

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 dû 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 côté 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 "scelllements" 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).

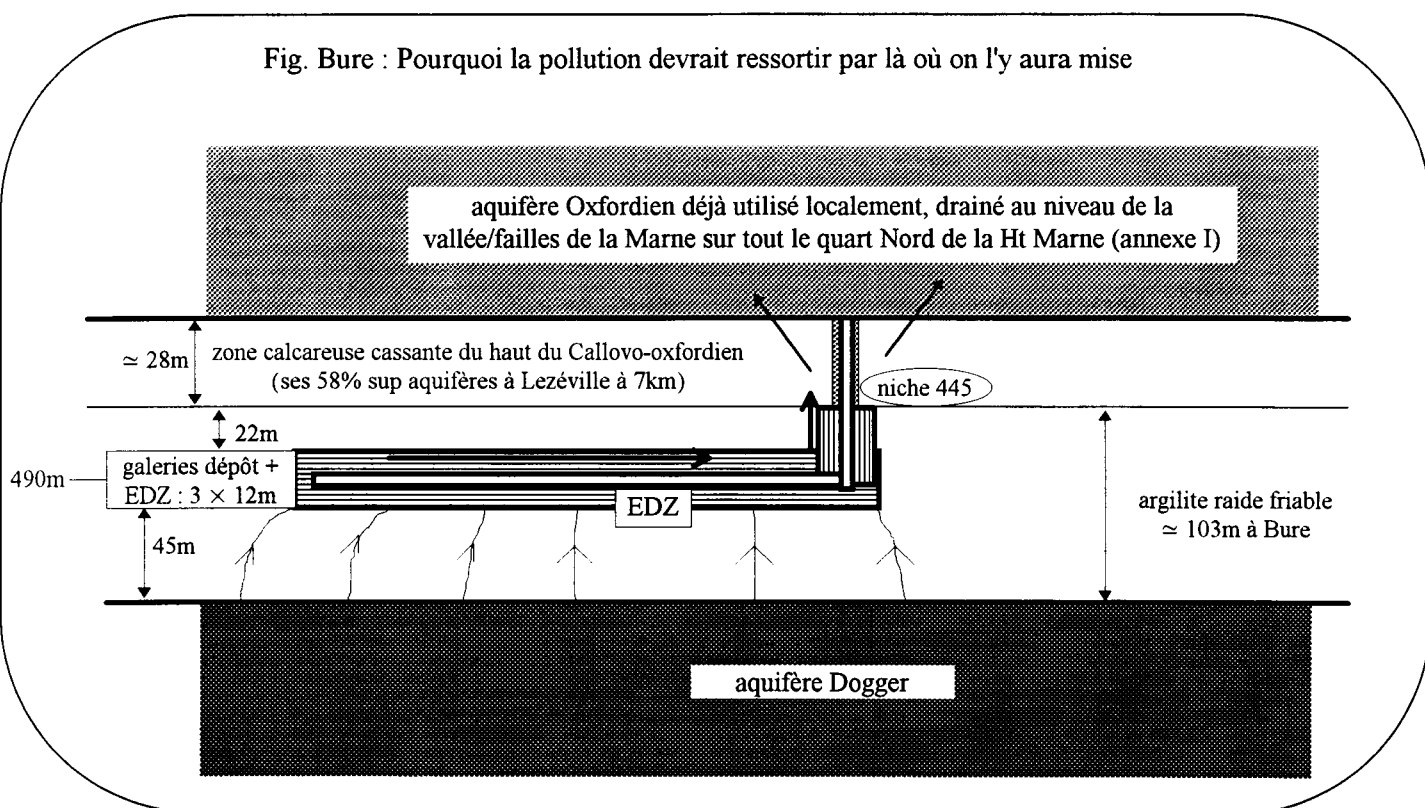
Pourquoi ?

"... 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).