essai de scellement par un bouchon de bentonite long de 3 mètres *"il était essentiel de retirer ce revêtement bien plus perméable que l'argile de Boom pour étanchéifier le puits de manière effective."*

Malheureusement et bien que le revêtement n'ai été retiré que sur 3 mètres là où a été vite mise la bentonite (et béton et films de résine de part et d'autre) (Dereeper et Volckaert, 2002) :

"En dépit de l'installation rapide du scellement ce qui minimise le déplacement potentiel de la roche hôte, l'enlèvement du revêtement a provoqué une perturbation hydromécanique importante de la roche environnante. Elle est plus large que prévue, particulièrement la fissuration jusqu'à au moins 1 mètre de distance radialement de la paroi du puits."

Le simple retrait d'une courte portion du revêtement sur un puits récent de taille modeste par des équipes d'ingénieurs de pointe sans limitation de crédits provoque la création d'une nouvelle phase EDZ. Même dans l'argile plastique de Mol, on parle alors de fissures...

Pour l'argilite raide et friable de Bure, on ne voit pas très bien comment les futurs techniciens inconnus pourront réaliser le vœux informatique 2001 de l'ANDRA pour des puits 6 fois plus larges qui auront subi des contraintes sur plusieurs décennies lorsqu'il faudra : a) retirer le revêtement de béton, b) retirer les boulons longs de 2 mètres, et c) "gratter" la "zone fracturée" profonde de plus de 2 mètres...

D'autant que comme on l'a vu plus haut, pour ce type de roche élasto-plastique, le niveau de fracturation maximale se situera non pas contre les parois mais à l'intérieur du massif, comme à Tournemire.

D'après les calculs numériques, il se pourrait que ce soit plus vers la limite entre ce que l'Andra appelle "Zone fracturée" et "Zone endommagée" que la fracturation sera la plus développée (Baker et al. 1970 fig. 6).

Face à ce constat, une manip de "secours", dite expérience KEY, qui ressemble un peu à la manip de la dernière chance, va être tentée : une saignée de quelques dizaines de cm de large et profonde de 2 à 2,7 m. Le but sera de la remplir finalement de bentonite compactée (mais en attendant on simulera avec résine et vérins...).

C'est l'aventure : *"Il faut tester la faisabilité (...) en vérifiant que la création de la saignée n'a pas prolongé la EDZ et que la mise en pression restaure en partie les propriétés de la roche."* (AND4 p. 288). *"La commission partage la préoccupation de l'Andra d'acquérir au plus tôt des informations sur le comportement in situ de la EDZ mais souhaite que la justification de l'essai proposé lui soit présenté."* (CNE 9^e rapport p. 32).

Notons que pour une cavité d'un diamètre de 12m, cela ne toucherait que moins du quart de l'épaisseur de la EDZ. Cela concernerait donc seulement la "Zone fracturée" (perméabilité officiellement accrue de 2 à 7 ordres de grandeur) et semble être le substitut, inavoué, recherché par l'agence au "grattage"

impossible de cette "Zone fracturée". Enfin cela n'est prévu que pour les galeries, pas pour les puits. Or c'est la EDZ des puits rebouchés qui joindra l'aquifère supérieur et le dépôt.

La EDZ dans les calculs de diffusion pour une eau immobile

La diffusion est un phénomène d'homogénéisation d'un élément dont la répartition est au départ inhomogène, une dissipation des gradients. Ce déplacement n'est qu'une conséquence de l'agitation thermique aléatoire, dite mouvement brownien. Dire qu'une espèce diffuse, c'est dire que sa masse se déplace relativement au mélange qui est par exemple une eau souterraine immobile (les molécules d'eaux se déplacent tout autant par diffusion mais deux points voisins envoient, en moyenne, autant de molécules semblables l'un vers l'autre et cela ne se voit donc pas, c'est un équilibre dynamique). On ne peut empêcher la diffusion. C'est par elle que nous captions notre oxygène au niveau des poumons. L'ANDRA a donné des estimations du temps diffusif pour une traversée de 50m de Callovo-Oxfordien (AND3 B p. 131) à partir d'un dépôt de déchets à Bure : 200 000 ans pour les anions⁽¹⁴⁾, 120 000 ans pour les cations non retardés (AND3 B p. 269; CNE 2002 8^e r. p. 43; un peu différemment dans CNE 2004 10^e r. p. 38).

Lorsque l'agence fournit de telles estimations :

1) Elle applique pour une très grande échelle des mesures faites par le CEA sur des échantillons épais de tout juste 1cm. La représentativité de ces échantillons n'est pas forcément garantie puisqu'il est fréquemment reporté des problèmes d'échantillonnage dus au "discage" des carottes. Or des modélisations à l'échelle du bassin parisien arrivent à la conclusion qu'il faut donner au coefficient de diffusion (exemple de l'hélium) des valeurs 10 à 20 fois plus hautes que celles mesurées sur échantillons callovo-oxfordien de 1cm (CNE 2002, 8^e r. p. 42; de Marsily et al. 2002, p. 955). Le problème d'échelle est plus que posé. Il faudrait proposer un temps de migration divisé par 10 puisqu'il est directement inversement proportionnel au coefficient de diffusion (Bonin 1998, p. 322)⁽¹⁴⁾. Le temps théorique devrait être de 20 000 et 12 000 ans respectivement pour anions et cations non retenus et pour un 50 m théorique d'argilite traversée. L'agence omet de le préciser.

2) L'effet de la température dont dépend par définition le mouvement brownien n'est pas exposé. Dans les déchets "B", les "Coques et embouts" (= les "B4" et "B5") sont exothermiques.

3) L'agence modélise une hypothétique couche Callovo-Oxfordienne homogène de 130 m. Tel n'est pas le cas. Le tiers supérieur du Callovo-Oxfordien, la zone dite "A", est rigide⁽⁴⁾ donc peut être parcourue de diaclases/fractures ouvertes. C'est alors une zone perméable où l'eau circule comme cela a été constaté dans le forage pétrolier de Lezéville à moins de 7 km du site de Bure (perte totale des fluides de forage dans les 58% supérieurs de la Zone A; Coparex 1989). Il est impossible en l'état de prévoir à distance la présence de tels fractures joints et diaclases dans une roche cassante. Il serait donc non seulement "raisonnablement pénalisant" mais surtout responsable, de ne pas inclure la "zone A" rigide du Callovo-oxfordien dans le calcul de migration diffusive puisque le relais par circulation convective en fissures peut se faire dès ce niveau. Si l'on part de 290m (cote du futur laboratoire), qu'on retire le rayon des galeries pour le dépôt envisagé ($1/2D=6m$) et l'épaisseur de la EDZ horizontale supérieure associée ($=D=12m$), il ne reste alors que 22 mètres avant d'atteindre la "zone A" rigide. Si l'on se met au centre du faciès argilite (Callovo-oxfordien moins la "zone A" rigide et divisé par deux), il reste 33m entre les EDZ et les zones cassantes supérieures ("zone A") et inférieure ("Dogger", en fait Dalle nacrée). Et comme le temps de diffusion est proportionnel au carré de la distance parcourue⁽¹⁴⁾ les temps théoriques aux anions et cations pour atteindre ces zones potentiellement fracturées chutent plus que ne le fait la distance. Ils sont respectivement de 86 500 et 52 300 ans si l'on ignore l'effet d'échelle. Avec un effet d'échelle de 10, cela signifie que les anions et cations non retenus peuvent atteindre massivement des parties fracturées de la "Zone A" (en contact avec l'aquifère Oxfordien comme à Lezéville) respectivement en 8 700 et 5 200 ans. Ce raisonnement est valable pour l'argilite vierge.

4) Mais il est impossible d'enfouir les déchets sans créer une EDZ qui est jusqu'à présent ignorée dans les calculs de diffusion. Pourtant la création "*...de grandes fractures qui pourraient drainer l'eau plutôt vite sur de grande distances.*" (Tournemire, Bonin 1998, résumé) va réduire considérablement la tortuosité naturelle de la roche tout au long du dépôt puis verticalement vers l'aquifère supérieur. Le coefficient de diffusion dans de tels couloirs devrait être très significativement

augmenté. En effet : "Le coefficient de diffusion d dans un milieu poreux est cependant plus petit que celui dans l'eau d_0 , approximativement $0,7 d_0$ dans le sable, et $0,1 d_0$ à $0,01 d_0$ pour l'argile. Le coefficient de réduction ($0,7$ à $0,01$) est quelque fois appelé la tortuosité du milieu." (de Marsily et al. 2002, p. 952). Or "Les valeurs du coefficient de diffusion mesurées sur échantillons de l'argile du Callovo-oxfordien sont plus vers $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}^2/\text{s}$, c'est à dire une tortuosité d'environ $0,01$." (idem p. 955). A l'échelle du bassin parisien, ces auteurs arrivent à une tortuosité des niveaux d'argilite de $0,3$ comme leur meilleur calage de leur modèle (idem p. 955), résultat qu'ils expliquent par l'effet d'échelle.

