

(15a)



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes

Etude bibliographique

STOCAMINE

O. BOUR

*Unité Déchets et Sols Pollués
Direction des Risques Chroniques*

21 décembre 2001

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi au vu des informations fournies à l'INERIS et compte tenu des connaissances techniques et scientifiques connues à ce jour.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

L'INERIS ne peut être tenu pour responsable des décisions prises en application de ses propositions ou des conséquences engendrées par le non-respect ou l'interprétation erronée de ses recommandations.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent document intégralement ou de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes

Etude bibliographique

STOCAMINE

21 DECEMBRE 2001

Ce document comporte 16 pages (hors couverture et annexes).


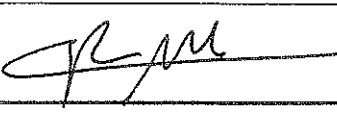
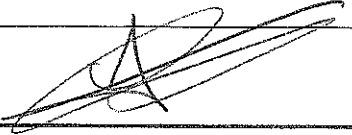
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	O. BOUR	H. BAROUDI	F. MARCEL
Qualité	Ingénieur à l'Unité « Déchets et Sites Pollués » Direction des Risques Chroniques	Ingénieur à l'Unité « Déchets et Sites Pollués » Direction des Risques Chroniques	Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	3
1.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.2 DOCUMENTS ANALYSES.....	3
1.3 CADRE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	3
1.3.1 <i>Données préalables à la recherche bibliographique fournies par les Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)</i>	3
1.3.2 <i>Connaissance du comportement des cendres en terme de perméabilité (données INERIS)</i>	4
2. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	4
2.1.1 <i>Les dispositifs d'étanchéité utilisés en digue</i>	4
2.1.2 <i>Dispositifs de limitation des intrusions d'eau</i>	6
2.1.3 <i>Mises en place du bouchon</i>	7
2.1.4 <i>Comportement des cendres sous eau</i>	7
2.1.5 <i>Utilisation de la bentonite</i>	11
3. CONCLUSIONS	13
3.1 SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	13
3.2 AXES DE RECHERCHE POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERMÉABILITÉ DES BOUCHONS	13
3.2.1 <i>Mise en place des bouchons de cendres</i>	13
3.2.2 <i>Mise en place de matériaux argileux</i>	13
3.2.3 <i>Dispositif permettant de tester le colmatage périphérique</i>	14
4. BIBLIOGRAPHIE.....	15

1. INTRODUCTION

1.1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette étude a pour objet le comportement à long terme des cendres de centrales sous charge hydraulique et les divers procédés d'amélioration des caractéristiques de perméabilité d'un bouchon de cendres. Les éléments suivants ont été recherchés :

- Utilisation de cendres volantes en tant que bouchons en mine ;
- Matériaux utilisés en tant que bouchons en mine ou scellements étanches, vis-à-vis du critère de perméabilité ;

Les articles traitant des éventuelles modifications physico-chimiques (échanges de cations, précipitations, ...) dues aux interactions avec une eau susceptible d'être fortement chargée en sels ont été également recherchés.

1.2 DOCUMENTS ANALYSES

La sélection d'une dizaine d'article a été réalisée à partir des résumés provenant des banques de données spécialisées (essentiellement dans le domaine de l'énergie).

La recherche a été faite en considérant les articles traitant de l'étanchéité et des cendres volantes ainsi que ceux traitant de la réalisation de bouchons étanches en domaine minier.

1.3 CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.3.1 Données préalables à la recherche bibliographique fournies par les Mines de Potasse d'Alsace (MDPA)

Le rapport 12-99/XE du service des études générales des MDPA cite les matériaux les plus souvent utilisés lors de la recherche de faibles perméabilités (argiles, produits bitumineux, résines chimiques).

Les contacts pris auprès de DAMREC avaient écarté l'utilisation de la bentonite en raison du risque de floculation au moment de la mise en place du fait de la salinité du milieu. L'argile kaolinique était citée également mais nécessiterait un compactage afin d'atteindre des faibles perméabilités.

Pour ce qui concerne les produits bitumineux, des problèmes de mise en place à chaud pour le produit pur ont été énoncés. La mise en place à froid paraîtrait possible après définition d'un protocole.

Les résines chimiques citées nécessiteraient également des essais de laboratoire afin de vérifier la compatibilité avec le but recherché.

Les conditions de mise en place particulière, quelquefois sous eau et sans possibilité d'intervention directe éliminent les matériaux nécessitant un compactage.

La construction à partir d'agrégats couverts par du bitume est présentée. De manière idéale, les vides des agrégats devant être comblés par le bitume doivent être larges et plutôt à température tiède. Des tests de laboratoires montrent une pénétration sur une profondeur de 20 à 30 cm du bitume sur des agrégats arrondis de dimensions comprises entre 19 à 76 mm et à une température environnante supérieure à 3°C, le bitume étant versé à une température de 160 °C.

L'utilisation de "béton plastique" est également évoquée ainsi que celle de béton bitumineux pour la construction de diaphragmes verticaux étanches. Ces compositions sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Formulation "béton plastique" n°1	Formulation "béton plastique" n°2	Formulation béton bitumineux*
<ul style="list-style-type: none"> - 12% de ciment Portland - 2,5 % de bentonite 570 Fullbent - 85,5 % d'agrégats de 12 mm - un ration eau/solide de 0,24. 	<ul style="list-style-type: none"> - 5% de ciment Portland - 10% d'argile - 15% de silt - 85% de sable silteux placé à une teneur en eau de 30% 	<ul style="list-style-type: none"> - calcaires de 12 à 25 mm complétés avec des fines - vides comblés par 7,5 à 8,5 % de bitume. - Le tout est mixé à une température de 160 à 210 °C

Les boues de ciment expansé (une forme de béton cellulaire) sont citées également (Clark A.G., Virta M.R., Colaizzi G.J., 1989) en tant que matériau pouvant être utilisé dans les remblais de galeries. Les bétons cellulaires sont des formes de béton contenant des cellules stables de gaz uniformément distribuées dans le mélange. Ces bétons sont généralement relativement perméables du fait de leur caractère expansé mais peuvent en fonction des adjuvants avoir une perméabilité fortement variable. Les boues de ciment expansives testées présentent des perméabilités échelonnées entre $4 \cdot 10^{-9}$ m/s et $6 \cdot 10^{-4}$ m/s. Des études sur un mélange particulier montrent que le coefficient de perméabilité est inversement proportionnel au poids unitaire de l'échantillon.

On ne dispose néanmoins que de peu de mesures permettant de connaître les compositions et les perméabilités atteintes par les mélanges ciment-additifs, bien que soit cité un réactif permettant de créer des mélanges de qualité plus imperméable.

Pour ce qui concerne le renforcement de l'étanchéité, un renforcement par des feuilles plastiques est cité (Penman, 1985). Des feuilles de plastiques de 0,76 mm d'épaisseur ont été utilisées en renforcement de l'étanchéité de noyau argileux des barrages

2.1.2 Dispositifs de limitation des intrusions d'eau

Les rideaux de coulis sont souvent utilisés pour permettre la foration en limitant les intrusions d'eau.

Ces coulis sont distingués selon le type de ciment et leurs composants. Ils comprennent :

- les solutions à base de polymères inorganiques ;
- les solutions à base de polymères organiques (bitumes, latex, résines) ;
- les solutions à base de substances synthétiques et de minéraux naturels (ciment et ajout).

