



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Préfecture des Vosges



Agence de l'eau
Rhin-Meuse



*Cartographie d'orientation des zones
contraignantes pour la réception d'un centre
de stockage de classe II
dans le département des Vosges*
Volume 1 : Géologie et hydrogéologie

J-R.Mossmann, G. Fourniguet, J-C.Baubron

Etude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 01-PIR-408

Novembre 2001
BRGM/RP-51354-FR



Mots clés : formation, géologie, contrainte, stockage, classe II, argile, minéralogie, cartographie, département, Vosges.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

J-R.Mossmann, G. Fourniguet, J-C. Baubron (2001) – Cartographie d'orientation des zones contraignantes pour la réception d'un centre de stockage de classe II dans le département des Vosges. Volume 1 : Géologie et hydrogéologie. Rapport BRGM/RP-51354-FR, 48 pages, 9 figures, 2 tableaux, 2 annexes dont 1 hors texte.

© BRGM ,2001. Ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Avertissement

Cette étude a pour but de délimiter sur la base des critères retenus, les zones contraignantes pour l'implantation d'un CET¹. Les zones présentant des contraintes, fortes ou moins fortes, ainsi identifiées, ne doivent pas être interprétées comme des contraintes juridiques qui pourraient être **opposées** d'emblée avant même l'instruction de tel ou tel dossier.

En effet, il faut rappeler qu'un dossier de demande de création d'un **CET** peut contenir des éléments, techniques et autres, pouvant compenser telle ou telle contrainte.

De même, une décision d'autorisation peut comporter des prescriptions imposées **ou** demandées en **vue** de ces compensations.

Enfin, et **a l'inverse**, cette étude n'a pas non plus vocation à l'exhaustivité en ce que d'autres contraintes, non reprises dans **l'étude**, peuvent apparaître au cours de l'instruction de ce dossier.

En conclusion de cet avertissement, il faut rappeler que la présente étude, **qui** n'engage que ses auteurs, ne peut bien entendu se substituer à une décision, mais a pour but d'éclairer son auteur avant qu'il se prononce.

¹ CET : Centre d'**Enfouissement** Technique.

Synthèse

À la demande de la Préfecture du département des Vosges, une cartographie des formations géologiques d'orientation à l'échelle du 1/125 000^{ème} a été réalisée, destinée à définir lesquelles de ces unités lithostratigraphiques étaient très contraignantes en l'état et a priori pour recevoir un centre de stockage de classe II. Une synthèse géologique a donc été établie, par analyse et harmonisation des différentes cartes géologiques éditées à l'échelle du 1/50000^{ème}. Après un rappel des caractéristiques et contraintes essentielles auxquelles un centre de stockage de classe II devait répondre, la synthèse géologique a été effectuée, en prenant en compte les paramètres majeurs à retenir, à savoir l'épaisseur et les caractéristiques mécaniques et de perméabilités des barrières naturelles destinées à maintenir confinés à long terme les produits déposés. Cette synthèse a permis de définir des unités géologiques directement contraignantes, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques bien connues (trop grande perméabilité par exemple). Ce sont les formations qui constituent le socle (granites, gneiss, etc.) et qui représentent un cinquième du territoire départemental, pour l'essentiel à l'est et au sud-est. De même ont été classées comme très contraignantes les formations gréseuses (couvrant un quart du département), et les formations calcaires ou marneuses qui se trouvent au-dessus (21,8 % du territoire). Les formations alluviales, éminemment perméables, représentent 18,8 % de l'espace du département, et ont donc aussi été sélectionnées comme contraignantes. Enfin, les niveaux argileux d'épaisseurs inférieures à 10 mètres sont considérés comme *a priori* contraignants pour recevoir un centre de stockage de classe II. Ces formations représentent un peu moins de 1% de la surface du département. Il reste donc environ 13,4% de la superficie départementale couverte par des formations argileuses, dont les caractéristiques propres pourraient convenir à l'objectif désigné.

Ces formations argileuses, qui se répartissent en 6 niveaux stratigraphiques (Callovo-oxfordien, Toarcien, Domérien inférieur, Keuper supérieur, Keuper inférieur et Muschelkalk moyen) ont fait l'objet d'échantillonnages et d'analyses minéralogiques. Ces dernières mettent en évidence que les phases minérales majeures sont la kaolinite, l'illite, la vermiculite et l'interstratifié illite/vermiculite, qui se répartissent de manière progressive selon les conditions de dépôt des argiles aux différentes époques de sédimentation (annexe 2 et figure 9). Parmi ces niveaux argileux, les marnes irisées du Keuper inférieur couvrent 5,8 % du département, soit près de la moitié des surfaces couvertes par les formations argileuses (43,6 %). En dessous se trouvent les argiles et marnes du Muschelkalk, qui représentent 21,5 % des argiles. Les marnes irisées du Keuper supérieur représentent 14,4 % des surfaces argileuses. Le reste des superficies argileuses est modeste, réparti en tiers égaux.

”
.

Au vu des résultats des analyses, aucune de ces formations ne peut être considérée a **priori** contraignante pour recevoir un centre de stockage de classe II. C'est ce que traduit la cartographie dépaiementale produite au 1/125 000^{ème} (annexe 1), sur laquelle des critères de contraintes particuliers **ont** été reportés, comme les failles (pour lesquelles une vigilance spécifique doit être portée pour environ 500 m de part et d'autre du tracé cartographié), les réseaux hydrographiques de surface et les autres contraintes liées à l'occupation de l'espace (périmètres **AEP**, **ZNIEFF**, etc.).

Sommaire

Avertissement	3
Synthèse	5
Sommaire	7
Liste des figures	8
Liste des tableaux	9
Liste des annexes	9
Introduction	11
1. Définition des termes utilisés	13
2. Contraintes réglementaires d'un site de stockage de déchets d'ordures ménagères ou assimilés (articles 9, 10 et 11 de l'Arrêté)	15
2.1 Environnement du site	15
2.2 Barrières de sécurité	15
2.3 Barrière d'étanchéité	16
3. Eléments de géologie régionale	17
4. Définition d'une zone contraignante pour recevoir une installation de déchets de classe II	19
4.1 Les roches argileuses	19
4.2 Les roches cristallophyliennes	20
4.3 Les formations alluvionnaires	21
4.4 Les roches sédimentaires non argileuses	21
5. Formations exclues apriori de la cartographie des zones très contraignantes	23
5.1 Les formations restant à confirmer	23
5.1.1 La formation argileuse dite « les Argiles de la Woëvre » du Callovien (J3c-4a)	24
5.1.2 La formation argileuse du Toarcien (15-17-8)	24
5.1.3 La formation argileuse du Domérien inférieur (14b-16a)	24
5.1.4 La formation argileuse du Keuper supérieur (t9)	25
5.1.5 La formation argileuse du Keuper inférieur (t7-t5)	25

5.1.6 La formation argileuse des couches grises et rouges du Muschelkalk moyen (t4b-t4a)	26
5.2 Caractérisation minéralogique	26
5.3 Évaluation des matériaux non argileux et des matériaux argileux	27
5.3.1 Définitions d'un minéral argileux	27
5.3.2 Minéraux de granulométrie supérieure à 2 µm (matériau non argileux) .	28
5.3.3 Minéraux de granulométrie inférieure à 2 µm (matériau argileux)	30
6. Autres critères potentiellement très contraignants	43
6.1 Présence d'unités aquifères	43
6.2 Réseau hydrographique de surface	44
6.3 Failles et structures tectoniques	44
6.4 Zones d'intérêt.....	45
conclusion	47

Liste des figures

Figure 1 : Échelle stratigraphique régionale.....	18
Figure 2 : Représentation schématique de la structure des phyllosilicates	31
Figure 3 : Échantillon C. Diffactogramme expérimental. Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en Å) sont reportées sur le diagramme.....	35
Figure 4 : Échantillon C. Diffactogramme recalculé. Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en Å) sont reportées sur le diagramme	36
Figure 5 : Échantillon n° 2. Diffactogramme expérimental.....	37
Figure 6 : Échantillon n° 2. Diffactogramme calculé.....	38
Figure 7 : Échantillon n° 4 : Diffactogramme expérimental.....	39
Figure 8 : Échantillon n° 4 : Diffactogramme recalculé	40
Figure 9 : Synthèse des caractéristiques minéralogiques des argiles étudiées dans les différents étages échantillonnés.....	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques minéralogiques de la fraction > 2µm des échantillons étudiés	29
Tableau 2 : Position des raies caractéristiques de quelques phyllosilicates.	33

Liste des annexes

Annexe 1 (hors texte) - Carte d'orientation à l'échelle du 1/125 000 ^e des formations géologiques contraignantes à la réception d'un centre de stockage de classe II dans les Vosges.	
Annexe 2 - Répartition spatiale de la minéralogie des formations argileuses du département des Vosges (Echelle 1/350 000 ^e).	

Introduction

Si les déchets ménagers sont, la plupart du temps, considérés comme « inoffensifs » (en opposition aux « déchets dangereux » qui font l'objet d'une définition communautaire précise), une mise en centre de stockage mal conduite peut se révéler dangereuse pour l'environnement et la sécurité des riverains. C'est pourquoi, l'Arrêté Ministériel du 9 septembre 1997 (publié au JO du 2 octobre 1997) définit les conditions d'aménagement des installations de stockage de déchets ménagers ou assimilés existantes ou nouvelles.

Dans ce texte, les Titres II : « Création de nouvelles installations et extension d'installations existantes » ; III : « Exploitation de l'installation » ; et IV : « Couverture des parties comblées et fin d'exploitation » précisent en particulier les dispositions prévues pour les installations nouvelles. Le Titre V : « Installations existantes » indique les mesures à mettre en œuvre pour les modalités de mise en conformité des installations existantes.

En annexe, l'Arrêté:

- définit les catégories de déchets admissibles :
 - catégorie D : déchets non ultimes à comportement fortement évolutif,
 - catégorie E : déchets à caractère polluant modéré, et à comportement peu évolutif.
- dresse la liste des déchets interdits ;
- indique les concentrations maximales en polluants des rejets liquides ;
- précise les dispositions obligatoires de la mise en conformité.

Ce texte a été adapté lors de la transposition en droit national de la Directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 (Arrêté Ministériel du 9 septembre 1997 modifié, J. O. des 2 octobre 1997, 2 mars 2002 et 19 avril 2002). Ces adaptations ne semblent pas devoir concerner les propriétés de la barrière géologique (Paragraphe 3.2 de l'Annexe I de la Directive sus visée).

