

Chaque stockage géologique est le résultat d'un compromis

Afin que les déchets de haute radioactivité et de longue durée de vie soient isolés de l'homme et de l'environnement, le gouvernement belge a décidé de les enfouir 'en principe' dans un stockage souterrain à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Ce stockage sera creusé dans une 'roche hôte appropriée'. Mais qu'est-ce qu'une roche hôte appropriée ? Et quel serait l'emplacement idéal ? Nous avons posé ces questions à deux spécialistes renommés des sciences de la terre : l'hydrogéologue Alain Dassargues, professeur à l'Université de Liège, et le géologue des structures Manuel Sintubin, professeur à la KU Leuven. Leur réponse : il n'y aura jamais de site répondant à tous les critères. Il n'y a pas de site 'idéal'. Ni en Belgique, ni à l'étranger. Il faudra toujours trouver un compromis.

'Stewardship' planétaire

"La roche hôte d'un stockage géologique doit éviter que des niveaux nocifs de radioactivité ne soient émis dans la biosphère, c'est-à-dire la partie de la Terre où la vie se développe", explique Alain Dassargues. "La roche hôte doit contenir les éléments radioactifs lorsque les barrières conçues par l'homme commencent à céder. Il s'agit entre autres des 'superconteneurs' pour les déchets de haute radioactivité et des 'caissons en béton' pour les déchets de longue durée de vie. Ces barrières sont constituées de plusieurs couches de métal et/ou d'enveloppes de béton qui entourent les déchets."

"Les barrières artificielles ne cèderont pas tout de suite, mais certainement après une période de plusieurs milliers d'années", ajoute Manuel Sintubin. "Par conséquent, la roche hôte doit être capable de retenir les éléments radioactifs jusqu'à ce que leur radioactivité soit retombée à un niveau tel qu'ils ne constituent plus une menace pour la vie sur Terre. Ce processus de désintégration radioactive prendra plusieurs centaines de milliers d'années."



Manuel Sintubin (à gauche) est professeur de géodynamique au département des Sciences de la terre et de l'environnement de la KU Leuven. Il étudie divers aspects de notre planète 'active', en mettant l'accent sur les processus tectoniques de la croûte terrestre. Il s'intéresse également à la géologie des tremblements de terre, à l'archéologie ainsi qu'à la relation entre géologie et société.

Alain Dassargues (à droite) est professeur d'hydrogéologie et de géologie de l'environnement à l'Université de Liège. Les sujets qu'il étudie comprennent entre autres la modélisation des eaux souterraines pour les aspects quantitatifs et qualitatifs au niveau local et régional, la géostatistique appliquée aux données hydrogéologiques, les cartes de vulnérabilité des eaux souterraines et l'évaluation des zones de protection, les caractérisations hydrogéologiques, les systèmes géothermiques ouverts à basse enthalpie, le stockage des déchets dans des roches géologiques à faible perméabilité,...

“Nous voulons empêcher que des éléments radioactifs pénètrent dans la biosphère”, poursuit Manuel Sintubin. “Cet engagement est remarquable parce qu’il va au-delà de la protection de la vie humaine. L’objectif est d’isoler les déchets de toutes les formes de vie sur Terre, même après la disparition de l’homme. En d’autres termes, notre engagement est une forme de ‘stewardship’ planétaire.”

Imperméabilité, stabilité et prévisibilité

Les Suisses utilisent pas moins de 13 critères géologiques pour sélectionner un site approprié pour un stockage en profondeur. L’Agence internationale de l’énergie atomique (AIEA) énumère également un grand nombre de critères à remplir par le sous-sol et la roche hôte, dont les propriétés hydrologéologiques, chimiques et géomécaniques de cette roche et la stabilité de l’environnement. Parmi tous ces critères, quels sont ceux qui sont vraiment importants et ceux qui le sont moins ?