Les coulis à base d'argile présentent l'avantage d'être peu onéreux pour une mise en place à l'échelle des travaux d'étanchéification.

Les propriétés des coulis à base d'argile dépendent de la composition et de la teneur de leurs constituants. L'expérience de K. Roman (2000) sur des échantillons provenant de 60 mines de minéraux argileux a amené à la conclusion que le meilleur matériau pour la constitution de coulis sont les argiles polyminérales composées d'illite et de kaolinite par comparaison aux argiles constituées exclusivement de montmorillonite.

A partir du choix d'une mixture d'argile (caractérisée physiquement par la densité, la viscosité, la contrainte de cisaillement, la quantité de sable, le pourcentage de précipitation en 24H), l'addition du type de ciment est déterminée par les conditions locales, soit la température et la composition chimique de l'eau souterraine.

Une application de solution de coulis sur la base d'une argile polyminérale sous des conditions d'apparition d'eaux très chargées en sels est décrite, en particulier la construction de rideaux d'étanchéité dans des formations salifères. La minéralisation liée aux horizons de gypse puis de sels atteint en effet des teneurs de 130 à 320 g/l.

Des réactifs ont été nécessaires du fait de la forte concentration en sels de magnésium (30-120 g/l).

La solution a consisté en :

- 21-24% d'argiles polyminérales ;
- 7,2 - 10,5 % de réactifs (non renseignés) ;
- eau salée (complément à 100%).

Une mixture de ce type, composée de matériaux locaux, a également été préparée pour réaliser une couverture étanche autour d'une exploitation souterraine de diamant en Sibérie. Les eaux étaient fortement agressives et minéralisées (90-130 g/l de sels, teneur en sulfate de 6g/l, température de -2°C).

2.1.3 Mises en place du bouchon

Seul un article (Pierau, 1989) traite du problème particulier du remplissage du puits en prenant en compte les circulations parasites à l'extrados du cuvelage par les fissurations existantes dans le terrain naturel.

Le remplissage du puits est prévu en effet par un mélange de matériaux argileux comprenant une fraction fine pour réaliser l'étanchéité désirée. L'étanchéité des niveaux fissurés est supposée réalisée par le gonflement des matériaux argileux existant ainsi que par l'injection sous pression d'une suspension d'argile.

Dans le cas du stockage de déchets radioactifs, la barrière est supposée avoir une efficacité pendant une période de plus de 10 000 ans. Les matériaux tels que le béton ou les autres matériaux artificiels n'ont pas été sélectionnés pour les critères de durabilité.

Trois portions du puits ont été isolées afin de définir des critères de perméabilité du remplissage du puits, la difficulté consistant à prévoir le traitement particulier à réaliser dans la zone située à l'extrados du puits.

Les considérations de l'effet silo sur les parois du puits et des contraintes résultantes sur les fissures sont abordées.

La réalisation de bouchons étanches est recherchée pour les applications de stockage de gaz. Dans le cas du bouchage de puits non initialement remblayé la méthode classique de mise en place de béton et d'injection de boues de ciment est pratiquée. Dans le cas de puits déjà remblayés ou endommagé, la congélation des parois du puits a été appliquée avec succès (Butteiens, 1979) afin de renforcer celui-ci avant l'évacuation des déblais et la réalisation d'un nouveau bouchon.

2.1.4 Comportement des cendres sous eau

2.1.4.1 Comportement physico-chimique

Le comportement des cendres a été souvent étudié du point de vue de leur impact en terme de métaux lourds et plus particulièrement pour les cendres provenant de l'incinération des ordures ménagères.

Les effets négatifs reportés concernant l'utilisation des cendres dans les travaux souterrains concernent l'augmentation du pH jusqu'à des valeurs de 12 et une augmentation des teneurs en sels, en particulier en sulfates.

Le relargage de sulfates à partir de cendres est un phénomène commun. Les résultats de test de lixiviation sur les cendres de centrales de l'article (Cempiel & al., 2000), montrent des taux de sels lixiviés atteignant 6,8 à 5,5 % de la masse de cendres.

Les expériences montrent une lixiviation des chlorures suivie de celle des sulfates, dont le processus est plus lent.

Un lessivage des cendres a été réalisé par une eau de mine saumâtre relativement minéralisée et légèrement alcaline : 20 g/l de minéralisation contenant 9 600 mg/l de chlorures et 1 050 mg/l de sulfates. Une quantité d'eaux minières de 9 l a ainsi percolé des échantillons de 500 g de cendres.

Les eaux minières ont lixivié une part massique de cendres plus faible que l'eau distillée et égale à environ 5,4 % à 4,5 % des cendres.

Les expériences montrent une augmentation significative de la minéralisation des premiers litres de filtrat liée en particulier au lessivage des chlorures. Les sulfates sont relargués plus lentement mais leur quantité augmentent significativement dans le temps. Dans le cas étudié, la teneur en chlorures double alors que celle en sulfates triple. Ces changements ne sont visibles que sur les deux premiers filtrats correspondant à deux percolations successives de 1 l.

Les cendres étudiées ne sont pas calciques (teneur en CaO inférieure à 10%). Leur forte teneur en fer (8% en terme de Fe₂O₃) n'induit pas de forme soluble du fait de la prédominance des formes de sulfures.

En tant que matériau les cendres étudiées étaient fortement poreuses (n = 44 à 52%) mais sujettes à la compaction (n = 11 à 13%).

Ces cendres silico-alumineuses des centrales polonaises de Laziska et de Lagiska sont de qualité comparable à celles provenant de la centrale Emile Huchet de Freyming Merlebach utilisé par les MDPA. Le tableau ci-dessous présente leurs principales caractéristiques physico-chimiques.

Constituant chimique	Centrales de Laziska et Lagiska	Centrale Emile Huchet
SiO ₂	42,7 - 45 %	43 - 54 %
Al ₂ O ₃	25,7 - 29,6 %	22 - 32 %
Fe ₂ O ₃	8,2 - 10,1 %	4 - 15 %
CaO	3,2 - 5,5 %	1 - 8 %
MgO	2,5 - 3,5 %	1 - 3 %
Humidité	0,95 - 1,79 %	< 20 %
Granulométrie	80% < 0,1 mm	0,2 - 0,0005 mm

Dans le cas des régions ayant plus de 800 mm de précipitations météoriques annuelles, la teneur en eau des cendres ainsi exposées aux précipitations météoriques atteignait des valeurs comprises entre 33% et 60% pour une mise en place à une teneur en eau comprise entre 25% et 33%.

Tableau de comparaison du relargage des différentes cendres (données MDPa et Cempiel, 2000).

Composant relargué	Centrales de Laziska et Lagisza teneur en mg/l	Centrale Emile Huchet Teneur en mg/l
	Essai statique 24H	Lixiviation X31-210
Ca ²⁺	393 - 569	1 291
Mg ²⁺	49 - 58	299
Cl ⁻	1 697 - 1653	30
SO ₄ ²⁻	468 - 683	4 300
HCO ₃ ⁻	61 - 97	600

Il faut noter que les sulfates et les carbonates sont lixiviés moins rapidement dans le cas des cendres volantes des centrales de Laziska et de Lagisza car les essais statiques de 24 H fournissent des valeurs par défaut, en comparaison au protocole de lixiviation en milieu agité de la norme X31-210 utilisé pour les cendres volantes produites par la centrale Emile Huchet.