C'est par rapport aux contraintes réglementaires ainsi définies que le Service Géologique Régional Lorraine du BRGM, sollicité par la Préfecture des Vosges, a procédé à l'évaluation du territoire du Département des Vosges afin de cartographier les zones à fortes contraintes techniques (pour des raisons géologiques et hydrogéologiques), à présenter naturellement les propriétés requises pour héberger une installation de stockage des déchets ménagers et assimilés, dont la nécessité a été mise en évidence par le Plan Départemental des Vosges des Déchets Ménagers et Assimilés (AP du 18/11/1996). Il doit en résulter une synthèse cartographique, à l'échelle du 1/125 000.

”
.
”

Dans ce travail, les zones non susceptibles ‘de présenter les propriétés requises pour héberger un centre de stockage de Classe II, telles que définies par l’Arrêté Ministériel sus mentionné, ont donc été déterminées par rapport aux exigences des articles 9 à 11 du Titre 1, Chapitre II de l’Arrêté. L’étude porte ainsi sur la détermination des zones a priori défavorables à héberger une installation nouvelle de stockage des déchets ménagers et assimilés. Les formations géologiques seront donc cartographiées en fonction de leur lithologie (nature), un classement sera effectué en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques : puissance et aptitudes à empêcher le transfert de produits polluants (perméabilité), afin de déterminer progressivement celles présentent *a priori* un caractère contraignant avec l’objectif poursuivi.

Les données utilisées seront celles provenant d’une synthèse des cartes géologiques au 1/50 000 ème , des informations issues de la Banque des Données du Sous-Sol (**BSS**) auxquelles seront ajoutées des analyses de caractérisation effectuées dans le cadre de ce travail.

1. Définition des termes utilisés

Les définitions des termes techniques utilisés ont été reprises de l'Article 1 de l'Arrêté du 9 septembre 1997, et de l'Article 2 de la Directive 1999/31/CE du 24 avril 1999.

- Installation de stockage :** installation d'élimination des déchets par dépôt ou enfouissement sur le sol ou dans des cavités artificielles ou naturelles du sol et couverture ultérieure, sans intention de reprise ultérieure, à l'exclusion du stockage dans des cavités naturelles ou artificielles dans le sous-sol.
- Installation nouvelle :** une installation autorisée plus d'un an après la publication de l'Arrêté Ministériel.
- Installation existante :** une installation autorisée au plus tard un an après la publication de l'Arrêté Ministériel.
- Installation collective :** une installation qui reçoit les déchets de plusieurs producteurs de déchets, d'une ou plusieurs collectivités territoriales.
- Installation interne :** une installation exploitée par un producteur de déchets pour ses propres déchets, sur son site de production ou ailleurs.
- Période d'exploitation :** période couvrant les actions d'admission et de stockage des déchets.
- Période de suivi :** période pendant laquelle aucun apport de déchets ne peut être réalisé et pendant laquelle il est constaté une production significative de biogaz ou de lixiviat, ou toute manifestation susceptible de nuire aux intérêts mentionnés à l'Article L511-1 du Code de l'Environnement.
- Extension :** augmentation de la capacité de stockage autorisée par augmentation de la hauteur de stockage des déchets sur la zone à exploiter ou par augmentation de la superficie de la zone à exploiter.
- Casier :** subdivision de la zone à exploiter, délimitée par une digue périmétrique stable et étanche, hydrauliquement indépendante.
- Alvéole :** subdivision du casier.

- Barrière de sécurité passive :** substratum du site, devant présenter, de haut en bas, une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} d s sur au moins 1 m, et inférieure à 1.10^{-6} m/s sur au moins **5 m.**
- Barrière de sécurité active:** sur le fond et sur les flancs de chaque casier, une barrière de sécurité active assure son indépendance hydraulique, le drainage et la collecte des lixiviats, et évite ainsi la sollicitation de la barrière de sécurité passive. Cette fonction d'étanchéité est assurée **par** une géomembrane.
- Lixiviat :** tout liquide filtrant par percolation des déchets mis en décharge, et s'écoulant d'une décharge, ou contenu dans celle-ci.
- Géomembrane :** produit adapté au génie civil, mince, souple, continu, étanche au liquide même sous les sollicitations en service tel que défini dans la norme NF P 84-500.
- Géotextile :** matériau perméable, qui peut être tissé, non tissé, aiguilleté ou tricoté, utilisé dans les applications de génie civil et de géotechnique.
- Perméabilité :** aptitude d'un milieu à se laisser traverser par de l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique.
- Nappe exploitable :** ressource en eau qui peut, compte tenu de sa qualité, de ses caractéristiques hydrogéologiques et de sa localisation, donner lieu à une exploitation pour l'alimentation en eau potable ou thermo-minérale.

2. Contraintes réglementaires d'un site de stockage de déchets d'ordures ménagères ou assimilés (articles 9, 10 et ■■ de l'Arrêté)

2.1 ENVIRONNEMENT DU SITE

L'article 9 de l'Arrêté stipule que la zone à exploiter doit être implantée et aménagée de telle sorte que son exploitation soit compatible avec les autres activités et occupations du sol environnantes, et qu'elle ne génère pas de nuisances qui ne pourraient faire l'objet de mesures compensatoires suffisantes, et qui mettraient en cause la préservation de l'environnement et de la salubrité publique.

En particulier, la zone d'exploitation ne doit pas être située à moins de 200 m de la limite de propriété du site. L'implantation de l'installation doit **par** ailleurs prendre en compte les mesures de prévention des dangers d'incendie du couvert végétal situé à proximité et à l'extérieur du grillage de clôture, en particulier en bordure de massifs forestiers ou en amont de ces derniers par rapport aux vents dominants.

2.2 BARRIERES DE SECURITE

L'article 10 prévoit que la barrière de sécurité passive est normalement constituée par une formation géologique naturelle de faible perméabilité, et de plusieurs mètres d'épaisseur. Le contexte hydrogéologique doit être favorable. Cela signifie notamment que la barrière de sécurité passive doit se situer dans une zone non saturée du sous-sol.

L'article 11 fixe les caractéristiques de la barrière de sécurité passive, qui doit avoir une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} d/s sur au moins un mètre d'épaisseur, et reposer sur une formation minérale de perméabilité inférieure à 1.10^{-6} m/s, au moins épaisse de 5 m.

Lorsque la perméabilité naturelle du substratum n'est pas inférieure à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 m d'épaisseur, mais tout de même inférieure à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 m, il est possible de reconstituer la barrière de sécurité passive par l'apport complémentaire d'un matériau naturel éventuellement remanié. Ce matériau naturel doit présenter, après sa mise en place, des caractéristiques hydrauliques conformes à celles prévues à l'article 11 de l'Arrêté.

2.3 BARRIERE D'ETANCHEITE

Il existe deux mécanismes de migration des polluants à travers une structure de Confinement. Le transport par convection, qui obéit à la loi de Darcy, dépend de la perméabilité de la structure de confinement, et devient négligeable lorsque la perméabilité est très faible (inférieure à 10^{-10} ds). Lorsque la perméabilité de la structure de confinement devient faible, (inférieure à 10^{-8} ds), le transport par diffusion, lié au gradient de concentration, devient progressivement prépondérant par rapport au transport par convection. L'importance relative du transport par diffusion augmente lorsque l'épaisseur de la barrière diminue. En conséquence, il semble nécessaire de fixer une épaisseur minimale pour chacune des couches qui constituent la barrière passive, de façon à tenir compte de ces phénomènes. En particulier, il ne semble pas satisfaisant de vouloir substituer la couche d'argile de 1 mètre à moins de 10^{-9} m/s de perméabilité, par une géomembrane ou par un géotextile bentonitique, offrant une perméabilité très faible, mais une épaisseur trop insuffisante. Si en théorie on y « gagne » en terme de performance de l'imperméabilité, les temps de transfert du polluant par diffusion sont très courts (de l'ordre du mois) au regard des conditions naturelles, et surtout, il est difficile de garantir une absence de fluage de la bentonite (matériau généralement utilisé pour garantir « l'imperméabilité » dans le géotextile, lors de la mise en charge du casier: l'épaisseur efficace de la barrière peut ainsi être réduite à néant.

3. Éléments de géologie régionale

Le département des Vosges est couvert par 21 cartes géologiques au 1/50 000 (certaines de ces cartes n'étant que partiellement concernées). Dans le cadre de cette étude, on peut distinguer 2 régions bien distinctes en fonction de la nature géologique du sous-sol. Les trois quarts du département correspondent à des formations sédimentaires datées de l'ère secondaire (plus précisément du Séquanien au Buntsandstein), le quart restant correspondant à des roches cristallophylliennes au sens large (granite, granito-gneiss, roches volcaniques, etc.).

Les cartes géologiques du département des Vosges ne prennent pas en compte les formations superficielles, à de très rares exceptions près et sous forme de petits placages. En particulier, les « Limons de plateaux » et les altérites situées au-dessus des granites ne sont pas cartographiés. Il n'en est donc **pas** tenu compte dans la carte de synthèse.

Les cartes géologiques ayant été réalisées à des périodes différentes, l'échelle stratigraphique correspondant aux terrains sédimentaires du département des Vosges a été souvent modifiée. La figure 1 fait une synthèse résumée de la séquence stratigraphique globale.

Les autres formations affleurant dans le département des Vosges correspondent à des roches cristallines essentiellement granitiques : granite de Senones, des Crêtes, de Tholy, granite syncinématique, microgranite, grauwackes, g-ranodiorite. Les autres roches présentes sont soit des vauugnérites, des migmatites, des gneiss et granito-gneiss, des volcanites acides ou basiques (kératophyres, spilites, diabases, gabbros, rhyolites, tufs, ignimbrites, dolérites, etc.). Pour mémoire de petits gisements de cipolin (noté C) existent sur la feuille de Gérardmer (gisement de calcaire cristallin dans des gneiss perlés à grenat). Les différentes cartes géologiques ne donnent aucune indication quant à l'altération de ces roches. Toutes ces formations sont diaclasées ou fracturées (présence de nombreuses fissures), elles ont donc été classées comme n'étant pas adaptées a priori à l'installation d'un CET.

