

CENTRE D'INFORMATIQUE GÉOLOGIQUE

MINES DE POTASSE D'ALSACE

Etude de sûreté d'un projet
de stockage de déchets toxiques
dans la mine Amélie

Approche des problèmes liés
à l'hydrogéologie

P. COMBES, E. LEDOUX

LHM/RD/90/60

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DES MINES DE PARIS**

ARMINES

**CENTRE D'INFORMATIQUE GEOLOGIQUE
LABORATOIRE D'HYDROGEOLOGIE
MATHEMATIQUE**

MINES DE POTASSE D'ALSACE

**Etude de sûreté d'un projet
de stockage de déchets toxiques
dans la mine Amélie**

**Approche des problèmes liés
à l'hydrogéologie**

P. COMBES, E. LEDOUX

LHM/RD/90/60

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE	3
I - CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL	4
II - STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE DES TERRAINS	5
II.1 - Les formations du substratum	5
II.2 - Le remplissage tertiaire	6
III - TECTONIQUE	11
IV - LE DIAPIRISME	13
V - CONCLUSION	14
DEUXIEME PARTIE : ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA MINE	17
I - LES AQUIFERES DU SECONDAIRE	17
II - LES HORIZONS PERMEABLES DU TERTIAIRE	18
III - L'AQUIFERE ALLUVIAL	22
IV - CONCLUSION	22
TROISIEME PARTIE : ANALYSE DES RISQUES POTENTIELS D'ENVAHISSEMENT PAR L'EAU DES CAVITES DE STOCKAGE	23
I - LE BLOC HOTE	24
I.1 - Morphologie générale	24
I.2 - Les perturbations internes du bloc-hôte et ses limites	26
I.3 - Les relations du bloc-hôte avec le milieu extérieur	27
I.4 - Le bloc-hôte et le site de stockage	27
II - ENVAHISSEMENT DE LA CAVITE DE STOCKAGE PAR LES EAUX : SCENARIO DE REFERENCE	28
II.1 - Les risques à court terme	28
II.2 - Les risques à long terme	29
III - DISCUSSION DU SCENARIO DE REFERENCE	32
III.1 - Les relations avec la mine Marie-Louise	32
III.2 - Discussion des hypothèses	34
IV - ANALYSE DES RISQUES VIS A VIS DE L'EAU SOUTERRAINE	36
IV.1 - Mécanismes de pollution des aquifères superficiels	36
IV.2 - Conséquences de la pollution des aquifères : scénario puits	37
CONCLUSION GENERALE	38

INTRODUCTION

Les mines de Potasse d'Alsace S.A. (MDPA) étudient un projet de stockage de déchets industriels toxiques, non radioactifs, dans les formations salines profondes du bassin potassique alsacien. Le site de stockage envisagé aurait une capacité de 320000 tonnes et serait aménagé à partir de l'ancienne mine Joseph-Else.

Cette technique de stockage est mise en œuvre depuis près de 20 ans par le producteur de potasse Ouest allemand KALI UND SALZ A.G., qui, avec l'accord des autorités fédérales stocke des déchets toxiques solides dans l'ancien secteur de Herfa-Neurode partie intégrante de la mine en activité de Wintershall. A l'heure actuelle la quantité totale stockée doit être voisine de 800000 tonnes pour un dépôt annuel de près de 100000 t/an ces dernières années.

Le but de l'élimination des déchets est d'assurer l'inocuité vis-à-vis de l'environnement de substances nocives de différentes natures. Cette fonction pourrait être envisagée de deux manières bien distinctes :

- une approche par dilution qui consisterait à utiliser le vecteur le plus approprié pour introduire les déchets dans l'environnement à des concentrations inoffensives ;
- une approche confinement qui consiste à isoler les déchets de la biosphère et minimiser sinon exclure tout relargage vers l'environnement.

L'approche confinement qui aboutit au stockage sous des formes variées trouve un intérêt particulier lorsque la nocivité se dégrade au cours du temps. C'est par exemple le cas pour les déchets radioactifs de faible activité qui sont accumulés dans des sites de surface qui pourront être banalisés après une période de surveillance de 300 ans.

Par contre, pour certains déchets radioactifs de haute activité et pour les déchets chimiques, la toxicité n'évolue que peu ou pas du tout avec le temps ; le confinement doit donc être théoriquement définitif ou en tout cas pouvoir être garanti sur une très longue période.

Dans la mesure où il ne paraît pas possible de démontrer que le confinement sera absolu pendant un laps de temps indéterminé, le concept de sûreté repose classiquement sur la notion de barrières interposées en série entre les déchets et l'environnement, dont l'effet cumulatif doit conduire à une très faible probabilité de relargage et en tout cas à des flux acceptables, même en cas de défaillance d'une des barrières.

Les différentes barrières envisageables sont les suivantes :

- Conditionnement des déchets : dans le cas qui nous occupe et dans la mesure où seuls des déchets solides seront stockés, il n'est pas prévu de conditionnement particulier autre que celui nécessaire à la manutention des colis. Les fûts métalliques ne constitueront pas une protection durable et l'on considèrera, qu'à long terme, l'effet de la barrière due au conditionnement est inexistant.

- Matériaux de remplissage interposés entre les conteneurs et la formation géologique réceptrice : ce type de barrière ouvragée réalisée par exemple en matériaux argileux peut constituer une protection hydraulique et géochimique en cas d'intrusion d'eau. En mine de sel, cette barrière perd de son intérêt dans la mesure où par suite de la plasticité du sel, les cavités sont susceptibles de se refermer à terme et de venir emprisonner les déchets. Elle n'est donc pas envisagée par le concept de stockage MDP.
- Barrière géologique : elle est constituée par la formation géologique et par les aménagements qui y sont pratiqués pour réaliser les stockages qui, selon leur nature, doivent imposer une barrière hydraulique et géochimique au transfert des polluants. Le milieu salifère est a priori très favorable car la présence même de sel est une preuve d'un très bas niveau de circulation de l'eau souterraine qui constitue le vecteur essentiel des polluants sur une longue période. Cependant, la solubilité très grande de cette roche peut rapidement remettre en cause cet avantage. L'étude hydrogéologique aura donc pour objet essentiel de discuter le rôle confinant de cette barrière géologique et son évolution au cours du temps.
- Barrière constituée par l'environnement lui-même : en cas de défaillance des précédentes barrières et notamment de la barrière géologique, un flux d'eau souterraine chargé de substances toxiques dissoutes serait susceptible d'atteindre l'environnement. Avant de parvenir éventuellement jusqu'à l'homme, les polluants subiront vraisemblablement une dilution par les eaux souterraines et superficielles et pourront être ramenés dans certains cas à des concentrations inoffensives. Cet effet de barrière dépend à la fois des propriétés des substances polluantes mais aussi de celles du milieu aquifère récepteur.

L'étude qui va suivre s'intéresse essentiellement au rôle de la barrière géologique considérée dans le contexte régional.

Les documents utilisés pour notre travail proviennent essentiellement :

- des archives de MDP SA,
- des travaux de C. Sittler (Mémoires du Service de la Carte Géologique d'Alsace et de Lorraine n°24, 392p, Strasbourg 1965),
- des travaux de C. Courtot, E. Gannat, E. Wendling du Service Géologique des Mines de Potasse d'Alsace S.A. Mulhouse. (Le bassin potassique de Mulhouse et ses environs. Etude du tertiaire. Sci. Géol., Bull, 25, 2-3, p.69-91 Strasbourg 1972),
- de la synthèse géothermique du Fossé rhénan supérieur (Commission of the European Communities - DGRST - 1979).

Le présent rapport comporte trois parties. Les deux premières sont consacrées à la description de l'environnement géologique et hydrogéologique du site envisagé. La troisième analyse les risques potentiels d'invasion par l'eau des cavités de stockage à court et à long terme et tente d'approcher l'état final du système après son abandon.

PREMIERE PARTIE
ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE

I - CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL

Le bassin potassique de Mulhouse qui est l'objet de nos réflexions est situé dans la plaine du Rhin qui correspond du point de vue structural au fossé rhénan. Ce fossé d'effondrement d'âge tertiaire de direction NNE-SSW est long de 300 km et large de 35 km. La plaine, située sur l'axe principal du rift, est limitée de part et d'autre par une série de failles de direction rhénane qui se relaient ou se dédoublent (tracé en baïonnette). Elle est bordée par les collines sous-vosgiennes et les massifs des Vosges et de la Forêt Noire (figure 1).

L'histoire tectonique et sédimentaire du fossé est longue et complexe. Elle débute à l'orogénèse Hercynienne qui conditionne le modelé du socle rhénan et l'orientation générale du fossé puisque des failles d'orientation rhénane (NNE-SSW) sont déjà fréquentes. A l'ère secondaire la sédimentation atteint 1500 m d'épaisseur environ et concerne la totalité du bloc rhénan. A la fin du Jurassique l'émersion du massif Vosges-Forêt Noire est totale et se poursuit au Crétacé. A la fin du Crétacé les mouvements prémonitoires alpins plissent la couverture secondaire selon une direction WSW-ENE.

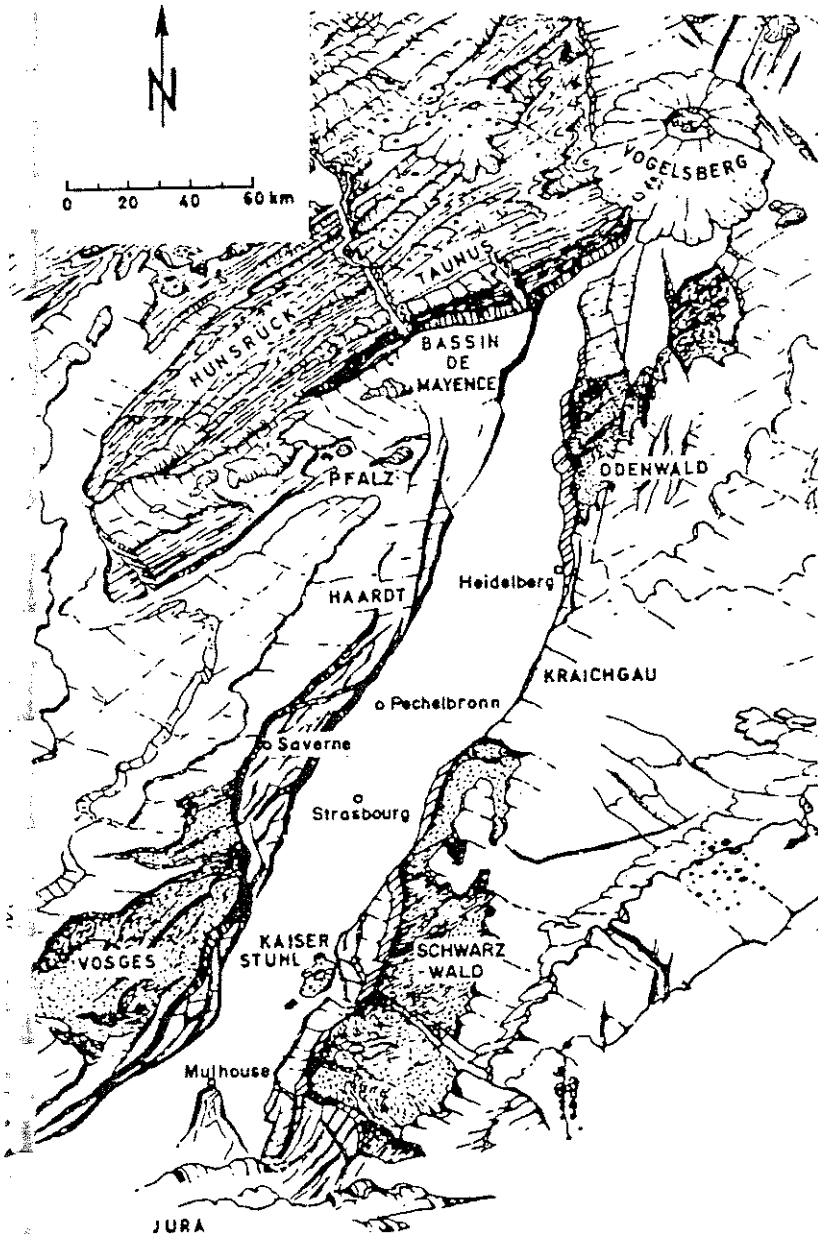
L'affaissement du fossé débute à l'Eocène, il atteint son paroxysme à l'Oligocène et se poursuit encore actuellement, l'effondrement maximum est voisin de 5000 m.

En bordure du fossé l'effondrement est due à des failles normales de direction rhénane (NNE) et varisque (NE) dont le pendage est supérieur à 60° . Elles traduisent une phase d'extension de direction E-W. Dans le centre du graben des failles antithétiques ont pris naissance pour assurer la continuité du milieu. La distension E-W est estimée à 4-5 km.

Cet affaissement a permis l'invasion marine, d'abord à partir du domaine alpin au Sud puis par le Nord du fossé. Les dépôts Tertiaires sont très développés et atteignent 1600 m d'épaisseur. C'est dans cette série que l'on rencontre les horizons salifères et potassiques découverts en 1904 et exploités depuis par les MDP.

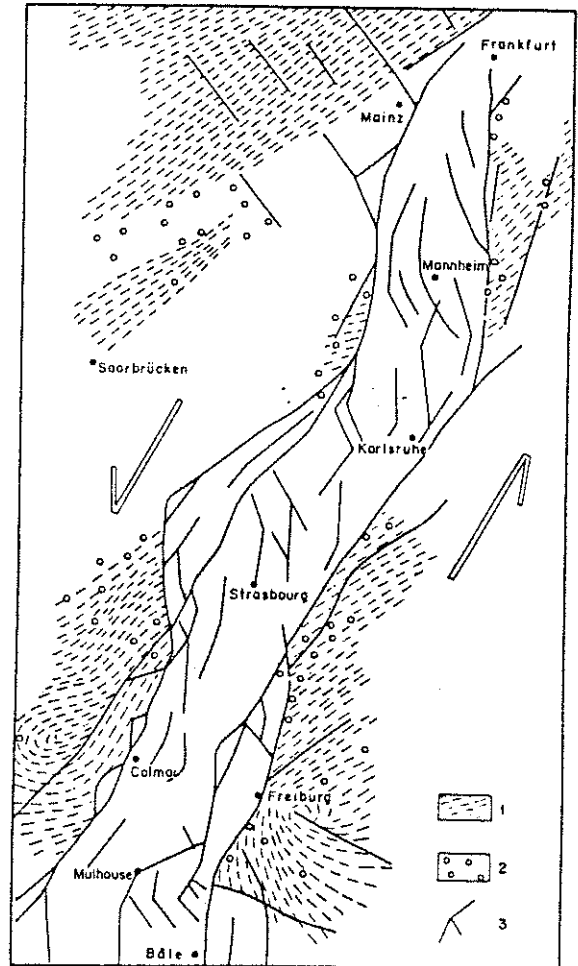
L'extension très importante de ce fossé introduit une histoire géologique et des conditions lithologiques assez différentes selon le secteur considéré. En raison de l'objectif de cette étude nous limiterons notre description au bassin potassique dans lequel se situe le site du stockage.

Figure 1 : Situation structurale du fossé au
Milieu du bloc Rhénan



(D'après H. Closs)

Les massifs anciens apparaissent
en foncé

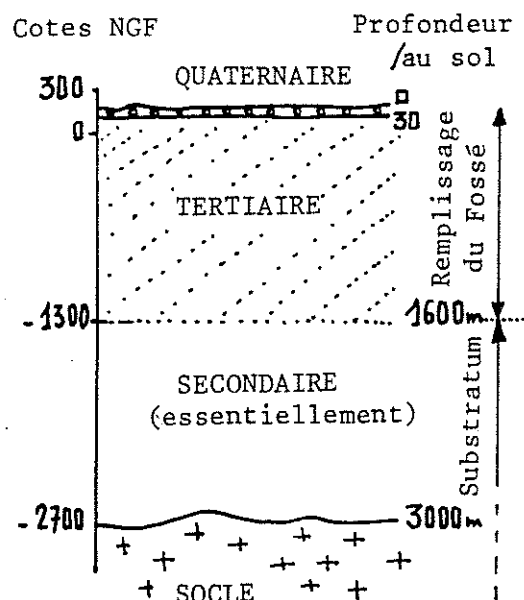


(D'après C. Sittler)

- 1 - Socle Hercynien
- 2 - Volcanisme Permien
- 3 - Réseau de failles

II - STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE DES TERRAINS

La coupe présentée sur la figure 2 présente la structure des terrains dans le bassin potassique de Mulhouse, et permet d'en dégager les épaisseurs moyennes.



Nous allons maintenant décrire la lithologie des terrains en détaillant particulièrement le remplissage tertiaire qui constitue l'environnement immédiat du site de stockage.

II.1 - Les formations du substratum

Dans le bassin de Mulhouse le substratum est constitué d'un socle granitique et de roches sédimentaires secondaires. Les terrains primaires sont probablement peu représentés voire absents dans cette région.

Cette série secondaire de 1300 m d'épaisseur environ est continue dans cette partie du fossé depuis le Trias jusqu'au Jurassique supérieur. Considérant le but hydrogéologique de cette étude, nous retiendrons au sein de cet ensemble essentiellement marneux quatre niveaux lithologiques particuliers. Il s'agit de haut en bas des horizons suivants :

- calcaires du Malm,
- calcaires de la grande Oolithe (Dogger),
- calcaires et dolomies du Muschelkalk,
- des grès du Buntsandstein.

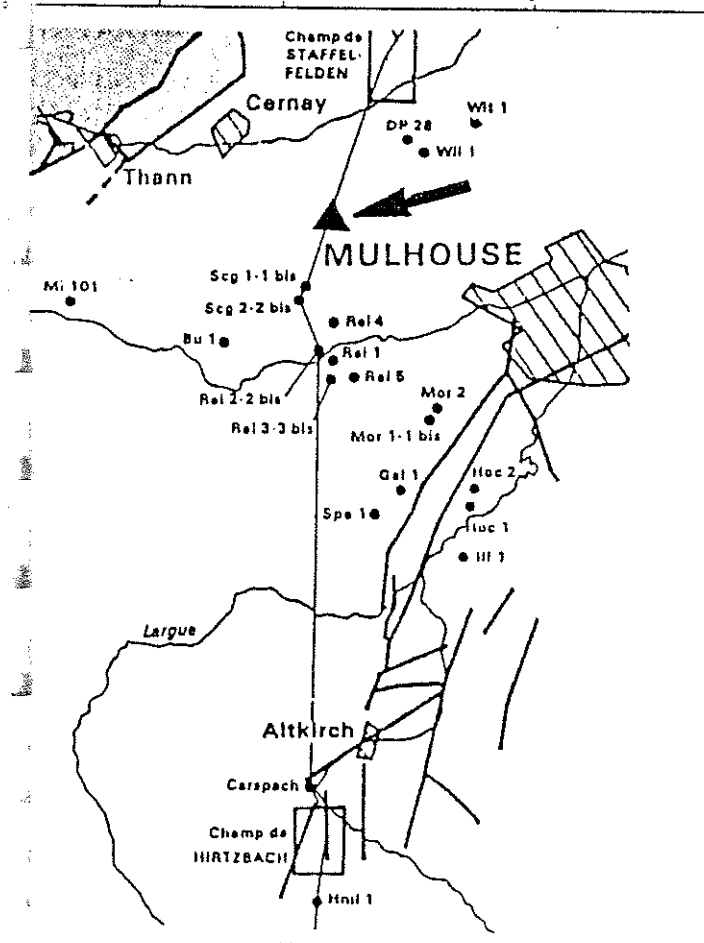
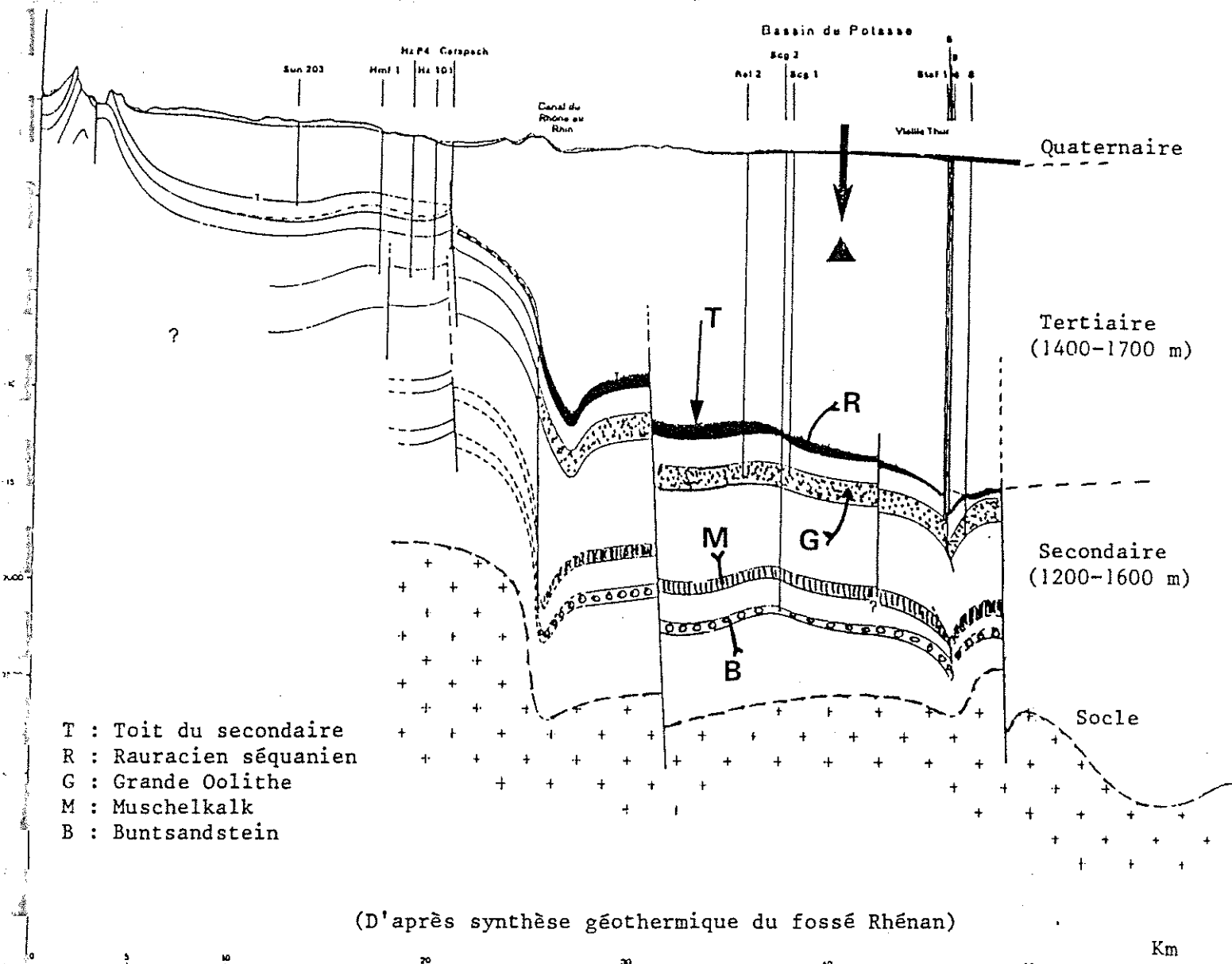