On remarque néanmoins que les teneurs du lixiviat en chlorures sont moins élevées sur les cendres de la centrale Emile Huchet alors que celles en sulfates sont plus élevées.

Dans le cas de cendres à caractère plus calcique ou sulfocalcique, les ions Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, et Cl⁻ dominant souvent la chimie des lessivats (Jaroslav & al., 1995).

Les cendres polonaises stockées dans les travaux miniers ont présenté des teneurs en sels beaucoup plus importantes que les cendres fraîches du fait des chlorures et sulfures présents dans les eaux de préparation des mélanges de cendres/eau lors de la mise en place.

La filtration ou percolation de ces cendres par les eaux minières à 20 g/l de minéralisation produit moins de composés solubles que la lixiviation statique de l'échantillon. L'alcalinisation de l'eau par les cendres fraîches (pH supérieur à 10) n'a pas été observée après plusieurs années de stockages des cendres dans les travaux miniers.

Les études à réaliser dans le cadre du comportement géochimique à long terme sont citées essentiellement dans le cas des matériaux de type ciment ou de type argileux utilisés pour l'étanchéité des puits (Melchior, 1988).

Les réactions de dissolution/précipitation, de changement de phase et d'échange cationique sont citées comme pouvant influencer de manière sensible la perméabilité des matériaux formant le bouchon d'un puits.

Dans le cas des bétons, la dissolution d'un des composants des bétons est citée comme un exemple de la dégradation de ces qualités d'étanchéification. De même l'échange de cation en milieu saturé en sodium (eaux saumâtres salées) est cité comme un exemple de la transformation des propriétés de gonflement et donc d'étanchéité des argiles.

2.1.4.2 Comportement en terme de perméabilité

Les mesures de la conductivité hydraulique des cendres des centrales de Laziska et de Lagisza sont comprises entre $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s à $3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

La conductivité de cendres à caractère plus calcique a été mesurée par perméamètre de Guelph et par mesure en laboratoire sur des cendres exposées aux précipitations dans des lysimètres (Jaroslav & al., 1995).

Les valeurs mesurées en laboratoire sont comprises entre $8 \cdot 10^{-6}$ m/s et $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s alors que celles mesurées sur le terrain sont comprises entre $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s et $1 \cdot 10^{-6}$ m/s pour une exposition de deux ans des cendres aux précipitations avant couverture par la terre de la cellule lysimétrique. Les valeurs mesurées sur le terrain sont plus élevées de un à deux ordres de grandeur. Ces fortes perméabilités sont attribuées à la formation de microfractures générées par les mécanismes de dissolution, minéralisation, précipitation et alternance de phases de gel/dégel.

Il faut noter que la formation de microfractures liées aux phases de gel/dégel a également été observée par l'INERIS sur des cendres disposées sur des terrils. Une augmentation de perméabilité d'un ordre de grandeur par rapport aux mesures en laboratoire avait été également constatée.

La présence d'eau fortement minéralisée est connue pour influencer fortement les résultats des essais de perméabilité par les processus de dispersion et de floculation. Les essais réalisés avec des eaux minières relativement minéralisées (1,2 g/l de sulfate, 32 g/l de chlorures, 12 g/l de Ca^{2+} , 6 g/l de Na^{+}) montrent une forte augmentation de la perméabilité par rapport à de l'eau de qualité potable.

2.1.4.3 Comportement en mélange avec de l'argile

Les cendres volantes peuvent également être utilisées dans les produits argileux. Une amélioration des qualités mécaniques, dimensionnelles et de teneur à l'eau a été notée avec l'utilisation des cendres silico-alumineuses du fait en particulier de l'effet pouzzolanique. Des tests sont présentés par Temini (1992) dans le cas d'étude de produits argileux mis en forme par extrusion. Les mélanges d'argile (kaolinite), cendres silico-alumineuses, liants (ciment ou chaux) et eau ont été étudiés vis à vis de la stabilisation des qualités dimensionnelles et mécaniques.

La tenue à l'eau est améliorée. Les éprouvettes de mélanges contenant des cendres n'ont pas présenté de dégradation après plusieurs mois d'immersion dans l'eau.

2.1.5 Utilisation de la bentonite

Les interactions des contaminants avec la bentonite sont citées comme plus importantes lorsque celle-ci se trouve sous forme de boue (Alther, 1987)

Les phosphates, essentiellement ceux de sodium, diminuent la viscosité de la boue par dispersion mais également diminue la perméabilité en permettant par la suite un dépôt en amont du filtre des particules argileuses sous forme de feuillets parallèles.

Les effets des eaux saumâtres sont décrits comme modérés sur la faible perméabilité apportée par les bentonites, soit une augmentation de perméabilité inférieure à un facteur 5.

L'étanchéité est corrélée au gonflement des bentonites. Ce gonflement peut être augmenté par des additions de polymères. La floculation est alors prévenue également par l'addition de dispersants comme le lignite ou les polyphosphates.

Il faut noter l'importance de la préhydratation dans les applications où l'étanchéité est recherchée afin d'augmenter la résistance aux contaminants. Dans les cas des eaux saumâtres, il est conseillé d'utiliser une bentonite calcique ou une attapulгите et de diminuer la perméabilité par l'apport de matériaux fins.

L'action dispersive des polymères permet également une meilleure réaction face aux contaminants.

Dans ce cas l'utilisation de polymère (1% en poids de polymère "C") est susceptible de fortement diminuer l'augmentation de perméabilité liée à la minéralisation de l'eau pour un essai de perméabilité d'une durée de 30 jours.

Système d'étanchéité	Perméat : Eau potable	Perméat : Eaux minières synthétiques
Sol (sable fin)	$> 1 \cdot 10^{-6}$ m/s	$> 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
Sol + bentonite NPB (Wyoming)	$2,1 \cdot 10^{-11}$ m/s	$3,5 \cdot 10^{-9}$ m/s
Sol + bentonite NPB + polymère C	$2 \cdot 10^{-11}$ m/s	$4 \cdot 10^{-11}$ m/s

Le procédé utilise une boue contenant 8 à 12% de mélange polymère-bentonite et la dispersion par pulvérisation de cette boue. Le flux d'eau transporte ainsi la boue plus profondément dans les vides de la roche ou du sol. Le scellement se réalise par le gonflement en place de l'argile, ce qui nécessite l'application immédiate de la boue ainsi préparée. Cette application ne peut donc être réalisée sous eau.

Les polymères utilisés sont le plus souvent des polymères linéaires de type polyacrylique tel que les polyacrylamides et les acides polyacryliques. Les composants majeurs des polymères de type "C" utilisées sont décrits comme des polymères gonflant à l'eau qui peuvent être obtenus par polymérisation de monomères tels que l'acrylamide, méthacrylamide, N-propylacrylamide et acide acrylique.

~~Des tests de laboratoire sont nécessaires pour connaître le comportement des mélanges bentonite/polymère vis-à-vis de la chimie des fluides. Il faut noter que ces monomères peuvent être fortement toxiques et que leur emploi est donc restreint.~~

3. CONCLUSIONS

3.1 SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique a permis de noter :

- ~~L'importance des conditions de la mise en place des cendres vis-à-vis du critère de perméabilité. Une mise en place homogène doit être recherchée telle que la mise en œuvre sous faible profondeur d'eau. Des phénomènes de sédimentation différenciée induisent en effet dans le cas de fortes hauteurs d'eau la sédimentation initiale de strates de matériaux plus grossiers et donc plus perméables ;~~
- La possibilité d'utiliser les matériaux argileux malgré l'environnement a priori peu favorable. Cette utilisation doit être guidée par l'emploi de matériau moins sensible que les argiles les plus gonflantes et par l'ajout de réactifs tels que les dispersants pour éviter la formation de floccs d'argile ;
 - La confirmation d'un phénomène général pour les cendres volantes d'une dissolution relativement rapide de la fraction soluble composée par les chlorures et les sulfates ;
 - L'utilisation de géomembrane au sein de digue ou de bouchon pour limiter le flux d'eau.