Dans la partie est du département existent de nombreuses formations liées aux glaciations quaternaires. Les cartes géologiques au 1/50 000 concernées sont celles de Cirey-sur-Vezouze, de St-Dié, d'Epinal, de Bruyères, de Gérardmer, de Plombières-les-Bains, de Remiremont, de Munster, de Giromagny et de Thann. Les dépôts liés à ces glaciations (formations glaciaires, fluvio-glaciaires, glacio-lacustres, moraines, cônes fluvio-glaciaires, etc.) sont souvent grossiers, essentiellement composés de blocs, galets, cailloux et sables plus ou moins altérés, parfois épais et seront donc, a priori non adaptés à l'installation d'un CET.

Ere	Période			Etages	Sous-étages et autres dénominations
Secondaire = Mésozoïque	Jurassique	sup.	Malm	Portlandien	
				Kimméridgien	
				Oxfordien	Séquanien
					Rauracien
					Argovien
					Oxfordien s.s. (j4b)
		Moy.	Jogge	Callovien (j3c-4a)	
				Bathonien	
				Bajocien	
				Aalénien	
		Inf.	Lias	Toarcien (t7-8)	
				Domérien (t4bi,6a)	Pleinsbachien =
	Carixien			Channouthien	
	Sinemurien			Lotharingien	
	Hettangien			Sinemurien	
	Trias	Sup.	Trias alpin	métien (t10-11b)	Rhétien
				Norienm	Keuper
				Carnien (t7-6)	
		Moy.		Ladinien (t6b)	Lettenkohle Muschelkalk
				Anisien = Virglorien (t4)	
Inf.		Werfénien = Scythien		Buntsandstein	

Figure 1 :Échelle stratigraphique régionale.

Les étages ou les sous-étages représentés sur fond grisé sont défavorables à l'implantation d'un centre de stockage. Ceux représentés sur fond blanc possèdent des niveaux argileux dont les caractéristiques peuvent être non contraignants et doivent donc être Confirmées.

4. Définition d'une zone contraignante pour recevoir une installation de déchets de classe II

Une zone contraignante pour recevoir une installation de déchets de classe II, est une zone qui n'offre pas une épaisseur naturelle de formation géologique satisfaisant aux conditions de l'Arrêté. Celui-ci, pas plus que la Directive d'avril 1999, ne définissent expressément la nature géologique d'un substratum adapté : **la seule contrainte est d'être apte à éviter toute pollution du sol ou des eaux**

Dans ce contexte, le matériau adapté doit répondre principalement à deux objectifs :

1. La stabilité mécanique de l'ouvrage ;
2. L'obtention d'une perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s, non pas nécessairement en place, mais éventuellement une fois extrait, transporté, régalaé et compacté sur le site.

4.1 LES ROCHES ARGILEUSES

La première approche consiste souvent à rechercher un matériau naturel ayant les qualités requises, défini habituellement sous le terme d'« argile », comme réponse spontanée à cette double contrainte de résistance mécanique et d'imperméabilité. En fait, une gamme **plus** large de matériaux naturels correspond à ces critères, contenant cependant tous une forte proportion d'argile, mais pouvant comprendre également une fraction silteuse ou sableuse.

Parfois, les conditions d'exploitation, de préparation et de transport peuvent rendre un matériau techniquement performant, non exploitable économiquement, du fait d'une distance trop importante entre le projet de centre de stockage et le gisement, qui peut induire une contrainte de coût souvent importante.

Dans le cas où on dispose, à proximité du projet, d'un gisement satisfaisant aux contraintes de stabilité mécanique, et dont la perméabilité n'est pas trop éloignée de l'objectif recherché, il est parfois possible d'améliorer efficacement ses propriétés. La façon la plus courante consiste à traiter le matériau naturel par ajout d'argile, quasiment pure, sous forme de poudre très fine (environ 100 µm), désignée sous le terme commercial de « bentonite ».

Le rôle de la barrière de sécurité passive est de garantir l'absence d'impact du centre de stockage à long terme. La barrière de sécurité active a, en effet, une durée de vie limitée et mal connue, que l'on peut estimer de l'ordre de grandeur de celle de la phase d'exploitation d'un centre de stockage. Par la suite, le vieillissement des matériaux, l'absence de suivi et de contrôle après la phase d'exploitation et de surveillance du site, font que l'on ne peut plus compter techniquement sur cette barrière de sécurité active pour empêcher la migration de contaminants éventuels.

La fonction de la barrière de sécurité passive, dont les caractéristiques prendront le relais de celles dégradées de la barrière active, est alors de pallier la disparition des facteurs de protection mis en place initialement. Les matériaux naturels riches en minéraux argileux, outre qu'ils sont susceptibles de présenter les qualités géotechniques et hydrodynamiques requises pour le projet, présentent en plus l'avantage d'être capables de fixer une grande quantité et une grande diversité d'éléments minéraux ou organiques (capacité d'adsorption). D'autres matériaux, parfois moins perméables que les formations argileuses, ne possèdent pas cette qualité et peuvent s'avérer moins efficaces à retenir des substances polluantes.

4.2 LES ROCHES CRISTALLOPHYLIENNES

C'est en particulier le cas des roches ignées, du type des granites, que nous avons systématiquement considérées comme inaptées, *a priori*, donc incluses dans la cartographie remise des zones défavorables, pour les raisons suivantes :

- Absence de matériel argileux, en volumes et surfaces très insuffisants, capables de piéger des contaminants organiques ou métalliques ;
- Perméabilité parfois faible ou très faible, mais généralement existence de circulations 'en grand' importantes, liées à des réseaux de fissures, permettant un transfert rapide de lixiviats ;
- Vulnérabilité des eaux souterraines de ces massifs, qui de plus peuvent agir comme aires de recharges pour certaines nappes utilisées par ailleurs pour des usages sensibles.

Ce type de matériau constitue une partie importante du département des Vosges : au Nord-Est, à l'Est, au Sud et au Sud-Est. La surface de ces formations est de 1179 km².

4.3 LES FORMATIONS ALLUVIONNAIRES

Les formations alluvionnaires ont également été considérées comme inaptées, *a priori*, et à ce titre également incluses dans la cartographie des zones non susceptibles de recevoir un centre de stockage de classe II. Les principales raisons sont les suivantes :

1. Ces formations présentent généralement une grande hétérogénéité, alternant ou entrecroisant des niveaux fins et des niveaux grossiers, qui ne permettent pas de garantir des propriétés homogènes et continues. Elles sont constituées essentiellement de sables, graviers et cailloutis, matériaux éminemment perméables ;
2. Ces formations sont le plus souvent occupées par des nappes d'eau souterraines, parfois captées, mais pouvant alimenter le réseau hydrographique de surface ou souterrain. De plus, ces nappes sont souvent à faible profondeur, donc vulnérables.

Ces formations sont généralement présentes dans les vallées. Elles couvrent 11 10 km' dans le département.

4.4 LES ROCHES SEDIMENTAIRES NON ARGILEUSES

Les roches sédimentaires dépourvues de minéraux argileux ont également été jugées inaptées, *a priori*, à héberger un centre de stockage, et incluses dans la cartographie, pour les raisons suivantes :

1. S'il s'agit de grès, les roches sédimentaires ne présentent pas les propriétés d'imperméabilité requises. Ce sont en effet d'anciens niveaux sableux, plus ou moins consolidés par un ciment siliceux ou calcaire. Il y existe des intercalations argileuses, qui sont discontinues. Très souvent les grès hébergent des nappes souterraines d'intérêt économique, comme celles des grès du Trias inférieur en Lorraine. Les grès couvrent 1473 km² du département des Vosges.
2. S'il s'agit de roches carbonatées massives, comme les calcaires, elles peuvent posséder une perméabilité de fissures, tout comme des granites massifs, qui peut de plus se développer au contact agressif des lixiviats. Dans le cas de calcaires marneux, ils se présentent le plus souvent en alternance de bancs plus massifs et plus riches en carbonates, avec des bancs plus riches en minéraux argileux. De telles formations peuvent présenter une très bonne imperméabilité verticale, mais en revanche avoir une perméabilité horizontale qui peut être importante. De plus, l'alternance de bancs carbonatés et argileux peut affecter les propriétés géotechniques de la formation. Dans le département, ces formations calcaires et marneuses couvrent 1285 km'.

5. Formations exclues *a priori* de la cartographie des zones très contraignantes

Les formations naturelles qui sont éliminées *a priori* de la cartographie des zones à forte contrainte pour la réception d'un centre de stockage de classe II, sont les formations dites argileuses, telles qu'elles résultent de l'interprétation des cartes géologiques existantes. Parmi celles-ci, celles présentant une épaisseur insuffisante (inférieure à 10 mètres) ou qui ne sont pas à l'affleurement, ont été considérées, *a priori*, inaptes et ont été intégrées dans le document cartographique des zones contraignantes (par exemple la formation du Rhétien supérieur (t1Ob-t11b), ou la formation argileuse de la Lettenkohle moyenne (t6b), trop peu épaisses, et reposant sur une formation gréseuse ou dolomitique non adaptée), ou encore les argiles à chailles de l'Oxfordien. L'ensemble des formations argileuses à forte contrainte couvre une superficie d'environ 57 km² dans le département.

Parmi les formations argileuses restantes, qui seraient donc *a priori* aptes à la réception d'un centre de stockage de classe II, il convient de vérifier si leurs caractéristiques sont propres à l'usage projeté :

- Leur teneur en minéraux argileux, une teneur trop faible pouvant les rendre inaptes ;
- La nature des minéraux argileux, qui détermine en partie les propriétés de ces formations.

Ces formations ont donc été échantillonnées et analysées. Les prélèvements ont été réalisés à la tarière à main à une profondeur comprise entre 1,0 m et 1,5 m, sur des affleurements de roche en place, après en avoir dégagé la couche superficielle altérée. Ils ont été conditionnés en sachets en polyéthylène, avant d'être envoyés au laboratoire d'analyses.

5.1 LES FORMATIONS RESTANT A CONFIRMER

Les formations argileuses qui sont exclues de la cartographie *a priori* des zones inaptes à la réception d'un centre de stockage de classe II, à ce stade sont, du haut de la série stratigraphique en bas :

5.1.1 La formation argileuse dite « les Argiles de la Woèvre » du Callovien (J3c-4a)

Épaisses de 50 à 120 m selon les endroits (couches se biseautant vers le sud-ouest, elles passent de 115 à 120 mètres vers Neufchâteau, à environ seulement 50 m vers Saint Blin, en Haute Mme). Elles sont constituées d'argiles grasses avec parfois des intercalations de bancs de calcaires marneux. Seul le faciès argileux pourrait convenir, dès lors qu'il possède une puissance d'une dizaine de mètres sans intercalaire. En outre, le faciès basal correspondant localement à un minerai de fer oolithique ne saurait convenir.