Figure 2 : Coupe générale des terrains dans la région de Mulhouse

Les calcaires du Malm

Ces terrains n'existent que dans la région de Mulhouse, ailleurs ils ont été érodés. Ils sont constitués par des calcaires blancs ou gris, sublithographiques du Séquanien et par le Rauracien qui présente un faciès corallien ou crayeux. Dans le bassin de Mulhouse le toit de ces terrains est situé entre 1500 m et 1600 m de profondeur (voir la carte de la figure 3). L'épaisseur de l'ensemble est inférieure à 100 m.

La grande Oolithe

Elle est constituée par des terrains d'âge Bajocien-Bathonien qui sont présents dans tout le fossé sauf dans l'extrême Nord. Dans la région de Mulhouse la "Grande Oolithe" est un calcaire massif en épais bancs d'oolithes petits à moyens situé à près de 2000 m de profondeur (voir la figure 4), son épaisseur est de l'ordre de 150 m.

Les calcaires et dolomies du Muschelkalk

Ils sont présents dans tout le fossé à une profondeur voisine de 2200 m dans la région de Mulhouse, leur épaisseur est d'une centaine de mètres.

Les grès du Buntsandstein

Situés à 2400 m de profondeur, ces grès détritiques perméables auraient moins de cent mètres d'épaisseur.

II.2 - Le remplissage tertiaire

Les mouvements prémonitoires de l'orogénèse alpine de la fin du Crétacé ont plissé le substratum secondaire selon des plis orientés WSW-ENE. Ces reliefs ne sont que partiellement érodés lors des premiers dépôts du tertiaire qui vont ainsi se déposer dans des bassins plus ou moins indépendants dont l'individualité va s'affirmer au cours de l'affaissement et va accroître la diversité du remplissage sédimentaire. Dans notre description de ce remplissage nous nous limiterons à la partie du bassin potassique située au Nord-Ouest de Mulhouse. C'est dans ce secteur du fossé que le tertiaire est le plus développé. La base de cette série se situe à environ 1600 m de profondeur sous le sol (voir la figure 7) sauf dans le secteur du horst de Mulhouse où elle n'est que de 2 à 300 m seulement.

L'Eocène

Ces formations sont discordantes sur le substratum Jurassique que nous avons décrit. Leur toit est constitué par les marnes vertes à Limnées de l'Oligocène. Leur puissance est très variable, 5 m à Colmar, une centaine de mètres à Staffelfelden. Le faciès est marno-conglomératique brun-rouge à violet, riche en pisolithes ferrugineux et en rognons d'anhydrite. Dans ces dépôts sidérolithiques s'intercale parfois un horizon de calcaire lacustre à Planorbes. Dans la zone de Reiningue, à l'Ouest de Mulhouse, on note de rapides variations de faciès.

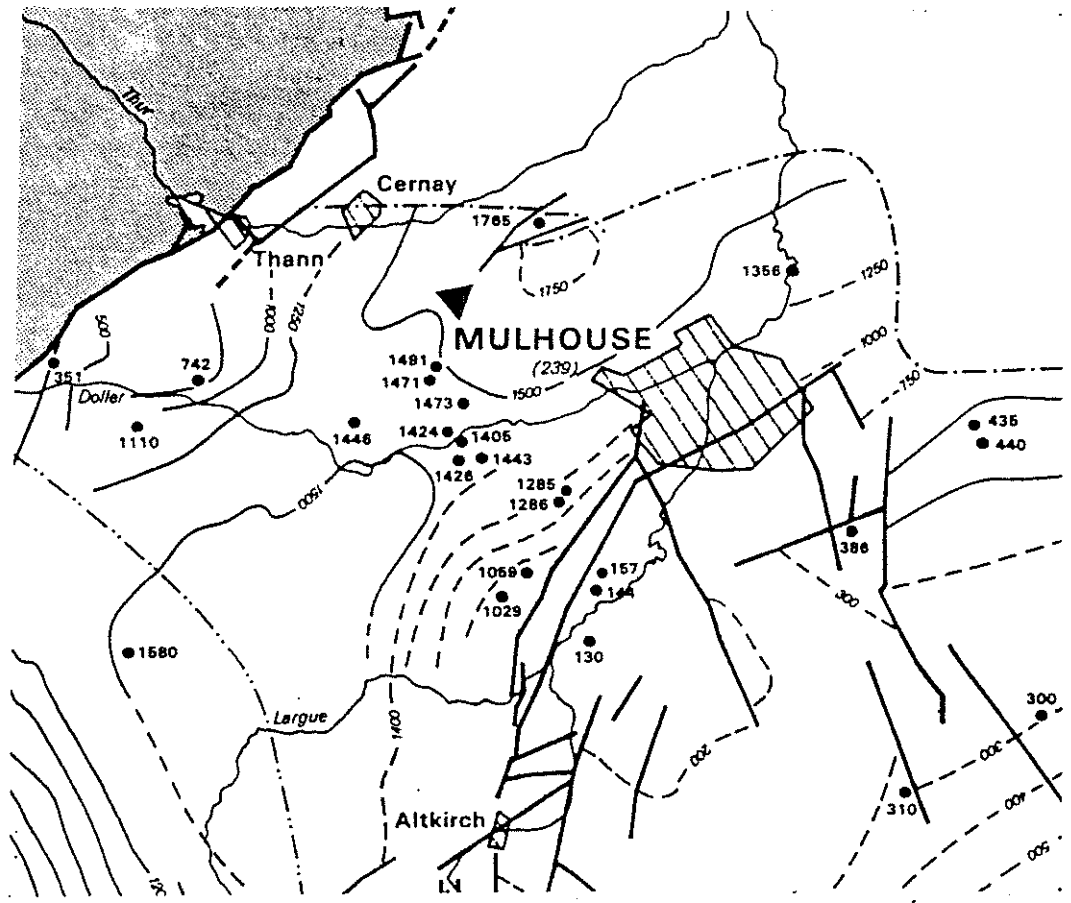


Figure 3 : Profondeur au toit du Séquanien-Rauracien (Malm)

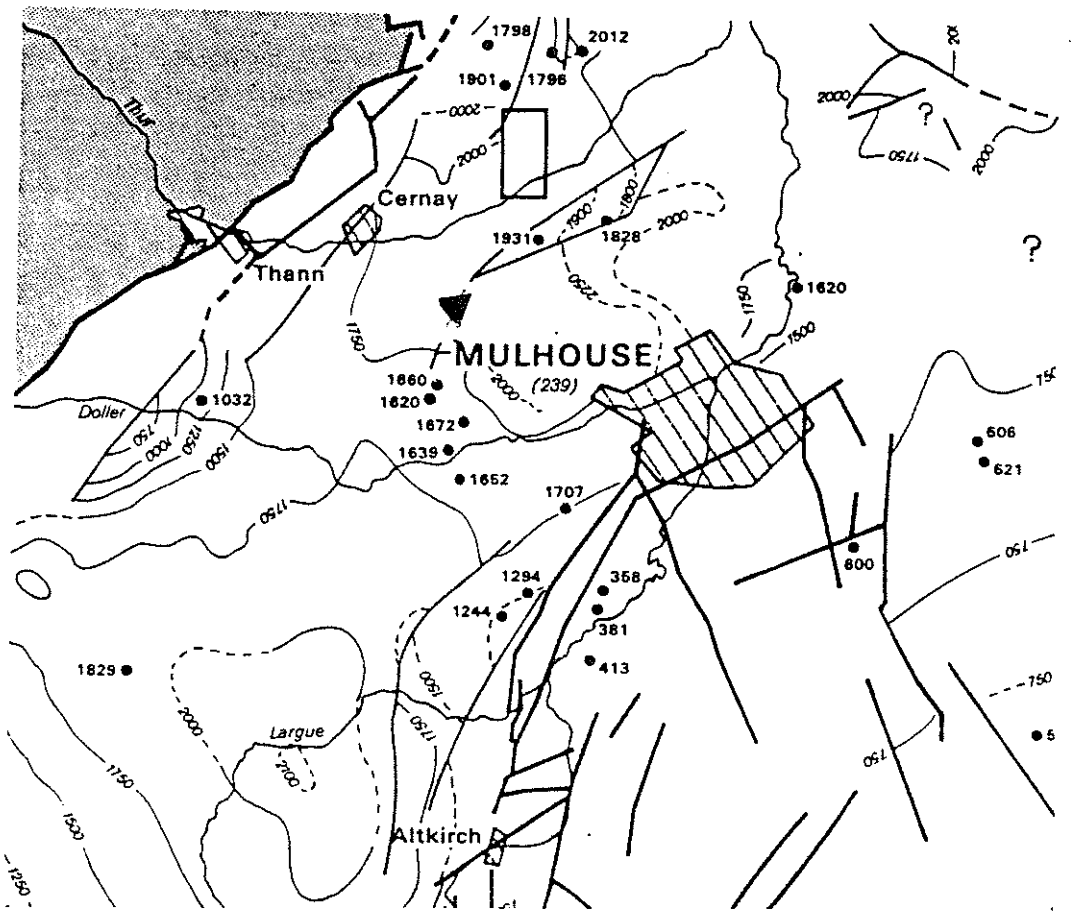


Figure 4 : Profondeur au toit de la grande oolithe (Dogger)
 (Extrait de la synthèse géothermique du fossé Rhénan)

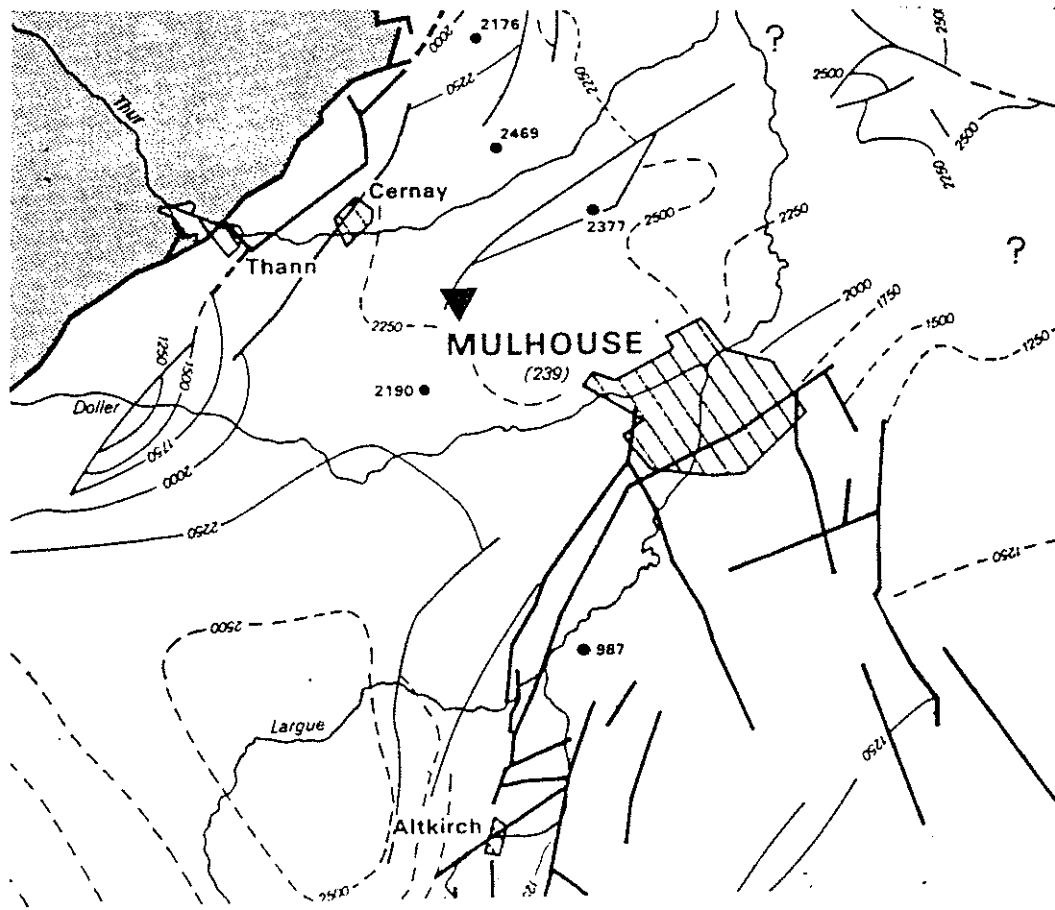


Figure 5 : Profondeur au toit du Muschelkalk

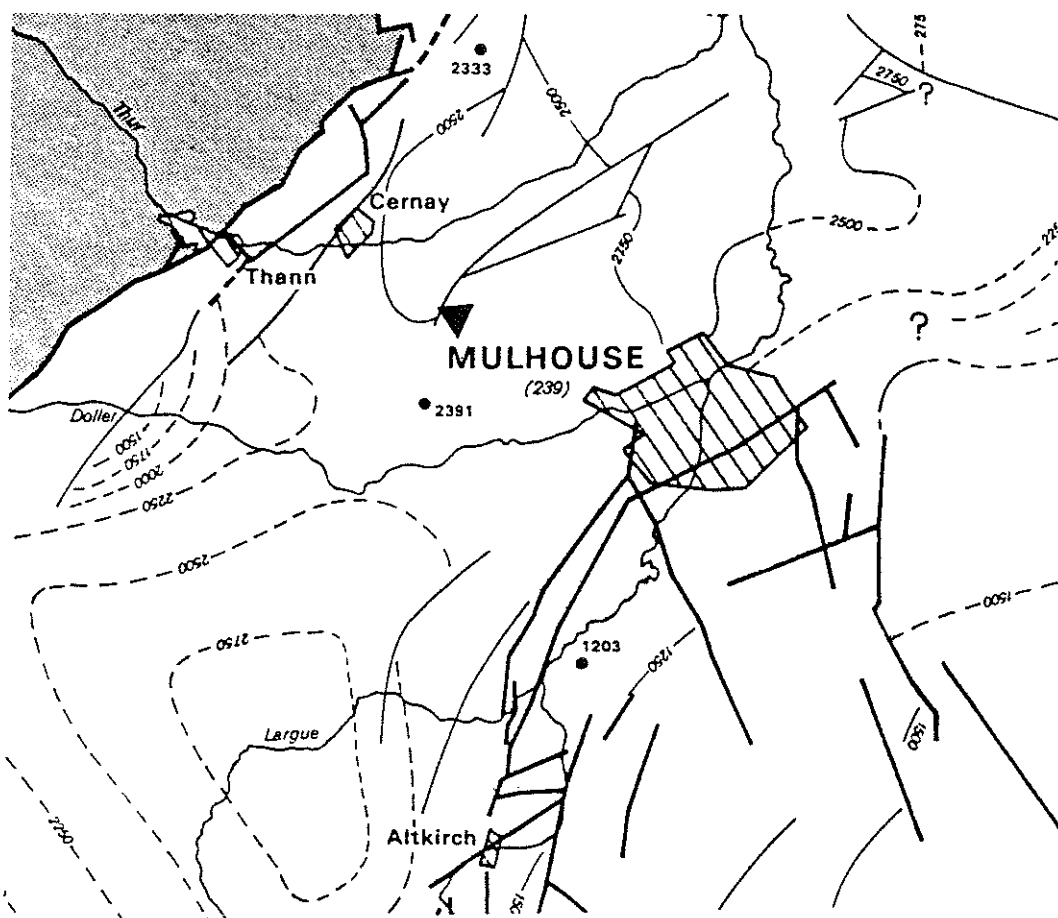


Figure 6 : Profondeur au toit du Buntsandstein
(Extrait de la synthèse géothermique du fossé Rhénan)