3.2 AXES DE RECHERCHE POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERMEABILITÉ DES BOUCHONS

3.2.1 Mise en place des bouchons de cendres

Les conditions optimales de la mise en place des cendres évoquées dans la littérature sont le suivi du niveau d'eau en vue d'effectuer le remplissage du puits par les cendres sous au plus quelques mètres d'eau en contrôlant le débit ou le niveau des arrivées d'eaux provenant du cuvelage. En effectuant ce remplissage sous faible hauteur d'eau, il serait possible également d'agir sur la chimie de l'eau du fait des volumes moindres d'eau mis en jeu. Ce contrôle n'est néanmoins pas envisageable dans le cas de fortes arrivées d'eaux. Ce contrôle permettrait d'utiliser éventuellement un ajout de bentonite qui serait dispersée par la présence de réactifs appropriés. Du fait de la forte dispersion des résultats de mesures de perméabilité en fonction des conditions de mise en place des cendres (un à deux ordres de grandeur), il est ainsi probable qu'un meilleur contrôle des conditions de mise en place permettrait de diminuer de manière sensible la perméabilité du bouchon.

3.2.2 Mise en place de matériaux argileux

Il semblerait qu'il soit plus judicieux de privilégier l'utilisation de matériaux fins qui permettent d'envisager le colmatage des fissures du cuvelage. Dans ce cadre l'utilisation des matériaux argileux sous un contrôle du chimisme de l'eau et/ou des matériaux argileux à mettre en œuvre doit également être recherchée. Les références utilisées ne permettent néanmoins pas de déduire les perméabilités attendues. Des essais sont donc nécessaires en vue de qualifier les mélanges à mettre en œuvre.

3.2.3 Dispositif permettant de tester le colmatage périphérique.

Le dispositif doit permettre essentiellement de tester la propagation et puis le dépôt des particules fines vis-à-vis de l'interface cuvelage/rocher. Un dispositif de type piézomètre artificiel dont l'annulaire serait rempli de sable perméable représentatif de la perméabilité cuvelage/rocher permettrait de tester ces caractéristiques. Ce dispositif permettrait également de tester les différents mélanges ou mises en œuvre en vue de colmater les fuites dans le cuvelage du puits à l'échelle du laboratoire.

4. BIBLIOGRAPHIE

Alther G.R., 1987, "The qualifications of bentonite as a soil sealant", Engineering Geology, 23, pp 177-191

~~Bowders J.J., Head W.J., Sharma C., Usman A.A., 1991, "Fly ash grouts for subsidence control", Int. Conf. On energy in the 1990 Pittsburgh h.~~

Buttiens F.J. Ernest, 1979, "Conversion of abandoned collieries in southern Belgium into low pressure gas storage units, with description of special plugging of the various shafts", Eng. Geol., 13, 531-539

Cempiel Edward, Grabowska krystyna, Pozzi Marek, Sowa Malgorzata, 2000, "Examination of fly-ashes stored in workings of Wujek coal mines in aspect of their influence on environment", International Mine Water Association Congress 2000

Clark A.G., Virta M.R., Colaizzi G.J., 1989, "Development of containment Barriers Using Foaming Mud Cement, NTIS

Kus Roman, Polozov Yuriy, 2000, "Fighting water hazard by grouting - practical applications", International Mine Water Association Congress 2000

Jaroslav S., Foster H.J.& Butler R.D., 1995, "Environmental impact of fly ash disposal at Colorado, Illinois and Ohio test sites - hydrogeological approach", Groundwater quality : Remediation and Protection, Prague Conférence, May, 1995, IAHS Publ. N°225.

Liao A.& Baroid N.L., 1988, "Evaluation of polymer-Bentonite/soil Admixture as Hydraulic Barriers for Oilfiled Waste pits and Non-Oilfiels Applications", IADC/SPE Drilling Conference

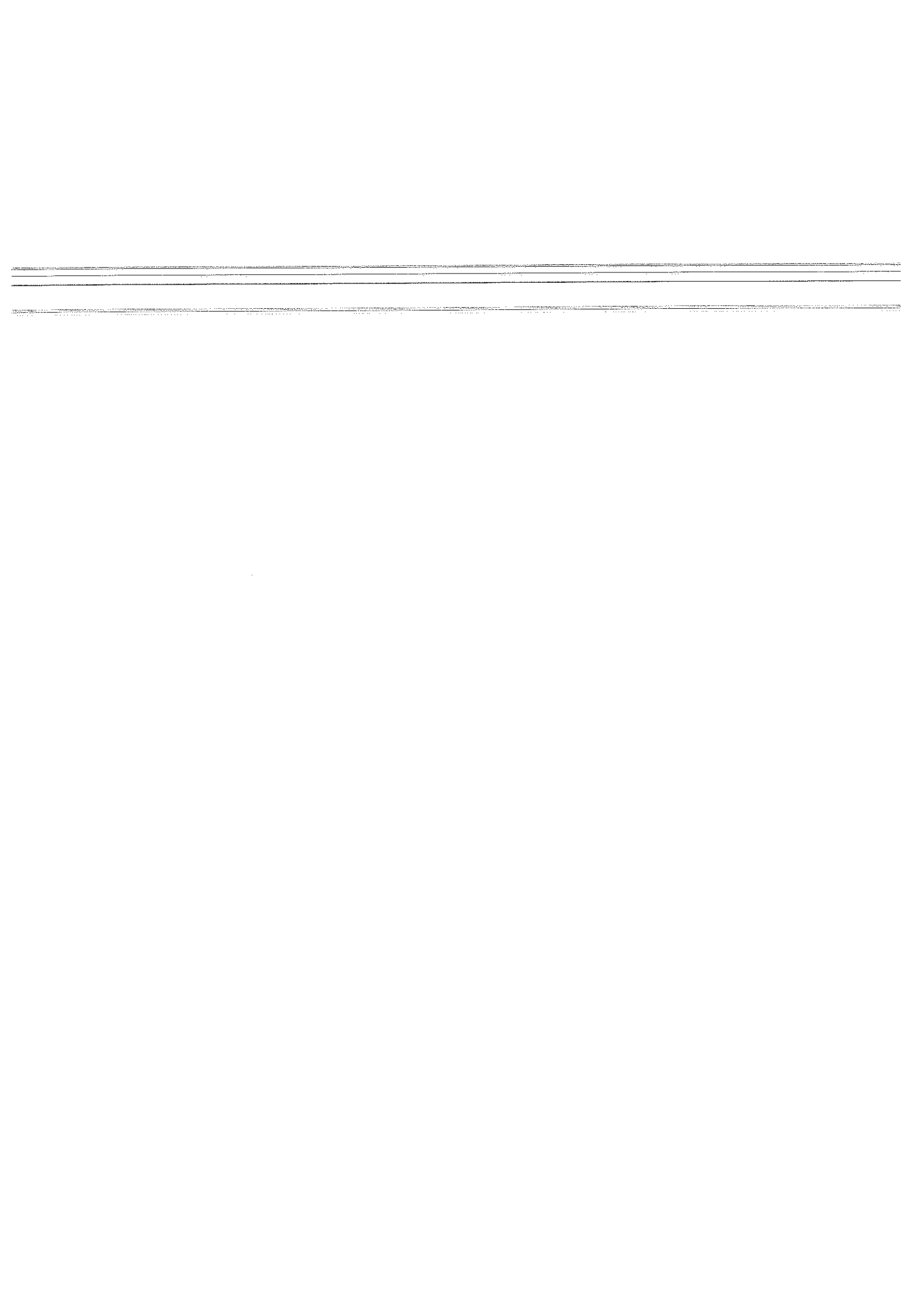
Melchior D, Glazier R., Marton R., "Geochemical performance of earthen and cementitious sealing materials for radioactive waste repositories", Waste Management 1988