Cette formation a été échantillonnée dans une coupe de la voie SNCF à Fréville (Feuille IGN 3217^E Neufchâteau 1/25000). L'ensemble de cette formation occupe un territoire de 46,7 km² dans le département.

5.1.2 La formation argileuse du Toarcien (15-17-8)

Cet étage est essentiellement argilo-marneux. Ce niveau commence par un faciès similaire à celui des grès médioliasiques sous-jacents, suivi de schistes argileux bitumineux (« schistes carton » ou « schistes à Posidunomyes », de puissance inférieure à 8 m). Au-dessus, on trouve des argiles marneuses gris-bleu, devenant jaunâtres par altération. Le sommet du Toarcien peut renfermer de fines passées sablo-micacées. Sa puissance ne devrait pas dépasser 50 mètres dans la région de Neufchâteau, mais atteindrait 80 à 90 mètres dans le nord-est de la feuille de Châtenois. Cette formation (17-8, Toarcien supérieur) a été échantillonnée dans une excavation lors de travaux dans le village de Certilleux (Feuille IGN 3217^E Neufchâteau 1/25000). Elle représente une superficie totale de 61,9 km² pour le département.

5.1.3 La formation argileuse du Domérien inférieur (14b-16a)

Le Domérien inférieur est constitué d'argiles à Amaltheus mavgavitus. Elles sont feuilletées, grisâtres, finement micacées, avec des intercalations de marnes argileuses et d'argilites calcaires. La puissance de cette formation, épaisse en moyenne de 90 m, varierait de 85 à 110 mètres (minimum de 85 m dans les notices). Il conviendra de distinguer les zones présentant des petits bancs, nodules ou miches calcaires, qui seraient alors à forte contrainte. Cette formation a été échantillonnée au lieu-dit « Le Chauffour » à Aulnois (Feuille IGN 331170 Châtenois 1/25000). Elle couvre une surface de 51,5 km².

5.1.4 La formation argileuse du Keuper supérieur (t9)

C'est le niveau des «(marnes irisées supérieures)». Il s'agit de marnes tendres, imperméables, multicolores, comprenant de fréquentes intercalations de dolomies marneuses en petits bancs isolés. À la base on trouve, sur 5 à 8 mètres d'épaisseur, un niveau de marnes argileuses rouges, avec inclusions de gypse saccharoyde ou fibreux, et masses d'anhydrite à la base. La puissance totale est variable, de 25 à 40 mètres environ. Cette formation a été échantillonnée à la cote 263 sur le talus de route allant de Xaronval vers les Bourdrières, et au lieu-dit « La Corvée » entre Bettencourt et Chauffécourt (Feuille IGN34170 Mirecourt 1/25000). Les passées à gypse ou anhydrite ne sont pas rencontrées à l'affleurement (le sulfate de calcium a été dissous). Les affleurements occupent une superficie totale de 113,1 km².

5.1.5 La formation argileuse du Keuper inférieur (t7-t5)

Il s'agit du niveau des « Marnes irisées inférieures », correspondant à un puissant massif marneux et gypseux (marnes versicolores brun-rouge, violacées, grises, verdâtres et noires, schisteuses ou dolomitiques) avec des alternances de dolomie, cargneules, couches ou lentilles d'anhydrite et de gypse. La puissance de cette formation varie de 50 à 140 mètres. Cette formation (t7) a été échantillonnée le long de la **D55** au lieu-dit « Le Moulin » à Florémont (Feuille IGN 34170 Mirecourt 1/25000), à l'entrée du village de Rancourt (Feuille IGN 33 18^E Vittel 1/25000), près de Padoux et au lieu-dit « Le Derrière » entre Moyemont et Charmes (Feuille IGN 35170 Rambervillers 1/25000). Les passées à gypse ou anhydrite ne sont **pas** rencontrées à l'affleurement (le sulfate de calcium a été dissous). Il en est de même fréquemment pour les **Lits** dolomitiques, sans que la dissolution puisse être considérée cependant comme systématique. Cette formation est la mieux représentée dans le département des Vosges, avec une superficie totale de 341,7 km².

5.1.6 La formation argileuse des couches grises et rouges du Muschelkalk moyen (t4b-t4a)

Puissante de 30 à 50 mètres, elle est constituée de marnes schisteuses dolomitiques feuilletées, avec présence fréquente de gypse fibreux et d'anhydrite en profondeur. Au sommet, peut se développer, au sein des marnes, un faciès caverneux, criblé de petites cavités parallélépipédiques, séparées par des cloisons calcaires. La base du Muschelkalk moyen, épaisse de 15 à 30 mètres, correspond à des argilites bariolées (Argiles de Pexonne), à nombreux filonnets de gypse et minces plaquettes grisâtres microgéseuses, parfois jaunâtres et dolomitiques. Cette formation a été échantillonnée en bordure de la route entre Destord et Sainte Hélène (Feuille **IGN35170** Rambervillers 1/25000) et au lieu-dit « Les Échènes » à Lerrain (Feuille IGN 34180 Dompain 1/25000). L'altération lors des glaciations du quaternaire conduit pour les affleurements à une situation analogue pour cette formation à celle du Keuper inférieur. La superficie totale représente une surface de 168,0 km².

5.2 CARACTERISATION MINÉRALOGIQUE

Chaque prélèvement a fait l'objet d'une détermination minéralogique sommaire destinée à :

1. Évaluer la teneur des matériaux en argiles et en fraction non argileuse ;
2. Évaluer la nature des minéraux argileux, et leur proportion dans le matériau.

La technique utilisée est la diffraction des rayons X, sur des pastilles de poudre de roche totale broyée, pour l'identification et la quantification des phases non argileuses, et sur des fractions granulométriques < 2 µm pour l'identification et la quantification des minéraux argileux. Ces mesures ont été réalisées par le Laboratoire Environnement et Minéralogie de l'École Nationale Supérieure de Géologie, à Nancy.

La technique consiste à analyser les rayons X diffractés par les interfaces constituées par les différents plans définis par les arrangements atomiques des minéraux. Chaque minéral possède ainsi sa « signature » spécifique, sous forme de raies diffractométriques générées par la présence de plans cristallographiques dans le cristal.

5.3 EVALUATION DES MATERIAUX NON ARGILEUX ET DES MATERIAUX ARGILEUX

5.3.1 Définitions d'un minéral argileux

Il y a plusieurs façons de définir un minéral argileux. La première est granulométrique, généralement utilisée en géotechnique : c'est toute fraction minérale de taille inférieure à 2 μm d'un sol ou d'une formation géologique.

Une deuxième définition englobe dans l'acceptation une notion de propriété : matériau de granulométrie fine, qui devient en général plastique à partir d'une certaine teneur en eau, et qui durcit au séchage ou à la calcination.

Les termes utilisés ne sont pas définis précisément, car il n'y a pas de consensus (Guggenheim et Martin, 1995). Pour la plupart des géologues et des pédologues, la taille granulométrique retenue est 2 μm , alors que pour les sédimentologues c'est plutôt 4 μm , et 1 μm pour les chimistes des colloïdes.

La plasticité est la propriété de pouvoir modeler le matériau lorsqu'il est à teneur en eau optimale. Ce n'est qu'en partie une propriété liée à la nature minéralogique des éléments qui constituent le matériau. En général, tout minéral argileux fin possède un minimum de plasticité, mais celle-ci peut varier grandement en fonction de la manière dont sont formés les agrégats de particules. La nature minéralogique des éléments constitutifs d'une roche argileuse est une indication des propriétés qu'elle est susceptible de présenter, (ou que l'on peut s'attendre à trouver), mais n'est pas le seul critère déterminant.

Pour cette étude, nous avons considéré que *la fraction argileuse était la fraction de la roche dont la granulométrie est inférieure ou égale à 2 μm* (équivalent diamètre sphérique). Cette fraction est le plus souvent largement dominée par une famille de minéraux particulière, les phyllosilicates. Ce sont eux en particulier qui contribuent à donner au matériau argileux ses propriétés de plasticité et d'imperméabilité.

Le terme « roche argileuse » désigne des roches détritiques (ou sédimentaires) à grain très fin, contenant au moins 50 % de minéraux argileux, auxquels peuvent s'ajouter d'autres minéraux très divers, détritiques ou non (quartz, minéraux carbonatés, colloïdes...). Les roches argileuses se présentent macroscopiquement comme des roches tendres, rayables à l'ongle, fragiles à l'état sec, et qui se brisent avec une cassure conchoïdale. Elles sont douées d'un grand pouvoir absorbant, gonflent à l'eau et deviennent plastiques avant de perdre leur cohésion. Elles se dispersent alors dans l'eau en formant une suspension colloïdale dont la stabilité dépend à la fois de la nature de l'argile, et des caractéristiques physico-chimiques du fluide.

5.3.2 Minéraux de granulométrie supérieure à 2 µm (matériau non argileux)

Ces minéraux font partie de ce qui est parfois désigné par « la phase grossière ». Son abondance est déterminée par différence entre le poids d'un échantillon de la roche totale, et le poids résiduel après en avoir extrait la fraction argileuse (<2 µm). L'identification minéralogique et la quantification approximative de cette fraction ont été réalisées **par** diffraction des rayons X. La séparation de la phase argileuse (<2 µm) a été réalisée par décantation d'une suspension dans l'eau d'un échantillon de roche totale broyée, et extraction de la partie non décantée, en appliquant la Loi de Stokes sur la vitesse de sédimentation de particules sphériques. La décantation est accélérée par centrifugation de la suspension.

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tableau 1.

Presque tous les échantillons étudiés présentent une proportion élevée en particules fines <2 µm, supérieure à 45 % de la roche totale, ce qui devrait être potentiellement suffisant **pour** atteindre des perméabilités assez faibles pour la roche totale. La seule présence en quantité de minéraux **argileux**, si elle est un argument en faveur de faibles perméabilités, n'est **pas** suffisante pour prédire la perméabilité réelle des formations : des déterminations spécifiques sont indispensables pour cela et peuvent, seules donner une bonne estimation de la valeur réelle.

Aucune des roches examinées n'est exempte non plus de minéraux non argileux, ce qui est potentiellement en faveur de qualités géotechniques potentiellement adaptées (non inadaptées), qu'il conviendra d'évaluer précisément au moyen des tests géotechniques appropriés.