Dans les couloirs EDZ le coefficient de réduction, ou tortuosité, ne peut être que beaucoup plus faible que dans l'argilite vierge (fractures ouvertes), c'est à dire qu'on se rapprochera encore plus des valeurs de coefficient de diffusion dans les liquides. Qualitativement le coefficient de diffusion dans l'EDZ devrait être des dizaines de fois supérieur à celui mesuré sur échantillons de 1 cm . Le temps de migration diffusive qui lui est directement inversement proportionnel devrait être dans ces couloirs des dizaines de fois plus court que celui donné par l'agence aux autorités. Comme on l'a vu plus haut, pour franchir les 33 mètres qui séparent la EDZ supérieure d'un dépôt (centré) à la "zone A" cassante du Callovo-oxfordien, les temps de diffusion théorique obtenus avec les coefficients mesurés sur échantillons sont $86\,500$ et $52\,300$ ans pour anions et cations non retenus. On peut s'attendre à ce que ce temps ne soit que d'une paire de millénaires via la faible tortuosité de la EDZ des puits rebouchés dans le cas d'une eau totalement immobile.

Convection/advection : qu'est-ce qui fait couler l'eau ?

Mouvement convectif ou advectif sont des expressions employées pour signifier que l'eau souterraine (qui entraîne les éléments lessivés) se déplace. C'est en quelque sorte par opposition à une migration par diffusion, dans quel cas on raisonne généralement par simplicité sur la base d'une eau qui est immobile (mais la diffusion se produit aussi dans l'eau en mouvement).

Le moteur de l'écoulement de l'eau est ce qu'on appelle la différence de charge hydraulique, Δh , ou perte de charge, par exemple entre Dogger et Oxfordien ou entre deux points de l'Oxfordien ou entre deux points du Dogger. La charge hydraulique, h , également appelée hauteur piézométrique est tout simplement la pression visualisée comme la hauteur d'une colonne d'eau à l'endroit considéré, en mètres. C'est la très simple loi du chevalier Henri Darcy établie en 1856 sur les colonnes de sable des fontaines de Dijon. Il faut bien sûr rapporter cette différence à la longueur du trajet parcouru, H , et voilà défini le gradient hydraulique $i = \Delta h/H$ (donc en mètre/mètre). La loi de Darcy qui donne une vitesse apparente d'écoulement de l'eau, v (m/s), s'écrit le plus simplement du monde : $v = K i$.

Et K ?, c'est tout simplement le coefficient de perméabilité maintenant appelé conductivité hydraulique : les 10^{-13} , 10^{-9} m/s, etc., dont on parlera abondamment ci-dessous.

Des deux paramètres K et i , c'est K qui de très loin présente la plus grande amplitude de variation (entre 10^{-13} et 10^{-9} m/s par exemple, il y a un facteur $10\,000$). Le paramètre K est connu en physique pour être l'un des rares dont l'intervalle de variation est de 13 ordres de grandeur. Des petites causes entraînent de fortes variations de K et donc de vitesse de Darcy⁽⁹⁾. La plus belle illustration en est la "zone fracturée" où, simplement parce qu'on a creusé à proximité, la perméabilité peut être accrue de 10^7 c'est à dire d'un facteur 10 millions.

Il faut distinguer qu'au sein de la loi de Darcy il y a deux grandeurs physiques différentes :

"- le déplacement physique des molécules d'eau dans les terrains, généralement lent,
- la transmission des gradients de charge ou de pression qui peut être très rapide d'un bout à l'autre de l'aquifère." (Detay, M. 1997, p. 33). Le récent tsunami de l'Océan indien nous a ouvert les yeux à ce sujet même si ce n'était pas dans un milieu poreux. C'est à cause de cette transmission rapide des gradients de charge qu'il est si important de connaître les conditions aux limites d'un aquifère, même si elles nous semblent être bien distantes.

Le scénario 2001 qualifié de «normal» en quatre points

L'agence a défini un scénario présenté comme de la situation «normale», avec :

- a) une perméabilité (K) verticale "en grand" de l'argilite $\leq 10^{-13}$ m/s,
- b) un rebouchage des puits qui sera parfaitement réussi avec une perméabilité $\leq 10^{-13}$ m/s,
- c) une zone fracturée supprimée sans difficulté, sa perméabilité étant devenue $\leq 10^{-13}$ m/s,
- d) une perméabilité de l'EDZ verticale restante (la "Zone endommagée") de 10^{-11} m/s.

Comme on lit dans les manuels que la perméabilité d'une roche argileuse classique tourne autour d'une médiane de 10^{-11} m/s (par exemple Freeze and Cherry 1979 p. 29), on peut penser que ce scénario revient à mettre par la pensée les déchets chimiques et atomiques au sein d'un massif d'argilite vierge. Cela revient à supprimer l'existence des puits et leur EDZ ce qui, hormis un calcul dit de justification avec l'iode, est effectivement ce qui a été fait :

"Le modèle conceptuel du stockage retenu représente donc les modules sans prendre en compte les galeries de liaison et les puits avec un relâchement des radionucléides depuis les modules de stockage dans la formation hôte." (AND3 B p. 258, c'est moi qui met en gras)

Tout réside dans le choix des chiffres. Reprenons ces quatre points :

□ **point a)** : L'agence affirme que les valeurs qu'elle a choisies en modélisation "en grand" sont "raisonnablement pénalisantes" (AND3 B p. 252). Sur 14 valeurs de perméabilité des argilites s.s. ("Argiles de la Woëvre" = niveaux C_{2a} + C_{2b}) mesurées in situ, 3 ont été données inférieures à 10^{-13} m/s. L'une a été ré-interprétée (devenue $2 \cdot 10^{-13}$ m/s, EST211; AND6 t.1 p. 217). Une autre est considérée en résultats "non stabilisés (...) une révision est sans doute nécessaire à une interprétation plus fiable" (EST212; AND6 t.1 p. 195). Il en reste une : $2 \cdot 10^{-14}$ m/s (sonde EPG, EST107 à Cirfontaines; AND5 vol.1 p. 30) qui a déjà elle-même donné lieu à plusieurs interprétations (AND2 t.4 III p. 10). Toutes les autres valeurs sont égales ou plus élevées que 10^{-13} m/s.

Sur le site de Bure, elles sont comprises entre $1 \cdot 10^{-13}$ et $5,5 \cdot 10^{-13}$ m/s (8 valeurs, AND6 t.1 p. 191-220). A HTM102 (Cirfontaines) c'est $1,98 \cdot 10^{-12}$ et $5 \cdot 10^{-12}$ m/s (AND1 p. 36 test n°7 et 8, valeurs médianes). Enfin à Morley (MSE101) c'est de $3,9 \cdot 10^{-12}$ à $9,35 \cdot 10^{-12}$ m/s (AND1 p. 37, test n°6, 7 et 8).

Une comparaison a pu être faite à Bure pour deux intervalles définis entre la perméabilité mesurée en forage vertical (dont il a pu être argumenté que le test ne mesure que la perméabilité horizontale) et en forage très incliné : 69° par rapport à la verticale (forage EST211). Les valeurs mesurées en forage très incliné ne sont pas inférieures (elles ont même été trouvées légèrement supérieures, le double, dans les deux cas; AND6 t.1 p. 217-18). Il n'est donc pas possible de différencier une perméabilité horizontale et une perméabilité verticale "en grand". Dans ces tests, les paramètres perméabilité et charge sont liés (AND6 t.1 p. 210). Or l'interprétation de la surpression (la charge) observée dans les argilites continue de poser problème. On ne sait pas quelle part y prend le fluage de l'argilite au voisinage du forage ou un gonflement des argiles par interaction avec le fluide de forage, c'est à dire des artefacts (AND6 t.1 p. 196, p. 215, CNE 10^èr, 2004, p. 24). Charge et perméabilité étant liées dans les tests, on est pas en mesure de savoir non plus l'impact que cela a sur l'estimation des perméabilités.

Morley est en plein dans la zone dite "équivalente de transposition des données de laboratoire souterrain à un stockage". La moyenne des trois mesures disponibles de perméabilité de l'argilite y est de $5,83 \cdot 10^{-12}$ m/s. C'est une perméabilité mesurée 58 fois plus haute que celle retenue en modélisation informatique "en grand" ! Non seulement la valeur choisie, $\leq 10^{-13}$ m/s n'est pas pénalisante, elle est inexplicablement inférieure aux mesures "en grand" dont on dispose.

□ **point b)** : Le but du rebouchage est double : 1) soutien mécanique au massif rocheux sans quoi l'EDZ se développera; 2) appui latéral aux quelques "scellemets" prévus de bentonite (longueur de "référence" : 7,5 m; AND3 B p. 295). Une fois saturée, la bentonite est censée exercer une pression sur la roche en place à son niveau, mais cela ne se produira pas si la bentonite peut gonfler latéralement. La mauvaise nouvelle a été annoncée dans AND4 (p. 109 à 114). Pour atteindre ces buts, il faudrait un remblayage dont le module sécant (la rigidité) est 200 MPa. Or celui de l'argilite extraite remaniée remise en place en galerie ne devrait pas dépasser 13 à 43 MPa, soit entre 4,5 et 15 fois moins qu'il est

nécessaire. Donc si on remet les quelques millions de m³ d'argilite où on l'a prise, la EDZ s'élargira et les scellements seront inefficaces. L'agence cherche "*des pistes alternatives*".