Penman, A.D.M., 1985, "The waterproof element for embankment dams", Water Power Et Dam construction

Pierau. B, 1989, "Konzept für die verfüllung und abdichtung des schächte", Seminar on Geotechnical problems of underground disposal and transport processes - Aachen - 3 oct. 1989.

Striegel. K-H, 1993, "Underground disposal in working coal mines of Northrhine-Westfalia, Germany", Géoconfine 93, Arnould, Barrès & Côme (eds)

Temimi M., Ait-Mokhtar A., Camps J.P., Laquerbe M, 1992, "Utilisation des cendres volantes dans des produits argileux stabilisés à froid et mis en forme par extrusion", Materials and Structures, pp 397-403



(155)

INERIS

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

PROJET

**Etude du comportement hydraulique
de l'obturation d'un puits par un
bouchon de cendres volantes**

Synthèse

STOCAMINE

O. BOUR

*Unité Déchets et Sites Pollués
Direction des Risques Chroniques*

15 OCTOBRE 2002

STOCAMINE
Avenue Joseph Else
Boîte Postale 50
68310 WITTELSHEIM

A l'attention de Monsieur M.P. DADAUX

Verneuil-en-Halatte, le 02 décembre 2002

N/réf. : INERIS-DRC-02-22780/DESP-R03PROJET
N° 287

Objet : Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes

Monsieur,

J'ai le plaisir de vous remettre, ci-joint, un exemplaire du rapport (*), concernant l'affaire en objet.

Je vous en souhaite bonne réception et je vous adresserai prochainement la facture relative à cette prestation.

Tout en restant à votre disposition, je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de ma considération distinguée.

Le Responsable de l'Unité Déchet et Sites
Pollués à la Direction des Risques
Chroniques,



H. BAROUDI

P.J. : 1 rapport

(*) Réf INERIS-DRC-02-22780/DESP-R03PROJET du 15 octobre 2002

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi au vu des informations fournies à l'INERIS et compte tenu des connaissances techniques et scientifiques connues à ce jour.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

L'INERIS ne peut être tenu pour responsable des décisions prises en application de ses propositions ou des conséquences engendrées par le non-respect ou l'interprétation erronée de ses recommandations.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent document intégralement ou de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes

Synthèse

STOCAMINE

12 OCTOBRE 2002

Ce document comporte 30 pages (hors couverture).

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	O. BOUR	H. BAROUDI	F. MARCEL
Qualité	Ingénieur à l'Unité Déchets et Sols Pollués Direction des Risques Chroniques	Responsable de l'Unité Déchets et Sols Pollués de la Direction des Risques Chroniques	Direction des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION.....	5
2.	EXPLOITATION DES DONNÉES PROVENANT DES PUIITS MARIE ET LOUISE.....	5
2.1	DONNÉES DISPONIBLES	5
2.2	EXPLOITATION DES MESURES DE REMONTÉE.....	6
2.2.1	<i>Principe de la modélisation analytique.....</i>	6
2.2.2	<i>Interprétation des courbes obtenues.....</i>	8
2.2.3	<i>Résultats et interprétation des mesures complémentaires liées aux arrivées d'eaux de la nappe alluviale de la Thur.....</i>	9
2.2.4	<i>Estimation par excès de la perméabilité des bouchons</i>	11
3.	ETUDE DU CHIMISME DES EAUX.....	13
3.1	OBJET DE L'ÉTUDE, PRÉLÈVEMENTS ET MESURES RÉALISÉES.....	13
3.2	ÉVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU PUIITS D'EXTRACTION	13
3.3	ÉVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU PUIITS DE SERVICE.....	14
4.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	15
4.1	DOCUMENTS ANALYSES	15
4.2	DIFFÉRENTES THÉMATIQUES ABORDÉES CONCERNANT LE TRAITEMENT DES PUIITS	15
4.3	CONCEPTION GÉNÉRALE DES DISPOSITIFS D'ÉTANCHÉIFICATION DES PUIITS	16
4.3.1	<i>Conception générale de l'ensemble du dispositif.....</i>	16
4.3.2	<i>Mise en place de bouchon étanche.....</i>	17
4.4	DISPOSITIFS PARTICULIERS D'ÉTANCHÉIFICATION	18
4.4.1	<i>Développement des coulis d'étanchéification</i>	18
4.4.2	<i>Les dispositifs d'étanchéité utilisés en digue</i>	19
4.4.3	<i>Les rideaux de coulis</i>	20
4.5	COMPORTEMENT DES CENDRES SOUS EAU	21
4.5.1	<i>Comportement physico-chimique</i>	21
4.5.2	<i>Comportement en terme de perméabilité.....</i>	23
5.	CONCLUSIONS	26
5.1	SYNTHÈSE CONCERNANT LES PUIITS MARIE ET LOUISE.....	26
5.2	RECOMMANDATIONS CONCERNANT LE SUIVI DES RELATIONS HYDRAULIQUES ENTRE LES PUIITS ET LES AQUIFÈRES.....	26
5.3	SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	26
5.4	AXES DE RECHERCHE POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERMÉABILITÉ DES BOUCHONS.....	27
5.4.1	<i>Mise en place des bouchons de cendres</i>	27
5.4.2	<i>Mise en place de matériaux argileux.....</i>	27
5.4.3	<i>Dispositif permettant de tester le colmatage périphérique.....</i>	27
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	28

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : PRÉSENTATION DE LA GÉOLOGIE ET DE LA LOCALISATION6
 FIGURE 2 : SCHÉMA DU PRINCIPE DE LA MODÉLISATION DE LA REMONTÉE DU PLAN D’EAU DANS LES Puits MAIE ET LOUISE.....7
 FIGURE 3 : COMPARAISON DES VALEURS MESURÉES ET DES COURBES CALCULÉES DE HAUTEUR DU PLAN D’EAU POUR LE Puits MARIE8
 FIGURE 4 : COMPARAISON DES VALEURS MESURÉES ET DES VALEURS CALCULÉES DU PLAN D’EAU POUR LE Puits LOUISE.9
 FIGURE 5 : PIÉZOMÉTRIE SIMULÉE ET MESURÉE DU PIÉZOMÈTRE DU Puits MARIE POUR DIFFÉRENTS COUPLES DE VALEURS DE POROSITÉ EFFICACE($n_e = 0,12 - 0,18$) ET DE PERMÉABILITÉ ($k = 56 - 69$ M/j).....10
 FIGURE 6 : PIÉZOMÉTRIE SIMULÉE ET MESURÉE DU PIÉZOMÈTRE DU Puits MARIE-LOUISE POUR DIFFÉRENTS COUPLES DE VALEURS DE POROSITÉ EFFICACE($n_e = 0,12 - 0,18$) ET DE PERMÉABILITÉ ($k = 56 - 69$ M/j).11
 FIGURE 7 : BAISSÉ SUCCESSIVE DU NIVEAU DE L’EAU DANS LE Puits MARIE12
 FIGURE 8 : SUIVI DU NIVEAU DE L’EAU DANS LE Puits ET LA NAPPE LORS DES BAISSÉ SUCCESSIVES DE L’EAU DANS LE Puits MARIE.....12
 FIGURE 9 : EVOLUTION DES EAUX DU Puits D’EXTRACTION DE LA SYLVINITE.....13
 FIGURE 10 : EVOLUTION AVEC LA PROFONDEUR DU CHIMISME DES EAUX DU Puits DE SERVICE.....14