A priori, aucune des formations étudiées pour leur fraction non argileuse ne semble devoir être incluse avec les formations cartographiées comme potentiellement inadaptées à héberger une installation de stockage de déchets de classe II.

Identification	Formation	Lieu de prélèvement	% de la roche totale	Minéraux identifiés
B	« Argile de la Woëyre » du Callovien (j3c-4a)	Fréville	58	Quartz : 44 % Calcite : 48 % Gypse : 5 % Dolomite : <1,5 % Feldspath : <1 %
	Toarcien (L7-8)	Certilleux	60	Quartz : 65 % Calcite : 34 % Feldspath : 1%
C	Domérien inférieur (14b-16a)	Aulnois	43	Quartz : 92 % Feldspath : <5% Boehmite : <5%
002	Keuper supérieur (t9)	Xaronval	38	Quartz : 63 % Dolomite : 28 % Feldspath : <6 % Calcite : <4 %
003	Keuper supérieur (t9)	Béttoncourt / Chauffémont	56	Quartz : 48 % Dolomite 30 % Calcite : 18 % Feldspath : 3 % Pyrite : 1 %
001	Keuper inférieur (t7-t5)	Florémont	44	Quartz : 47 % Calcite : 48 % Dolomite : 2 % Pyrite : 2 % Feldspath : 1 %
004	Keuper inférieur (t7-t5)	Rancourt	30	Quartz : 52 % Dolomite : 44 % Calcite : 5 %
007	Keuper inférieur (t7-t5)	Padoux	18	Quartz : 75 % Calcite : 25 %
008	Keuper inférieur (t7-t5)	Moyemont	27	Quartz : 52 % Dolomite : 45 % Calcite : <2 % Feldspath : <2 %
005	Muschelkalk moyen (t4b-t4a)	Lerrain	57	Quartz : 48 % Dolomite : 44 % Calcite : 4 % Feldspath : 4 %
006	Muschelkalk moyen (t4b-t4a)	Destord / Sainte Hélène	37	Quartz : 94 % Dolomite : 2 % Calcite : 2 % Feldspath : 2 %

Tableau 1 : Caractéristiques minéralogiques de la fraction > 2µm des échantillons étudiés

5.3.3 Minéraux de granulométrie inférieure à 2 µm (matériau argileux)

a) *Éléments de cristallographie des minéraux argileux.*

Il n'est pas question ici d'aborder la classification des minéraux argileux, mais quelques éléments de base relatifs à la structure et à la classification des minéraux argileux sont nécessaires pour interpréter les résultats de diffraction X.

Minéralogiquement, les argiles correspondent à des minéraux aluminosilicatés, le plus souvent de la famille des phyllosilicates : ce sont des particules à base d'aluminium et de silicium oxydés, arrangées en feuillets de très faible épaisseur (entre 7 et 14 Å).

Compte tenu de la granulométrie des particules et de leur structure (association de feuillets de très faible épaisseur), les matériaux argileux développent des surfaces spécifiques très élevées, comprises entre 5 et 800 m²/g, ce qui leur confère des propriétés d'adsorption très importantes.

Parmi ceux-ci, nous nous limiterons plus particulièrement à quatre familles importantes pour notre étude : les kaolinites, les illites, les smectites et les vermiculites.

b) *Structure des phyllosilicates.*

L'unité de base des minéraux argileux est le feuillet, constitué de plusieurs couches (Figure 2).

1. Une première couche est constituée d'un ensemble de tétraèdres accolés, dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygène, et le centre par un atome de silicium, parfois remplacé par de l'aluminium. Cette couche est appelée couche T ;
2. Une deuxième couche, accolée à la première, est constituée d'un ensemble d'éléments octaédriques, dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygène et d'hydroxyde, et le centre par de l'aluminium, plus ou moins substitué par du magnésium et/ou du fer ; cette couche est appelée couche O.

Il en résulte :

- Un feuillet constitué par la succession d'une couche T et d'une couche O accolées, est caractéristique des phyllosilicates 1 : 1 ou T : O, comme par exemple la **kaolinite**. Son épaisseur est typiquement de 7 Å ;
- Un feuillet constitué par une succession de couches O accolées entre deux couches T est caractéristique des phyllosilicates 2 : 1 ou TOT, comme par exemple la **smectite**, **illite** ou la **vermiculite**. Son épaisseur est typiquement de 10 Å à 14 Å, selon le minéral (10 Å pour l'illite, 14 Å pour la smectite ou la vermiculite).

Le nombre d'atomes d'aluminium remplaçant le silicium dans les couches T, et/ou le nombre d'atomes de fer ou de magnésium qui remplacent 1'atome d'aluminium dans la couche O, constituent un élément de classification des phyllosilicates.

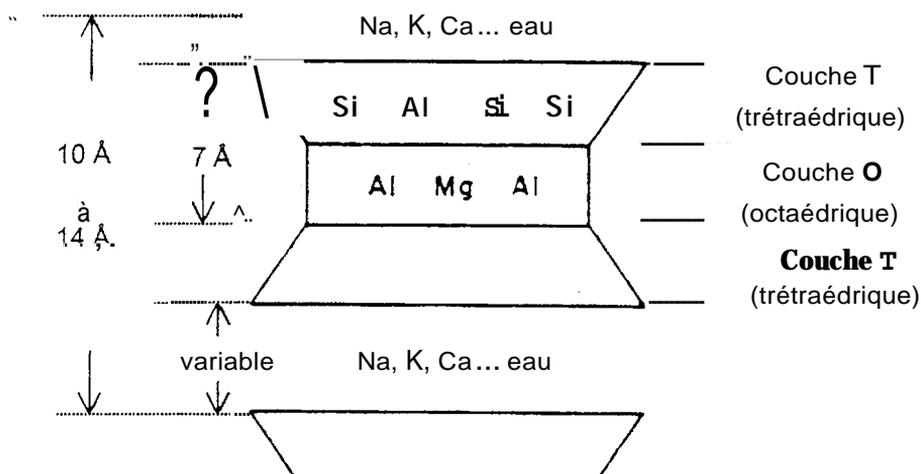


Figure 2 - Représentation schématique de la structure des phyllosilicates

La substitution d'un atome **par** un autre peut engendrer des anomalies électriques au niveau du feuillet. Celles-ci sont compensées par l'incorporation, entre les feuillets, de charges positives, sous forme de cations et/ou de molécules d'eau si le déficit électrique à combler est faible.

La nature du cation compensateur (par conséquent le type de déficit de charge électrique du feuillet) est un élément complémentaire de la classification des phyllosilicates. C'est en particulier cette particularité électrique qui confère aux phyllosilicates leurs propriétés d'adsorption, que l'on peut mesurer en déterminant leur capacité d'échange cationique, qui est la propriété présentée par les phyllosilicates à échanger leur cation compensateur interfoliaire contre un autre. En particulier, les métaux ont tendance à remplacer le cation compensateur originel.

La smectite et la vermiculite sont parmi les phyllosilicates ayant la capacité d'échange cationique la plus élevée (80 à 150 meq/100g*), alors que l'illite (10 à 20 meq/100g) ou la kaolinite (5 meq/100g) sont parmi ceux qui ont la moins bonne capacité d'échange cationique.

* meq/100 g : milliequivalents pour 100 grammes. Unité de mesure de la capacité d'échange cationique. Exprime le nombre équivalent de monovalences positives pouvant être échangées par 100 grammes de matériau sec.

On utilise également cette propriété pour l'identification des minéraux phyllosilicatés : en présence de certaines molécules organiques, certains phyllosilicates sont capables de les incorporer entre les feuillets, d'autres pas. Ainsi, la smectite, lorsqu'elle est exposée à des vapeurs d'éthylène-glycol, incorpore cette molécule organique entre ses feuillets.

Cette molécule organique étant assez épaisse, cela provoque le gonflement du minéral.

L'épaisseur de l'unité de base de la smectite, qui est normalement de 14 Å, passe à 17 Å. La vermiculite, qui ne se distingue pas de la smectite par son unité de base à 14 Å, n'est pas capable d'incorporer cette molécule organique. Même exposée à ses vapeurs, l'épaisseur de l'unité de base reste la même. La kaolinite et l'illite sont également insensibles à ce traitement.

La sensibilité à certains solvants organiques n'est pas seulement utile pour distinguer minéralogiquement les phyllosilicates. Elle est également un très bon indicateur de leur pouvoir gonflant en présence d'eau.

Ainsi, l'illite, la kaolinite ou la vermiculite, qui sont insensibles à l'éthylène glycol, sont des phyllosilicates faiblement gonflants en présence d'eau. Par contre, la smectite, sensible à l'éthylène glycol, est un phyllosilicate facilement gonflant en présence d'eau.

Le pouvoir gonflant des phyllosilicates diminue la perméabilité d'une formation argileuse.

Enfin, une famille particulière de phyllosilicate est constituée de minéraux dont la structure est obtenue par le mélange de feuillets de différents types : illite avec smectite, kaolinite avec vermiculite. Il ne s'agit pas dans ce cas d'un mélange mécanique d'une illite par exemple avec une vermiculite ou une smectite, mais bien d'une nouvelle entité dont l'unité de base serait composée d'un mélange de feuillets de nature différente, accolés les uns aux autres.

Plusieurs types de feuillets peuvent être mélangés simultanément de la sorte, aboutissant à un grand nombre de structures possibles. De plus, les feuillets peuvent se succéder soit de façon aléatoire, soit de façon plus ou moins ordonnée. On classe ces phyllosilicates dans la famille des interstratifiés, en distinguant les interstratifiés désordonnés (mélange aléatoire de feuillets formant une unité de base) et les interstratifiés ordonnés (mélange ordonné des feuillets formant une unité de base).

Les phases minérales que nous avons identifiées dans nos prélèvements sont :

- De l'illite ;
- De la kaolinite ;
- De la vermiculite ;
- Et des interstratifiés illite/vermiculite.

Nous n'avons pas identifié de smectite, qui est généralement le minéral argileux le plus abondant dans les formations sédimentaires, en remplacement de la vermiculite ici.

c) Identification minéralogique des échantillons argileux.

L'identification minéralogique des argiles a été effectuée par diffraction des rayons X de préparations orientées perpendiculairement au faisceau.