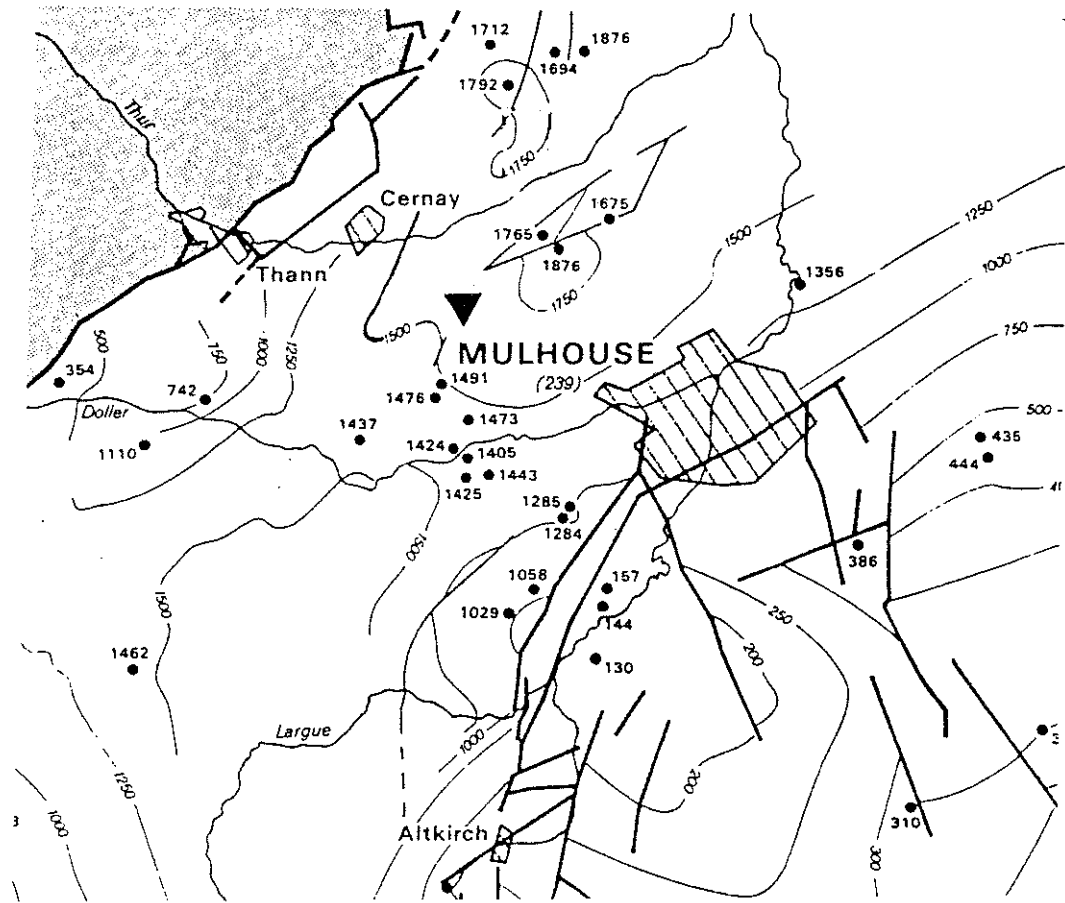
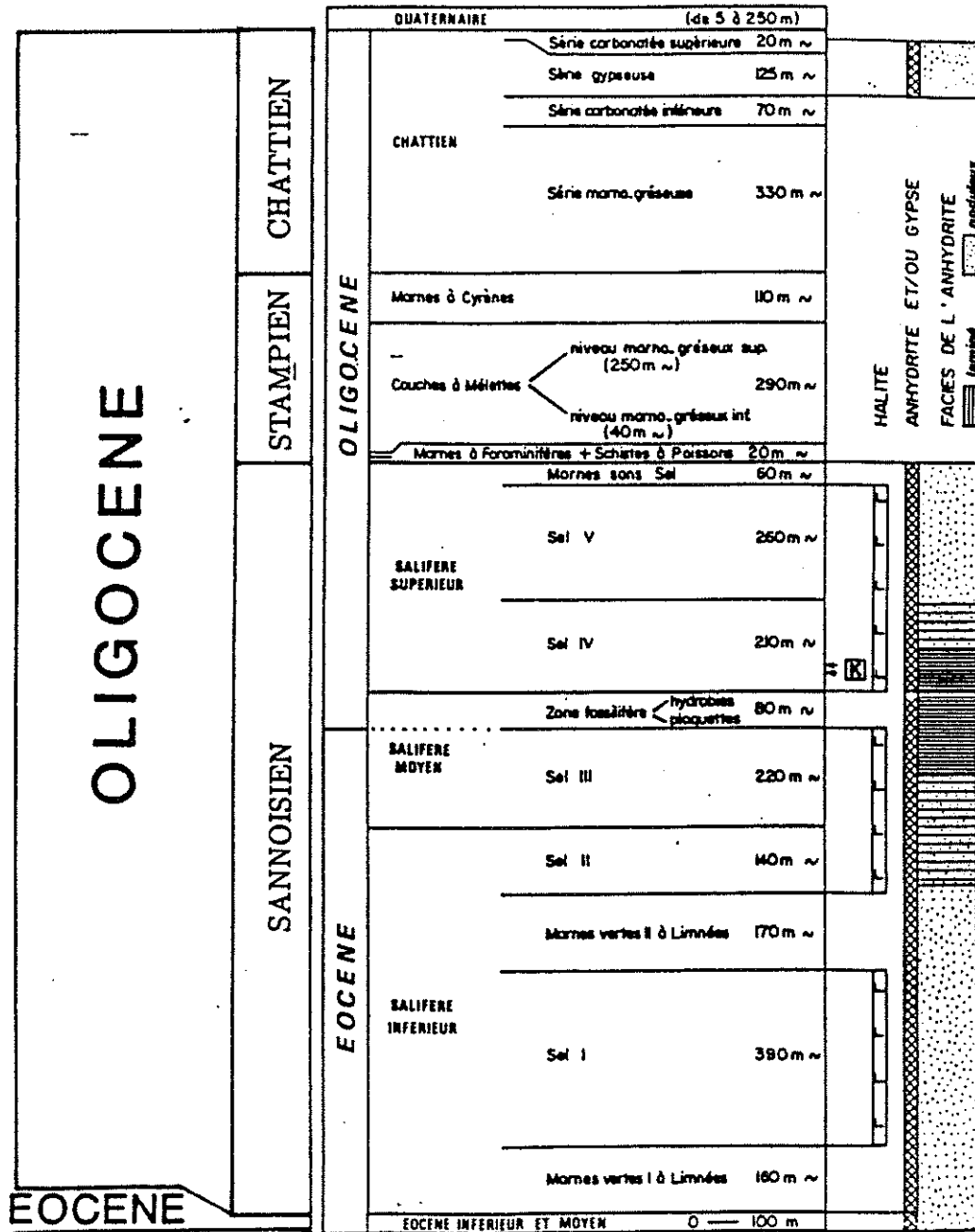


Figure 7 : Profondeur de la base du tertiaire
(D'après synthèse géothermique du fossé Rhénan)

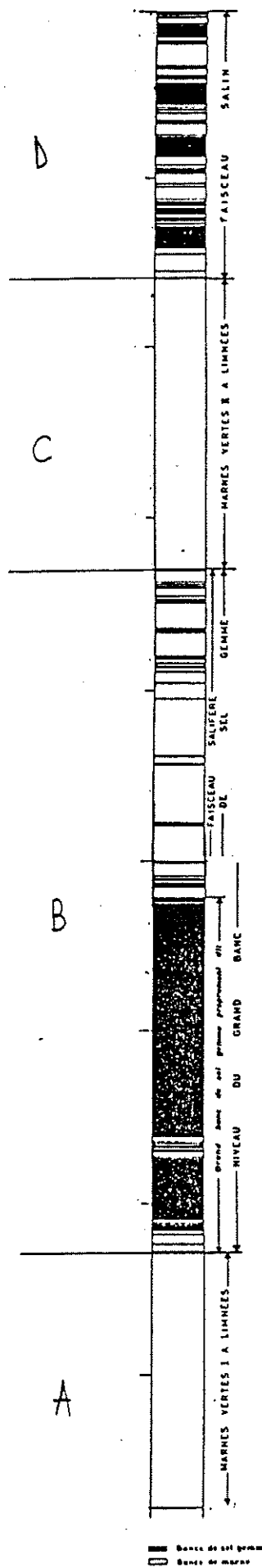
L'Oligocène

Il constitue l'essentiel du remplissage tertiaire du bassin de Mulhouse et renferme les horizons potassiques exploités depuis 1904 par les MDPA. C'est au sein de cette série que se trouve le site de stockage envisagé. Dans ce rapport nous avons adopté l'échelle chronostratigraphique en usage aux MDPA qui fixe la limite Eocène-Oligocène à l'apparition des marnes vertes à limnées situées au mur de la zone salifère inférieure. Des travaux récents placent cependant cette limite au sein de la zone salifère moyenne. Le tableau ci-dessous présente la correspondance entre ces deux interprétations ainsi que la succession des horizons dont nous allons décrire en détail la lithologie en commençant par la base.



COURTOT-GANAT
MDPA (1972)

BLANC-VALLERON et GANAT (1985)



Sannoisien : Zone salifère inférieure

Cette zone salifère inférieure est découpée en quatre unités principales dénommées A, B, C et D sur la figure ci-jointe. Ces unités peuvent être ainsi décrites :

Unité A : C'est une série constituée de marnes grises à vertes à Limnées contenant de l'anhydrite en rognons. Elle ne renferme pas de couches de sel gemme. La puissance est de 150 m pour tout le bassin de Mulhouse.

Unité B : Elle est appelée "niveau du grand banc de sel gemme". A la base on rencontre un puissant horizon de sel gemme de 200 m d'épaisseur au maximum. On trouve au-dessus 190 m de formation constituée par une alternance de marnes vertes et de couches de sel gemme peu développées.

Unité C : D'une puissance de 170 m cette série est identique à l'unité A, marnes vertes à Limnées avec anhydrite en rognons sans couches de sel gemme.

Unité D : Il s'agit d'un faisceau salin formé d'une superposition de marnes vertes moins franches devenant beiges à grises et de couches de sel gemme. L'épaisseur de ce faisceau est de 150 m.

Epaisseur totale : 700 à 900 m

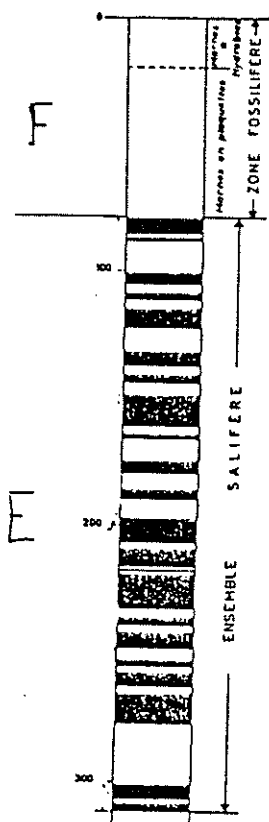
Epaisseur de sel cumulée : 250 m dont un banc de 100 à 200 m d'épaisseur et 57 autres bancs bien individualisés.

Sannoisien : Zone salifère moyenne

L'épaisseur de cette zone salifère moyenne est voisine de 300 m, deux unités sont classiquement distinguées :

Unité E : Dénommée "ensemble salifère" elle est constituée d'une alternance de marnes bitumineuses rayées de lits dolomitiques et de bancs de sel gemme. L'anhydrite se présente en couches sur toute la hauteur de cette série mais également en rognons dans la moitié inférieure.

Unité F ou zone fossilifère épaisse de 80 m : A la base on rencontre des marnes en plaquettes grises brunâtres contenant des filets et couches d'anhydrite. La faune est riche en Ostracodes et Gammaridés. Au-dessus se trouve un horizon de 20 m d'épaisseur riche en gastéropodes (Hydrobia) d'où le nom de cet horizon.



Epaisseur totale 300 m

Epaisseur de sel cumulée 80 m

22 bancs de sel individualisés

Sannoisien : Zone salifère supérieure

C'est dans cette zone que l'on rencontre les deux niveaux potassique exploités et le futur site de stockage. On distingue 3 Unités :

Unité G : ou complexe salin : Il peut être divisé en deux parties.

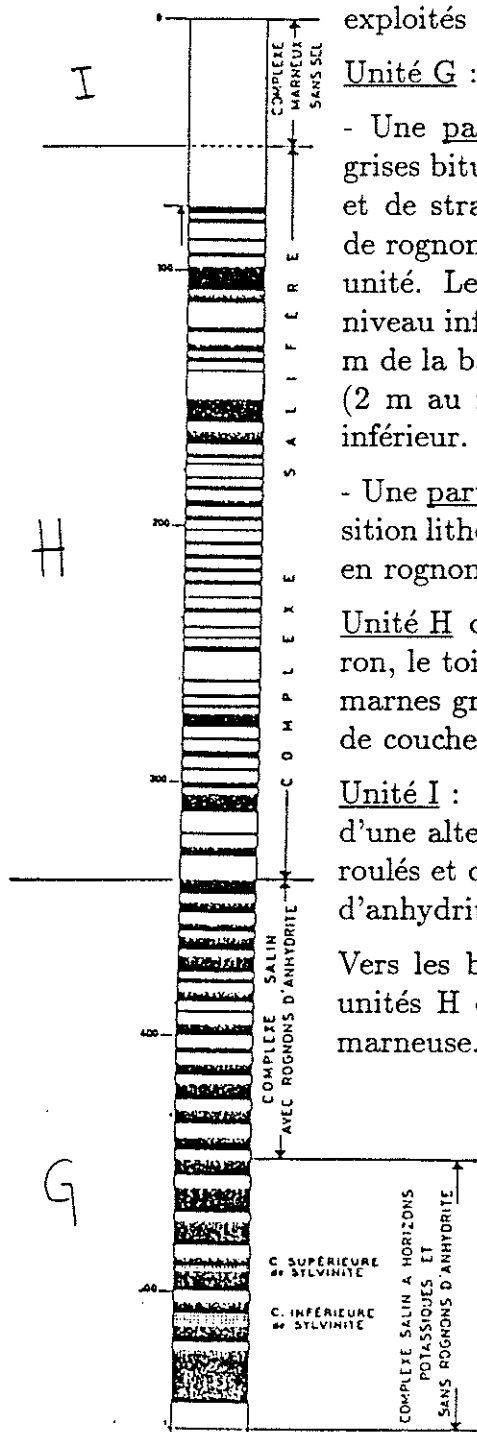
- Une partie inférieure de 100 m d'épaisseur constituée de marnes grises bitumineuses, d'horizons potassiques, de couches de sel gemme, et de strates d'anhydrite souvent dolomitiques. On ne trouve pas de rognons d'anhydrite contrairement à la partie supérieure de cette unité. Le gisement de potasse est constitué par deux niveaux. Un niveau inférieur de 6 m de puissance maximale dont le mur est à 40 m de la base de cette zone salifère. Un niveau supérieur moins épais (2 m au maximum) situé à 20-25 m au-dessus du mur du niveau inférieur.

- Une partie supérieure de 100 m d'épaisseur également et de composition lithologique identique si ce n'est que l'on rencontre de l'anhydrite en rognons et qu'il n'y a pas de niveaux potassiques.

Unité H ou complexe salifère : son épaisseur est de 300 m environ, le toit est déterminé par diagraphie. Ce complexe est formé de marnes grises, vertes, et brun-rouge, d'anhydrite en gros rognons et de couches de sel gemme.

Unité I : Complexe marneux sans sel de 50 m d'épaisseur constitué d'une alternance régulière de marnes brun-rouge à grains de quartz roulés et de marnes gris-bleu à vertes à filets ou rognons de gypse ou d'anhydrite, cette dernière étant toujours sous-jacente au gypse.

Vers les bordures Sud et Ouest du bassin de Mulhouse le sel des unités H et G disparaît peu à peu et la série devient entièrement marneuse.



Epaisseur totale : 450 à 550 m

Epaisseur de sel cumulée 150 m

120 bancs de sel individualisés

Le Stampien

Stampien inférieur :

- Couche à Foraminifères (5 à 12 m). Marnes pyriteuses brunes à la base puis vert bleuâtre au sommet riches en foraminifères indiquant l'invasion marine du fossé.
- Couche à Amphisiles (2 à 17 m). Marnes bitumineuses avec de minces pellicules de calcaire blanchâtre. La radioactivité élevée en fait un niveau repère des diagraphies.

Stampien moyen : Couches à Melettes (300 m)

Cette puissante série est essentiellement constituée de marnes grises micacées. On y rencontre quelques horizons de calcaires dolomitiques peu épais (moins de 10 cm) et des niveaux de grès à ciment calcaire plus ou moins bien consolidés constituant un niveau de 40 à 50 m de puissance vers la base de la série.

Stampien supérieur : Couches à Cyrènes (100 m)

C'est une alternance de marnes finement sableuses et de couches de grès tendres mal consolidés.

Le Chattien

On ne le rencontre qu'à cinq kilomètres environ du site de stockage (voir la figure 8). Il est constitué par des marnes bariolées à horizons gréseux mal consolidés. Vers le sommet de la série apparaissent des niveaux de calcaires vacuolaires et les marnes contiennent des nids de gypse en gros cristaux.

Le Plio-quaternaire

Les dépôts pliocènes sont peu représentés dans le bassin de Mulhouse. Le quaternaire est peu développé en raison de la situation de bordure de la région. Son épaisseur varie de 20 à 50 m, il est formé par des limons, sables, graviers et galets d'origines vosgienne et rhénane. Entre le tertiaire et le remplissage alluvial on rencontre souvent un niveau d'argile jaune appelé zone de transition.

III - TECTONIQUE

Le style tectonique des formations de remplissage du fossé rhénan est quelque peu différent selon la région considérée. Dans le bassin potassique de Mulhouse le remplissage du tertiaire est affecté d'ondulations de direction subméridiennes à grand rayon de courbure. Elles sont parfois interrompues par des failles normales, de même direction que les plis, le plus souvent antithétiques à regard Ouest de pendage 30 à 40°. A l'exception des accidents bordiers qui sont synsédimentaires les autres failles sont le plus souvent post-sédimentaires c'est-à-dire post-chattienne. L'analogie des terrains rencontrés de part et d'autre de ces accidents (lithologie et épaisseur) le montre. Ces accidents qui sont reproduits sur la figure 8 ont des rejets qui peuvent atteindre 500 mètres et conduisent à découper la série en grand panneaux monoclinaux. A partir de l'III (voir figure 9) se développe, vers l'Est, une

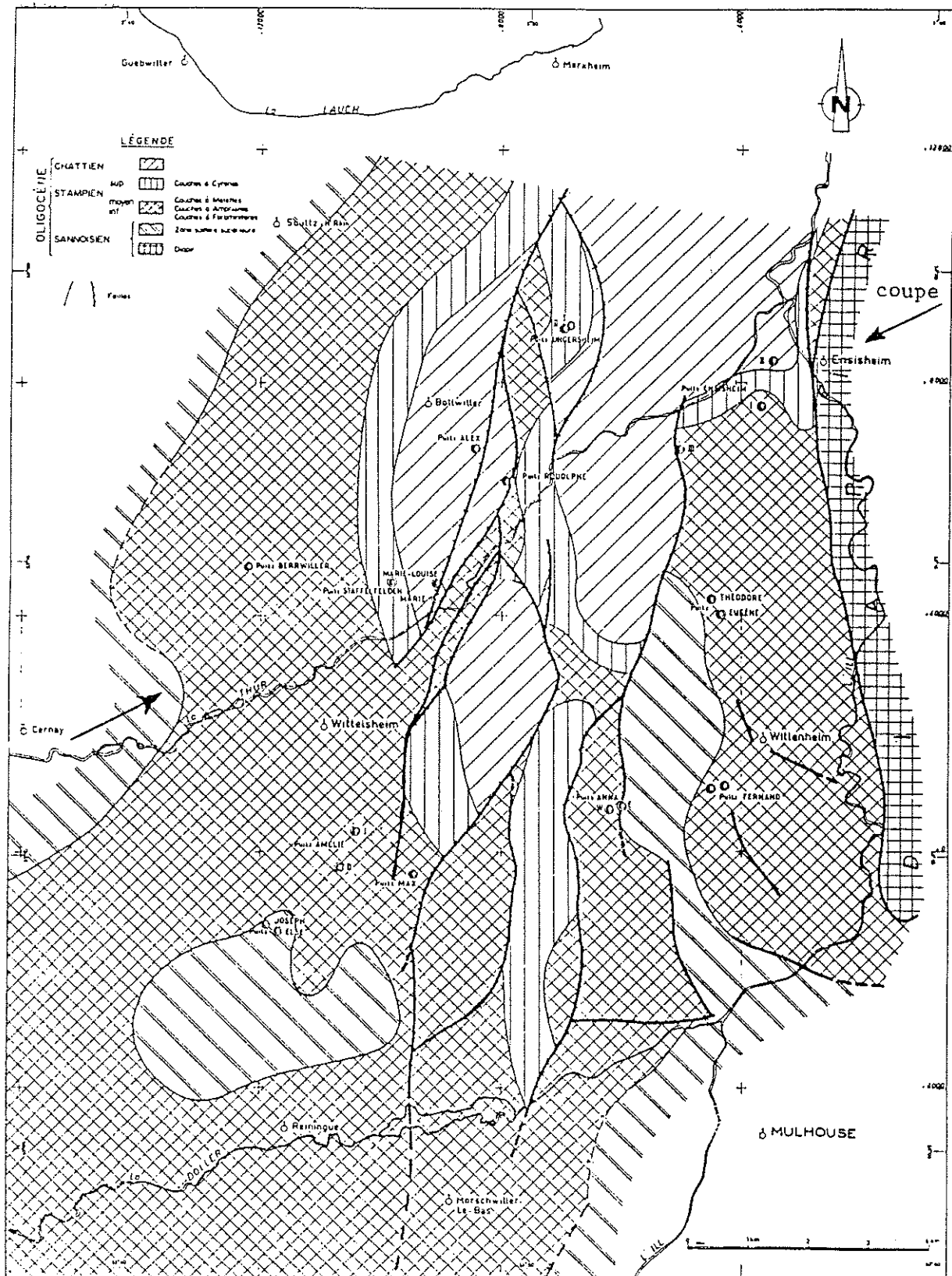
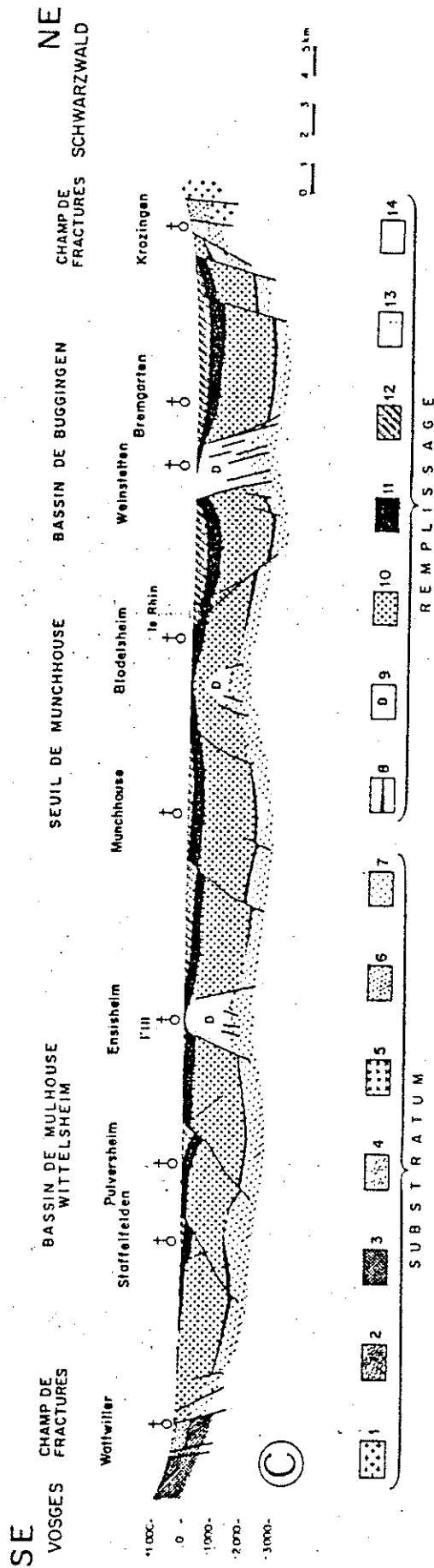


Figure 8 : Carte géologique du bassin potassique de Mulhouse (Quaternaire enlevé) - (Document MDP A-SA)



Légende :

1. Socle cristallin, granites. - 2. Précambrien. - 3. Viséen volcano-sédimentaire (faciès Culm). - 4. Permien volcano-sédimentaire. - 5. Permien volcanique. - 6. Trias : Buntsandstein, Muschelkalk et Keuper. - 7. Jurassique : Dogger et Malm. - 8. Éocène : dépôts sidérolithiques, calcaires lacustres ou schistes bitumineux. - 9. Diapirs de sel. - 10. Oligocène inférieur : Lattorfien subdivisé en zone salifère inférieure et zone salifère moyenne et supérieure. - 11. Oligocène moyen : Rupélien. - 12. Oligocène supérieur : Chattien. - 13. Miocène : Aquitanien et Miocène détritique. - 14. Plio-Quaternaire : dépôts fluviaux pliocènes, alluvions rhénanes et vosgiennes.