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : DESCRIPTION DES VALEURS UTILISÉES POUR LE CALCUL DE LA REMONTÉE DU PLAN D’EAU DES Puits MARIE ET LOUISE.....7
 TABLEAU 2 : COMPOSITION D’UN COULIS ADAPTÉ À L’ENVIRONNEMENT DE LA FORMATION HÔTE18
 TABLEAU 3 : FORMULATION DE BÉTON POUR LA RÉALISATION DE DIAPHRAGMES VERTICAUX ÉTANCHES20
 TABLEAU 4 : COMPOSITION DES CENDRES SILICO-ALUMINEUSES ÉTUDIÉES22
 TABLEAU 5 : COMPARAISON DU RELARGAGE DES DIFFÉRENTES CENDRES (DONNÉES MDPa ET CEMPIEL, 2000).22
 TABLEAU 6 : ÉVOLUTION DE LA PERMÉABILITÉ DES MATÉRIEAUX LIÉE À LA PERCOLATION D’EAUX MINIÈRES....25

RESUME

La société STOCAMINE a missionné l'INERIS afin de réaliser une étude décrivant les possibilités techniques de suivi des circulations d'eaux dans les puits remblayés par les Mines de Potasse d'Alsace. L'étude, réalisée en collaboration avec les Mines de Potasse d'Alsace, a traité successivement la mise au point d'un protocole de mesures et de suivi, l'exploitation des mesures de remontée réalisées ainsi que la synthèse des données publiées concernant la mise en place de scellement étanche et leur comportement dans le long terme.

L'exploitation des mesures de remontée a été réalisée sur deux puits Marie et Louise. Celle-ci a permis de localiser les plus importantes venues d'eaux dans les puits. La descente du plan d'eau au sein du puits Marie vers sa cote d'équilibre avec la nappe alluviale a permis de déduire une perméabilité maximale de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s du bouchon de cendres. Une modélisation de l'influence de la remontée de l'eau dans un puits sur les piézomètres existants à la périphérie de ce puits a également été conduite. Une influence très faible a été calculée du fait entre autre de l'éloignement des piézomètres et de la perméabilité assez forte des terrains superficiels.

La reconnaissance du chimisme des eaux surmontant le bouchon de cendre a fait apparaître une faible évolution des teneurs en éléments majeurs du bilan ionique, liés essentiellement à l'augmentation des teneurs en sulfate. Cette augmentation peut être attribuée a priori aux cendres déversées.

La synthèse bibliographique sur la conception des joints et scellements utilisables fait état de l'utilisation possible de plusieurs matériaux pour la réalisation de joints étanches et en particuliers de l'utilisation de mélange de matériaux comportant des cendres. Le rapport conclut sur les dispositifs et mises en place les plus appropriés, en particulier la mise en œuvre de cendres sous une faible hauteur d'eau afin de limiter la ségrégation des particules les plus fines.

1. INTRODUCTION

La société STOCAMINE a présenté un projet de programme d'étude visant à répondre à l'article 2 de l'arrêté préfectoral 970157 du 3 février 1997 l'autorisant à exploiter un stockage souterrain réversible de déchets industriels sur le territoire de WITTELSHEIM.

Une première étude réalisée par le service Etudes Générales des MDPAs (réf 12-99/XE) conclut à la poursuite de l'acquisition des données liées au suivi du remblayage des puits en cours, en complément de l'expérience provenant des douze puits déjà remblayés.

Deux puits sont alors en projet de remblayage (Puits Marie et Louise) alors que le remblayage est en cours également sur deux autres puits (Ungersheim 2 (U2) et Schoenen-Steinbach).

La DRIRE du Haut-Rhin a souhaité une étude relative à un programme d'essais « décrivant notamment les possibilités techniques de suivi des circulations d'eau dans les puits et du caractère imperméable du bouchon ».

L'INERIS a été missionné par la société STOCAMINE pour répondre à ces interrogations par le moyen de 3 axes de recherche :

- 1/ l'exploitation des mesures de hauteur d'eau déjà réalisées sur un puits ;
- 2/ la mise au point d'un protocole de mesures complémentaires ainsi que la modélisation hydrodynamique d'un bouchon à débit de fuite variable ;
- 3/ une étude bibliographique du comportement de la perméabilité des cendres volantes sous charge hydraulique et de son évolution dans le temps (sous l'influence du chimisme des eaux) ;

Les points 1 et 2 ont été étudiés dans le rapport intermédiaire INERIS-DRS-00-22780/R01 du 25 octobre 2000. Une étude bibliographique (rapport INERIS-DRC-01-22780/DESP-R02) a également traité le point 3. Ce rapport constitue la synthèse des rapports précédents. Il intègre également des références complémentaires disponibles aux Mines de Potasse d'Alsace.

2. EXPLOITATION DES DONNEES PROVENANT DES PUIITS MARIE ET LOUISE.

2.1 DONNEES DISPONIBLES

L'exploitation des données a consisté à utiliser l'ensemble des données disponibles, à savoir :

- la description de la géologie rencontrée par les deux puits ;
- la description des travaux de remblayage des puits ;
- la mesure de la remontée sur chaque puits ;
- une évaluation de l'exhaure moyenne journalière.