□ **point c)** : Enlèvement de la zone fracturée : irréaliste en l'état comme discuté plus haut dans "Déliçats travaux...", vraisemblablement impossible sans créer une nouvelle EDZ au delà donc de section encore plus grande. Conséquences absolument considérables (facteur de plusieurs ordres de grandeur) en terme de perméabilité, de sûreté, des doses calculées pour les futurs habitants...

□ **point d)** : L'agence reconnaît que :

"La fracturation est le seul phénomène à prendre en compte dans la modification de la perméabilité, car il joue d'une part sur les vitesses de transport en créant un réseau discret dont la perméabilité locale peut dépasser de plusieurs ordres de grandeur celle des argilites intactes, d'autre part sur les directions d'écoulement." (AND2, t.1 II, p. 20).

"Dans l'état actuel des connaissances, et compte tenu de la relativement grande dispersion des résultats, aucune anisotropie vis-à-vis des critères de rupture n'a été mis en évidence." (AND2 t.4 IV p. 10).

Mais en conflit patent avec ces constats, et évidemment sans justification possible, toute la modélisation 2001 utilise une perméabilité pour l'EDZ verticale 100 fois inférieure à celle de l'EDZ horizontale : 10⁻¹¹ à comparer à 10⁻⁹ m/s (AND3 B p. 292) !

C'est à la suite de cette cascade de choix qu'on arrive à une perméabilité de l'EDZ verticale qui n'est autre que celle d'une roche argileuse moyenne (= concrètement la EDZ a disparu).

Mais il ne peut y avoir de dépôt à la limite Meuse-Haute-Marne sans puits pour y accéder et le scénario appelé «*normal*» est sans intérêt.

Malgré tout l'agence donne le résultat d'un autre scénario qu'elle a baptisé «*altéré*». Dans ce scénario, il est toujours admis :

- le $\leq 10^{-13}$ m/s du point a),
- l'inexistence de la zone fracturée du point c),
- le 10⁻¹¹ m/s EDZ vertical du point d).

Mais il est maintenant considéré que le rebouchage (le point b)) est moins idéal, que la perméabilité du scellement (=diamètre du puits + "Zone fracturée") est 10⁻⁹ m/s. La modélisation donne pour ce scénario «*altéré*» que la moitié de la pollution passerait par l'ancien puits rebouché (AND3 B p. 288).

Mais 10⁻⁹ m/s, c'est justement la perméabilité de l'EDZ, l'EDZ horizontale. Puisqu'il n'y a pas d'anisotropie mise en évidence pour le critère de rupture et que la perméabilité est directement liée à la fracturation, il n'y a pas de raison technique de considérer que la perméabilité de l'EDZ verticale soit très éloignée de cette valeur (i.e. le 10⁻¹¹ m/s du point d) est sans justification technique valable). Or la section de l'EDZ est 8 fois plus étendue que celle du puits et encore 7 fois celle du "scellement" défini dans le «*scénario altéré*». Tenir compte dans les modélisations de la EDZ verticale nous met donc encore bien plus sûrement en scénario "altéré" (le 10⁻⁹ m/s s'applique à une section 7 fois plus grande que dans le scénario), quelque soit d'ailleurs la perméabilité du puits rebouché en lui-même. Et si l'on tient compte de la "Zone fracturée" dont la perméabilité est plus élevée encore de quelques ordres de grandeur...

Conclusion, on ne voit pas très bien comment ce court-circuit de la barrière géologique peut être évité⁽⁶⁾.

L'inévitable à Bure

Avec les scénarii appelés «*altérés*» par l'agence (perméabilité verticale du puits rebouché + "zone fracturée" $\geq 10^{-9}$ m/s) et qui semblent complètement inévitables d'après les données actuelles, il a été calculé que⁽⁸⁾ :

"Les temps caractéristiques de migration convectifs depuis le module jusqu'au puits d'accès sont de l'ordre de quelques centaines d'années à quelques milliers d'années selon les cas. La barrière géologique constituée par la formation du Callovo-Oxfordien est court-circuitée." (AND3 B, p. 288, c'est moi qui met en gras).

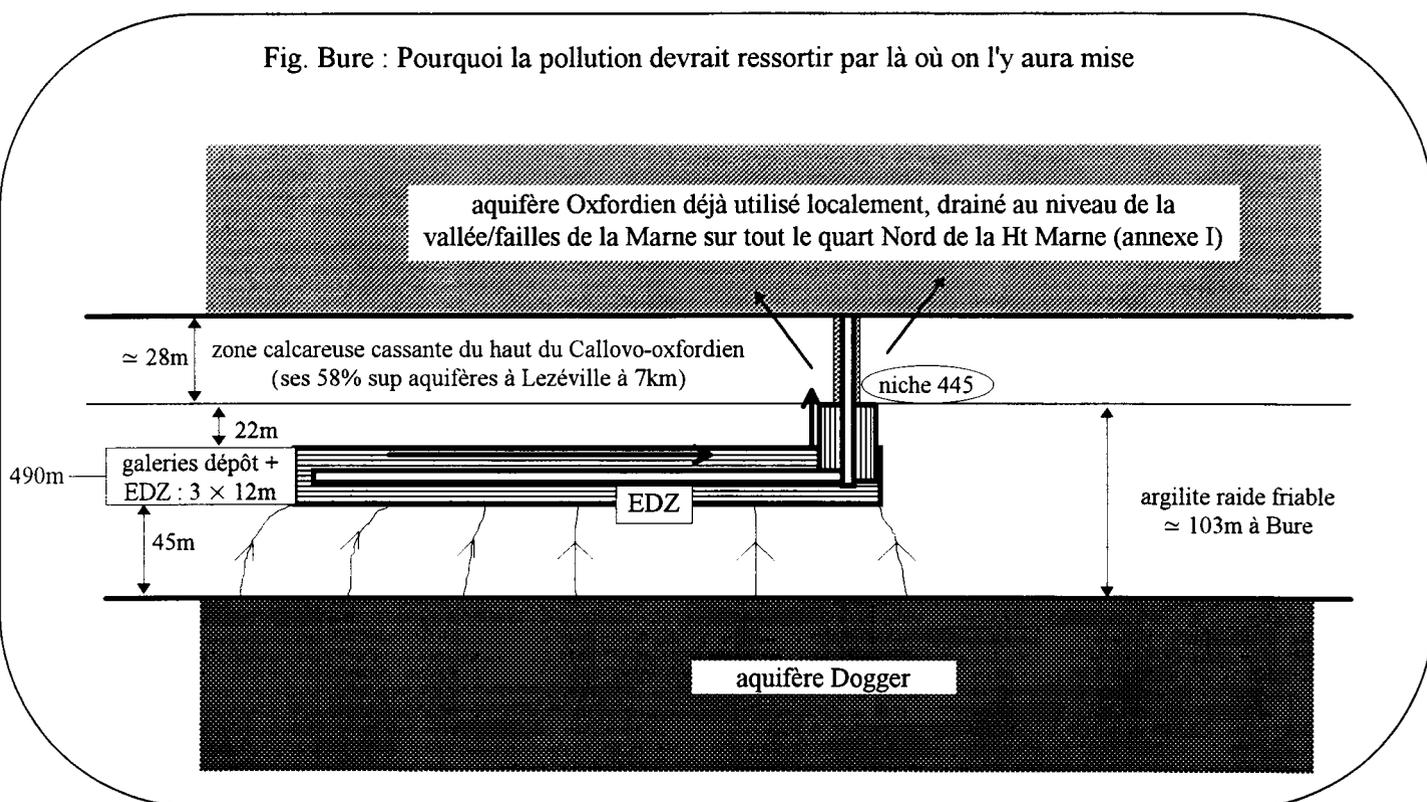
Pourquoi ?

"... la charge imposée au toit [sommet] du Callovo-Oxfordien est transmise (avec de faibles pertes de charge suivant les cas), via le puits, jusqu'au premier scellement efficace.

La présence de scellements efficaces (scellements de fractionnement, bouchons d'alvéole) dans le stockage induit alors une perte de charge à la traversée de la zone scellée, mais cette dernière apparaît insuffisante pour contrôler le schéma hydraulique du stockage : la charge imposée au toit du Callovo-Oxfordien est partiellement transmise au sein des modules de stockage, en particulier par les zones endommagées de perméabilité supérieure à celle des scellements efficaces. A titre d'exemple, si le scellement efficace est un scellement de fractionnement (placé à l'horizontale dans une galerie), la charge hydraulique se transmet au module par la zone endommagée autour des galeries (...) La transmission de la charge au sein du stockage induit des écoulements convergents vers la galerie de liaison et vers le puits d'accès. La migration des radionucléides s'effectue alors par transport convectif au sein des galeries et/ou des zones endommagées vers le puits." (AND3 B p. 287-88, c'est moi qui met en gras).

Cela se produit donc même avec la "Zone fracturée" (0,15 à 0,25 diamètre, d'une perméabilité accrue de 2 à 7 ordres de grandeur par rapport à la roche saine) purement et simplement supprimée dans le modèle.

Fig. Bure : Pourquoi la pollution devrait ressortir par là où on l'y aura mise



C'est que, contrairement à celles du Mont Terri et de Tournemire, la couche d'argilite de Bure est immergée au sein d'un bassin sédimentaire saturé en eau circulante : le bassin parisien.