La structure en feuillet des phyllosilicates génère des plans évidents correspondants aux limites de couches et de feuillets. En orientant tous les feuillets « à plat » lors de préparations spécifiques, les plans de limites de couches sont dominants: les raies diffractométriques sont très fortes et prédominent sur les autres. Le diffractogramme ainsi obtenu permet d'identifier les phyllosilicates à partir des raies principales qui correspondent généralement à l'épaisseur d'une unité de base cristallographique (7, 10 ou 14 Å, en général) et aux harmoniques qui leurs sont associées.

La sensibilité des phyllosilicates à différents traitements se traduit par des modifications des raies caractéristiques. Les traitements les plus couramment utilisés sont l'exposition à des vapeurs de glycol et le chauffage à 550°C.

La position des raies Caractéristiques (distances réticulaires) des différents phyllosilicates identifiés est donnée dans le tableau 2.

Minéral	Sans traitement	Éthylène glycol	Chauffage à 550°C
Illite	10 Å	10 Å	10 Å
Kaolinite	7 Å	7 Å	Disparaît
Vermiculite	14 Å	14 Å	10 Å
interstratifié Illitevermiculite	Variable entre 10 et 14 Å	Variable entre 10 et 14 Å	10 Å

Tableau 2 -Position des raies caractéristiques de quelques phyllosilicates.

Trois grands types d'associations minéralogiques ont été mis en évidence :

1. **Des formations caractérisées par leur teneur en kaolinite** comme minéral dominant, associé à de l'illite et de la vermiculite (figure 3). Ce sont les formations :
 - du Callovien (j3c-4a) échantillonnée à Fréville (échantillon B) ;
 - du Toarcien (17-8), échantillonnée à Certilleux (échantillon **A**) ;
 - du Domérien inférieur (i4b-l6a), échantillonnée à Aulnois (échantillon C).

Le diffractogramme de l'échantillon C représenté dans la figure 3 a été modélisé par calcul, afin d'évaluer la nature des minéraux et leurs proportions relatives (figure 4).

Pour recalculer ce diffractogramme, il faut introduire au moins trois espèces minérales :

- De la kaolinite (60 % pour l'échantillon C) ;
- Un interstratifié désordonné illite/vermiculite (à hauteur de 30 %), contenant 40% de feuillets d'illite et 60 % de feuillets de vermiculite. La position du pic, correspondant à 13,3 au lieu de 13,9, suggère que la proportion de vermiculite est probablement un peu plus élevée dans l'échantillon réel, que dans le calcul ;
- De l'illite (10 %) en complément.

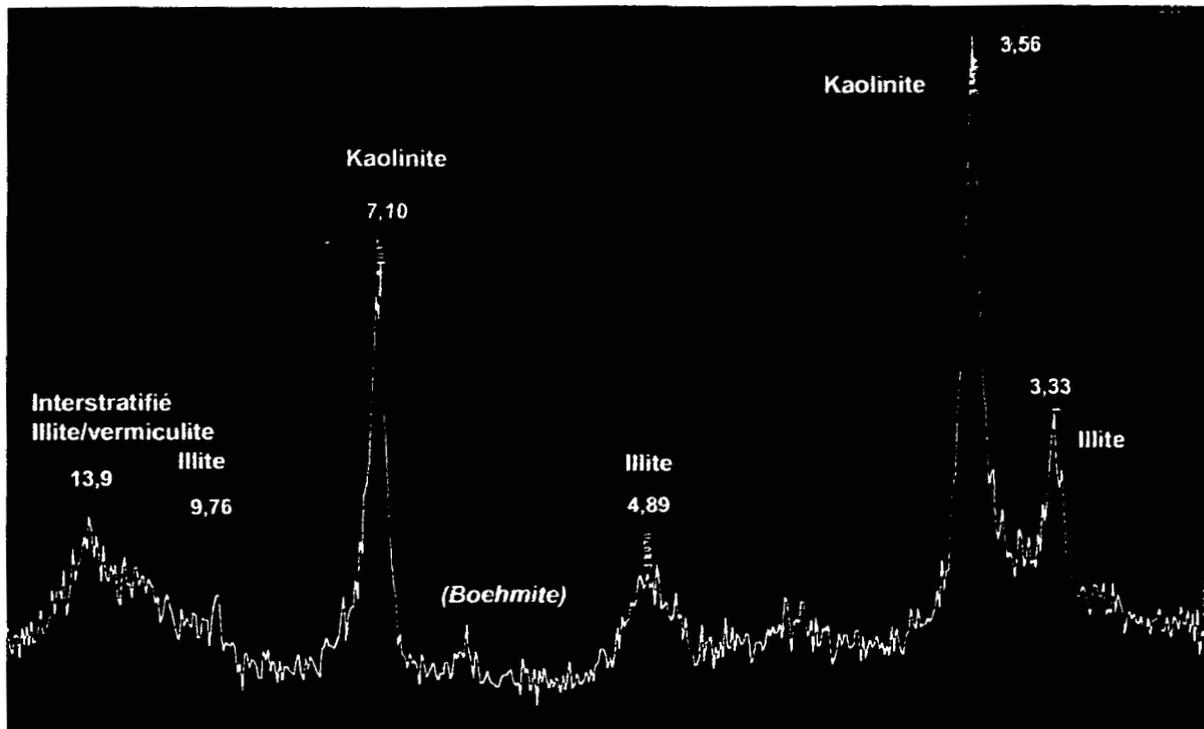


Figure 3 -Échantillon C. Diffractogramme expérimental. Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en Å) sont reportées sur le diagramme.

Avec ces données, on obtient une assez bonne concordance entre le diffractogramme calculé (figure 4) et le diffractogramme expérimental (figure 2), qui comprend en plus des raies correspondant à des minéraux non phylliteux (quartz en particulier, ou boehmite).

Les teneurs correspondantes en feuillets sont, d'après ces calculs :

- Kaolinite : 60 %
- Illite : 22 %
- Vermiculite 18 %

Même si le calcul sous-estime la quantité réelle de vermiculite par rapport à l'illite, de la fraction argileuse des échantillons A, B ou C, nous sommes en présence d'une argile peu gonflante à l'eau, contenant environ 20 % de matériau ayant de bonnes propriétés d'échange cationique.

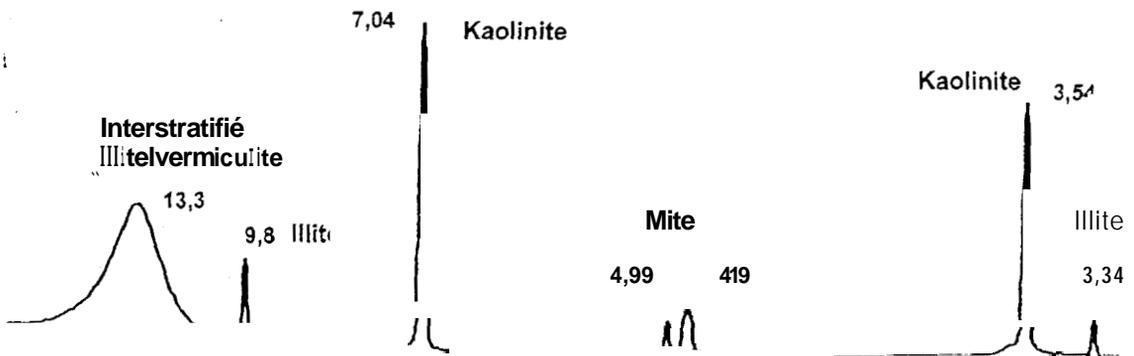


Figure 4 : Échantillon C. Diffractogramme recalculé. Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en Å) sont reportées sur le diagramme

2. Des formations caractérisées par des interstratifiés illite/vermiculite comme minéraux dominants, complétés par de la kaolinite et/ou de l'illite en minéraux secondaires (figure 5). Ce sont les formations du Keuper supérieur (t9), que nous avons échantillonnées à Xaronval (échantillon n° 2, représenté figure 4) et à Bettoncourt / Chauffémont (échantillon n° 3).

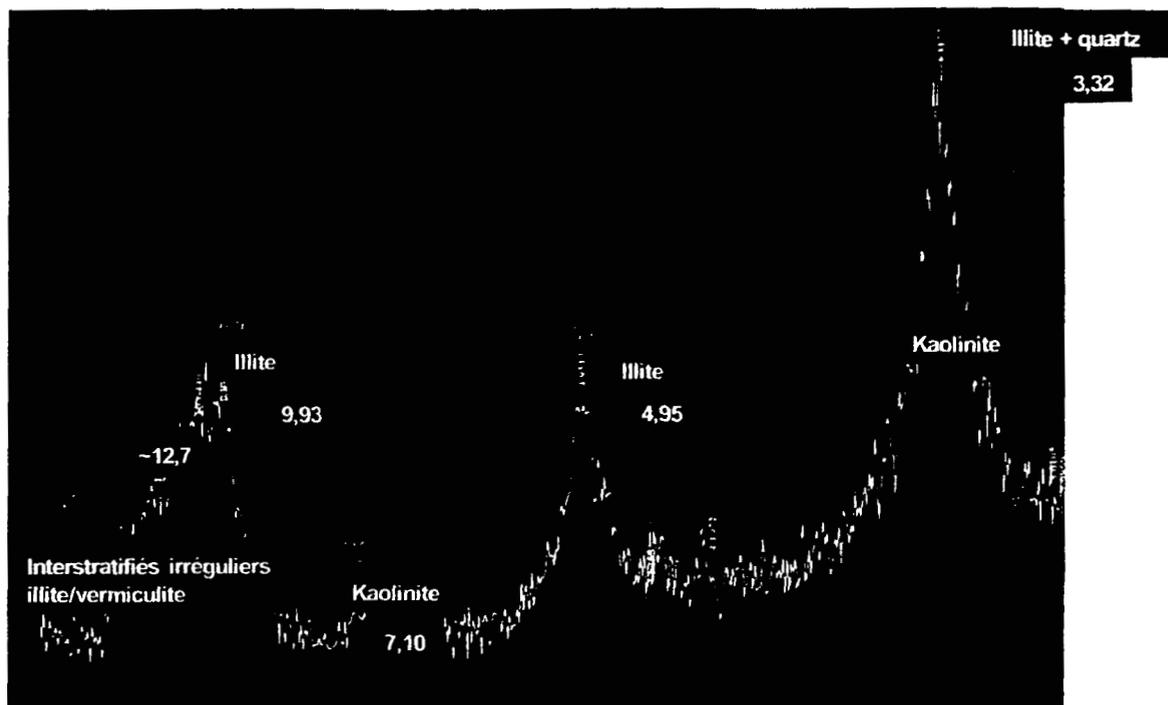


Figure 5 -Échantillon n° 2 Diffractogramme expérimental.

Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en Å) sont reportées sur le diagramme.

Le calcul d'un diffractogramme similaire au diffractogramme expérimental nécessite d'introduire au minimum trois interstratifiés irréguliers du type illite/vermiculite, de l'illite et de la kaolinite. Le diffractogramme calculé de la figure 5 a ainsi été obtenu avec les paramètres suivants :

- Interstratifié irrégulier illite/vermiculite n° 1, constitué de 60 % de feuillets de vermiculite, interstratifiés avec 40 % de feuillets d'illite. Ce premier interstratifié a une abondance relative de 5 % ;
- Interstratifié irrégulier illite/vermiculite n° 2, constitué de 40 % de feuillets de vermiculite, interstratifiés avec 60 % de feuillets d'illite. Ce deuxième interstratifié est mieux représenté dans le mélange, avec une abondance relative de 30 % ;
- Interstratifié irrégulier illite/vermiculite n° 3, constitué de 15 % de feuillets de vermiculite, interstratifiés avec 85 % de feuillets d'illite. Ce troisième interstratifié a une abondance relative de 45 % ;
- Enfin, de l'illite (15 %) et de la kaolinite (5 %) complètent l'échantillon calculé.

Avec ces paramètres, on obtient un diffractogramme calculé approchant le diffractogramme réel (figure 5). L'ensemble de la fraction correspond à une abondance relative de feuillets de l'ordre de :

- Illite : 73 % ;
- Vermiculite : 22 % ;
- Kaolinite : 5 % ;

Soit une teneur en feuillets de vermiculite sensiblement égale à celle de l'assemblage précédent.

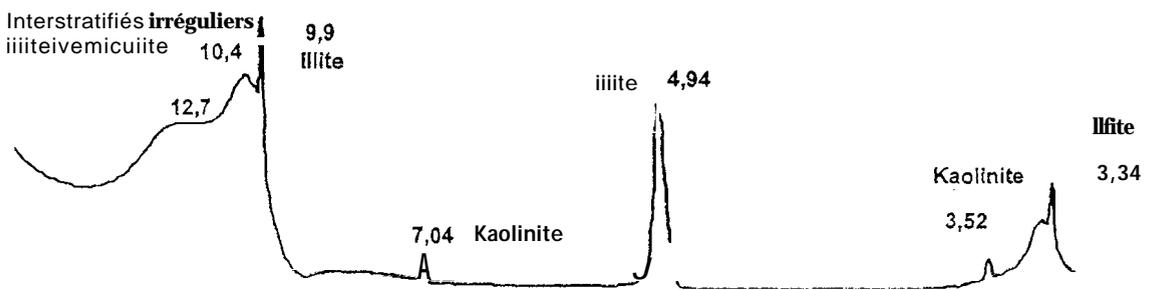


Figure 6 -Échantillon n° 2. Diffractogramme calculé.

Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en **Å**) sont reportées sur le diagramme.

3. Des formations caractérisées par des illites, « vermiculites » et kaolinites, ces dernières représentées toutefois en proportion plus faible que les deux premiers (figure 6). Ces formations sont les formations du Keuper inférieur (t7-t5), échantillonnées à Florémont (échantillon n° 1), à Rancourt (échantillon n° 4), à Padoux (échantillon n° 7) et à Moyemont (échantillon n° 8).

La figure 7 est un diffractogramme expérimental de l'échantillon n° 4 prélevé à Rancourt, représentant ce type de formation.

Ce diffractogramme peut être modélisé par un mélange d'interstratifiés à illite/vermiculite enrichis en vermiculite, qui explique la largeur du pic associé, à une position très proche de celle de la vermiculite vraie. La combinaison retenue pour le calcul du diffractogramme de la Figure 8 est la suivante :

- 50 % d'illite ;
- 10 % de kaolinite ;
- 15 % d'un interstratifié désordonné contenant 50 % de vermiculite et 50 % d'illite ;
- 20 % d'un interstratifié ordonné très riche en vermiculite (70 % de vermiculite et 30 % d'illite) ;
- 5 % d'un interstratifié ordonné très riche en vermiculite (85% de vermiculite et 15 % d'illite).

Bien que la vermiculite « pure » ne soit pas représentée en tant que telle, l'assemblage contient deux interstratifiés très enrichis en ce minéral, qui permettent de faire ressortir un pic de diffraction très proche d'un pic caractéristique de celui de la vermiculite.

L'ensemble de la fraction ainsi défini contient environ 30 % de feuillets de vermiculite, 10% de feuillets de kaolinite, et 60 % de feuillets d'illite.

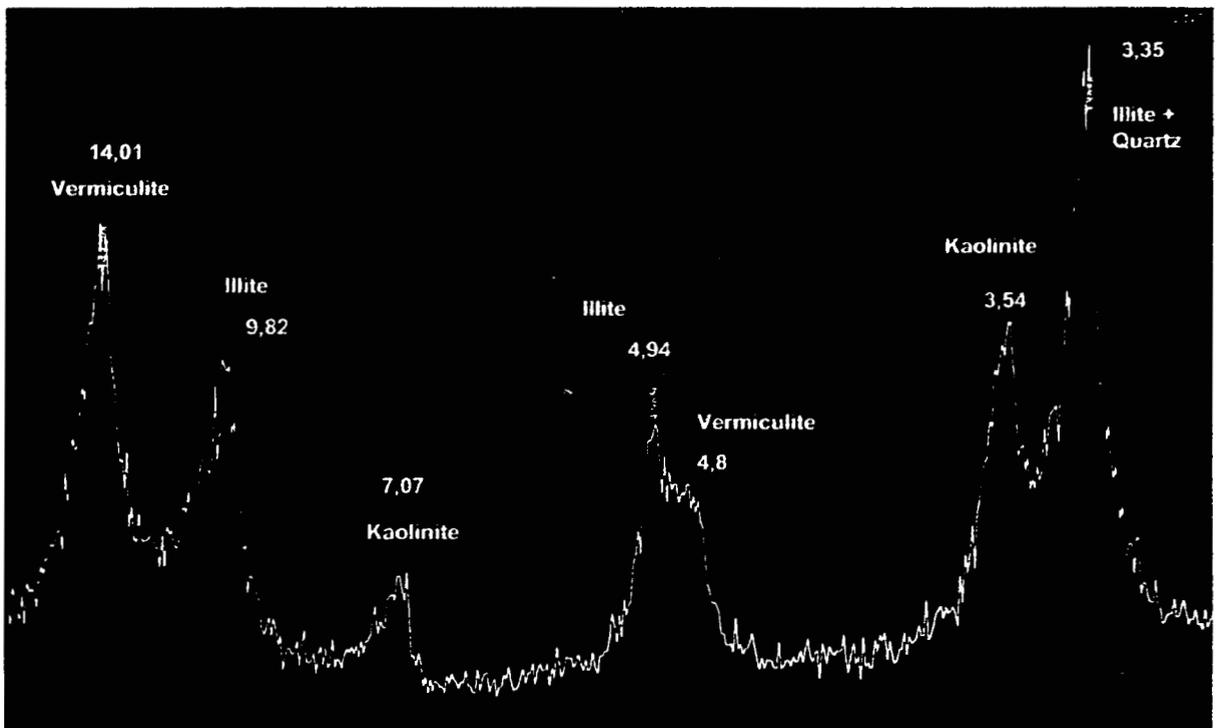


Figure 7 -Échantillon n° 4 -Diffractogramme expérimental.

Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en **A**) sont reportées sur le diagramme.

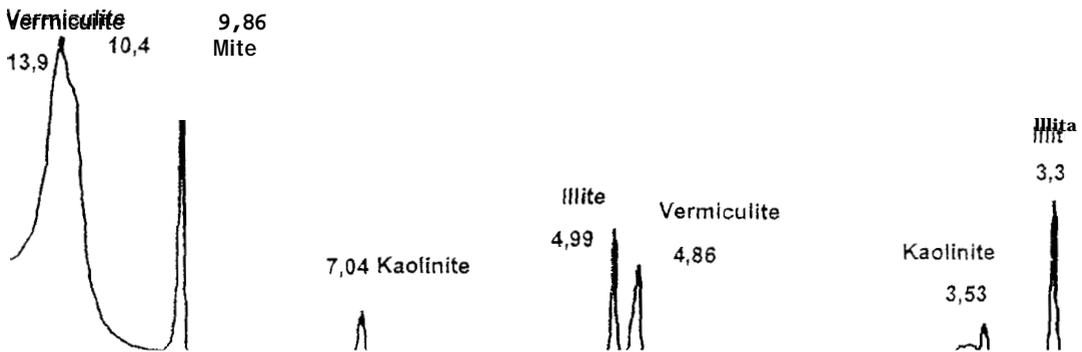


Figure 8 -Échantillon n° 4 -Diffractogramme recalculé.

Les distances réticulaires caractéristiques des minéraux (en **A**) sont reportées sur le diagramme.

d) interprétation

Les trois faciès mis en évidence par la diffraction des rayons X, contiennent tous de l'illite, de la kaolinite et de la vermiculite. Ils se distinguent **par** les proportions relatives de ces différents composés (figure 9 et annexe 2):

- un faciès plutôt caractérisé par la présence de kaolinite plus abondante qu'ailleurs (formations les plus « récentes », du Domérien au Toarcien) ;
- un faciès plutôt caractérisé par la présence d'interstratifié désordonné illite-vermiculite, représentatif des niveaux du Keuper supérieur ;
- un faciès caractérisé **par** de la « vermiculite » et de l'illite, caractéristique du Keuper inférieur et du Muschelkaik.

Ces trois faciès ont une teneur à peu près équivalente en fraction argileuse (entre 40 et 60 %), ne contiennent pas de minéraux dits « gonflants à l'eau », et présentent des quantités de feuillets de vermiculite assez similaires entre elles, entre 20 et 30 % environ dans la fraction argileuse. Bien que le Keuper inférieur soit peut être une formation légèrement plus argileuse en moyenne que les autres, et légèrement plus riche en vermiculite, qui possède une excellente capacité d'échange cationique, on ne peut pas, à ce niveau de détail, considérer qu'il faille regarder l'une ou l'autre de ces formations comme potentiellement inaptes à héberger un centre de stockage de classe II.

Aucune des formations argileuses, non exclues antérieurement, que nous avons échantillonnées et analysées, ne peuvent être considérées comme inaptes, sur la base des critères minéralogiques et granulométriques mis en évidence.