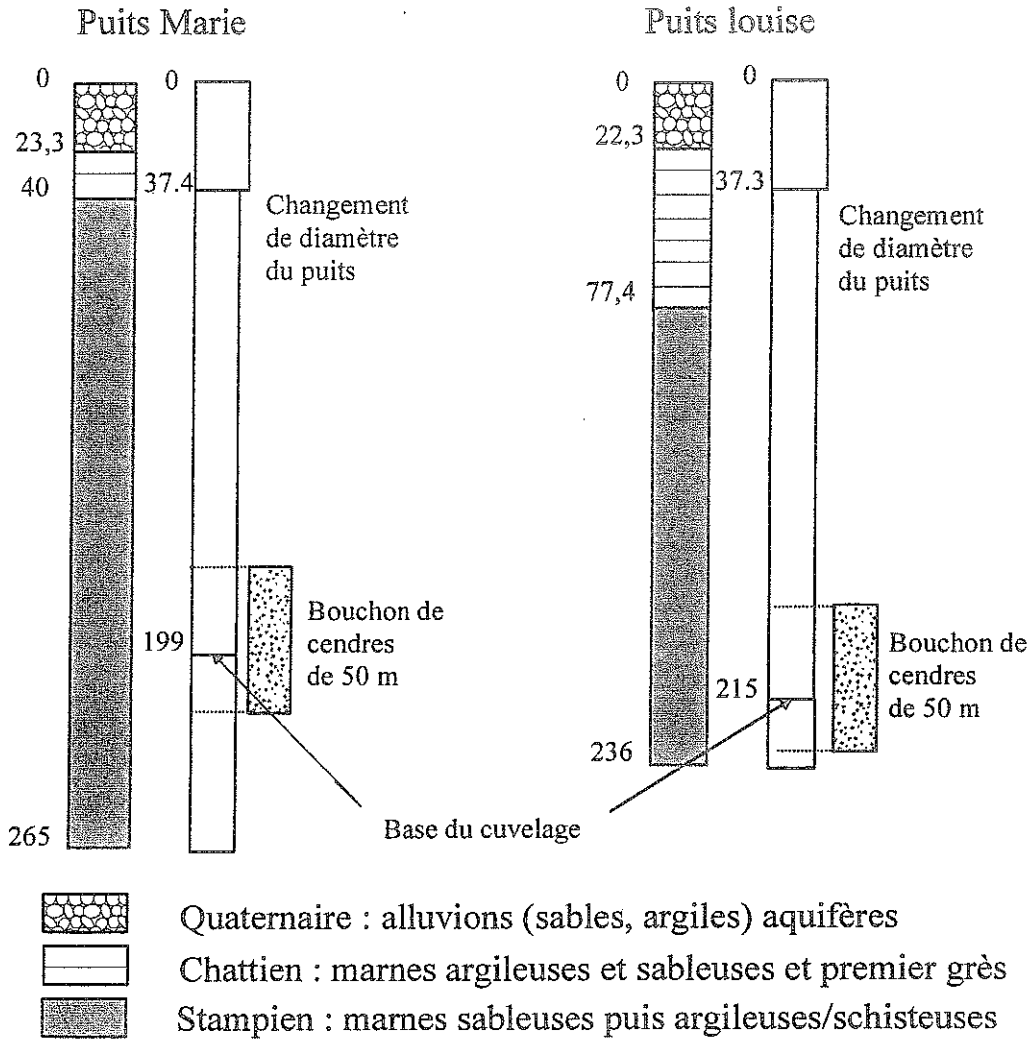


Figure 1 : Présentation de la géologie et de la localisation des deux bouchons de cendres

2.2 EXPLOITATION DES MESURES DE REMONTEE

2.2.1 Principe de la modélisation analytique

La modélisation choisie consiste à établir un bilan de masse des quantités d'eau transitant par le cuvelage au temps t. Soit :

$$\text{Variation de hauteur dans le puits} = \text{débit des arrivées/section courante} - \text{débit infiltré par le bouchon/section courante}$$

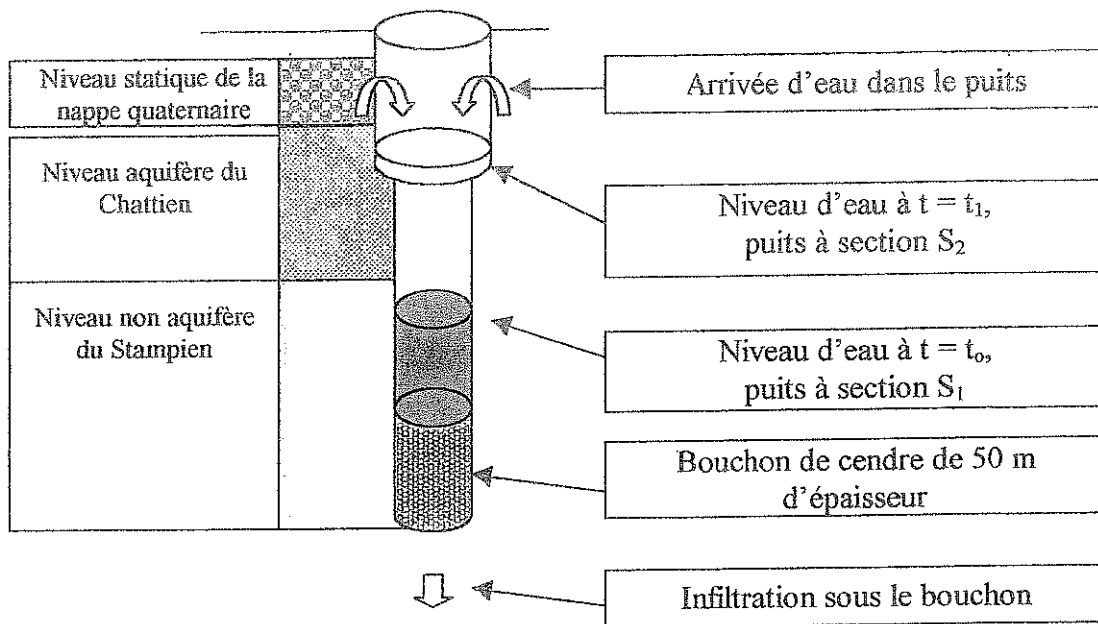


Figure 2 : schéma du principe de la modélisation de la remontée du plan d'eau dans les puits Maie et Louise

Les hypothèses concernant l'alimentation des puits permettent d'obtenir la formule suivante, valable pour la remontée du plan d'eau du puits Marie en fonction du temps t :

$$h_{1M(t)} = be^{\left(\frac{-S_{1M}kt}{S_{2M}e}\right)} + \frac{Q_{1M}e}{S_{1M}k}$$

Les paramètres utilisés sont décrits dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Description des valeurs utilisées pour le calcul de la remontée du plan d'eau des puits Marie et Louise

Paramètre	Description	Puits Marie	Puits Louise
H_{0M}, H_{0L}	Hauteur initiale au dessus des bouchons des puits Marie/Louise	(55 + 50) m	(59 + 50) m
H_{1M}, H_{1L}	Hauteur du changement de section des puits Marie/Louise	(132,6 + 50) m	(147,7 + 50) m
S_{1M}, S_{1L}	Section basale des puits Marie/Louise	15,90 m ²	15,90 m ²
S_{2M}, S_{2L}	Section courante des puits Marie/Louise	20,43 m ²	21,24 m ²
Q_{1M}, Q_{1L}	Débit d'alimentation des puits Marie/Louise	4,05 10 ⁻⁴ m ³ /s	4,28 10 ⁻⁴ m ³ /s
e	Epaisseur du bouchon	50 m	50 m

2.2.2 Interprétation des courbes obtenues

Le couple débit initial d'alimentation / perméabilité du bouchon a fait l'objet d'un ajustement en cherchant à minimiser les écarts avec la courbe de remontée mesurée. Dans la gamme de perméabilité étudiée ($1 \cdot 10^{-6}$ m/s– $1 \cdot 10^{-9}$ m/s), la baisse de niveau liée à une plus grande perméabilité du bouchon ne produit pas d'effets mesurables du fait des faibles variations déduites (de l'ordre de quelques mètres). Ces variations sont plus faibles que les variations créées par les modifications de l'alimentation liée aux fuites aux travers du cuvelage.

Les courbes de remontée mesurées permettent donc d'observer essentiellement les changements de pente liés au tarissement progressif de l'alimentation à partir de la base du Chattien.