Pour un gradient ascendant, on visualise que l'EDZ empruntée par l'eau sera comme un serpent qui remontera du fût le plus éloigné jusqu'à l'aquifère calcaire supérieur en prenant l'intégralité du dépôt en enfilade (galeries puis puits). La pollution devrait ressortir par là où elle aura été mise.

Dans le cas où l'écoulement est du haut vers le bas, il faut inverser les flèches sur le graphique ci-dessus. La EDZ des puits transmet toujours la charge du sommet du Callovo-Oxfordien au niveau du dépôt et le gradient est environ doublé entre celui-ci et le Dogger (vu que la distance entre les charges est divisée par 2). La migration du polluant sera plus longue dans ce sens parce qu'au lieu de couloirs EDZ, il y a 45 m d'argilite normale entre EDZ horizontale et Dogger⁽⁷⁾. La présence éventuelle

d'anciennes zones fracturées dans cette partie inférieure aurait un effet considérable (augmentation locale de la valeur de K d'ordres de grandeur, c'est tout simplement autant d'équivalents-EDZ verticales disposés en plans plutôt qu'en anneaux et connectés à l'EDZ horizontale).

Direction des écoulements

Il faut connaître la répartition des valeurs des charges hydrauliques, h (m), appelées aussi hauteurs ou cotes piézométriques, dans les aquifères. C'est ce qu'on appelle les cartes piézométriques. Elles sont formées de courbes d'égale charge hydraulique, dites isopièzes, en mètres NGF, c'est à dire exprimées par convention en Nivellement Général compté au dessus du niveau moyen des mers, la même référence que la topographie de la surface du sol. Les liens entre les deux sont ainsi apparents :

- la cote de l'altitude de la zone de recharge aux affleurements est la valeur maximale de la cote de h ,

- si une vallée profonde draine un aquifère, la valeur de la charge hydraulique à son approche peut tomber à peu près à la cote qui est celle du fond de la vallée;

- on est en zone d'artésianisme lorsque la cote de charge hydraulique est plus haute que la topographie de l'endroit, etc.

Aquifère Oxfordien

A l'Est d'une ligne Cirfontaines-en-Ornois – Montiers-sur-Saulx (ligne C–M), la situation est trouvée classique. En partant du fossé tectonique de Gondrecourt (AEP Lezéville, $h = 327\text{m}$; AND1 p. 58), la charge diminue lorsque l'on s'éloigne du fossé tectonique et des affleurements en se déplaçant vers le N-W : direction de Bar-le-duc (Morley, $h = 256\text{m}$). Le gradient horizontal i est d'environ 0,4 %, soit une baisse de h de 4 mètres chaque kilomètre parcouru dans cette direction. A l'Ouest de cette ligne C–M au contraire la direction pique droit sur la vallée/failles de la Marne, sur Joinville. C'est une direction perpendiculaire à la précédente et le gradient i est plus élevé : 0,45 à 0,55 %. Dans un forage 2003 à partir des hauteurs six kilomètres à l'Ouest de Joinville (Nomécourt, EST342), h est 196m NGF ce qui correspond à l'altitude de la bourgade de Joinville tout au fond de la vallée de la Marne. La vallée/failles de la Marne effectue selon toute vraisemblance un vigoureux drainage des eaux qui circulent dans les calcaires oxfordiens à commencer de Montiers-sur-Saulx (soit sur une bande large de plus de 10 km sur le flanc Est de la vallée). La vallée et rivière Marne est l'une des grandes sources d'eau, eau potable notamment, pour le bassin parisien en aval : très nombreux villages et villes comme St Dizier, Châlons-en-Champagne, etc. Tous sont connectés directement au projet d'enfouissement à Bure via l'Oxfordien.

Aquifère Dogger

Les données sont particulièrement énigmatiques.

- Premièrement à l'Est de la ligne C–M (Cirfontaines–Montiers) sur une bonne partie de la zone dite "équivalente de transposition des données de laboratoire souterrain à un stockage" (AND2 t.5 fig. 4.4-01), il n'y a que quelques mètres de variation autour d'une valeur h de 290m (Cirfontaines : 289; Bure : 290,5; Demanges : 292; Morley : 286m; AND5; AND6 p. 203, p. 268). La remarque CNE de 2002 (8^er p. 45) reste d'actualité : " La direction précise des écoulements dans le voisinage du site est en fait inconnue et, de plus, la faible différence de charge observée entre ces deux forages (3m) alors qu'ils sont distants de 15 km, est difficile à expliquer.". Considérant que cette sorte de plateau de la hauteur de la charge hydraulique h autour de 290m au sein du Dogger sur toute la zone n'est pas explicable par écoulement horizontal, l'ANDRA écrivait en 2001 : "... une forte perméabilité du Trias détritique qui par drainance à travers les différents semi-perméables le séparant du Dogger impose la structure de son champs de charge à ce puissant niveau calcaire." (AND2 t.5 II p. 6).

L'hydrogéochimie aboutit à la même conclusion : "La source de chlorures dans les eaux du Dogger de la zone peut résulter d'un apport des horizons sous-jacents. (...) ...des apports en chlorures des horizons sous-jacents, vraisemblablement en relation avec les niveaux salifères rencontrés à l'est du bassin de Paris dans le Trias. Ces apports sont variables en fonction de la localisation des forages." (AND5 vol. 1 p. 166-67).

Ainsi la charge hydraulique dans l'aquifère Dogger serait dépendante de celle de l'aquifère profond du Trias par le lien hydraulique vertical des charges. Mais on ne sait rien de cet aquifère Trias sous la zone. On est dans la situation absurde où malgré plus de 11 ans de présence, l'agence n'a jamais fait pousser un seul de ses forages jusqu'à lui. Cela alors que en plus, il est un gros réservoir géothermique potentiel "...à l'aplomb du département de la Meuse, région dans laquelle leur température est la plus intéressante." (AFME et al. 1983, p. 124, c'est moi qui souligne).

□ Deuxièmement, cette charge hydraulique de 290m n'est pas à sa place. Pour la relier à la charge hydraulique aux affleurements (liée à leur altitude), il faut imaginer un long plateau piézométrique Nord-Sud sans aucune perte hydraulique entre St Blin et Demange-aux-eaux soit sur 35 km (AND5 vol.2 fig. 7-5). Le manque de perte de charge progressive si la circulation était ainsi horizontale Sud–Nord sur une telle distance serait énigmatique. Dans les interstices du sol, la viscosité de l'eau ne peut pas être négligée et il y a une perte de charge. Voilà pourquoi on peut lire cette intéressante petite phrase-2004 (AND5 vol.1 p. 163) :

"A l'amont du site, le fossé de Gondrecourt pourrait se situer sur une crête piézométrique."

Autrement dit la charge hydraulique au sein du Dogger est trouvée plus élevée au alentours du fossé de Gondrecourt qu'elle ne l'est de part et d'autre, et à l'Est, et à l'Ouest.

Sorte de clin d'oeil à cette situation moderne, les indices disponibles sont que l'ensemble de la pile sédimentaire, des roches affleurantes actuelles jusqu'à la couche Trias, a dans le passé été parcouru par l'eau souterraine au niveau du fossé tectonique de Gondrecourt : *"les données en $\delta^{13}C$ sur les calcites de colmatage du fossé de Gondrecourt montrent une remontée d'un fluide équilibré en C avec le Bathonien vers la surface. - les données en Sr (...) montrent l'apport d'un Sr radiogénique d'une signature similaire à celle des formations du Trias. Cette signature aurait ainsi été acquise par un fluide météoritique dans les niveaux Triasiques qui aurait remonté le fossé, puis aurait percolé les calcaires,..."* (AND4 p. 211-12).

Conclusion, la situation est maintenant claire. Il y a un lien hydraulique actuel comme aux temps géologiques entre les eaux du Trias et celles du Dogger. Le fossé tectonique de Gondrecourt joue un grand rôle dans cet échange. Il n'y a pas "d'exception Bure", la situation est exactement celle connue dans le centre du bassin (Worden & Matray 1995).

□ La Ligne Cirfontaines–Morley (ligne C–M) semble pour le Dogger aussi correspondre à un basculement hydraulique du même type qu'enregistré au sein de l'Oxfordien. La charge hydraulique h diminue à partir de là et en allant droit sur la vallée/failles de la Marne (de 286m à Morley à 250m à Nomécourt, EST342, 6 km à l'Ouest de Joinville) figurant un gradient i de 0,16%. L'agence a attendu 9 et 10 ans pour faire 4 nouveaux forages atteignant le Dogger. Ces nouvelles données ont balayé en un mois la modélisation de référence 2001 faite en l'absence de toute carte piézométrique au Dogger. Comme écrit avec pudeur la CNE dans son dernier rapport (2004, 10^er, p. 20) : *"Les cartes piézométriques préliminaires présentées à la Commission indiquent une modification très sensible des directions d'écoulement dans le Dogger par rapport aux estimations antérieures (écoulement vers l'Ouest et vers le Sud Ouest)."*

La simulation ANDRA/ANTEA dite de référence 2001 prévoyait en effet que l'eau dans le Dogger coulerait plein Nord à partir de Bure (AND2 t5 fig. 2.1-03) et qu'une partie partirait vers l'Est-Nord-Est pour un exutoire vers Toul (CNE 2002, 8^er, p. 46). ANDRA/ANTEA 2004 arrive à presque l'exact opposé pour la même eau dans la même couche ! : vers le Sud-Ouest (AND5 vol.2 fig. 7-5).