“Pour moi, le critère majeur est que la roche hôte et le sous-sol soient ‘imperméables’ à l’eau”, répond Alain Dassargues. “L’eau ne peut pas circuler dans la sous-sol dans laquelle les déchets seront enfouis. Une fois que les barrières artificielles auront cédé, les eaux d’infiltration capteraient les éléments radioactifs et les transporteraient vers d’autres couches terrestres plus perméables. Si cette eau contaminée entre en contact avec une couche aquifère – que ce soit au-dessus ou en-dessous du stockage géologique – la radioactivité se propage très rapidement, ce qui constitue une menace pour notre eau potable et pour d’autres sources d’eau souterraines et de surface. C’est pourquoi un sous-sol perméable, tel que des roches poreuses ou fragmentées, le sable, le gravier, le limon, etc., ne convient certainement pas comme roche hôte pour un stockage géologique de déchets radioactifs”.

Manuel Sintubin affirme que la stabilité géologique doit inévitablement être l’un des critères prioritaires, peut-être même plus important que les propriétés de la roche hôte. “Les processus géologiques se déroulent presque toujours de manière très lente et prévisible sur une échelle de temps de centaines de milliers d’années. En choisissant un site approprié pour un stockage, nous devons être en mesure de prédire que le sous-sol ne changera pas au cours du prochain million d’années. La Finlande creuse par exemple un stockage dans les roches cristallines du ‘Bouclier baltique’. Ce socle cristallin est resté géologiquement stable durant les 600 derniers millions d’années”.

“Il est illusoire de penser que l’on trouvera en Belgique – ou ailleurs dans le monde – un site parfait qui répondra à tous les critères”, conclut Manuel Sintubin. “Il faudra toujours faire des compromis. Bien entendu, les zones tectoniques actives, les régions d’activité volcanique, les roches hôtes très fragmentées ou poreuses sont absolument inadaptées au stockage géologique en profondeur des déchets radioactifs.”

Utilisation du sol et du sous-sol

“L’utilisation à d’autres fins du sol et du sous-sol sera également importante dans le processus de choix du site”, ajoute Alain Dassargues. “Un stockage géologique devra entrer en concurrence avec d’autres utilisations, tant en surface que dans le sous-sol, tant aujourd’hui qu’à l’avenir. Cette concurrence proviendra entre autres du stockage de l’eau et du gaz (gaz naturel et, à l’avenir, peut-être du CO₂ et de l’hydrogène), de l’énergie géothermique, de l’exploitation minière, etc.”

“Dès qu’une installation de stockage de déchets radioactifs sera en activité, il sera exclu d’utiliser les couches situées au-dessus et au-dessous du stockage pour d’autres applications, de même que toute la zone avoisinante. Il en résulte des restrictions quant au choix du site. De plus, il est difficile d’imaginer qu’une installation de stockage de déchets radioactifs puisse être creusée sous une ville comme Bruxelles, Liège ou Anvers. Ce sont autant de critères à prendre en compte”, précise Alain Dassargues.

Un puzzle social et technique

Qu’est-ce que tout cela signifie pour la Belgique ? “Dans le monde occidental, la recherche d’un site approprié a démarré de différentes manières”, explique Manuel Sintubin. “Certains pays ont cherché, sur une base ‘volontaire’, des communautés prêtes à autoriser un stockage géologique sur leur territoire. D’autres ont commencé par sélectionner un site sur la base de critères géologiques. Les approches les plus efficaces combinent les deux démarches. La société doit cependant comprendre qu’en dernier ressort, c’est la géologie qui détermine le site. La sécurité reste en effet l’objectif principal. Dans de nombreuses régions de Belgique, il est absolument hors de question de construire un stockage géologique pour les déchets hautement radioactifs parce que le sous-sol ne s’y prête pas du tout.”

Sel, argile, granite

Selon l’Agence internationale de l’énergie atomique, ce sont surtout les roches cristallines (granite, roches métamorphiques du socle, etc.), les argiles (argiles plastiques ou molles, argiles plus consolidées) et les roches salines (évacorites stratifiées, dômes de sel) qui conviennent comme roches hôtes pour un stockage géologique de déchets radioactifs.

Mais ni Alain Dassargues ni Manuel Sintubin ne sont des partisans du sel comme roche hôte. Manuel Sintubin : “La mobilité de la roche dans les dômes de sel est peu prévisible sur une période de plusieurs milliers d’années. La stabilité des couches de sel peut être meilleure – comme dans l’installation WIPP aux États-Unis – mais la roche saline peut se dissoudre en cas d’infiltration d’eau. Cela entraîne une corrosion accélérée des barrières artificielles. En outre, nous ne disposons pas en Belgique de roches salines appropriées, ce n’est donc pas une option qu’il faut envisager chez nous.”