Figure 9 : Coupe transversale du fossé Rhénan (C. Sittler) - Le tracé est indiqué sur la figure 8)

tectonique propre aux formations salifères. De légers replis anticlinaux sont accentués par des phénomènes diapiriques de fluage du sel et sont accompagnés de failles méridiennes.

Dans le secteur concerné par le site de stockage, bien connu grâce aux ouvrages Joseph, Else, Wittelsheim I et II la structure est régulière et se présente sous la forme d'un monoclinal à pendage de 6 à 10° vers le NNW. Cette régularité structurale s'interrompt au voisinage du puits Max, c'est-à-dire à 1,5 km du site de stockage envisagé. Les galeries de communication établies entre les puits Amélie I, Amélie II et Max, permettent en effet de mettre en évidence l'existence d'un accident concernant l'ensemble du bassin potassique de Mulhouse. La figure 10 présente les détails de la structure au voisinage de l'accident. Le rejet de cette faille est voisin de 170 mètres, c'est le bloc Amélie qui est affaissé par rapport au bloc Max. Notons qu'au sud du puits Max, cet accident s'amortit et disparaît progressivement.

Des accidents du même type existent également plus à l'est en bordure de la mine Anna. Ces zones plus tectonisées n'ont pas fait l'objet d'exploitation de la potasse.

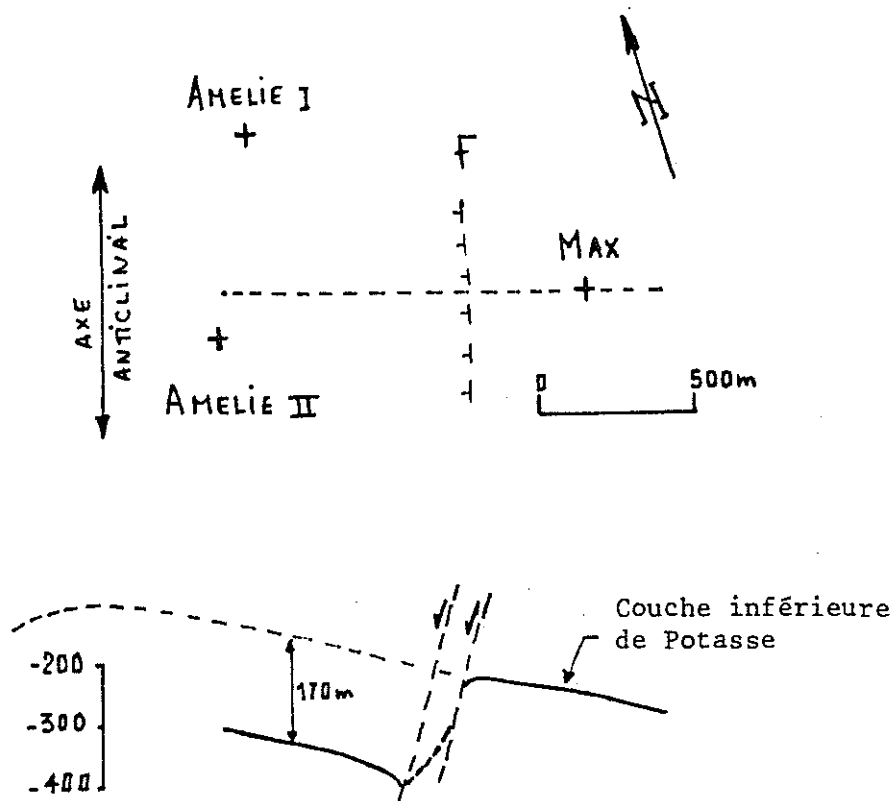
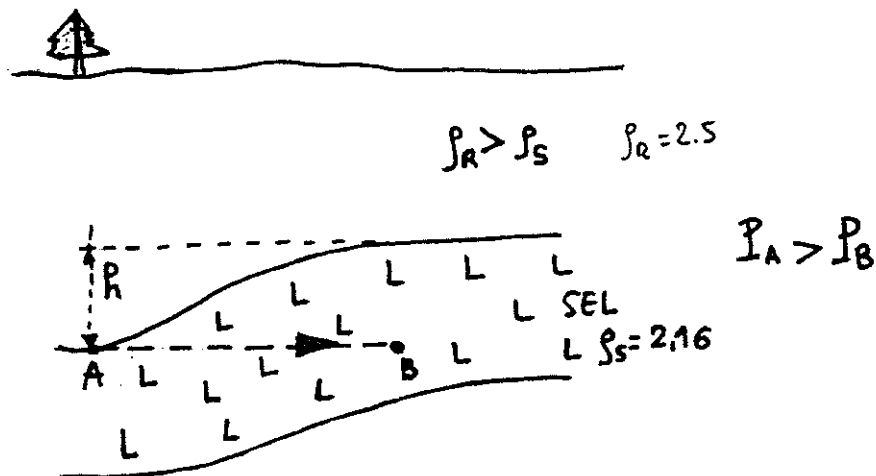


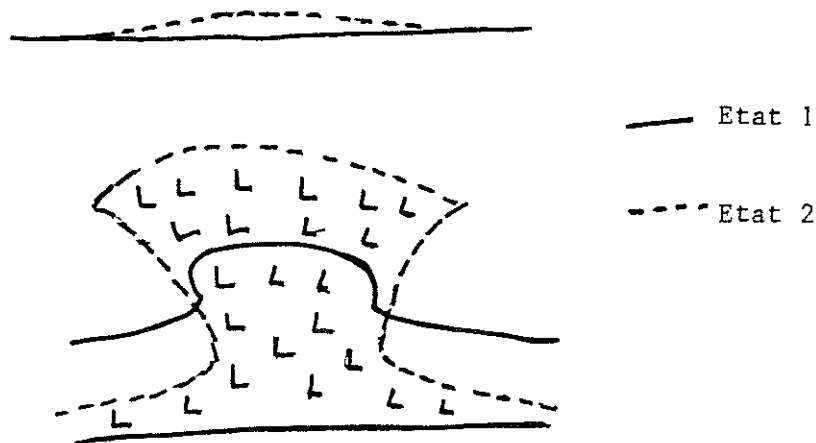
Figure 10

IV - LE DIAPIRISME

Ce phénomène, aussi dénommé halocinèse, est propre aux masses salifères. Il est dû à deux propriétés particulières du sel, son faible poids spécifique vis-à-vis des autres roches pour des conditions comparables de gisement (figure 11), et son comportement viscoplastique. Ces deux propriétés conduisent à des conditions d'instabilité. Considérons par exemple la structure schématisée ci-dessous.



La différence de pression régnant dans la masse de sel amène celui-ci à se déplacer de A vers B. Dans des conditions particulières on peut avoir une rupture au toit des terrains encaissants et migration du sel vers le haut. Il y a dans ce cas formation d'un diapir dont la forme s'ajuste à la distribution des pressions qui existent dans les terrains encaissants.



Lorsque le dôme s'approche de la surface du sol il atteint des terrains de densité plus faible qu'en profondeur (en raison de la compaction) et le diapir a tendance à s'étaler, sous nos climats il est alors soumis à une lixiviation importante par les eaux souterraines. Les résidus de dissolution s'accumulent à la partie supérieure du dôme et constituent le cap-rock. Le dôme se stabilise souvent avant d'atteindre la surface car la vitesse d'ascension compense les pertes par dissolution. En climat désertique la dissolution n'intervient pas et l'on peut rencontrer des montagnes de sel (Algérie, Arabie Saoudite). La formation d'un diapir entraîne des déséquilibres de pression des terrains qui génère d'autres diapirs de sorte que l'on observe souvent des alignements aboutissant finalement à des diapirs qui ont un grand développement longitudinal (voir figure 11).

Deux paramètres jouent un rôle essentiel pour le développement du phénomène, l'épaisseur de la série salifère et la profondeur du gisement qui conditionne la plasticité du sel. Il semblerait que l'épaisseur minimale de sel doive être de 500 m et que la profondeur du gisement doive excéder 1000 à 2000 m. Il ne s'agit là que d'ordres de grandeur car les conditions locales, degré géothermique, tectonique, nature du recouvrement jouent également un rôle important.

La vitesse de déplacement du dôme varie au cours du temps. Elle doit être maximale lorsque le dôme approche de la surface puisque la différence de pression due au contraste de densité est à un maximum alors que la résistance des terrains est assez faible dans les couches non consolidées. A l'opposé elle doit être faible lors de l'initialisation. Les mesures effectuées conduisent à estimer cette vitesse entre 0,1 et 0,5 mm par an.

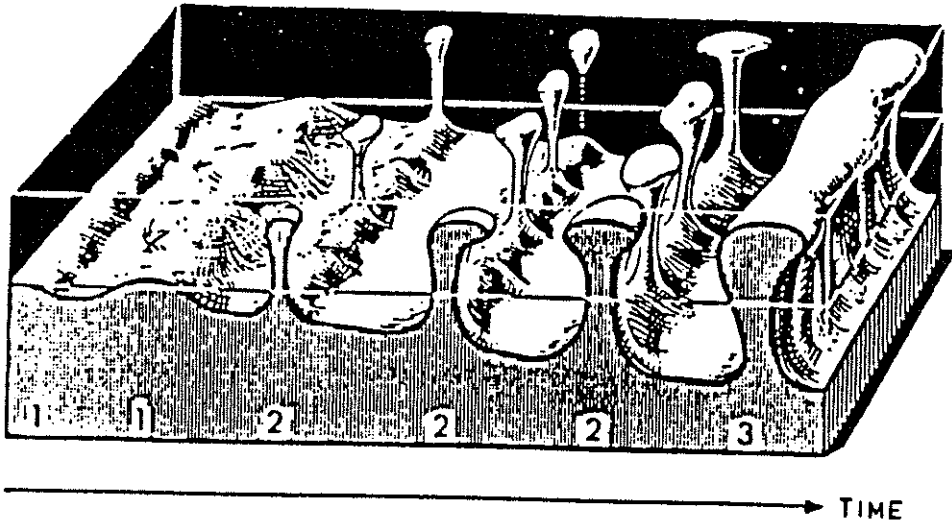
Conclusion : sûreté du stockage et diapirisme

Dans la plaine du Rhin les conditions sont assez peu favorables à la formation de diapir, en raison notamment de l'épaisseur trop réduite des bancs de sel individualisés. On ne rencontre en effet que quelques diapirs importants au Nord et à l'Est de Mulhouse alors que dans les régions où les facteurs sont plus favorables c'est près d'une centaine de diapirs qui sont connus (région de Hambourg). Il n'en reste pas moins que l'on rencontre à 10 km à l'Est du site de stockage le diapir d'Ensisheim orienté N-S et long de 15 km. Dans le secteur du site les travaux miniers et les sondages réalisés attestent de la régularité des couches et de l'absence de diapir en formation. Si un diapir devait se constituer dans cette région, ce qui est peu probable, car si les conditions étaient favorables il existerait déjà, compte tenu de la profondeur du dépôt et des vitesses d'ascension, il faudrait un minimum d'un million d'années avant qu'il atteigne la nappe des alluvions. Pour toute ces raisons nous considérerons que le risque entraîné par le diapirisme est négligeable pour la sûreté du stockage.

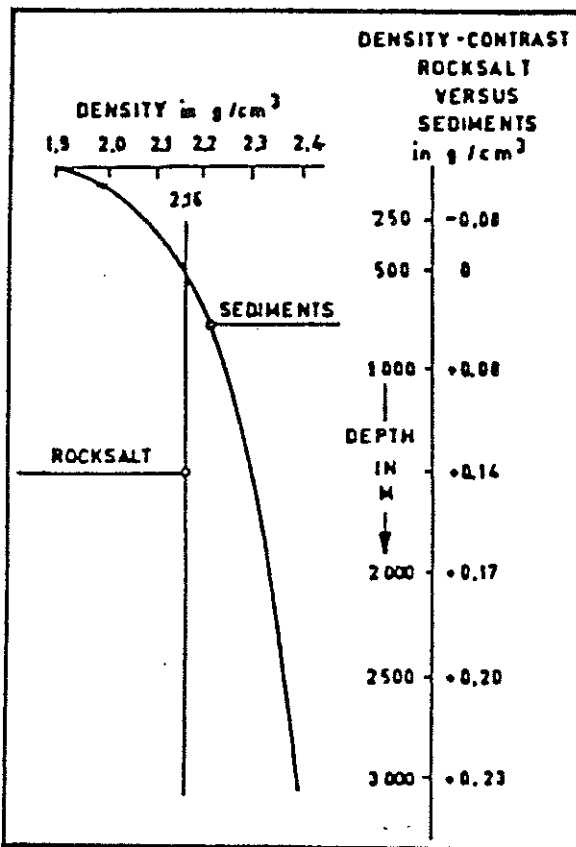
V - CONCLUSION

A la suite de la description stratigraphique et lithologique des formations environnant le site de stockage envisagé on peut établir la coupe synthétique des terrains, situés à la verticale du site, présentée ci-après. Pour la suite de l'étude on retiendra les points principaux suivants :

- Les formations du Chattien et du Stampien ne sont pas présentes à l'aplomb du site,



Development of different salt structures in N-Germany (from Permian salt deposits). The horizontal line marks the decrease of the original thickness of bedded salt. (1: salt pillows, 2: salt domes or diapirs, 3: salt diapir of elongated form or salt wall)

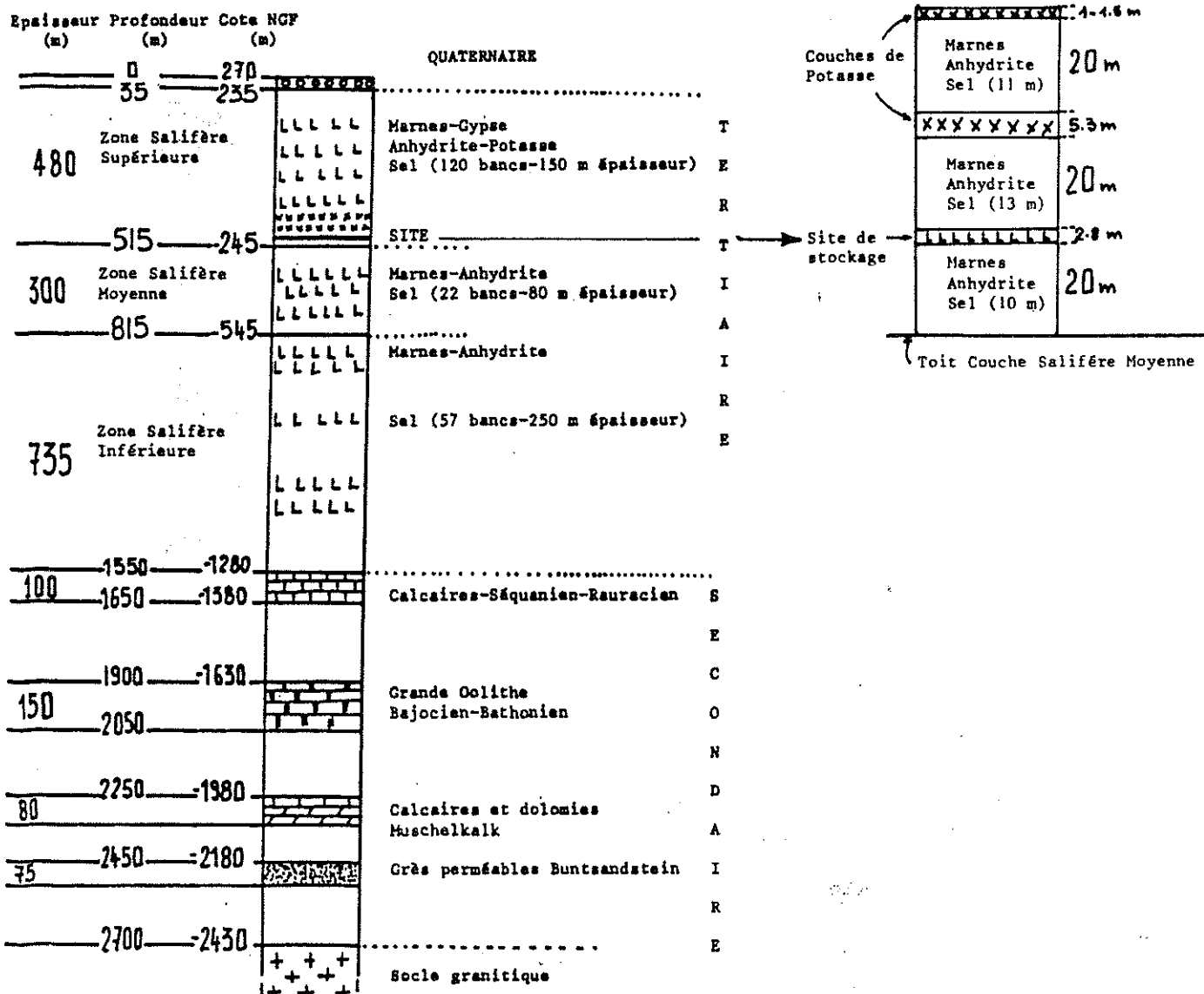


Density of rock salt and sediments as well as density difference between rock salt and sediments plotted as a function of depth

Figure 11

- le Sannoisien possède une épaisseur totale de l'ordre de 1500 m,
- la cavité de stockage est placée au cœur d'une puissante série constituée de roches peu perméables (marnes, gypse, anhydrite, potasse et sel). L'épaisseur de sel cumulé est voisine de 500 m,
- la structure tectonique est calme, on note cependant une zone faillée dont le rejet total est de 170 m environ au niveau de la couche inférieure de potasse. Cet accident est situé à 1,5 km du site,
- Il n'y a pas au voisinage du site de structure diapirique développée ou en cours de formation.

Coupe synthétique des terrains à la verticale du Site



DEUXIEME PARTIE
ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

ENVIRONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE LA MINE

Nous allons dans un premier temps présenter les caractéristiques hydrogéologiques générales des formations aquifères situées dans le bassin de Mulhouse. A la suite de cette revue nous retiendrons celles qui concernent plus particulièrement la sûreté du stockage.

I - LES AQUIFERES DU SECONDAIRE

Les caractéristiques lithologiques des terrains permettent de retenir comme aquifères les horizons suivants :

- Les calcaires du Malm (Rauracien-Séquanien).
- Les calcaires de la Grande Oolithe (Dogger).
- Les calcaires du Muschelkalk.
- Les grès du Buntsandstein.