Comme on dispose de 6 forages au Dogger pour 1200 km² dans lesquels sont situés deux fossés tectoniques et autres faisceaux de failles et des flexures dont l'importance hydraulique est de plus en plus évidente, il est prématuré de dire qu'on aura pas encore d'autres surprises.

Ce gradient décroissant vers le Sud-Ouest à l'Ouest de la ligne C–M n'a rien à voir avec la disposition des affleurements bien au contraire. C'est une nouvelle fois la vallée/failles de la Marne qui a en toute vraisemblance un effet profond sur la circulation de l'eau au niveau du Dogger aussi.

Force est de constater que les eaux qui sont dans l'Oxfordien et celles qui sont dans le Dogger subissent à l'Ouest de la ligne C–M cette même profonde influence de la vallée/faille de la Marne.

Gradients entre Dogger et Oxfordien

□ A l'Est de la ligne Cirfontaine–Montiers :

De la situation simplifiée juste décrite : gradient régulier dans l'Oxfordien, plateau de la valeur dans le Dogger, il résulte que i ne sera pas constant. La valeur de $h \simeq 290$ m, celle dans le Dogger sur la zone, est aussi celle de l'un des isopièzes dans l'Oxfordien. Cet isopièze dans l'Oxfordien passe quelque part entre Bure et Montiers-sur-Saulx. Donc le long d'une courbe à peu près SSW à E, la valeur de i entre les deux aquifères sera nulle. Mais au sud (environ 1/3 de la zone dite "équivalente de transposition des données de laboratoire souterrain à un stockage"; AND2 t.5 fig. 4.4-01), $i = 0,1$ m/m puis $i = 0,2$ m/m (Bure puis HTM102-Cirfontaines) conduit l'eau à descendre de l'Oxfordien au Dogger. Et à l'inverse au nord (environ les 2/3 de la zone dite "équivalente de transposition des données de laboratoire souterrain à un stockage") : i vaut respectivement 0,2 et 0,15 m/m et pousse l'eau à monter du Dogger à l'Oxfordien (Morley MSE101 et Demange-aux-eaux EST312).

On est pas dans une zone hydraulique monotone où la valeur de i est constante. Au contraire la valeur de i varie continuellement dans l'espace avec un intervalle de magnitude de 0,4 m/m (d'après les 4 points connus) avec un mouvement théorique de l'eau en sens inverse de chaque côté d'une zone d'inversion. Un problème physique se pose : quelles seraient les conséquences hydrauliques de l'instauration d'une tuyauterie au bas mot 10 000 fois plus perméable traversant un tel gradient de i ? La géochimie des eaux, et cela implique des échantillons de HTM102-Cirfontaines, n'est pas compatible avec un mouvement advectif/convectif du haut vers le bas sur le long terme : "les chlorures présentent un comportement chimique simple et peuvent être assimilés sans ambiguïté à un traceur conservatif." (AND2 t1 II p. 22). Plus loin : "Le système Callovo-Oxfordien se comporte donc comme un système ouvert vis-à-vis des chlorures. En d'autres termes : les chlorures sont échangés entre le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes." (idem p.23). Avec : "Les concentrations en chlorure étant plus grandes dans le Dogger que dans l'Oxfordien calcaire d'une part, supposées intermédiaires dans le Callovo-Oxfordien -compte tenu des imprécisions de mesures de la composition interstitielle des argilites-..." (idem p. 24). Et enfin : "Dans l'hypothèse d'une migration ascendante par diffusion-convection en régime permanent, l'hypothèse d'une migration descendante peut être écartée à la vue du profil vertical de concentration en chlorure." (AND2 t.1 II p. 25, c'est moi qui souligne).

□ A l'Ouest de la ligne Cirfontaine–Montiers :

En piquant droit sur la vallée de la Marne la charge dans le Dogger diminue (0,16%) mais la diminution est beaucoup plus forte dans l'Oxfordien (0,45 à 0,55%). De nouveau la valeur de i varie continuellement dans l'espace. Une inversion de gradient doit se produire un peu en amont de Montreuil-sur-Thonnance. En amont on retrouve la situation Cirfontaines (HTM102). En aval, vers l'Ouest, le gradient pousse l'eau à monter du Dogger à l'Oxfordien ($i = 0,55$ m/m à Nomécourt 6 km à l'Ouest de Joinville).

Les valeurs des gradients hydrauliques entre les deux aquifères ne sont pas fixes

Les valeurs des gradients hydrauliques, i , évoluent très vite sous l'effet de l'action anthropique par exemple. L'exemple classique est l'exploitation des "sables verts" albiens à Paris depuis 1841. La charge hydraulique dans ces sables sous l'agglomération a diminué de 106 mètres (Raoult et al. 1998). Or outre un usage local accru parfaitement prévisible (Annexe I), l'Oxfordien apparaît comme une cible potentielle pour la géothermie entre Reims et Paris, l'eau n'ayant pas à être réinjectée (exploitation de Reims-Murigny; AFME et al. 1983, p. 122; alors que l'eau exploitée du Dogger à l'Est de Paris est réinjectée).

Cet aquifère supérieur Oxfordien est actuellement utilisé pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) à Lezéville, à moins de 7 km de la plate-forme de Bure. D'autres communes seront fatalement tentées de faire de même, puisque : "Lezéville et ses communes associées ne sont pas les seules à souffrir de ces difficultés car, eu égard au contexte hydrogéologique, c'est tout le secteur géographique situé au Nord-Est du canton qui est affecté par un déficit qualitatif et quantitatif de la ressource en eau." (ConsGéné 52, 1998, c'est moi qui met en gras, il s'agit de la zone même de Bure).

La transmissivité (=perméabilité \times épaisseur) de l'Oxfordien à Montreuil-sur-Thonnance par exemple : $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s (AND5 vol.1 tab.7-2), est aussi élevée que celle des "sables verts" (Annexe I).

Bien qu'il y ait toujours des venues d'eau, le Dogger lui a été trouvé très peu producteur⁽¹¹⁾. Il a peu de chance d'être exploité localement. A Morley MSE101 et Demange-aux-eaux EST312, ce Dogger est

artésien : si on laisse ces forages ouverts, l'eau coule lentement à la surface, sur le plancher des vaches (AND5 vol.1 p. 162). Il doit l'être jusqu'à Montiers-sur-Saulx dont l'altitude en vallée (de la Saulx) est encore inférieure à la cote piézométrique de 290mNGF dans le Dogger.

Ces deux usages, local et lointain de l'eau dans l'Oxfordien, qui ont déjà timidement cours, abaisseraient la charge hydraulique h dans l'Oxfordien alors que cela a peu de chance de se produire dans le Dogger, favorisant un mouvement ascendant de l'eau.

A l'étape laboratoire et dépôt, l'ANDRA pompe continuellement l'eau de l'aquifère Oxfordien autour des puits d'accès ce qui va faire tomber la charge hydraulique de l'aquifère de 50 mètres sur un diamètre d'ordre kilométrique au moins (AND2 t.5 II p.9) alors que la différence de charge (initiale) entre Oxfordien et Dogger à Bure était de 15m. Cela représente localement pour une distance H de 130m une variation du gradient i de $\simeq 0,4$ m/m (et une inversion de gradient pour cet endroit et bien au delà, partout où la variation excède 15m).

L'excavation pour le dépôt envisagé va provoquer un changement violent. i va grimper à quelque chose comme 8 m/m entre l'air des galeries et l'Oxfordien calcaire au dessus, le Dogger en dessous, initiant un vigoureux mouvement centripète de l'eau vers les galeries, vers les déchets prévus⁽¹³⁾.

Nouvelles preuves du rôle hydraulique essentiel des failles locales et diaclases/fractures

Dans l'état des connaissances 2004, la zone de Montreuil-sur-Thonnance avec la grosse bourgade de Joinville au fond de la vallée de la Marne juste derrière, est dans l'aval hydraulique de la région de Bure pour l'Oxfordien et le Dogger (AND5 vol.2 fig. 7-4 et 7-5). Or on y a trouvé des fractures N145E ouvertes en profondeur, et dans l'aquifère Oxfordien, et dans l'aquifère Dogger (forages de l'année 2003 : EST321 à l'Oxfordien, EST322 au Dogger). L'agence les attribue à deux reprises à la faille de Poisson qui est 2 km plus à l'Ouest⁽¹⁰⁾ (AND5 vol.1 p. 62, 103; vol. 2 fig. 4-33). Cette interprétation signifierait que c'est toute cette zone d'approche de la vallée/failles de la Marne sur des kilomètres qui doit être parsemée de fractures ouvertes synonymes d'une bonne productivité hydraulique et de circulation rapide.

Cela est donc à l'Ouest de Montreuil-sur-Thonnance, à l'aval.

"A l'amont hydraulique de EST321, l'isopièze de charge 300 m NGF est contrainte par la topographie à l'aplomb de structures identifiées à l'est de ce forage. En effet dans ce forage une forte venue d'eau très peu minéralisée sur fracture a été identifiée. Cette eau est très certainement une eau météorique infiltrée à une faible distance du forage et circulant rapidement au sein de ces structures." (AND5 vol.1 p. 162). *"L'hypothèse invoquée est que cette infiltration pourrait se produire au niveau des structures identifiées à l'est de ce forage."* (idem p. 146).