Argile de Boom

“Il y a plus de 40 ans, la Belgique a décidé de lancer des recherches pour voir si l’argile de Boom pouvait servir de roche hôte à une installation de stockage”, indique Alain Dassargues. “Ce nom fait référence à la zone où cette couche rocheuse affleure à la surface, c’est-à-dire dans la région de Boom. La formation argileuse s’est déposée il y a environ 30 millions d’années, alors que de grandes parties de la Belgique et des Pays-Bas actuels se trouvaient sous le niveau de la mer. Dans le nord-est de la Belgique (le bassin de Campine) et aux Pays-Bas, la couche d’argile a été recouverte par des sédiments plus jeunes. En Campine, près de la frontière néerlandaise, cette couche d’argile se trouve à une profondeur de plusieurs centaines de mètres et elle a, là aussi, une épaisseur de 100 à 150 mètres.”

Alain Dassargues et Manuel Sintubin s’accordent à dire que les recherches menées par le SCK CEN, l’ONDRAF et EURIDICE, y compris dans le laboratoire souterrain HADES, sont de niveau mondial. “La recherche belge est devenue une référence internationale pour les propriétés

géologiques, mécaniques, chimiques et hydrogéologiques de l'argile", affirme Manuel Sintubin. "La communauté des chercheurs universitaires belges a été et est toujours impliquée dans des volets importants de cette recherche. De nombreux projets de recherche ont été menés en collaboration avec des partenaires internationaux et plusieurs dizaines de projets l'ont été dans le cadre de programmes financés par l'UE. Tous ces éléments contribuent à la crédibilité de ces recherches."

"Il a ainsi été démontré que, dans un stockage géologique dans l'argile, certains des éléments radioactifs les plus toxiques – notamment le plutonium, l'américium, le neptunium, le curium... – adhèrent aux particules d'argile", précise Alain Dassargues. "D'autres éléments radioactifs ne migreront que très lentement à travers l'argile. Au moment où ils atteindront la biosphère, leur radioactivité se sera éteinte ou aura été diluée à une concentration telle que leur exposition à l'homme et à l'environnement sera largement inférieure aux limites légales."

"On a beaucoup investi dans les recherches sur l'argile de Boom. Dans d'autres endroits en Belgique, nous n'avons qu'une connaissance très superficielle du sous-sol profond", admet Alain Dassargues. "Nous sommes conscients des limites de l'argile de Boom en termes d'épaisseur, de profondeur, de présence de microfractures dans certaines régions, etc. C'est pourquoi l'argile d'Ypres (également connue sous le nom d'argile yprésienne ou d'argile des Flandres) est également étudiée".

Le mythe des 400 mètres

"On prétend souvent que 'plus le stockage est profond, plus il est sûr'. Ce n'est pas exact", poursuit Alain Dassargues. "L'épaisseur et la structure de la formation hôte sont plus importantes que la profondeur. Il est écrit dans le scénario financier de référence de l'ONDRAF/NIRAS que le stockage se fera à 400 mètres de profondeur, mais ce chiffre ne repose pas sur des arguments géologiques. Un stockage de déchets radioactifs à quelques centaines de mètres de profondeur est probablement aussi sûr qu'à 400 ou 500 mètres. En outre, un enfouissement à une plus grande profondeur va de pair avec une augmentation des défis techniques, des risques opérationnels et des coûts, qui ne sont pas forcément compensés par une meilleure protection de l'homme et de l'environnement".

L'ardoise ardennaise

Manuel Sintubin fait une proposition surprenante : "La chaîne ardoisière de l'Ardenne est aussi un très bon candidat. Il s'agit d'une roche homogène dotée de caractéristiques spécifiques. Bien sûr, il faut plutôt considérer l'ardoise comme une roche cristalline, comme en Finlande. Cela signifie que la conception d'un stockage de déchets radioactifs doit être envisagée du point de vue d'une roche cristalline. L'installation de stockage et les barrières artificielles nécessitent une conception très différente que dans une couche d'argile".