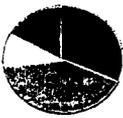
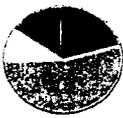
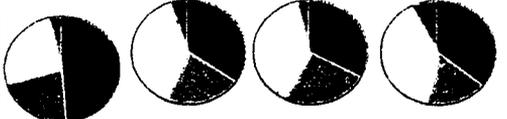
	Non échantillonné	
		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kaolinite ▪ Illite ▪ Illite/Vermiculite
		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kaolinite ▪ Illite ▪ Illite/Vermiculite
		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kaolinite ▪ Illite ▪ Vermiculite
	Non échantillonnées	
	Non échantillonnées	
Marnes irisées du Keuper supérieur		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Illite ▪ Illite/Vermiculite
Marnes irisées du Keuper inférieur		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Illite ▪ Kaolinite ▪ Vermiculite
		Faciès caractérisé par : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Illite ▪ Kaolinite ▪ Vermiculite

Figure 9 – Synthèse des caractéristiques minéralogiques des argiles étudiées dans les différents étages échantillonnés

6. Autres critères Potentiellement très contraignants

Les seuls critères géologiques ne sont pas suffisants pour déterminer si une formation géologique est potentiellement inapte à héberger un centre de stockage de déchets de classe II. D'autres critères doivent également être **pris** en compte, en particulier la présence et la vulnérabilité d'unités aquifères, l'existence de structures tectoniques, les zones inondables.

6.1 PRESENCE D'UNITES AQUIFERES

La présence d'unités aquifères à l'aplomb d'une formation géologiquement potentiellement apte à accueillir un centre de stockage de déchets de classe II, peut être défavorable à la réalisation de ce type de projet.

La présence seule de nappes d'eau souterraine n'est pas en soi un critère suffisant, encore faut-il que ces nappes représentent une ressource d'intérêt et quelles soient vulnérables. Ces deux critères ne sont pas totalement indépendants. La vulnérabilité est liée à la sensibilité de l'aquifère aux conditions externes, fonction de sa capacité (épaisseur et perméabilité), de son gradient et de son débit. Toutes choses égales par ailleurs, une nappe utilisée pour l'alimentation en eau potable est potentiellement plus sensible qu'une nappe utilisée pour un usage industriel. Mais la vulnérabilité d'une nappe est d'abord fonction de la nature du recouvrement (nature des roches, épaisseur) qui la protège des contaminations susceptibles de provenir de la surface.

Ont été représentés sur la carte les contours des périmètres de protection des captages d'eau destinés à l'alimentation humaine (source DDAF88) et les points de prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable (**AEP**) issus de la base nationale SISE-EAUX (**DDASS** 88). En plus des périmètres de protection, la délimitation des gîtes hydrominéraux de Vittel et de Contrexéville (source DRIRE) permet de définir des zones à fortes contraintes pour accueillir une installation de stockage de déchets ménagers ou assimilés, englobant des formations pourtant géologiquement potentiellement adéquates.

Les cours d'eau sont affectés par des crues, aussi la cartographie reprend-elle les zones inondées (inondation déjà observée dans le passé) et les zones inondables (susceptibles d'être inondées d'après les études hydrologiques) issues des travaux coordonnées par la DIREN Lorraine.

Ces deux types de zones, contraignantes pour recevoir un CET, sont en effet susceptibles, en cas d'inondation, d'augmenter le risque d'une pollution des eaux de surface et souterraines.

Ce sont :

- sur la Moselle, les zones inondées en mars 1876, décembre 1947, décembre 1982 et avril 1983 ;
- sur le Madon, les zones inondées en 1983 et 1996 ;
- sur la Meuse amont, les zones inondables.

6.2 RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE SURFACE

Le réseau hydrographique principal de surface est cartographié (source BD Carthage), car la présence de cours d'eau à proximité d'une installation de stockage de déchets de classe II représente un élément défavorable à l'installation d'un centre de stockage. En effet, l'activité d'une telle installation peut représenter un risque direct sur les cours d'eau, par déversement accidentel de lixiviats (débordements, accidents). De plus, les rivières sont généralement accompagnées d'une nappe d'eau souterraine qui sature le sous-sol jusqu'à des profondeurs très faibles (nappe d'accompagnement), qui peut faire office de vecteur de contamination permettant le transfert des polluants de l'amont vers l'aval de la vallée.

6.3 FAILLES ET STRUCTURES TECTONIQUES

Le département des Vosges étant situé en zone de montagne, le sous-sol a pu être affecté par des failles structurantes ou d'accompagnement. Ces failles ont pu apparaître à différents stades de l'histoire tectonique de la région : certaines d'entre elles peuvent encore être considérées comme actives, d'autres, qui correspondent à des rééquilibrages tectoniques, peuvent ne plus jouer.

Dans tous les cas, la présence d'une faille d'une certaine importance, représentée cartographiquement par une structure linéaire, s'accompagne d'une bande de part et d'autre de la faille proprement dite, où les terrains sont affectés par des fissures et des déformations de densité d'autant plus grande que l'on est proche de la faille elle-même. Ont été représentées ici les failles principales reprises de la synthèse des cartes géologiques au 1/50000^{ème}.

La largeur de cette zone perturbée dépend de nombreux paramètres, tels que le type de faille, l'épaisseur des couches concernées, leur nature plus ou moins cassante (on parle de compétence des couches), l'importance de l'épisode tectonique.. El n'existe pas de règle générale permettant de définir la largeur à considérer de part et d'autre de la faille proprement dite. Seule une étude d'impact prenant en compte ces contraintes peut déterminer l'importance réelle de la zone à considérer. Cependant, les nombreuses études effectuées concernant les possibilités de transfert des émanations gazeuses naturelles depuis les profondeurs jusque vers l'atmosphère ont montré qu'il existait des drains préférentiels de dégazage liés à ces structures tectoniques. La géochimie des gaz des sols est précisément un moyen de détection des failles, même sous recouvrement. On peut évaluer raisonnablement, compte tenu de la précision des relevés cartographiques, qu'un secteur de l'ordre de 500 m de part et d'autre du tracé sur carte d'une faille peut être affecté par ce phénomène et doit donc être analysé afin de connaître les secteurs rendus inaptes, car trop perméables (Cf. par exemple Baubron et al, *in press.*²).

Le risque potentiel par rapport à la stabilité tectonique des terrains d'implantation d'une installation classée est en principe pris en compte dans l'étude d'impact préalable. Les contraintes de construction sont définies par la réglementation sur les installations classées.

6.4 ZONES D'INTERET

Enfin, doivent être considérées comme zones potentiellement contraignantes, les zones d'intérêt divers : ZNIEFF (zones naturelles d'intérêt environnemental, faunistique et floristique), les RBD (réserves biologiques domaniales), réserves naturelles, et les zones définies par des contraintes urbanistiques, ou d'utilisation des sols (source DIREN-Lorraine).

La cartographie remise à ce stade de l'étude inclut les RBD. Elle pourra être complétée par les autres types de contraintes, lorsque celles-ci auront été définies pour le département des Vosges.

² J-C. Baubron, A. Rigo, J-P. Toutain. 2002. Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas : the Jaut pass example (Pyrenees, France). *Earth and Planetary Science Letters, in press.*

Conclusion

L'étude entreprise à la demande de la Préfecture des Vosges, en vue de cartographier les zones très contraignantes pour héberger un centre de stockage de déchets ménagers et assimilés, prévu dans le Plan Départemental des Vosges des Déchets Ménagers et Assimilés (**AP** du 18/11/1996), a permis d'éliminer les zones a priori géologiquement défavorables : terrains cristallins ou carbonatés massifs, zones alluvionnaires, zones gréseuses.

Parmi les zones dont le potentiel géologique ne permet pas de considérer qu'elles ne sont pas aptes à l'installation d'un centre de stockage de déchets de classe II, des critères tectoniques (failles), environnementaux (zones d'intérêts) ou de sensibilité (présence et usage de nappes d'eau souterraines, réseau hydrographique de surface), peuvent être superposés, afin de tenir compte de contraintes supplémentaires.

Les autres surfaces, c'est à dire les formations argileuses de plus de 10 m d'épaisseur selon la synthèse géologique effectuée, ne représentent pas pour autant automatiquement des zones aptes à recevoir un centre de stockage. Il s'agit de zones pour lesquelles aucun des critères d'exclusion définis et utilisés ne s'applique. Seule, une étude d'impact détaillée, spécifique au lieu envisagé, permettra de confirmer l'aptitude d'un site à héberger un centre de stockage de déchets.

D'après les données minéralogiques obtenues sur les formations argileuses échantillonnées, il semble peu probable qu'elles atteignent naturellement les critères de perméabilité imposés par la réglementation en vigueur pour le premier mètre de la barrière naturelle passive. Il est fort probable qu'une étude détaillée du site sélectionné indique la nécessité de procéder à des ajouts de matériaux bentonitiques pour atteindre la qualité voulue. Cela ne représente cependant pas un inconvénient majeur, la réglementation n'imposant pas que cette couche fût en place avec les propriétés requises. De telles formations seraient d'ailleurs difficiles à trouver.

Par contre, la qualité minéralogique et granulométrique des formations non éliminées semble adaptée pour obtenir naturellement une perméabilité de 10^{-6} m/s, requise par la réglementation. Mais ceci ne repose, à ce stade, que sur l'expérience de terrain appuyée par quelques analyses minéralogiques, et non pas sur des mesures physiques, qui, seules, permettent de vérifier la bonne adéquation du site choisi au projet à réaliser.

L'étude présentée ici a été réalisée dans le but de produire un document cartographique d'orientation (carte en annexe à l'échelle du 1/125000ème), synthétisant plusieurs critères jugés par le Comité de Pilotage comme contraignants pour la réalisation d'un projet de centre de stockage de classe II.

Cette étude ne constitue pas une étude de faisabilité. Certains des critères retenus sont, ou peuvent être considérés, comme des critères définitifs : installation en zone inondable, dans ou à proximité de périmètres de protection de captages d'eau potables, zones de perméabilité notablement élevée (grès, massifs fissurés...). D'autres critères ont été retenus, mais peuvent faire l'objet de compensations prévues par la réglementation, en particulier en ce qui concerne certaines zones d'intérêt.

Enfin, dans cette phase d'étude, aucun critère lié à l'urbanisme ou à l'utilisation du sol ou de l'espace n'a été pris en compte. Ceci fait l'objet d'une deuxième phase d'étude.