Les conditions hydrogéologiques précises de ces aquifères sont mal connues car il n'y a pas de forages exploitant ces réservoirs dans le bassin de Mulhouse. Les informations disponibles sont tirées d'essais et mesures effectués à l'occasion du creusement de forages pétroliers, il en résulte certaines imprécisions puisque ces mesures ne constituaient pas l'objectif essentiel de l'ouvrage. On peut néanmoins tirer les enseignements suivants :

Porosité

La porosité est, dans le bassin de Mulhouse, inférieure à 10% pour chacun de ces réservoirs. La fracturation est par contre importante dans les trois réservoirs calcaires, particulièrement dans la Grande Oolithe.

Perméabilité

La perméabilité à l'échelle des réservoirs est difficile à apprécier car les tests sollicitent souvent des hauteurs d'aquifère peu importantes et concernent la perméabilité proche de l'ouvrage qui est souvent réduite à cause de la boue de forage. Les mesures de perméabilité intrinsèque effectuées sur les carottes sont peu représentatives puisque la fissuration qui constitue l'essentiel de la perméabilité n'est pas prise en compte. C'est pourquoi on obtient des valeurs très faibles inférieures à quelques millidarcy. D'une façon générale elle est peu élevée sauf dans la grande Oolithe qui paraît être l'aquifère le plus productif du secondaire, particulièrement dans le bassin potassique, en raison de sa fracturation et de sa dolomitisation erratique.

Piézométrie

Dans ce domaine également les données sont rares et imprécises. On peut cependant, à partir des quelques informations fiables disponibles et de considérations d'hydrogéologie régionale, considérer que ces nappes sont artésiennes dans la région concernée par le

stockage. La cote piézométrique doit augmenter avec la profondeur du réservoir considéré et les valeurs suivantes repérées par rapport au niveau de la mer (NGF) peuvent être proposées :

- Calcaires du Malm	+270 m NGF
- Grande Oolithe	+280 m NGF
- Calcaires Muschelkalk	+300 m NGF
- Grès Buntsandstein	+320 m NGF

Entre les aquifères on rencontre des séries peu perméables qui assurent, à la drainance près, l'individualité des aquifères.

Température et salinité

La température des eaux est élevée elle s'explique par le fort gradient géothermique de cette région ce qui a motivé les études géothermiques entreprises en 1979. La salinité des eaux est également très forte (voir le tableau I). Elle varie beaucoup spatialement et aucune étude n'a à notre connaissance, été entreprise pour tenter de préciser l'origine du sel. Trois sources sont possibles, dissolution des niveaux salifères du tertiaire, du secondaire ou reste d'eaux connées.

II - LES HORIZONS PERMEABLES DU TERTIAIRE

Au sein de cette puissante série essentiellement marneuse il n'y a pas d'aquifère à proprement parler. On rencontre seulement quelques horizons gréseux plus perméables dans lesquels l'eau peut être présente. Nous allons successivement les décrire en s'appuyant sur les observations effectuées lors du creusement des puits d'exploitation ou de reconnaissance des MDP-A-SA.

Le Chattien

Il a été traversé par les puits Marie, Marie-Louise, Rodolphe et Alex. Dans les trois premiers de ces ouvrages ces terrains ont une épaisseur de quelques dizaines de mètres (Marie = 20 m, Marie-Louise = 55 m, Rodolphe = 51 m) et n'ont donné lieu à aucune venue d'eau notable. Il en est tout autrement au puits Alex où l'épaisseur de cette formation est de 300 m. Des venues importantes d'eau y ont été observées, elles varient selon les niveaux entre 1 et 500 l par minute. Les zones les plus productrices correspondent à la conjonction des horizons gréseux avec des zones de dislocation. En effet la coupe de l'ouvrage fait apparaître des variations très importantes du pendage des couches (20° à 60°) ainsi que la présence de zones broyées.

Le niveau le plus productif se situe à 276 m de profondeur, le débit à l'origine était de 500 l par minute il est tombé à 20 l par minute après huit jours. L'eau avait une salinité de 30 g/l en chlorure.

En conclusion nous retiendrons que dans le secteur du puits Alex des circulations d'eau complexes peuvent s'établir, au sein de la formation du Chattien, dans les horizons gréseux

Tableau I
Caractéristiques générales des aquifères du Secondaire

Aquifère	Epaisseur de l'horizon Productif	Piézométrie	t°C	Salinité des eaux (secteur de Mulhouse) NaCl
Calcaire du Malm	Moins de 100 m	270 m NGF	80°-85°	Très variable 5 à 50 g/l
Grande Oolithe (Dogger)	120 à 150 m	280 m NGF	100°	10 à 20 g/l
Calcaire du Muschelkalk	75 à 100 m	300 m NGF	100 à 120°	20 à 30 g/l
Grès du Buntsandstein	75 à 100 m	320 m NGF	120°	20 à 50 g/l

et les discontinuités tectoniques. Ailleurs cette même formation est très peu perméable. Enfin nous ajoutons que cette formation n'est pas présente dans la zone du site de stockage.

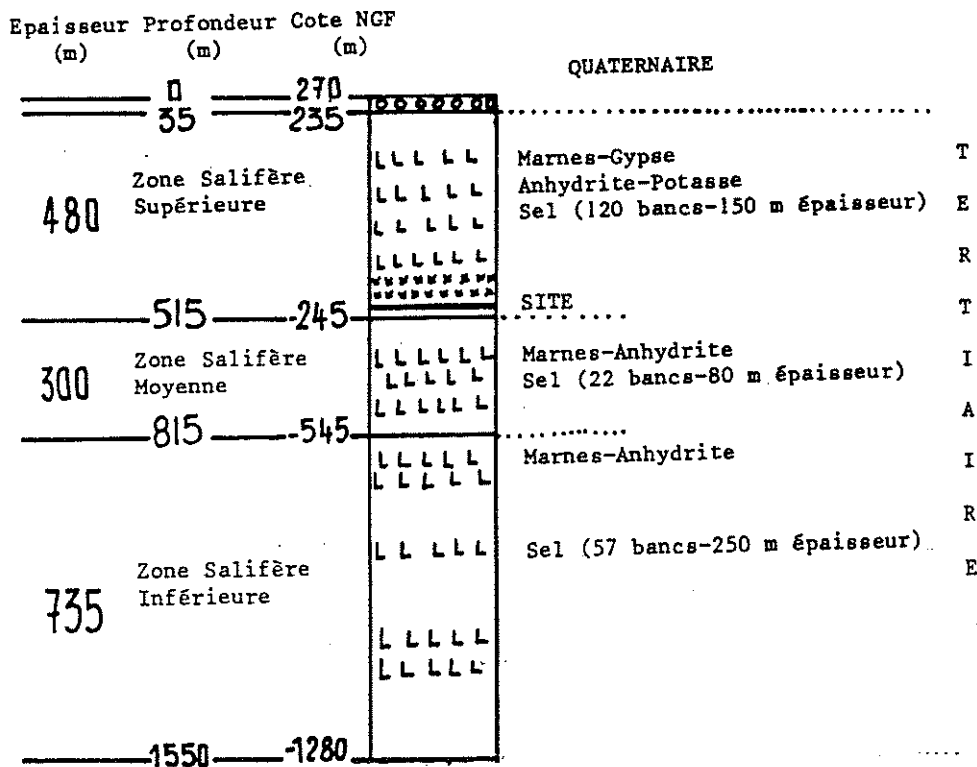
Le Stampien

Du point de vue hydrogéologique cette formation peut être divisée en deux parties, le Stampien inférieur et le Stampien moyen et supérieur. Le Stampien inférieur est essentiellement constitué de marnes (couches à Foraminifères et Amphisiles) sur une vingtaine de mètres d'épaisseur. Aucune arrivée d'eau n'a été observée dans ce niveau, sauf au puits Amélie I où l'existence d'une petite fissure a permis un écoulement de sept litres par minute.

Le Stampien moyen et supérieur, ou couches à Melettes et à Cyrènes, forment un puissant ensemble marneux dans lesquels les horizons sableux ou gréseux peuvent être assez abondants. Il en résulte que cet ensemble présente très souvent des horizons aquifères. Leur productivité dépend de la lithologie de l'horizon gréseux (épaisseur, granulométrie et pourcentage d'argile) et de sa situation vis-à-vis des alluvions quaternaires. C'est ainsi qu'au puits Marie, les couches à Cyrènes reposant directement sous les alluvions ont produit 750 l par minute entre 25 et 85 m de profondeur. Il s'agit là d'un cas extrême, le plus souvent le débit des couches perméable est en moyenne compris entre 40 et 120 l par minute.

Le Sannoisien

C'est au sein de cette formation de 1500 m d'épaisseur environ que se trouve le site de stockage, situé à 500 m du toit de la série. Nous rappelons qu'elle est constituée de marnes, gypse, anhydrite et de sel gemme. Le schéma ci-dessous rappelle la structure de cette série.



La zone salifère supérieure est bien connue car elle a été traversée par les nombreux puits de mine servant à l'exploitation de la potasse. Le site de stockage est géographiquement situé entre les puits Joseph, Else et Amélie II c'est donc ces ouvrages qui ont particulièrement retenu notre attention. Les observations effectuées au cours de leur creusement (1911 à 1912) consignées dans l'ouvrage de W. Wagner nous permettent de distinguer, du point de vue hydrogéologique, trois parties dans le niveau salifère supérieur (voir la figure 14).

La partie supérieure ou zone à gypse

Son épaisseur est de l'ordre de 100 mètres. Elle est constituée de marnes et de gypse. L'ensemble de ces terrains est imprégné d'eau responsable de la transformation de l'anhydrite en gypse. Lors du creusement des ouvrages il a été observé des suintements d'eau représentant le plus souvent des débits insignifiants. Des venues d'eau plus conséquentes ont toutefois été rencontrées dans le puits Joseph et Amélie II où elles ont atteint respectivement 15 et 31 l par minute.

La partie intermédiaire

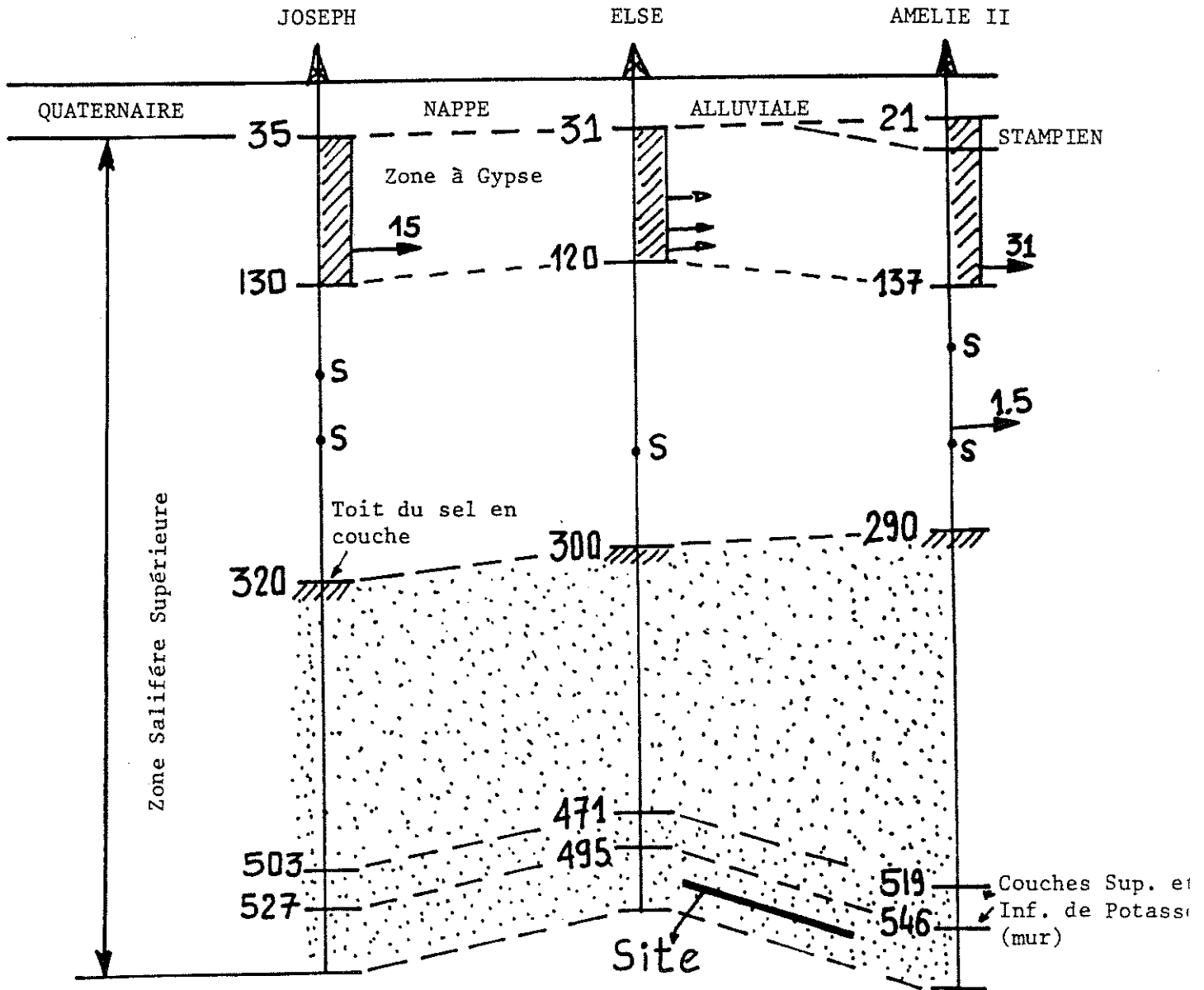
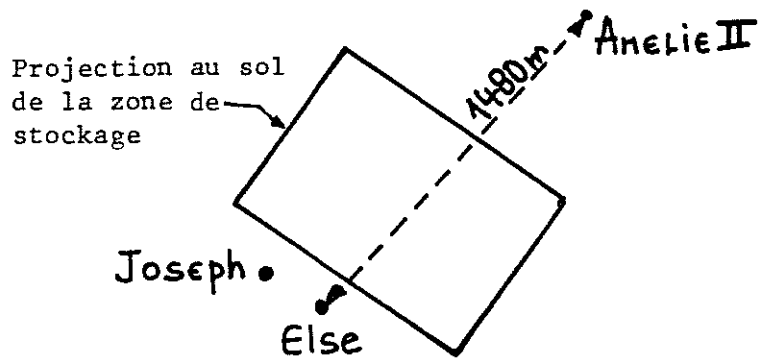
Elle débute à la base du niveau précédent et se poursuit jusqu'au toit du sel gemme en couche. L'épaisseur de cet horizon est voisine de 180 m, les terrains sont constitués de marnes, d'anhydrite et de sel. La présence d'eau n'est pas exceptionnelle, six puits sur les vingt deux existants ont rencontré des venues d'eau lors du fonçage. Elles se caractérisent par un tarissement partiel ou total aboutissant à un débit toujours très faible (inférieur à 4 l/mn) et par une salinité élevée. Par exemple dans le puits Amélie II, la venue d'eau s'est produite à 236 m de profondeur, elle a d'abord présenté un débit de 35 litres par minute qui s'est progressivement réduit à 1,5 litres par minute. La salinité des eaux est restée stable (entre 30 et 32 g/l de NaCl).

La partie inférieure


Elle débute au toit du sel gemme en couche et se poursuit jusqu'à la base de la zone salifère supérieure ce qui représente une épaisseur de l'ordre de 200 à 250 m. Aucune arrivée d'eau n'a jamais été observée dans cet horizon même après les affaissements consécutifs à l'exploitation des horizons potassiques.


Les zones salifères moyenne et inférieure


Ces terrains sont situés au-dessous des horizons potassiques exploités et sont donc moins bien connus puisqu'ils n'ont pas été traversés par les puits de mine. Cependant les forages profonds de reconnaissance creusés par MDPA et par les pétroliers ne font état d'aucun niveau aquifère au sein de cet ensemble marneux et salifère.




Zone Salifère Moyenne

 L'eau sature les terrains et peut circuler dans les fissures

 Venue d'eau individualisée et débit en litres/minute

 Absence de venue d'eau naturelle

 Présence de Sel signalée dans les coupes lithologiques

(Les profondeurs sont données par rapport au sol (m))

Figure 14

III - L'AQUIFERE ALLUVIAL

Les alluvions, essentiellement formées de gravier et de galets ont dans le secteur Joseph-Else une trentaine de mètres d'épaisseur. Elles sont très perméables ($K \simeq 10^{-3}$ m/s) et constituent un réservoir très productif dont le niveau statique est voisin de 263 m. La nappe est alimentée par les rivières vosgiennes (la Thur et la Doller) et l'infiltration des précipitations, elle est très exploitée par les MDPA dans le secteur de Wittelsheim. L'écoulement général s'effectue vers le Nord-Est.

IV - CONCLUSION

L'environnement hydrogéologique du stockage est synthétisé par la figure 15. On y observe que le site est situé au sein d'un puissant ensemble qui peut être considéré comme imperméable. Il est constitué par 1200 m de marnes, d'anhydrite et de sel, ce dernier totalisant une épaisseur cumulée de près de 500 m. Cet ensemble a pour limite supérieure le toit du sel gemme en couche et pour limite inférieure les terrains secondaires ; aucune venue d'eau n'y a jamais été rencontrée dans cette région. De part et d'autre de ce bloc que nous désignerons par le terme "bloc-hôte", on rencontre des formations où la présence de l'eau est plus ou moins importante. Vers le haut, il est successivement recouvert par trois horizons de plus en plus perméables au fur et à mesure que l'on se rapproche de la surface. Le premier de ces horizons est épais de 170 à 180 m, il est formé par des marnes, de l'anhydrite et de quelques occurrences de sel. La présence d'eau n'est pas systématique. Lorsqu'elle a été rencontrée il s'agissait toujours d'eau salée (30 g/l NaCl) et les débits mesurés à l'occasion du creusement des puits étaient très faibles (4 l/minute). Compte tenu du diamètre important des puits (5 m) ceci atteste de la très mauvaise perméabilité de cet horizon. Au-dessus, se trouve le niveau à gypse d'une centaine de mètres d'épaisseur. Ici l'eau est toujours présente, elle imbibe les terrains et peut produire un écoulement d'eau douce à la faveur de fissures et diaclases. Les débits observés lors de la réalisation des ouvrages n'ont pas excédé 30 l/minute ce qui traduit ici aussi une perméabilité très faible.

Les eaux rencontrées dans ces deux horizons ont pour origine la nappe alluviale qui les surmonte. L'eau est davantage présente dans le niveau à gypse en raison d'une compaction moindre du milieu et devient de plus en plus rare avec l'accroissement de la profondeur. La nappe alluviale est, elle, un véritable aquifère de forte perméabilité ($K \simeq 10^{-3}$ m/s) et à productivité élevée.

Vers le bas, le bloc-hôte se trouve au contact de l'aquifère du Malm (calcaires Rauracien-Séquanien) situé à 1000 m environ du site de stockage. Les autres aquifères du secondaire sont encore plus profonds, et jouent ainsi un rôle négligeable vis-à-vis de la sûreté du site dans la mesure où celle-ci ne dépend pas du nombre d'aquifères mais plutôt des caractéristiques hydrogéologiques de celui qui est le plus proche du bloc-hôte.

A la suite de cette revue du contexte hydrogéologique régional il apparaît que le site bénéficie d'une situation extrêmement favorable puisqu'il se situe au cœur d'une série salifère imperméable qui l'isole efficacement des aquifères sus et sous-jacents.