Alain Dassargues : "Je doute très fort que la chaîne ardoisière de l'Ardenne soit une candidate pour un stockage géologique. Cette roche est beaucoup plus perméable que l'argile de Boom parce qu'elle présente des fractures et des fissures. De plus, nous savons très peu de choses sur cette formation géologique à une profondeur de plusieurs centaines de mètres. Je doute fort que l'ardoise puisse concurrencer les formations argileuses."

Manuel Sintubin : “Oui, mais il faut aussi tenir compte de la dynamique sociale. Il est beaucoup plus probable que nous finissions par creuser un stockage de déchets de haute radioactivité dans les régions rurales des Ardennes que dans la partie nord de la Belgique, densément peuplée et industrielle.”

Alain Dassargues : “Cela se peut, mais toutes les recherches menées – y compris les simulations de migration d’éléments radioactifs après la rupture des barrières artificielles – démontrent que l’argile de Boom est de loin la meilleure roche hôte en Belgique. Même si l’on tient compte du fait que, dans la plupart des sites appropriés en Belgique, cette couche d’argile ne se trouve qu’à une profondeur de 250 mètres. C’est la meilleure que nous ayons... jusqu’à présent. Il existe peut-être des sites appropriés en Ardenne, mais il sera beaucoup plus difficile d’y caractériser les roches. Cet environnement géologique est beaucoup moins prévisible parce que ces roches sont fortement plissées et fissurées. Les cartographier nécessiterait un effort de recherche massif. Un effort qui n’est pas réalisable dans la pratique.”

Manuel Sintubin n’est pas d’accord avec ça : “La chaîne ardoisière de l’Ardenne est plus difficile à caractériser à l’avance – je l’admets – mais il faut regarder la mise en œuvre du projet Onkalo en Finlande. Les Finlandais adaptent leur installation même pendant les travaux d’excavation. Ils contournent ainsi les éventuelles fractures de la roche hôte. Dans les roches cristallines, la conception et la construction du stockage doivent être beaucoup plus flexibles que dans l’argile. Pour moi, il est clair que l’ONDRAF/NIRAS doit investir dans des recherches dans les Ardennes. Il devrait y réaliser des forages exploratoires et même y installer un laboratoire souterrain comparable à HADES dans l’argile de Boom.”

Alain Dassargues avance un contre-argument : “Un argument géologique classique – facile à comprendre – contre les roches cristallines dans les Ardennes est le fait que nous n’avons pas de pétrole (de schiste) et de gaz (de schiste) dans les Ardennes. Pourquoi ? Parce qu’ils ont été libérés par les fractures et les fissures tectoniques présentes dans la roche. Pour le stockage géologique des déchets radioactifs, je préfère vraiment les roches tendres qui sont plastiques et ‘auto-étanches’, comme l’argile de Boom ou l’argile d’Ypres. De nombreux pays, à l’exception de la Suède et de la Finlande, choisissent aujourd’hui l’argile.”

Manuel Sintubin : “À mon avis, il n’y a absolument aucune preuve que les sédiments infra-dévoniens des Ardennes aient jamais contenu suffisamment de matière organique pour pouvoir servir de roche hôte au gaz (de schiste) ou au pétrole (de schiste). Par ailleurs, je suis convaincu que la société n’acceptera jamais un stockage géologique à une profondeur de 250 mètres, même si la recherche montre qu’une telle profondeur pourrait être sûre. Selon moi, les critères géologiques aussi bien que sociétaux excluent l’argile de Boom comme roche hôte appropriée pour un stockage géologique en Belgique. Et même pour l’argile d’Ypres, il y aurait très peu de sites appropriés en Belgique. Nous devons mettre en place un processus adaptatif et ne pas exclure d’avance des options qui n’ont pas été suffisamment étudiées.”

... et la discussion, principalement basée sur des arguments techniques, s’est poursuivie ainsi pendant une bonne quinzaine de minutes.

L'impact du changement climatique

Autre sujet : le changement climatique. Quel pourrait être son impact sur un stockage géologique de déchets radioactifs ?