Les affleurements de l'Oxfordien en effet sont fort loin, à 20 km, et de l'autre côté du fossé tectonique de Gondrecourt (AND5 vol.2 fig. 7-4). Les "structures identifiées" à l'Est à une faible distance de ce forage sont à 3,5km : l'extrémité Nord de la faille de Soulaincourt-Aingoulaincourt-Pancey avec intersection à Aingoulaincourt d'un faisceau de trois failles (Hibsch et al. 2001). La vallée de la Saulx et ses talweg d'alimentation recoupés par ces failles sont à une altitude d'environ 300m.

Il apparaît donc que l'eau peut se déplacer rapidement dans l'Oxfordien entre Pancey et la vallée/failles de la Marne sur Joinville.

Enfin on constate que l'eau circulante dans le Dogger à Montreuil-sur-Thonnance (EST322) est, elle aussi, de très loin, la moins minéralisée de toutes les eaux échantillonnées dans le Dogger de la zone (AND5 vol. 3 annexe 4). Le Dogger est donc aussi affecté. Comment cette eau pourrait-elle sinon perdre sa minéralisation alors qu'elle est à 24 km des affleurements ?

En 1996 l'agence argumentait (AND1 p. 43) : *"La différence de charges constatée entre Dogger et Oxfordien calcaire indique l'absence de connexion entre ces niveaux carbonatés de part et d'autre du Callovo-oxfordien : aucune faille ne joue le rôle de drain vertical dans le domaine sélectionné."* A Montreuil-sur-Thonnance on est dans la situation inverse, la différence de charge entre les deux aquifères est fort réduite : 5 mètres ($i = 0,02$ m/m). Même si cela n'expliquerait pas tout, peut-être ces deux aquifères sont-ils en contact hydraulique dans les environs (Aingoulaincourt ?) ? La situation est

nettement plus complexe qu'on ne peut l'appréhender avec les forages disponibles et que ne peuvent le montrer les cartes piézométriques très simplifiées à grande échelle qui sont proposées.

Toute la simulation hydrogéologique de référence 2001, conduite en niant tout rôle hydraulique aux failles, même les majeures (= "*Hypothèse 1 : Pas de rôle hydraulique des failles, qu'elles soient locales ou régionales.*", AND2 t.5 II p. 4) est décidément complètement invalidée.

Les preuves du rôle hydraulique majeur des failles et fractures s'accumulent : curieuse crête piézométrique de l'eau dans le Dogger contre le fossé tectonique de Gondrecourt, vigoureux drainage des aquifères Oxfordien et Dogger par la vallée/failles de la Marne, alimentation partielle supposée de la zone de Montreuil-sur-Thonnance via des failles locales à Pancey, eau qui a perdu une partie de sa minéralisation et dans l'Oxfordien et dans le Dogger à cette même localité, multiplication de la transmissivité globale de l'Oxfordien par 1000 pour quelques diaclases ouvertes (dont la détection est impossible tant qu'on ne tombe pas dessus avec un forage). Selon l'interprétation 2003-2004 de l'agence, une bande de largeur pluri-kilométrique autour de la faille de Poisson comporterait de telles diaclases/fractures ouvertes...

ANNEXE I

L'aquifère oxfordien

L'ANDRA s'est longtemps cantonnée aux mesures de transmissivité, T (=perméabilité \times épaisseur), basses de ses premiers forages à l'Oxfordien ($2,9 \cdot 10^{-7}$ à $1,1 \cdot 10^{-6}$ m²/s à Cirfontaines, Morley et Bure). Elle les a généralisées et directement adoptées en modélisation : "*Le modèle final proposé utilise donc des transmissivités faibles dans la zone du site, sur une zone d'extension de l'ordre de 20 km, de forme initialement circulaire, puis ultérieurement en une bande parallèle aux affleurements.*" (CNE 2002, 8^er, p. 45) Il en résultait des résultats mis en doute par la CNE et qui apparaissent aujourd'hui totalement aberrants pour plus d'une raison : "...*la Commission s'interroge sur la plausibilité des temps de parcours calculés par l'ANDRA tant pour l'aquifère de l'Oxfordien que ceux du Dogger, qui sont de l'ordre de 800 000 ans pour l'exutoire Marne de l'Oxfordien et de 21 millions d'années pour l'exutoire Dogger dans la région de Toul.*" (CNE 2002, 8^er p. 46). Les doses de radioactivité-2001 reçues en mSv par les futurs habitants locaux étant calculées via ces modèles hydrauliques ne sont donc pas plus plausibles (considérablement minimisées). L'ANDRA/ANTEA avait fait cela bien que presque tous les forages pétroliers disponibles avant ce projet de Bure : Lezéville (à moins de 7 km au Sud de Bure), Chevillon et Bienville (17 km et 23 km à l'O-NO), avaient trouvé une partie de l'Oxfordien plutôt bonne productrice, la partie inférieure au premier, la partie supérieure aux deux autres (perte totale des fluides de forage injectés; mais pas de test hydraulique de quantification, les pétroliers n'étant pas intéressés par cette couche). Et un autre forage avait même été réalisé à Lezéville en 93, l'année précédant l'arrivée de l'ANDRA, pour l'alimentation de la commune en eau potable cette fois. Par ailleurs, on sait bien que la transmissivité de ces aquifères calcaires n'est pas régulière comme elle peut l'être dans les sables/grès. Il s'agit d'une perméabilité dite "en grand" (Guide Géologique "Lorraine-Champagne", Masson, p. 28) et les résultats ponctuels doivent être relativisés.

De fait la transmissivité, dans la plupart des forages ANDRA 2003 a été trouvée bien plus élevée que dans les premiers forages de l'agence. A Effincourt 8 km plein Ouest de Bure (EST351) elle est cinq fois plus élevée ($5 \cdot 10^{-6}$ m²/s), à Demange-aux-eaux à 14 km au N-E de Bure elle est 10 fois plus élevée ($1,5 \cdot 10^{-5}$ m²/s) et à Montreuil-sur-Thonnance, à 9 km Ouest-Sud-Ouest, (aval hydraulique de Bure avec Effincourt), elle est plus de 1000 fois plus élevée ($3 \cdot 10^{-3}$ m²/s; AND5 vol.1 tab.7-2) atteignant et dépassant presque celle des sables verts exploités sous Paris (qui est comprise entre $4 \cdot 10^{-4}$ et $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s; Raoult et al. 1998).

L'origine de la perméabilité est variée, pratiquement différente sous chaque plate-forme de forages : niveaux à très petite porosité à Bure, niveau oolithique à Demange-aux-eaux, fissures/fractures à Lezéville, à Montreuil-sur-Thonnance...

Une caractéristique de cet aquifère Oxfordien est établie à deux endroits : à Lezéville à moins de 7 km au Sud-S-E de Bure, il a été trouvé producteur tout à la base entre 384 et 303m de profondeur au cours du forage pétrolier LZV1, alors qu'au forage "F97" où il est présentement exploité pour l'eau potable, et situé à seulement 56 mètres du LZV1, il est producteur tout en haut de l'Oxfordien entre 150 et 100m de profondeur, soit 200m plus haut !

A Montreuil-sur-Thonnance, à 9 km Ouest-Sud-Ouest de Bure, la grosse venue d'eau est vers -389-410m dans le forage EST321 alors qu'elle est à -296 m, 100m plus haut, dans le EST322 qui est à... 12 mètres (12 enjambées) du précédent ! (AND5 vol.1 p. 46, 104 et 128).

ANNEXE II

Résultats de quelques tentatives de datation des eaux avec des éléments en trace

□ Helium

Marty et al. (lettre 2003) ont lancé une polémique en affirmant au terme d'un raisonnement sur des résultats d'analyse d'hélium que l'eau prélevée dans le Dogger à Morley (MSE101) "*est stagnante depuis peut-être plusieurs millions d'années*" (p.57). La seule datation ^{14}C disponible alors sur cette eau est de 30 500 ans mais l'eau n'était probablement pas encore complètement débarrassée de la pollution ^{14}C anthropique due au forage. Tous les calculs/raisonnements de Marty et al. (2003) sont suspendus au postulat que la série argileuse entre Trias et Dogger est totalement isolante (p. 57). Bien que l'un des auteurs de cette lettre (S. Dewonck) soit aujourd'hui à l'ANDRA, le postulat Marty et al. (2003) est totalement écarté par l'agence. On ne peut pas expliquer la répartition d'un élément majeur comme le sel, NaCl, mesuré dans l'eau du Dogger, sans des apports à partir du Trias (AND2 t.1 II p. 24; AND5 t.1 p. 149, p. 151, p. 166-167). Les techniciens de l'agence invoquent même une connexion Trias-Dogger pour expliquer la charge hydraulique dans le Dogger (AND2 t.5 II p. 4 et 6). Le lien est confirmé par d'autres éléments comme le strontium (AND4 p. 211-212), les hydrocarbures gazeux extraits du Callovo-Oxfordien (CH_4 et alcanes C_2 à C_4) d'origine thermique profonde (Dublyansky 2004 p. 238-39) ou le Cl36 (ci dessous). Le calcul/raisonnement de Marty et al. (2003) est totalement invalidé de multiple façons. L'agence cite pourtant cette lettre "*pour mémoire*" (SIC; AND5 t.1 p. 166, S. Dewonck étant parmi les auteurs de ce rapport de l'agence) en omettant d'étaler cette magistrale contradiction.