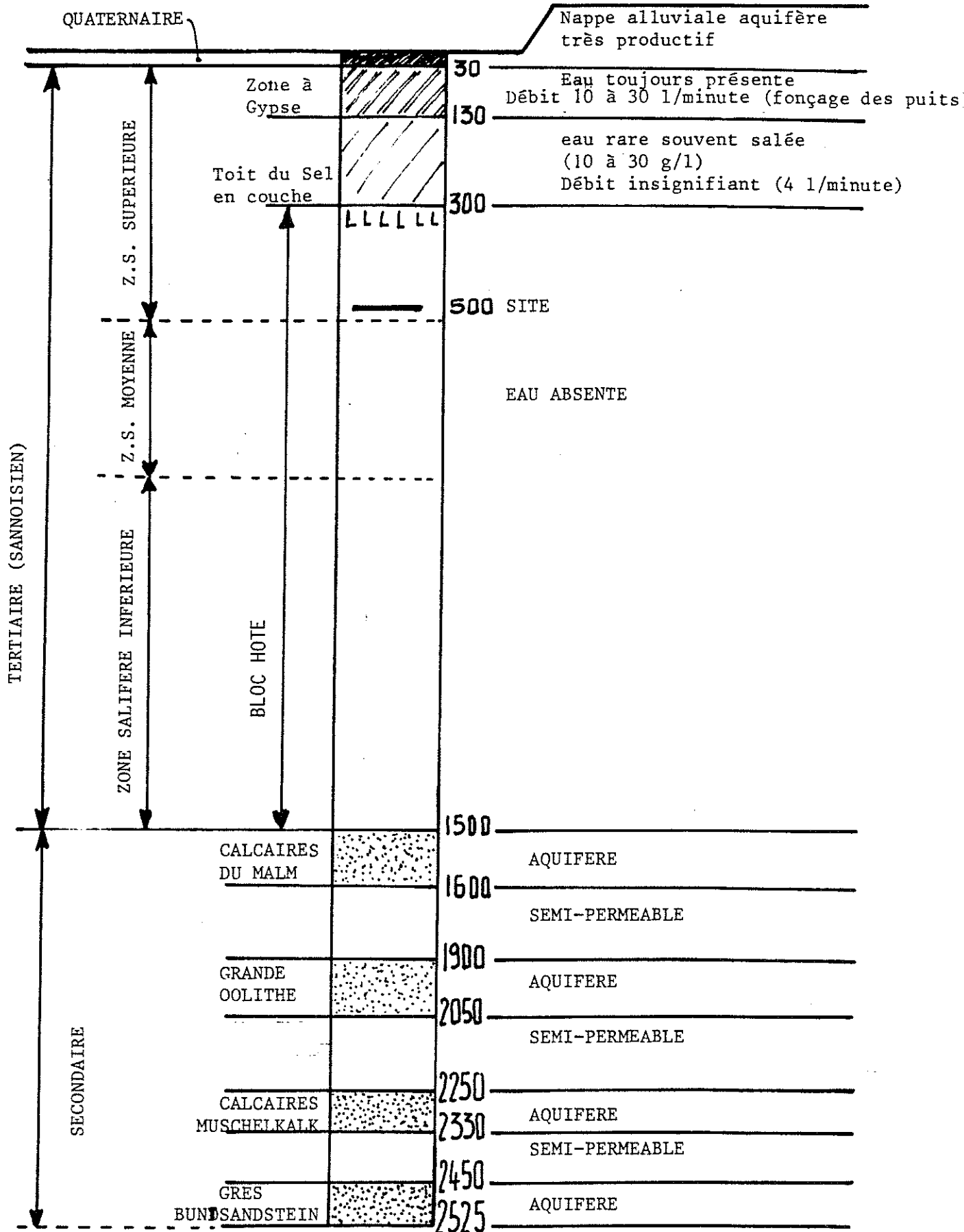


Figure 15 : Contexte hydrogéologique général

TROISIEME PARTIE
ANALYSE DES RISQUES POTENTIELS D'ENVAHISSEMENT
PAR L'EAU DES CAVITES DE STOCKAGE

Les conditions géologiques et hydrogéologiques des terrains environnant le bloc-hôte du site de stockage étant connues nous pouvons aborder la discussion de la sûreté du site vis à vis de l'eau qui est le seul vecteur susceptible de transporter des produits polluants vers la biosphère. Avant d'exposer divers scénarios d'intrusion de l'eau nous allons décrire les conditions internes au bloc-hôte qui vont déterminer les circulations de l'eau au sein du bloc ainsi que les relations actuelles entre ce bloc et le milieu extérieur.

I - LE BLOC-HOTE

I.1 - Morphologie générale

La formation géologique destinée à confiner le stockage a pour limite supérieure le toit du sel gemme et pour base l'apparition des terrains secondaires sur une épaisseur de 1200 m environ. Son extension horizontale est importante puisqu'elle concerne l'ensemble du bassin potassique. Si l'on s'intéresse aux environs du site de stockage on observe que sa structure, matérialisée par les courbes de niveaux de la couche inférieure de potasse tracées sur la figure 16, est relativement calme et correspond à un bombement anticlinal d'axe NE-SW. A l'aplomb du site le pendage général est de 8 à 10° vers le nord-ouest. Cette déformation souple à grand rayon de courbure est interrompue au niveau du puits Max par un accident qui effondre le compartiment Ouest de 170 m environ. Cette zone faillée que nous avons déjà décrite est située à 1,5 km des cavités de stockage. Elle a été recoupée par une galerie de service reliant le puits Max aux puits Amélie I et II qui n'a montré aucune venue d'eau.

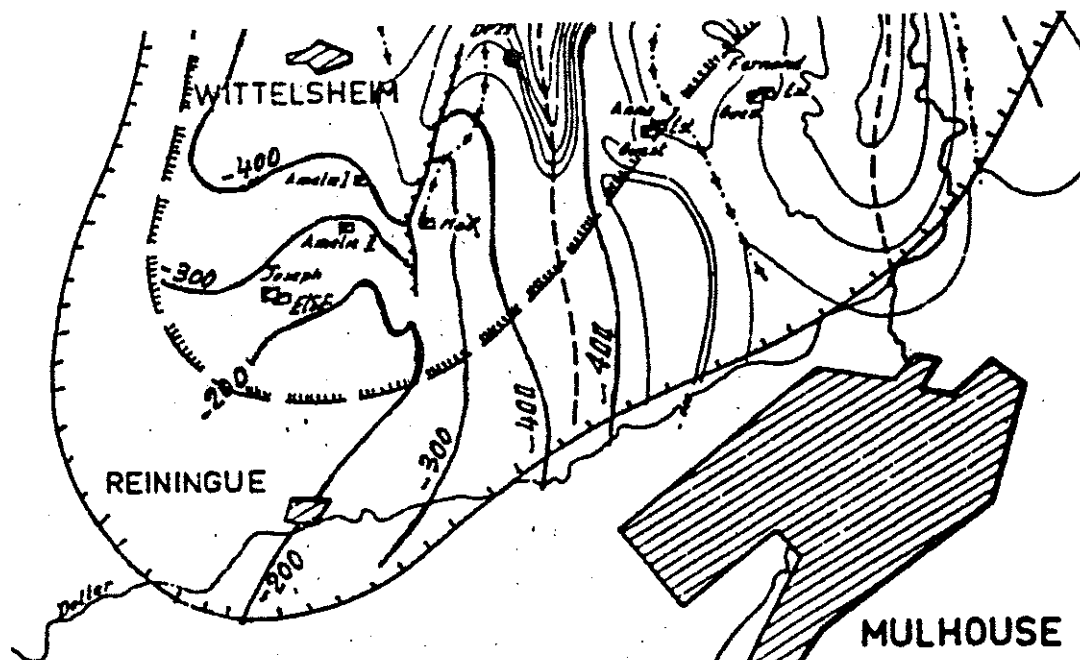


Figure 16 : Isobathes de la couche inférieure de Potasse (NGF)

I.2 - Les perturbations internes du bloc-hôte et ses limites

Les horizons potassiques présents au sein du bloc ont fait l'objet d'une exploitation par les MDPA. Le secteur du site appartient à la concession Amélie qui est une unité indépendante des autres secteurs exploités dans le bassin potassique. L'extension de l'exploitation est voisine de 24 km² en couche inférieure et de 10 km² seulement pour la couche supérieure. La figure 17 et le tableau II précisent la géométrie de la mine.

Après extraction des couches de potasse et le foisonnement des terrains résultant du formatage on peut considérer que l'on a créé, au sein du bloc-hôte, deux zones perméables constituant un milieu dans lequel de l'eau pourrait circuler si elle pouvait y parvenir. Il en résulterait un système hydraulique bicouche se composant d'un niveau inférieur de 24 km² surmonté dans la partie Nord de la concession d'un niveau de moindre développement (10 km²), l'ensemble étant en relation par l'intermédiaire des galeries de service.

Pour estimer le volume de ces réservoirs potentiels nous nous baserons sur les observations des affaissements en surface effectuées par le MDPA qui montrent que 90% des vides se répercutent quasi instantanément au jour. Nous admettons que le tassement se poursuit ensuite lentement et qu'il subsistera finalement à terme un vide résiduel localisé au niveau des horizons exploités représentant 5% du vide initial.

En adoptant les valeurs numériques suivantes :

- | | |
|-------------------------------------------------------|-------|
| - Epaisseur moyenne de la couche supérieure perturbée | 1,5 m |
| - Epaisseur moyenne de la couche inférieure perturbée | 4 |
| - Porosité | 5 % |

Les volumes calculés de ces réservoirs potentiels seraient de 750.000 m³ pour le niveau supérieur et de 4 800 000 m³ pour l'inférieur, soit une valeur totale de l'ordre de 5 500 000 m³. Le tableau II détaille les volumes par tranche altimétrique. La figure ci-dessous schématise l'allure de ces discontinuités perméables au sein du bloc-hôte.

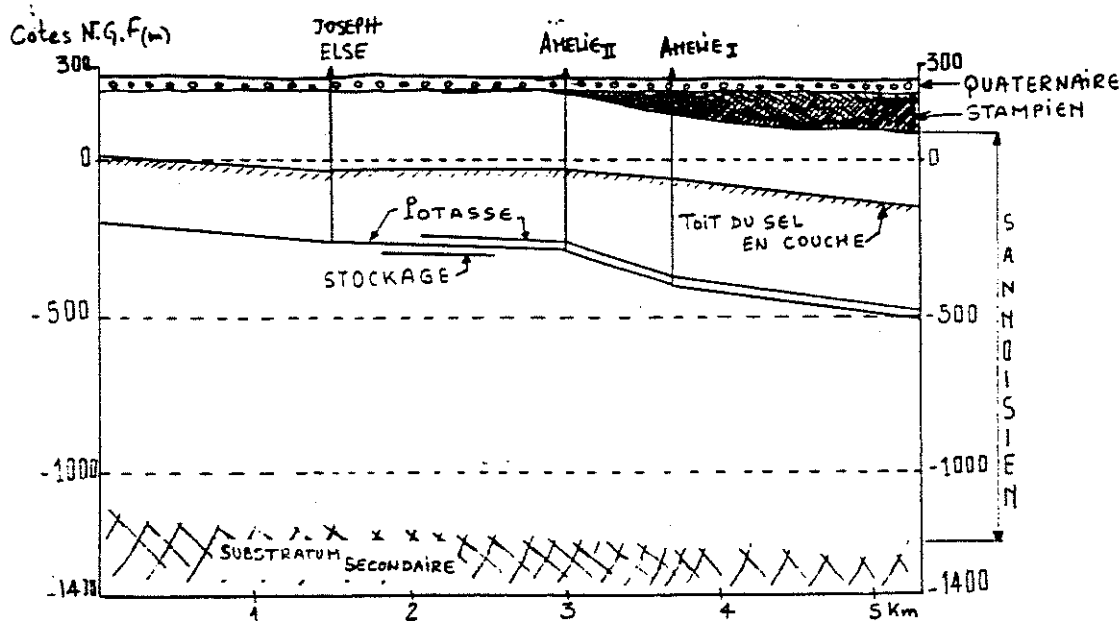


Tableau II : Géométrie de l'exploitation

COUCHE SUPERIEURE DE POTASSE

			Volume (e = 1,5 m) (P = 5%)
- Surface au-dessous de	-500 m	720 000 m ²	54 000 m ³
- Surface comprise entre	-450 et -500 m	1 960 000 m ²	147 000 m ³
- Surface comprise entre	-400 et -450 m	2 720 000 m ²	204 000 m ³
- Surface comprise entre	-350 et -400 m	2 880 000 m ²	216 000 m ³
- Surface comprise entre	-300 et -350 m	840 000 m ²	63 000 m ³
- Surface comprise entre	-250 et -300 m	400 000 m ²	30 000 m ³
- Surface au-dessus de	-250 m	360 000 m ²	27 000 m ³
Total		9 880 000 m ²	741 000 m ³

COUCHE INFERIEURE DE POTASSE

			Volume (e = 4 m) (P = 5%)
- Surface au-dessous de	-500 m	720 000 m ²	144 000 m ³
- Surface comprise entre	-450 et -500 m	1 960 000 m ²	392 000 m ³
- Surface comprise entre	-400 et -450 m	2 720 000 m ²	544 000 m ³
- Surface comprise entre	-350 et -400 m	2 880 000 m ²	576 000 m ³
- Surface comprise entre	-300 et -350 m	2 800 000 m ²	560 000 m ³
- Surface comprise entre	-250 et -300 m	2 600 000 m ²	520 000 m ³
- Surface comprise entre	-200 et -250 m	4 120 000 m ²	824 000 m ³
- Surface au-dessus de	-200 m	6 240 000 m ²	1 248 000 m ³
Total		24 040 000 m ²	4 808 000 m ³

Mine Marie-Louise

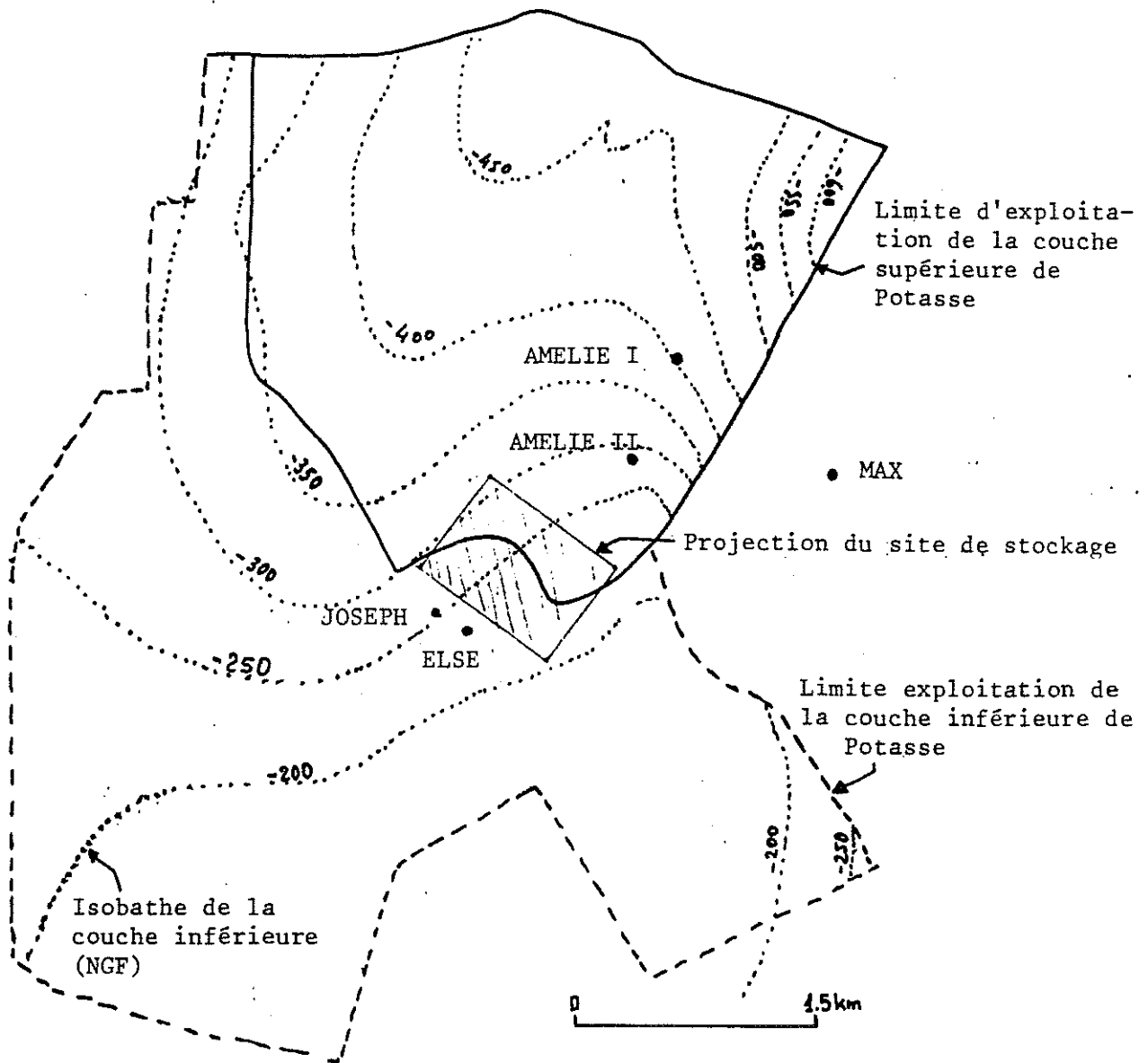


Figure 17. : La site de stockage et les travaux miniers

Au Nord de la mine Amélie se trouve, séparée par un stot de 20 m, la concession Marie-Louise qui a fait également l'objet d'une exploitation de la potasse dans des conditions analogues. Il n'existe pas à notre connaissance de galeries traversant le stot qui permettrait une communication directe entre les deux mines.

D'après les conditions précédentes nous délimiterons horizontalement le bloc-hôte destiné à recevoir le stockage de la manière suivante :

- Au Sud et à l'Ouest : une limite lithologique située à plus de 5 km du site représentée par la disparition naturelle de la série salifère,
- à l'Est la zone de flexure séparant la mine Amélie de la mine Anna,
- au Nord la limite d'exploitation de la mine Marie-Louise matérialisée par un stot de 20 m d'épaisseur.

I.3 - Les relations du bloc-hôte avec le milieu extérieur

Nous avons déjà précisé qu'aucune manifestation naturelle d'eau n'avait été rencontrée au sein du bloc. Cependant des venues d'eau sont observées à la base des puits reliant le bloc à la surface du sol. Dans l'état actuel, la mine est en relation avec la surface par l'intermédiaire de cinq puits de gros diamètre utilisés pour l'aérage et l'extraction de la potasse. L'ensemble des puits (Joseph, Else, Amélie I, Amélie II et Max) produit actuellement un débit d'eau douce de 300 m³/mois. Cette eau provient du Sannoisien (zone à gypse) pour les puits Joseph, Else, Amélie II, et des couches à Melettes pour les ouvrages Amélie I et Max. Ces horizons sont, comme nous l'avons vu, peu productifs et sont alimentés par la nappe alluviale qui les surmonte. L'eau pénètre à l'intérieur du puits par l'intermédiaire de discontinuités du cuvelage et ruisselle jusqu'à la base de l'ouvrage et s'égoutte dans des puisards d'où elle est pompée vers la surface. Les cotes de ces puisards sont les suivantes :

- Puits Joseph	-288 m NGF	- Puits Amélie I	-449 m NGF
- Puits Else	-245 m NGF	- Puits Amélie II	-419 m NGF
- Puits Max	-300 m NGF		

Ces entrées d'eau provenant des puits constituent les seules manifestations d'eau observées dans la concession Amélie. On rencontre cependant parfois des zones humides, d'extension métrique, correspondant à des inclusions fluides classiquement présentes dans les formations évaporitiques. On peut également ajouter que les affaissements produits par l'exploitation des couches de potasse n'ont jamais été à l'origine de venues d'eau.

I.4 - Le bloc-hôte et le site de stockage

Le site envisagé est situé au nord-est des puits Joseph et Else (voir la figure 17). Il sera constitué d'une cavité creusée dans les horizons salifères à une vingtaine de mètres au-dessous de la base de la couche inférieure de potasse. Cette cavité développée par la méthode des chambres et piliers (voir les détails de sa géométrie dans la partie mécanique des roches de cette étude) aura une extension d'environ 1000 m x 750 m. Le plancher de la

trouvera voisin de la cote -270m NGF soit à 500 m de profondeur sans le sol. La couche inférieure de potasse surmontant la cavité a été totalement exploitée, alors que la couche supérieure ne l'a été que sur la moitié de celle-ci (voir la figure 17). L'exploitation de cette partie de la concession a pris fin en 1973.

II - ENVAHISSEMENT DE LA CAVITE DE STOCKAGE PAR LES EAUX, SCENARIO DE REFERENCE

Nous allons examiner divers scénarios d'intrusion d'eau dans les galeries de stockage en distinguant les risques à court terme couvrant la période d'estimation du site et les risques à long terme qui concernent la période qui débute avec la fermeture du stockage.

II.1 - Les risques à court terme

La durée d'exploitation de ce site sera de quelques dizaines d'années. Pendant cette période coexisteront les opérations de stockage et de creusement de la cavité. Dans ces conditions deux scénarios d'accident pouvant amener des eaux au contact des déchets peuvent être envisagés :

- La rencontre d'une arrivée d'eau lors du développement des galeries de stockage,
 - l'augmentation des fuites actuellement observées dans le puits de mine de la concession Amélie.
- * Rencontre d'une arrivée d'eau lors du développement de la cavité

Nous avons vu que le site de stockage sera situé à une vingtaine de mètres au-dessous de la couche inférieure de potasse exploitée dans les années 1970. Cette exploitation a mis en évidence la régularité des dépôts sédimentaires c'est-à-dire l'absence d'accidents géologiques locaux. Par ailleurs aucune venue d'eau n'a été observée à l'occasion des affaisements liés à cette exploitation. Ces éléments indiquent qu'aucune venue d'eau ne peut raisonnablement être envisagée à l'occasion du développement de la cavité de stockage.