Alain Dassargues : “Le changement climatique affectera les gradients hydrauliques souterrains en raison de l’élévation du niveau de la mer. Toutefois, si on choisit une roche hôte appropriée, cela ne devrait pas poser de problème. Pour certains sites de stockage, le changement climatique pourrait même être positif. Par exemple, si dans quelques centaines d’années la surface au-dessus d’un stockage scellé est recouverte par la mer. Cela réduit le risque d’intrusion des générations futures et en cas de fuite dans la biosphère, la radioactivité serait également plus diluée. À mon avis, le changement climatique n’est pas une préoccupation majeure”.

Manuel Sintubin est tout à fait d’accord là-dessus : “Certains modèles climatiques prévoient qu’à la suite du changement climatique, nous éviterons la prochaine période glaciaire. Nous repoussons de 200.000 ans supplémentaires le risque d’érosion de la surface au-dessus d’un stockage pendant une période glaciaire. Bien sûr, nous devons prendre des mesures de précaution pour les bâtiments et les structures en surface contre des phénomènes météorologiques extrêmes. Mais cela n’affectera pas les constructions souterraines.”

La géologie ne s’arrête pas aux frontières nationales

Les deux scientifiques s’accordent à dire que nous devons également envisager des options internationales, étant donné que la géologie ne s’arrête pas aux frontières nationales. On trouvera sans doute dans les pays voisins de meilleures roches hôtes et de meilleurs sites pour un stockage géologique. Manuel Sintubin voit ainsi de nombreux avantages à une coopération entre les Pays-Bas et la Belgique : “Un concept pourrait consister à construire un stockage transfrontalier avec un puits sur le territoire belge et un autre sur le territoire néerlandais. Les couloirs souterrains de chargement des déchets se rejoindraient à la frontière et les galeries se trouveraient dans les deux pays. D’un point de vue géologique, c’est une solution qui a du sens”.

Une autre option serait qu’un ou plusieurs pays européens développent une industrie autour des déchets nucléaires. Il reste beaucoup d’obstacles et de défis, mais pourquoi créer dans l’UE dix ou quinze installations sous-optimales de stockage alors qu’il est possible de creuser un nombre limité d’installations offrant de bien meilleures garanties de sécurité, se demandent les deux scientifiques.

Ils observent d’ailleurs qu’en Finlande, entre autres, on voit se dessiner un débat public sur l’ouverture du stockage d’Onkalo à des déchets provenant d’autres pays. Actuellement, la loi finlandaise interdit l’importation de déchets radioactifs, mais les décisions politiques – ainsi que les lois – pourraient être modifiées au cours de la prochaine décennie.

Maintenir toutes les options ouvertes... pour maintenant

Le stockage géologique doit-il être considéré aujourd’hui comme la seule solution viable et définitive pour les déchets de haute radioactivité ? Devons-nous axer tout le processus de gouvernance sur la question de savoir quand, où et comment creuser une installation de stockage géologique en Belgique ?

Alain Dassargues et Manuel Sintubin répondent clairement 'non' et sont d'accord pour dire que nous devons être ouverts à d'autres solutions. Ils admettent qu'il n'existe pour l'instant aucune véritable alternative qui nous permettrait d'éviter un stockage géologique. Mais ce qui n'existe pas maintenant peut encore arriver... "D'un autre côté, nous devons rester réalistes. On ne peut pas contourner les lois de la physique : si nous ne trouvons pas d'autre solution d'ici 70 ans, le stockage géologique deviendra automatiquement la seule option", selon les deux scientifiques.

"Mais ce stockage pourra avoir pris une autre forme que celle que nous imaginons aujourd'hui. En attendant, le processus décisionnel doit être adaptable et flexible. Nous devons garder toutes les options ouvertes, mais arriver progressivement, dans un processus par étapes, à des décisions de plus en plus concrètes. À certains moments, nous devons abandonner certaines options sur la base d'arguments scientifiques solides et/ou de décisions éclairées, soutenues par la société. Il y aura à l'avenir des 'points de non-retour'. Mais aujourd'hui, nous ne pouvons pas décider quels seront ces points d'ici 25 ou 50 ans".