□ Chlore 36

La CNE avait recommandé l'usage du traceurs ^{36}Cl pour les mesures d'âges des eaux (8^e r, 2002, p. 46).

A Tournemire, l'IPSN (1995, p. 12) commente ses propres résultats mais qui concerne l'argilite en elle-même : "*Le ^{36}Cl est l'un des plus prometteur car il est normalement non retenu par la roche. Cet isotope bien que de vie courte à l'échelle géologique (la moitié disparaît en 300 000 ans) se forme en permanence par transmutation de l'isotope stable 35 du chlore (les neutrons nécessaires sont fournis indirectement par l'uranium et le thorium inclus à faible concentration dans la roche). Les quelques mesures faites semblent montrer une répartition du chlore 36 assez contrastée mais en équilibre avec celle des sources de neutrons. Ce ne serait pas le cas si des mouvements d'eau significatifs se faisaient à l'échelle des 300 000 ans. Si ces mesures sont confirmées ce sera un argument particulièrement fort en faveur d'une quasi absence de mouvements d'eau aux échelles de temps intéressant les stockages. Il est important de noter que cette méthode est valable pour tout site argileux.*"

Des mesures ont été faites à Bure. L'ANDRA (AND5 t.1 p. 152) mentionne brièvement des résultats mais sur l'eau prise dans les calcaires : "*Le type de relation mise en évidence par la ligne pointillée de la fig. 6-12 est caractéristique d'un apport en ^{36}Cl originnaire de la subsurface et d'un apport en chlorure (...) Dans notre cas, l'apport en chlorures pourrait se faire depuis les formations sous-jacentes du fait de la présence de halite dans la marge orientale du Trias.*"

Dans les calcaires à Bure la concentration en ^{36}Cl n'est donc pas "*en équilibre avec celle des sources de neutrons*". "*Aux échelles de temps intéressant un stockage*" l'eau est en mouvement dans l'ensemble de la pile sédimentaire avec des échanges aussi bien des profondeurs vers le haut que de la surface vers les aquifères.

□ Carbone 14

Les résultats des mesures, un peu embarrassant, sont qu'il y a un peu plus de carbone 14 dans l'eau qui est dans le Dogger que dans celle qui est dans l'Oxfordien (or normalement plus il y a de ^{14}C , plus l'eau est récente) : "*L'activité en ^{14}C de ces eaux, exprimée en pourcent de carbone moderne (pcm), est très basse également (0.12-0.5 pcm pour l'Oxfordien et 0.24 -1.15 pcm pour le Dogger). Pour cette technique, nous sommes*

également en limite de détection de la machine." (AND5 t.1 p. 152). Et l'agence écrit "... nous ne pouvons pas pour l'instant estimer des temps de résidence de ces eaux." (AND5 t.1 p. 166).

Mais l'agence aurait pu pourtant mentionner que dans le centre du bassin de Paris, celles des eaux de ce même Dogger qui contiennent entre 0.7 et 1.7 % pcm sont "datées" ("âge" conventionnel) entre $\geq 40\ 000$ ans et 33 000 ans (données IMRG/BRGM 1988 reproduites dans Wei et al. 1990 p. 355).

Notes

- (1) en théorie d'élasticité linéaire, ce sont le module d'Young, E (qui lie la contrainte axiale à la déformation axiale), et le rapport de Poisson, ν (qui lie les déformations axiale et latérale).
- (2) Le terme argilite signifie qu'il s'agit d'une roche à grain très fin, constituée en bonne partie de minéraux argileux mais pas seulement (une argilite litée est appelée shale). Sur le plan minéralogique, l'argilite de Bure contient un peu plus de 50% de minéraux argileux. Le reste est composé de quartz et calcite surtout, puis de feldspaths et pyrite. Sur le plan granulométrique, à Bure ce sont les particules de taille supérieure à $4\ \mu\text{m}$ (classe "silt") qui dominent légèrement sur celles de taille inférieure à $4\ \mu\text{m}$ (Pellenard, P. 2003, p. 53).
- (3) La résistance de ce genre de matériau est fonction du niveau de contrainte en plus des propriétés du matériel. Au delà d'un seuil défini, le déplacement n'est plus linéairement proportionnel à la force appliquée. Dans la méthode des éléments finis, un élément qui atteint le stade plastique n'est plus en état de supporter une charge supérieure à ce passage et ce sont les éléments voisins qui assurent la cohésion ou qui cèdent à leur tour. Cela conduit donc à une redistribution des contraintes. Il faut travailler par petite addition de la charge pour représenter la résistance du système à chaque étape de l'analyse. Baker et al. 1970 utilisent pour seuil de plasticité le critère de Coulomb bien connu en géologie structurale.
- (4) : "...niveaux où la roche présente des propriétés mécaniques et hydrauliques suffisamment favorables (zone A du Callovo-Oxfordien ou partie inférieure de l'Oxfordien calcaire). **Dans ces niveaux, les extensions des zones de rupture et endommagée calculées avec les données obtenues sur échantillon sont nulles à limitées.**" (AND4 p. 78, c'est moi qui met en gras). La niche -445m a été assez précisément accolée au niveau de la surface "S2" qui est vers -440 à $441,5\text{m}$ à Bure (AND2 t.3 fig. 3.1-01, AND6 vol.1 fig.3.2 p. 24). Cette surface S2 n'est autre par définition que le niveau de "minimum d'argilosité" (AND5 vol.1 p.105). Elle est aussi appelée RSO, Repère Supérieur Oolithique (oolithes présentes au nord de Commercy) qui est un "...nouvel épisode carbonaté... (...) marque le début de la sédimentation de plate-forme carbonatée en couverture de la couche hôte..." (AND5 vo.1 p.154, aussi p.160). Cette "zone A" correspond aux "Terrains à chailles" et "Marnes des Eparges" (C_{2c} et C_{2d} de l'ANDRA) bien connus des géologues de l'Est du bassin parisien. La perméabilité de cette "Zone A" Chailles-Eparge peut-être aussi faible que celle des argilites s.s. et même lui être inférieure (on peut supposer qu'elle est alors exempte de fissures). Mais, rappel feutré du caractère aquifère des 58% supérieurs de cette "Zone A" au forage pétrolier de Lezéville (Coparex 1989), des instabilités des valeurs de perméabilité mesurées avertissent du danger. Sur le site même de Bure, sa perméabilité au forage EST103 (sonde EPG située à $-442,5\text{ m}$. AND6 t.1 p. 269) est estimée à $2\ 10^{-12}\ \text{m/s}$, ce qui est plus que l'argilite à cet endroit (AND5 t.1 p. 30), et à Morley (MSE101) la perméabilité est encore 100 fois plus élevée : $2,6\ 10^{-10}\ \text{m/s}$ (AND1 p. 37, test n°9 sur toute l'épaisseur de la zone A).
- (5) La raison est qu'à l'approche d'une cavité cylindrique, la contrainte naturelle de la roche en place qui arrive perpendiculairement à la paroi tombe à zéro puisqu'en face il n'y a plus que l'air, alors que les calculs de la physique pour arriver à l'état d'équilibre des contraintes révèlent que simultanément la contrainte parallèle au mur de la cavité doit augmenter très vivement. Donc par exemple, si c'est la contrainte régionale la plus faible qui arrive perpendiculaire sur le mur de l'excavation, c'est l'autre contrainte perpendiculaire, donc qui est déjà la plus forte régionalement, qui va vivement augmenter à l'approche de la cavité. La différence entre les deux devient très grande et l'EDZ devient très étendue le long d'un tel plan. L'extension de l'EDZ varie donc tout autour de la cavité.
- (6) Les conséquences de ce court-circuit, qui résulte du choix de cette roche d'une pauvre résistance mécanique, ne seront pas quantifiées dans le dossier final 2005 : "**Une analyse phénoménologique sera faite pour les défauts de scellement, sans calcul.**" (CNE, 2004, 10^e rap., p. 27, c'est moi qui met en gras). C'est donc en acceptant l'ignorance que l'on aura de ces conséquences en 2005-2006 comme en 2004 que cette commission écrit 2 pages plus loin : "... le secteur de Bure possède des caractéristiques favorables. Plus particulièrement aucun élément réducteur n'a jusqu'à maintenant été trouvé." (CNE 10^e rap. p. 29, aussi p. XIII). A ce jour la CNE n'a jamais critiqué la terminologie «scénario normal». En réalité elle n'a jamais décrit le curieux montage qu'il représente.