- * Augmentation des fuites actuellement observées dans les puits de mine

L'ensemble des cinq puits de mine concernant la concession Amélie produisent actuellement un volume mensuel de 300 m³ (420 l/h). Cette eau provient de fuites de la partie supérieure du cuvelage des puits et est exhaurée à la surface. La position altimétrique des puisards récupérant l'eau à la base des puits (déjà précisée) montre que même en cas d'augmentation du débit de fuite, ce qui est peu vraisemblable compte tenu des visites périodiques et des observations passées qui ne montrent aucune aggravation, seul le puits Else pourrait produire des eaux à une altitude suffisante pour que celles-ci puissent atteindre la galerie de stockage. On peut donc facilement prendre les mesures préventives nécessaires pour éviter cette éventuelle situation en renforçant le système actuel d'évacuation des eaux de ce puits, ou bien en prenant des dispositions pour que l'eau ne puisse atteindre par ruissellement les galeries reliant le site à la mine et s'évacue vers les parties basses pendant que l'on procède à l'obturation de la venue d'eau.

En conclusion de cette discussion sur les risques à court terme on peut dire que l'on

voit mal quel accident raisonnablement envisageable pourrait compromettre la sûreté du site.

II.2 - Les risques à long terme : Scénario de référence

Cette période débiterait avec la fermeture des galeries de communication entre le site et la mine proprement dite. Nous distinguerons deux cas, le premier considère que la concession Amélie est maintenue dans son état actuel même s'il n'y a plus d'activité de stockage de déchets ou d'exploitation de potasse. Dans cette hypothèse les opérations de maintenance de l'état des cuvelages des puits sont effectuées régulièrement et les eaux de fuite sont exhaurées vers la surface. Avec ces hypothèses la mine évoluera peu par rapport à son état actuel puisque seulement les galeries de circulation creusées dans les horizons salifères vont petit à petit se refermer en raison du fluage du sel. On se retrouvera alors dans une situation identique à celle déjà évoquée plus haut et la sûreté sera conservée tant que cet état sera maintenu.

Dans l'autre cas nous adoptons l'hypothèse que la concession Amélie est abandonnée après le rebouchage des puits de mine. Le risque de contamination de la biosphère serait alors lié à la qualité de ce rebouchage. Considérons le scénario où ce rebouchage est parfait c'est-à-dire qu'il n'y a aucune circulation d'eau dans les matériaux de remplissage. Les seules entrées d'eau dans le système étant obturées totalement l'ensemble des travaux miniers resteraient secs et il n'y aurait pas de possibilité de contamination de la biosphère. Bien entendu un colmatage parfait des puits est peu réaliste sur une très longue période, il faut donc examiner le cas où ce rebouchage ne serait pas étanche. Les eaux percolant au travers des bouchons rempliraient peu à peu les cavités, la vitesse de remontée de l'eau et le temps de remplissage total dépendraient des débits de percolation. L'état final dépend ensuite essentiellement de la géométrie du système et des niveaux piézométriques des aquifères qui y sont connectés.

• Le remplissage des vides

L'estimation de ce temps de remplissage nécessite la connaissance des débits circulant dans les divers puits après leur rebouchage. Pour calculer ces débits nous allons adopter des hypothèses sur la circulation des eaux et fixer des fourchettes de valeurs aux paramètres qui nous font défaut. Nous proposerons ainsi un scénario de référence permettant de dégager des ordres de grandeur qui serviront de base à une discussion de l'influence des divers paramètres.

Les hypothèses adoptées sont les suivantes :

- Le puits est rempli depuis sa base, jusqu'au niveau du sol par des matériaux peu perméables (argiles, cendres volantes ...),
- l'épaisseur de remplissage prise en compte pour calculer le débit de percolation est celle qui est comprise entre l'horizon perméable le plus profond rencontré lors du creusement du puits et la cote de la recette supérieure de ce puits,
- la charge hydraulique motrice est prise égale à la différence entre la cote piézométrique de la nappe alluviale et la cote de la recette supérieure du puits. Nous considérerons

que cette charge motrice est constante dans le temps bien qu'en réalité elle tende vers zéro à partir de l'instant où l'eau atteint la cote de la recette supérieure.

Ces hypothèses toutes pessimistes conduisent à surestimer les débits ce qui va dans le sens de la sécurité.

Pour ce qui est de la perméabilité verticale des matériaux de remplissage nous avons adopté une valeur pénalisante de 5.10^{-7} m/s pour aller dans le sens de la sécurité.

L'application de la loi de Darcy avec ces hypothèses aboutit à un apport mensuel d'eau de 200 m³ qui remplira les vides.

On peut donc maintenant tracer l'évolution de la cote du plan d'eau dans la mine. On observe (figure 18) que les galeries de connexion reliant les cavités de stockage à la mine, voisines de la cote -270 m NGF seront atteintes au bout de 1500 ans. Ce n'est donc qu'à partir de ce moment que les déchets pourraient se trouver au contact de l'eau. La contamination éventuelle des aquifères proches de la surface ne pourra s'effectuer avant le remplissage total de la cavité qui demandera encore 800 années supplémentaires soit un total de 2300 ans après l'abandon du site.

On peut s'étonner que la valeur de 200 m³/mois retenue pour faire l'estimation dans l'hypothèse où les puits sont rebouchés est du même ordre de grandeur que celle qui est observée actuellement avec des puits ouverts. Ceci provient du fait que dans le premier cas il s'agit d'une estimation très pessimiste mais stable dans le temps, alors que dans le second le débit s'accroîtra inévitablement avec la dégradation des cuvelages et les éboulements des ouvrages qui en résulteront.

• Etat final du système

Après la phase de remplissage des vides l'eau aura atteint la cote -150 m NGF environ il faudra encore une dizaine d'années pour que s'établisse un niveau d'équilibre dans les différents puits de mine. C'est cet état stationnaire qu'il est intéressant d'approcher car il conditionne une éventuelle circulation d'eaux contaminées vers la biosphère.

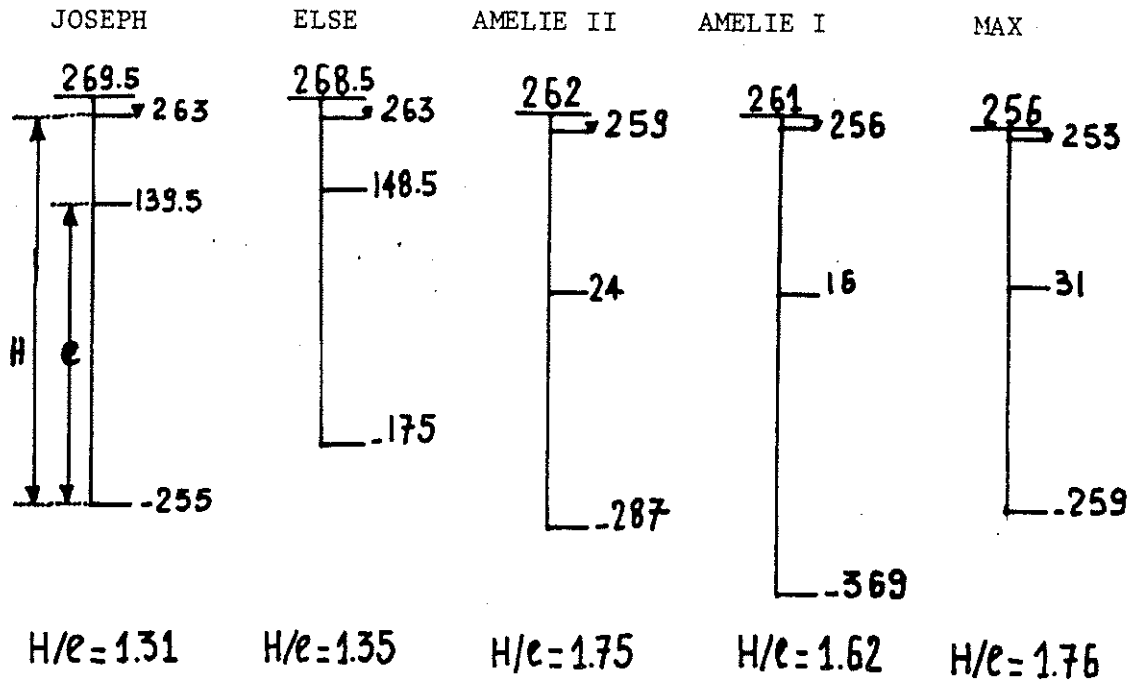
Cet état hydraulique dépendra de la géométrie du système, de la charge des aquifères qui sont en relation avec lui et de la salinité des eaux le remplissant. Considérons la figure 19 qui schématise le système et fait apparaître :

- Le niveau piézométrique des horizons perméables surmontant le bloc-hôte auxquels nous attribuerons la piézométrie de la nappe alluviale.
- Les cotes de la base des horizons perméables,
- les cotes des travaux miniers (recettes supérieures des puits).

Ces données permettent d'établir l'état d'équilibre final selon la salinité des eaux de remplissage.

Considérons tout d'abord le cas où de l'eau douce percole vers le bas à travers les bouchons d'obturation et que cette eau se sature en sel (densité 1,2) dès qu'elle atteint les travaux miniers. Après une phase transitoire complexe pendant laquelle d'une manière générale l'eau salée monte progressivement dans les travaux miniers, on aboutit à un état

Tableau III



H = charge hydraulique (m)

e = épaisseur active des bouchons (m)

A = Surface des puits (m²)

K_v = Perméabilité verticale des matériaux de bouchage (m/s)

$$Q_{m^3/h} = K_v \times A \times \frac{H}{e} \times 3600$$

$$A = 20 \text{ m}^2 \quad K_v = 5.10^{-7} \text{ m/s}$$

$$Q_{TOTAL} = 561600 K_v \text{ soit } \underline{200 \text{ m}^3/\text{mois}}$$

Mode de calcul du débit de remplissage des vides

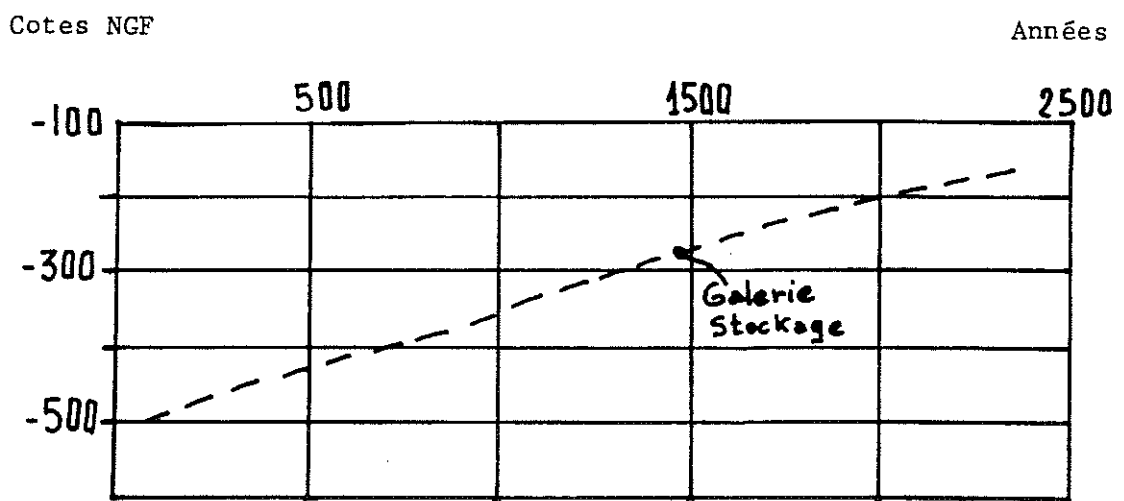


Figure 18 : Evolution du niveau de l'eau dans les travaux miniers

final où le puits Else se trouve rempli d'eau douce au-dessus de la recette supérieure alors que les autres présentent un interface eau douce-eau salée à des cotes différentes (cf. figure 19). On note que la position d'équilibre de ces interfaces est toujours très en dessous de la base des niveaux aquifères. Ceci signifie qu'un équilibre hydrostatique est théoriquement possible avec comme conséquence une absence de circulation de l'eau dans les vides résiduels et donc de transport d'une pollution vers l'environnement.

Ce résultat reste encore valable même si l'on considère que l'eau ne se sature pas totalement (densité 1,1 pour une salinité de 150 g/l).

Il faut également considérer le cas où l'eau acquiert une certaine salinité dans les puits au droit des formations salifères. Cette situation serait particulièrement pénalisante si le puits Else se trouvait rempli d'eau salée saturée dès le toit du sel à la cote -34 NGF. On constate que même dans ce cas (cf. figure 20) les interfaces eau douce-eau salée n'atteignent pas les terrains perméables et que l'équilibre hydrostatique est encore réalisé.

Ces résultats favorables du point de la sûreté du stockage, même après ennoyage, sont obtenus en considérant qu'il s'établit un interface abrupt en l'eau douce et l'eau salée. En réalité l'expérience montre qu'il existera une zone de transition d'épaisseur plus ou moins importante dont l'estimation est impossible. Dans la mesure où une concentration en sel même minime atteindrait les horizons aquifères, il s'établirait un écoulement visant à amener des eaux salées de la profondeur vers la surface, qui pourraient véhiculer des polluants. On peut donner une valeur maximale de ce flux en se plaçant dans les conditions, où il y a une homogénéisation de la salinité dans tout le système c'est-à-dire disparition des interfaces dans les puits. Ce schéma est nécessairement pessimiste puisque l'eau introduite dans le système est forcément plus douce donc moins dense qu'aux exutoires.

Le calcul du débit transitant dans le système constitué par l'ensemble des 5 puits et les travaux miniers s'effectue de la manière suivante :

- le calage hydraulique s'appliquant sur les bouchons des puits est imposée par la nappe alluviale (h_i pour les puits i),
- chaque bouchon est caractérisé par une conductivité hydraulique moyenne calculée par la formule :

$$\theta = \frac{S \cdot k}{L}$$

où $S = 20 \text{ m}^2$ surface de la section du puits

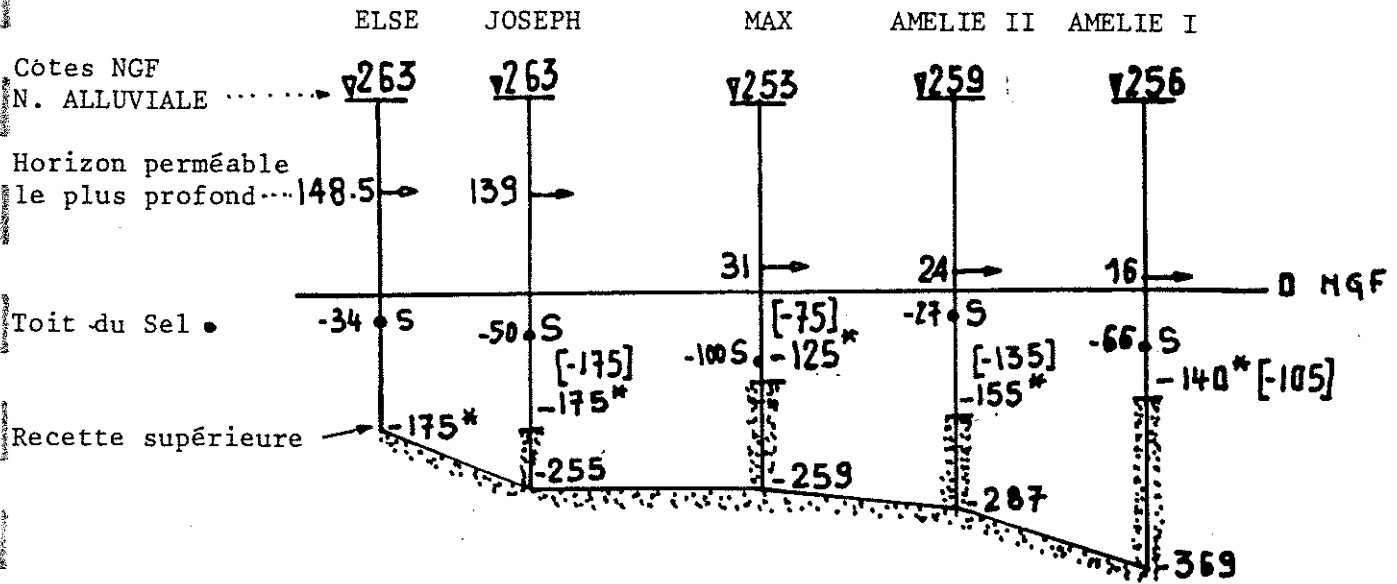
$K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ perméabilité de référence des matériaux constituant les bouchons

L longueur moyenne efficace d'un bouchon $\simeq 340 \text{ m}$.

- perméabilité très grande dans les travaux miniers vis-à-vis de celle des bouchons, d'où il résulte une charge uniforme h_o dans les travaux.

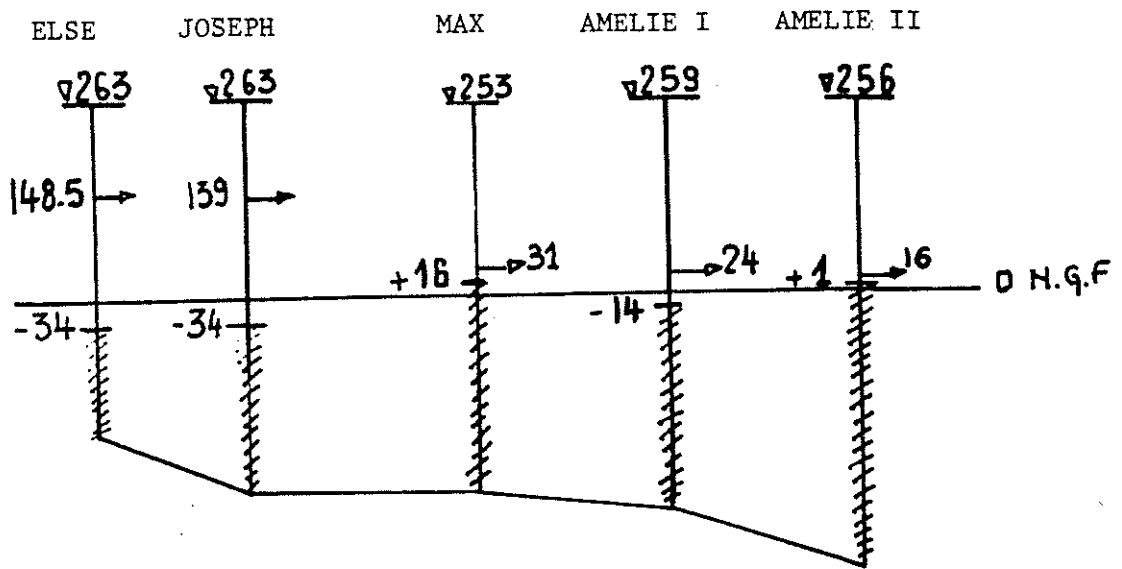
Le débit percolant dans chaque puits est donné par :

$$Q_i = \theta(h_i - h_o)$$



- 125* Cote de l'interface (Eau salée saturée d=1,2)
- [-135] Cote de l'interface (eau salée 150 g/l d=1,1)
- S Cote du toit du Sel en couche

Figure 19 : Etat final du système



- 34 cote de l'interface (eau salée saturée d=1,2)

Figure 20 : Etat final du système (puits ELSE rempli d'eau salée saturée à partir du toit du sel)

avec $\Sigma Q_i = 0$

L'application de ces relations avec les valeurs des niveaux piézométriques indiquées sur la figure 19 aboutit à un débit de circulation dans le système de $10 \text{ m}^3/\text{an}$.

- Le problème des dissolutions

L'envoyage des vides se fera comme nous l'avons vu par des eaux douces qui disposent d'un pouvoir de dissolution important (300 g/l). Ce phénomène est favorable du point de vue hydrodynamique puisqu'il conduit à terme au blocage par effet de densité des circulations souterraines.

La dissolution peut par contre être très gênante pour la stabilité à long terme des cavités ouvertes telles qu'elles se présentent par exemple dans les mines exploitées par chambres et piliers. Dans le cas présent, le problème ne se pose pas en ces termes puisque les affaissements sont déjà réalisés par foudroyage.

La quantité de sel dissoute lors de l'envoyage de la mine sera voisine de $1,65 \cdot 10^6$ tonnes (300 kg de sel par m^3 d'eau, pour un volume total de $5,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$) soit $800\,000 \text{ m}^3$. Ce volume, réparti sur l'ensemble de l'exploitation, représente une lame de sel de 3 cm environ, dont la disparition n'aura pas de conséquence sur la stabilité régionale des terrains.