- (7) En réalité, la EDZ des galeries qui seront orientées WSW–ENE sera la plus développée en voûte et radiers devant être de l'ordre de 1,5 fois le diamètre des galeries (AND2 t.5 tab. 3.2-10 et 3.2-11), et plus si celle-ci sont creusées à l'explosif. Elles seront en effet orientées perpendiculairement à la contrainte horizontale majeure σ_H ($\sigma_H \approx 1,6 \times \sigma_h \approx 19,5$ MPa; AND6 t.1 p. 34-35). Cette contrainte est supérieure à la contrainte verticale σ_V (calculée par ρgh comme $\approx 11,8$ MPa à 490m; AND2 t.4 fig. 4.7-02). Dans cette géométrie la contrainte la moins forte arrive verticalement sur les galeries (voir note ⁽⁵⁾). Cela diminue encore la garde d'argilite avec le Dogger de 6m (par rapport au calcul avec 1 diamètre; diamètre des galeries de 12m), soit 39m entre EDZ horizontale et Dogger, cela sans appliquer le moindre coefficient de sûreté. Il y a très peu de smectite dans cette moitié inférieure des argilites (Pellenard, P. 2003 p. 43-49) donc le pouvoir de rétention des cations susceptibles d'être retardés sera faible entre le dépôt et le Dogger.
- (8) le calcul a été conduit avec un gradient hydraulique (eau montante) de 1m/m ce qui peut paraître pénalisant mais il ne faut pas oublier qu'il est fait abstraction de la "zone fracturée". Une étude de sensibilité sur ce scénario qualifié d' "altéré" montre qu'il faut que les gradients soient fort petits, inférieurs à une valeur comprise entre 0,1 et 0,01 m/m pour que la migration diffusive rattrape la migration convective par l'ancien puits rebouché (AND3 A p. 139).
- (9) La vitesse de Darcy, v , représente le vecteur flux de la matière aussi est-il adapté à l'analyse hydrodynamique. v peut être assimilé à la vitesse d'un fluide fictif qui occuperait tout l'espace et dont le débit à travers la surface serait celui du fluide réel. Mais cette surface est constituée pour partie de roche solide, pour partie de vides où l'eau peut circuler (porosité cinématique n = rapport du volume des vides dont l'eau gravitaire peut être libérée par égouttage sur le volume total). La vitesse moyenne réelle, v_R (en m/s), est plus élevée que la vitesse de Darcy : $v_R = v/n$ (par exemple Detay 1997, p. 45, p. 277).
- (10) Il n'y a pas de faille connue contre les forages de Montreuil-sur-Thonnance (EST321-EST322) qui ont été fait sur la ligne de sismique pétrolière 84 JV 16 (AND5 vol. 2 fig. 1-1 et fig. 3-15). La faille de Poisson est 2 km à l'Ouest et le noeud de failles d'Aingoulaincourt est 3,5 km à l'E-SE (Hibsch et al. 2001 vol.2 fig. 41). La plate-forme de Bure est à moins de 6 km au NE du noeud de failles d'Aingoulaincourt.
- (11) sauf à Montreuil-sur-Thonnance (EST322) où la transmissivité ($K \times$ épaisseur) du Dogger est tout de même de $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, où on constate en outre d'une part que l'eau circulante est peu minéralisée par rapport aux autres échantillonnées dans le Dogger et d'autre part la présence de fractures (AND5, vol. 1, p. 128, 103).
- (13) A Bure, le milieu de la série callovo-oxfordienne est vers -125m NGF . La charge hydraulique dans l'Oxfordien était avant dérangement de $+304,5 \text{ m NGF}$, celle dans le Dogger de $+290,5\text{m NGF}$. Dans les galeries, alvéoles du dépôt en exploitation la charge hydraulique est zéro (pression atmosphérique). Le gradient, $i = \Delta h/L$, sur $L=50\text{m}$ entre limite de la série callovo-oxfordienne et galeries et leur EDZ est de, pour l'Oxfordien par exemple : $304,5 - (-125)/50 \approx 8,6 \text{ m/m}$.
- (14) Cela découle de la loi de Fick dans les milieux poreux : le temps caractéristique de diffusion, T (s), sur la distance H (m) est proportionnel au carré de cette distance et directement inversement proportionnel au coefficient effectif de diffusion D_{eff} (m^2/s), η est la porosité accessible à la diffusion (sans dimension) (Bonin 1998, p. 322) :

$$T = \frac{\eta H^2}{D_{eff}}$$

Application : reproduction du calcul ANDRA 2001 pour les anions (qui ignore l'effet d'échelle et de température) : H pris de 50m (AND3 B p. 131), $D_{eff} = 4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ("référence", AND3 B p. 281) et $\eta=0,01$ ("référence", AND2 t.4 III p. 23) $\rightarrow T = 6,25 \cdot 10^{12}$ secondes, c'est à dire 198 186 ans ($\approx 200\ 000$ ans).

Références

- AFME-BRGM-GEOCHALEUR 1983, "Guide du maître d'ouvrage en géothermie", Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie en collaboration avec le BRGM et de GEOCHALEUR, édit. BRGM, collection "Manuels et Méthodes" n°8: 186p.
- AND1 : 9 avril 1996 "Recherches préliminaires à l'implantation des laboratoires de recherche souterrains - Bilan des travaux janvier 1994-mars 1996". 150p, distribué à l'ILCI.
- AND2 : janvier 2001 : "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", 5 tomes (obtenu en 2004 au CLIS sur deux CDrom).
- AND3 : décembre 2001 : "Dossier 2001 Argile", parties A et B (obtenu en 2004 au CLIS sur CDrom).
- AND4 : janvier 2004 : "Bilan des études et travaux 2002" (obtenu en 2004 au CLIS sur CDrom).

- AND5 : 27/01/04 ("modifications") : date d'origine 28/11/03 : "Forages scientifiques profonds - Synthèse FSP" (obtenu au CLIS mais seulement en 2005).
- AND6 : 08/12/04 : "Forages de Reconnaissance de la Formation - Synthèse FRF" (obtenu au CLIS en 2005).
- Baker, L. E. - Sandhu, R. S. - Shieh, W. Y. 1970 "Application of elasto-plastic analysis in rock mechanics by finite element method", Proc. 11th symp. Rock Mech., Berkeley, june 1969, chap. 14: 237-51.
- Bonin, B. 1998 (IPSN) "Deep geological disposal in argillaceous formations : studies at the Tournemire test site", *Jl. of Contaminant Hydrology* 35: 315-30.
- ConsGéné52 1998 : Rapport du service hydroécologie du Conseil Général de la Haute Marne sur la transformation du forage de Lezéville 1993 en forage AEP (Alimentation en Eau Potable) "F97" en avril 97 pour le SIAEP d'Echenay, 10 p., mars 1998.
- Coparex 1989, "Rapport final forage "Lezéville 1" (LZV1) - permis de Biencourt", septembre 1989 SC/NG/EG, 31p. et un log final dépliant du forage au 1/500 (disponible au BRGM de Reims).
- de Marsily, G. - Gonçalves, J. - Violette, S. - Castro, M. 2002, "Migration mechanisms of radionuclides from a clay repository toward adjacent aquifers and the surface", *C. R. Physique* 3, *Physique appliquée*: 945-59.
- Dereeper, B. et Volckaert, G. 2002 (SCK-CEN) "The reseal project, a large scale shaft sealing demonstration test", Andra clay meeting dec. 2002, Reims, abstract p. 269-70.
- Detay, M. 1997, "La gestion active des aquifères", Masson édit., 416p.
- Dublyansky, Y. 2004, "Aspect minéralogique et géochimique dans la formation hôte", in IEER "Examen critique du programme de recherche de l'ANDRA...", 27 déc. 2004, commandité par le CLIS, chap. 6, p. 221-257. Pour les hydrocarbures gazeux, Y. Dublyansky rapporte le travail de l'équipe ISOGAZ impliquant BRGM et IFP (Girard, J.P., Fléhoc, C., Huiban, Y, etc.).
- Freeze, R.A. - Cherry, J.A. 1979, "Gronwater", Prentice-hall Inc, 604p.
- Hibsich, C. - Lathuilière, B. - Le Roux, J. 2001, "Site Meuse/Haute Marne - Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site", rapport ANDRA D RP 0G2R 00-003, titulaire : Université de Nancy I (sédimentologie structurale) G2R (obtenu par le CLIS).
- IPSN avril 1995, "Projet du tunnel de Tournemire (Aveyron)", Fiche Info n° 165, pp. 11-14.
- Marty, B. - Dewonck, S. - France-Lanord, C. 2003, "Geochemical evidence for efficient aquifer isolation over geological timeframe", *letters to nature*, *Nature*, vol. 425, 4/09/03, p.55-58.
- Pellenard, P. 2003, "Message terrigène et influences volcaniques au Callovo-Oxfordien dans les bassins de Paris et du sud-est de la France", Société Géologique du Nord, Publication n°31 (thèse 3^e cycle, Lille 1), 362p.
- Raoult, Y. - Lauverjat, J. - Boulègue, J. - Olive, P. - Barjac, T. 1998, "Etude hydrogéologique d'une ligne d'écoulement de l'aquifère de l'Albien dans le bassin de Paris entre Gien-Auxerre et Paris", *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 169 (3): 453-57.
- Wei, H.F. - Ledoux, E. - Marsily, G. de 1990, "Regional modelling of groundwater flow and salt and environmental tracer transport in deep aquifers in the Paris basin", *Journal of Hydrology*, 120: 341-358.
- Worden, R. H. - Matray, J. M. 1995, "Cross formational flow in the Paris Basin", *Basin Research* 7: 53-66.