Après envoyage la circulation d'eau souterraine étant bloquée la dissolution s'arrêtera du même coup. Dans le cas où l'on admet le débit maximal de circulation de $10 \text{ m}^3/\text{an}$, le calcul aboutit à la dissolution d'une lame de sel théorique moyenne de $0,06 \text{ mm}$ en 1000 ans. Ce dernier résultat a peu de signification car avec un débit aussi faible la dissolution s'effectuera en des points localisés du système.

Il ressort de ces considérations que le phénomène général de dissolution représente un risque mineur pour l'évolution à long terme.

III - DISCUSSION DU SCENARIO DE REFERENCE

Au chapitre précédent il a été proposé un scénario de comportement à long terme du stockage reposant sur la persistance des caractéristiques géométrique et hydraulique du bloc-hôte au cours du temps ainsi que sur un jeu de mécanismes vraisemblables. Nous allons à présent discuter les hypothèses faites.

III.1 - Les relations avec la mine Marie-Louise

Le point sensible du bloc-hôte tel qu'il a été défini se situe au niveau du stot séparant la mine Amélie de la mine Marie-Louise qui limite le bloc-hôte vers le nord.

Ce stot est situé en aval pendage du côté Amélie et en position de cul-de-sac vis-à-vis des éventuelles circulations d'eau dans les vides. Il est donc raisonnable de penser que l'attaque par dissolution sera très réduite sur cette face du stot car l'eau qui baignera sera peu mobile et peu agressive. L'attaque par contre risque d'être plus active du côté Marie-Louise par le fait que l'on se trouve en amont pendage ce qui favorise le développement

d'une érosion régressive par de l'eau non saturée qui a tendance à remonter. On ne peut donc exclure un percement du stot à très long terme, qui ne pourrait en tout état de cause intervenir qu'après l'ennoyage de la mine Marie-Louise.

Nous nous intéressons donc successivement aux mécanismes d'ennoyage de la mine Marie-Louise et à l'état final d'un système hydraulique pour lequel les deux mines seraient en communication.

- L'ennoyage de la mine Marie-Louise

L'estimation de la durée d'ennoyage peut être faite en admettant les mêmes hypothèses de travail que pour le cas d'Amélie.

Dix puits mettent en relation les travaux miniers avec le jour, qui seront rebouchés lors de l'abandon de la mine. Trois d'entre eux sont d'ailleurs déjà obturés. Le débit total d'eau qui s'introduit par ces puits et qui est exhauré est actuellement voisin de 2400 m³ par mois.

Des calculs conduits avec les mêmes hypothèses que dans le cas de la mine Amélie (perméabilité des bouchons de 5.10⁻⁷ m/s) conduisant à estimer le débit de fuite à long terme après rebouchage des puits à 580 m³/mois.

Compte tenu des surfaces de potasse exploitées dans le secteur Marie-Louise (22 km² en couche supérieure et 26 km² en couche inférieure) et de la persistance d'un vide résiduel de 5% après foudroyage et tassement, le volume disponible à l'ennoyage est de l'ordre de 7.10⁶ m³.

Il résulte de ces estimations que la mine sera totalement noyée dans un délai de 1000 ans.

- La dissolution du stot

La dissolution du stot situé en amont pendage ne pourra intervenir qu'en fin de période de remplissage. Nous tenterons une approche calquée sur le cas de la mine Amélie pour estimer les débits circulant à terme dans les vides qui représenteront une limite supérieure du débit d'eau douce pouvant lixivier le stot.

Comme nous l'avons vu le cas le plus défavorable pour les conditions de circulation est celui où la densité de l'eau est uniforme dans tout le système. Le calcul du débit transitant dans les vides résiduels appliqués au 10 puits conduit à une valeur de 42 m³/an.

Ce débit est capable de dissoudre à saturation environ 6 m³ de sel par an. En considérant que le stot fait 4 km de long sur 5 m de haut, la surface globale en contact avec l'eau serait de 20000 m², ce qui veut dire qu'il faudrait un peu plus de 3000 ans pour réduire d'1 m l'épaisseur moyenne du stot, soit encore 60000 ans pour le faire disparaître totalement. Ce calcul ne doit pas être pris au pied de la lettre pour deux raisons dont les conséquences s'opposent :

- L'éloignement des puits introducteurs d'eau douce et l'épaisse série salifère située au toit des vides résiduels font que l'eau sera très proche de la saturation lorsque elle atteindra le stot.

- La dissolution sera vraisemblablement plus active en des points localisés.

Néanmoins on peut conclure de ces réflexions qu'une mise en communication des deux mines avant un minimum de 10000 ans est peu réaliste.

- L'état final après mise en communication des mines

Une fois la communication établie entre les deux mines, les deux systèmes hydrauliques jusque là indépendants n'en formeront plus qu'un et l'état final sera commandé pour les niveaux piézométriques des aquifères en relation avec les 15 puits rebouchés. On peut montrer qu'un équilibre hydrostatique lié aux contrastes de densité entre la saumure et l'eau douce, n'est plus possible comme cela était le cas lorsque la mine Amélie restait hydrauliquement isolée. Ceci tient à l'approfondissement vers le nord des niveaux perméables de la couverture de la série salifère.

Nous estimerons donc le débit transitant dans le système hydraulique général et susceptible de rejoindre les aquifères après avoir lixivié des déchets d'après la valeur calculée des débits d'eau douce introduit par les puits Joseph et Else qui sont les seuls situés en amont des déchets par rapport à l'écoulement.

Les calculs conduits selon la méthode déjà exposée montrent que les 5 puits de la mine Amélie seront introducteurs. Le débit total transitant s'élève à $90 \text{ m}^3/\text{an}$ dont $38 \text{ m}^3/\text{an}$ proviennent des puits Joseph et Else. Les exutoires majeurs sont les puits d'Ungersheim qui évacuent $40 \text{ m}^3/\text{an}$.

III.2 - Discussion des hypothèses

Avant de discuter les hypothèses nous rappellerons les résultats obtenus correspondant au scénario de référence.

- Mine Amélie isolée
 - Délai d'atteinte des déchets par l'eau : 1500 ans.
 - Ennoyage total des vides de la mine : 2300 ans.
 - Etablissement vraisemblable d'un régime hydrostatique bloquant les effluents.
 - Débit en cas de circulation des eaux : inférieur à $10 \text{ m}^3/\text{an}$.
- Mine Marie-Louise isolée
 - Délai d'ennoyage : 1000 ans.
 - Débit de circulation des eaux : $42 \text{ m}^3/\text{an}$.
 - Délai de mise en communication des deux mines par dissolution du stot : > 10000 ans.
- Système communiquant (Amélie et Marie-Louise)
 - Débit de circulation global : $90 \text{ m}^3/\text{an}$.
 - Débit introduit susceptible d'être contaminé : $38 \text{ m}^3/\text{an}$.

Ces résultats numériques obtenus par ailleurs avec des hypothèses pessimistes sont conditionnés par deux paramètres essentiels :

- Le volume attribué aux vides résiduels des travaux miniers.
- La perméabilité des bouchons réalisés dans les puits.

Nous discuterons successivement l'influence de ces paramètres.

• Le volume des vides influe uniquement sur les délais de remplissage et n'a, par contre, pas d'influence sur le fonctionnement hydraulique final du système et en particulier sur le débit susceptible d'y transiter, dans la mesure où nous avons admis l'hypothèse pessimiste que la perméabilité des zones foudroyées restait grande devant celle des bouchons et indépendante de la compaction. Ce paramètre n'est donc pas essentiel pour l'objectif de cette étude de sûreté à long terme. Nous avons admis que les vides résiduels au moment de l'abandon du stockage représenteraient 5% des vides d'exploitation, cette valeur étant justifiée par l'observation des affaissements miniers en surface. Il est vraisemblable que cette porosité continuera à diminuer au cours du temps avec une vitesse que l'on a tenté d'évaluer en modélisant le phénomène de compaction après foudroyage.

Le calcul suppose que la zone foudroyée a une épaisseur suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que la contrainte verticale est constante et égale au poids des terrains et que la contrainte horizontale qui a été libérée au moment du foudroyage se rétablit progressivement jusqu'à la valeur de la contrainte verticale au cours du compactage.

La figure 21 présente l'évolution du pourcentage de vides résiduels en fonction du temps et permet de dégager les valeurs suivantes.

Date (ans)	100	1000	3000	10000	100000
% de compaction des vides résultant du foudroyage	50	62	66	70	75

On constate qu'au moment de l'abandon du stockage, l'essentiel des zones d'exploitation de la potasse seront d'un âge supérieur à 100 ans, ce qui veut dire que plus de la moitié de la compaction sera déjà effectuée. Sur la période 100 à 3000 ans pendant laquelle la mine devrait se remplir la compaction ne variera que de 15% ce qui ne modifie pas l'ordre de grandeur de la durée de remplissage avancée. On conclura donc que le phénomène de compaction ne joue pas un rôle majeur dans l'estimation de ce temps de remplissage.

• La perméabilité des bouchons agit simultanément sur les délais de remplissage et sur les débits transitant dans l'état final. Ce paramètre a donc une influence directe sur l'impact à long terme car il conditionne les flux d'eau éventuellement contaminés qui parviendraient dans l'environnement.

Nous avons admis pour nos calculs une perméabilité de 5.10^{-7} m/s qui est largement supérieure à celle de matériaux argileux couramment rencontrés dans la nature pour lesquels des valeurs de 10^{-8} à 10^{-10} m/s sont observées. La valeur choisie est donc pessimiste si l'obturation est effectuée dans de bonnes conditions techniques. Nous considérerons donc que les débits qui résultent et qui sont proportionnels à cette perméabilité sont évalués par excès.

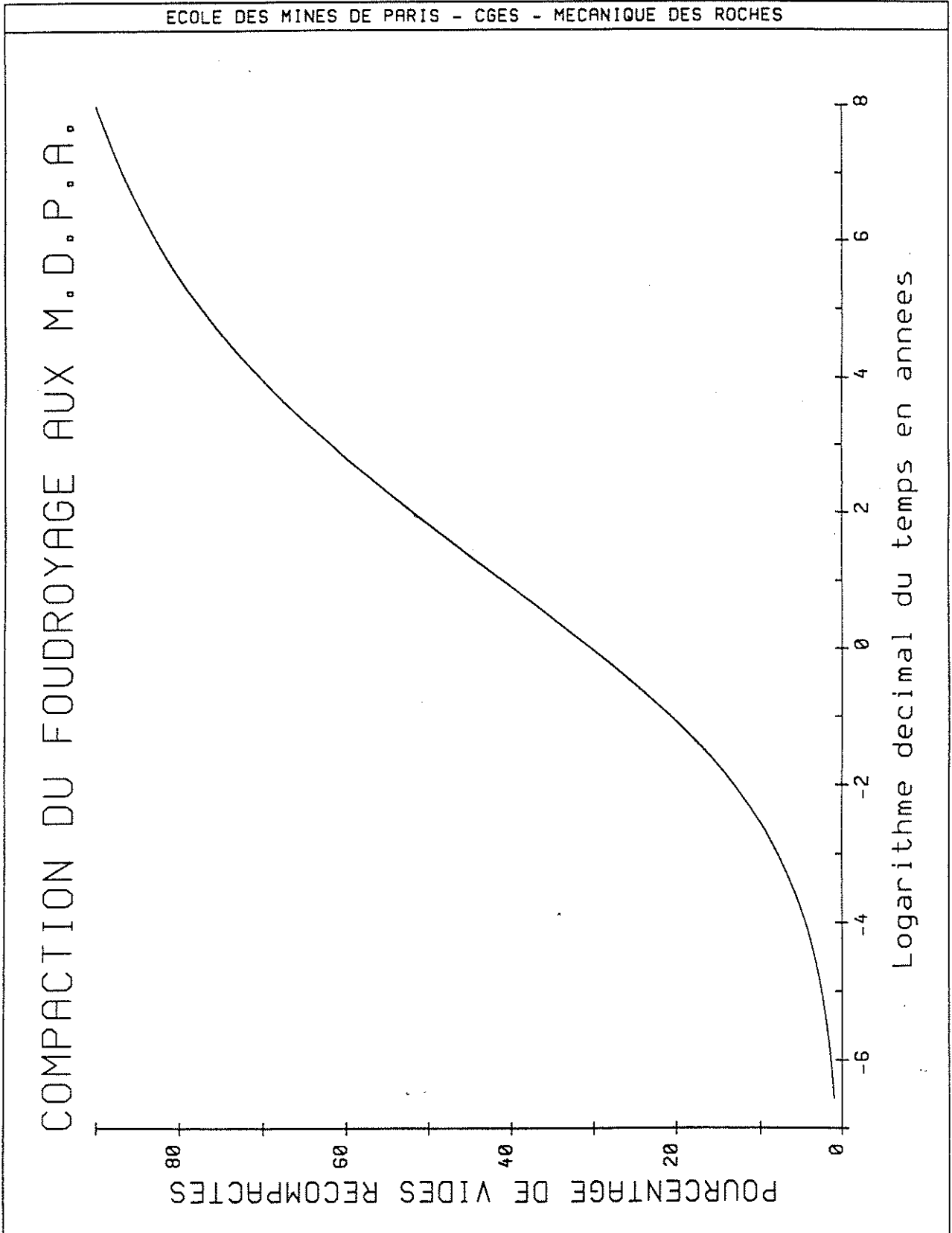


Figure 21 : Evolution des vides résiduels après foudroyage

IV - ANALYSE DES RISQUES VIS A VIS DE L'EAU SOUTERRAINE

De l'exposé précédent nous tirons les conclusions suivantes :

- Le risque de contamination par de l'eau polluée de l'environnement pendant les années d'exploitation du stockage sont nuls,
- après abandon du stockage et obturation des puits de mine les déchets ne sont atteints par l'eau qu'après près de 1500 ans et il faudra encore attendre 800 ans pour que s'établisse une continuité hydraulique entre l'eau remplissant les vides et les aquifères de la couverture du bloc- hôte.
- une fois la continuité hydraulique établie, la situation devrait tendre théoriquement vers un état hydrostatique, n'autorisant aucune circulation dans les travaux miniers et par conséquent aucun rejet de polluant vers la biosphère,
- cependant il est raisonnable de tempérer ce schéma théorique fondé sur une séparation tranchée entre l'eau douce et l'eau salée et de considérer une variation progressive de la salinité dans les puits. Dans cette hypothèse le débit maximal qui peut circuler est de $10 \text{ m}^3/\text{an}$, dans les conditions hydrogéologiques actuelles,
- dans le cas où une communication hydraulique s'établirait avec la mine Marie-Louise, ce qui demanderait au moins 10000 ans, ce débit maximal serait porté à $40 \text{ m}^3/\text{an}$.

Nous allons à présent nous interroger sur les conséquences de ce rejet sur la qualité de l'eau des aquifères superficiels.

IV.1 - Mécanismes de pollution des aquifères superficiels

Le rejet considéré ne peut avoir qu'une faible salinité car c'est justement la dilution par l'eau des aquifères supérieurs qui est le mécanisme responsable de l'émission de l'effluent. Il est toutefois impossible de donner une évaluation précise de la concentration, qui dépend de nombreux facteurs non maîtrisés tels que la diffusion dans le matériau de remplissage des puits et de la vitesse d'écoulement dans les aquifères.

La concentration en polluants de l'effluent dépendra essentiellement de deux facteurs :

- la solubilité des substances stockées dans l'eau qui aura été en contact avec les déchets,
- la géométrie des écoulements au sein des discontinuités du bloc-hôte qui fait que seul une partie de l'eau aura pu être contaminée. Cette dilution à l'intérieur des vides occupés par l'eau n'est pas quantifiable en raison notamment de la complexité des échanges entre les travaux miniers et les cavités de stockage par l'intermédiaire des galeries de communication qui les relieront.

L'eau contaminée atteindra d'abord les horizons peu perméables de l'Oligocène qui surmontent le bloc-hôte et finira par rejoindre la nappe alluviale qui représente la structure de drainage régional du système hydrogéologique.

IV.2 - Conséquences de la pollution des aquifères : scénario puits

L'eau de la nappe s'écoule vers les exutoires naturels représentés par les rivières et vers les puits de prélèvement. Dans le cas où les effluents contaminés seraient émis par le stockage la pollution apparaîtrait vraisemblablement de manière assez localisée au voisinage des puits qui sont les exutoires naturels du bloc-hôte. Il se formerait un panache de pollution par dilution dans l'écoulement de la nappe qui se dirigerait lui-même vers les exutoires naturels et éventuellement vers les puits d'exploitation.

La qualité de l'eau extraite dépendra de plusieurs facteurs :

- Des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère,
- du débit et la concentration de l'effluent parvenant à la nappe,
- des débits et de la position des forages d'exploitations.

Dans la mesure où la concentration en polluants des effluents n'est pas quantifiable, nous adopterons une approche globale, dans le cadre d'un scénario puits, du facteur de dilution par l'écoulement de la nappe.

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale (transmissivité $> 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) un puits donnera facilement un débit de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ soit environ $900\,000 \text{ m}^3/\text{an}$. En admettant ce qui est pessimiste que le forage draine l'ensemble de l'effluent soit 10 à $40 \text{ m}^3/\text{an}$ au maximum, la dilution sera au moins d'un facteur $25\,000$ à $100\,000$.

Remarquons que puisque le débit d'effluent n'est pas influencé ou très peu par le débit pompé dans la nappe le facteur de dilution augmente avec ce dernier. Ainsi un champ de captage destiné à l'alimentation d'une collectivité sera moins vulnérable qu'un ouvrage particulier qui pourrait se trouver défavorablement placé.

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude qui avait pour objet d'examiner la sûreté du projet de stockage de déchets toxiques dans des cavités creusées dans la couche de halite de la mine Amélie on peut ainsi résumer les principaux résultats acquis.

Au niveau du bloc-hôte les conditions sont extrêmement favorables

- du point de vue lithologique et tectonique

Le site est localisé au sein d'une série imperméable de 1200 m d'épaisseur dont la structure est calme et exempte d'accidents proches et importants pouvant jouer un rôle dans la circulation de l'eau souterraine.

- du point de vue hydrogéologique

Les aquifères qui encadrent le bloc-hôte sont situés à 1000 m sous le stockage pour ce qui concerne les calcaires du Jurassique Supérieur et à 500 m au-dessus pour l'aquifère alluvial. Seule la nappe alluviale est actuellement exploitée pour l'eau potable.

Aucune venue d'eau d'origine naturelle n'a jamais été rencontrée au cours de l'exploitation dans cette partie du bassin potassique, malgré l'extension des travaux miniers qui sont menés depuis près d'un siècle. Les seules occurrences d'eau observées sont artificielles et correspondent à des fuites du cuvelage des puits de mine qui sont exhaurées.

- du point de vue de l'état final du système

Malgré un rebouchage extrêmement soigneux des puits de mine, on devrait aboutir à terme à un ennoyage des cavités et vides résultant de l'exploitation. Cependant, une évaluation dans des hypothèses très pessimistes montre que les déchets resteront hors d'eau pendant plus de 1500 ans, et qu'il faudra encore 800 années supplémentaires pour que s'établisse une continuité hydraulique avec les aquifères de surface par l'intermédiaire des puits de mine rebouchés. A partir de ce moment, grâce à l'effet densitaire provoqué par la dissolution du sel, les calculs montrent que l'on doit aboutir à un régime hydrostatique interdisant toute circulation au sein du bloc-hôte vers la nappe alluviale. Pour aller dans le sens de la sécurité le calcul a également été mené en écartant l'effet densitaire et indique que le débit maximum des effluents en nappe ne peut excéder 10 m³/an.

Après 10000 ans une communication avec la mine Marie-Louise pourrait s'établir par dissolution du stot de séparation, ce qui aurait pour conséquence de porter ce débit à 40 m³/an.

- du point de vue de la dilution des eaux contaminées

Cette dilution intervient à deux niveaux, d'une part au sein du bloc-hôte puisque toute l'eau qui y circulerait éventuellement ne passerait pas à travers les galeries de stockage, d'autre part au débouché de la nappe alluviale très productive.

- du point de vue de la stabilité des terrains

Le faible débit d'eau prévisible dans les travaux et l'absence de cavités importantes liée à la méthode d'exploitation font que le phénomène de dissolution n'entraîne pas de risques particuliers sur la stabilité de la région.

Il apparaît donc que le site proposé présente à beaucoup d'égards des conditions de

sécurité excellentes, même à très long terme. Compte tenu des ordres de grandeur dégagés en situation pessimiste au cours de l'étude, une persistance des conditions favorables de confinement sur une durée minimum de 10 000 ans peut raisonnablement être retenue.