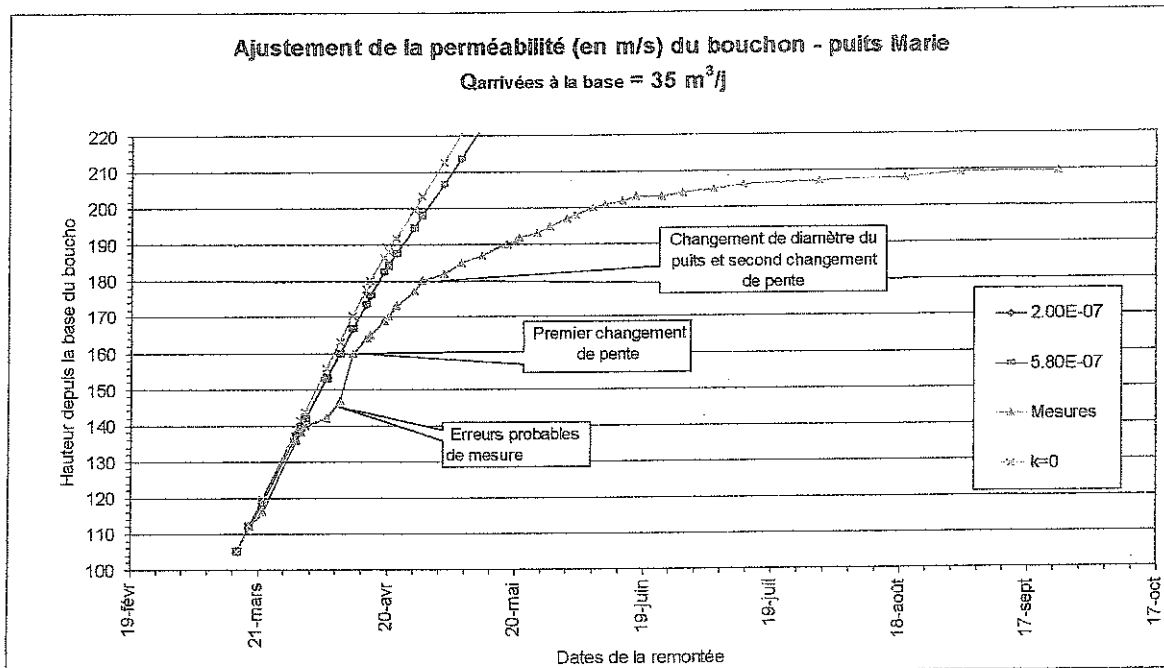


Figure 3 : Comparaison des valeurs mesurées et des courbes calculées de hauteur du plan d'eau pour le puits Marie

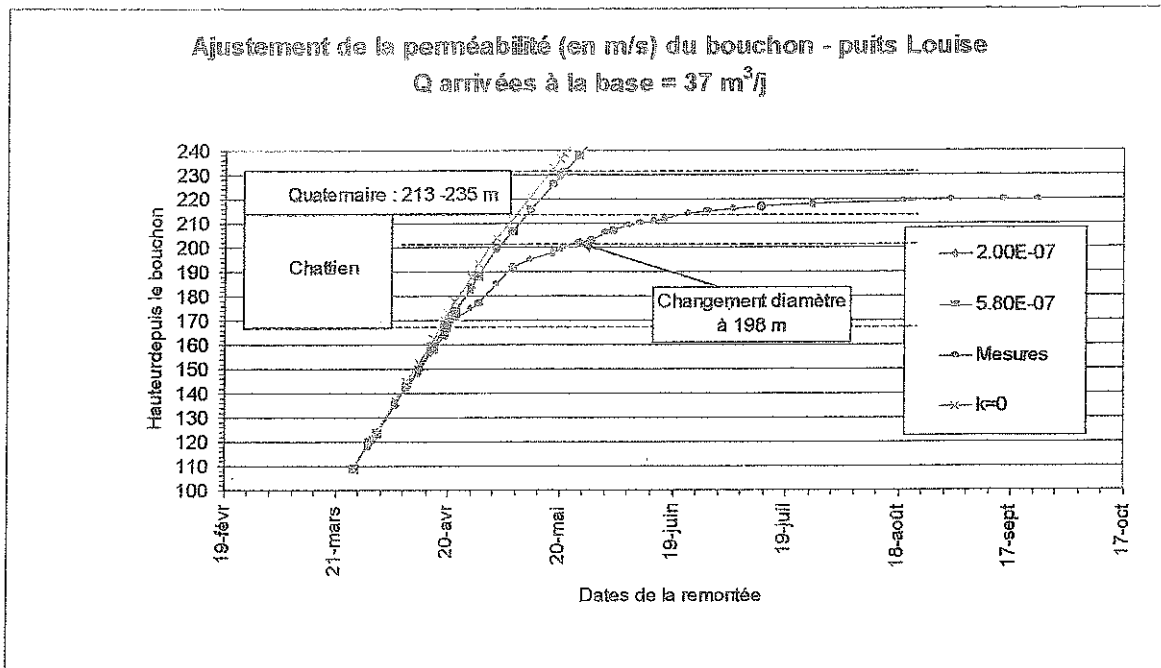


Figure 4 : Comparaison des valeurs mesurées et des valeurs calculées du plan d'eau pour le puits Louise.

2.2.3 Résultats et interprétation des mesures complémentaires liées aux arrivées d'eaux de la nappe alluviale de la Thur

Les mesures expérimentales les plus importantes ont été réalisées au cours de la remontée de l'eau au-dessus du bouchon de cendres volantes. L'interprétation de ces mesures a nécessité néanmoins de faire l'hypothèse simplificatrice d'une alimentation par l'aquifère des alluvions de la Thur. L'interprétation des courbes du modèle analytique a permis de montrer que l'on observe un tarissement progressif du débit d'alimentation des fuites alimentant la colonne d'eau des puits.

Dans le but de mieux cerner les relations entre la nappe alluviale et les puits, les deux piézomètres proches des puits ont été équipés d'enregistreurs de niveaux dans le but de suivre les perturbations du niveau de la nappe alluviale par la montée rapide du niveau d'eau dans le fût des puits.

Dans ce but un suivi des niveaux de la nappe alluviale à proximité des puits a été effectué par l'INERIS au cours des travaux de remblayage, au droit des deux piézomètres, situés à l'aval hydraulique et à une distance respective de 25 et 20 m des puits Louise et Marie.

Les travaux de remblayage ont provoqué :

- Au puits Marie : une remontée (le 7 et 8/10) de la colonne d'eau du puits de $-10,4 \text{ m/TN}$ à -1 m/TN ;
- Au puits Louise : une remontée (le 11 et 12/10) de la colonne d'eau du puits de $-14,8 \text{ m/TN}$ à -1 m/TN .

Un rabattement Δh augmentant de manière inversement proportionnelle à la valeur de la perméabilité existe à proximité du puits du fait de l'alimentation par la nappe alluviale. Les calculs analytiques montrent que ce rabattement ne pourrait être observable que dans le cas où la perméabilité des alluvions quaternaires serait inférieure à $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Dans le but de vérifier ce point tout en s'affranchissant des variations piézométriques liées aux précipitations météoriques, une modélisation numérique des variations de la piézométrie à proximité des puits a été réalisée en considérant un domaine de taille régionale afin de limiter les effets de bord au droit de la zone qui nous intéresse.

La piézométrie a été calée à partir des données de la Banque du Sous-Sol, des données de l'association pour la protection de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace (APRONA) et du suivi des deux piézomètres Marie et Marie-Louise.

Les paramètres ayant fait l'objet de calages sont la perméabilité et la porosité efficace. Les arrivées d'eau dans les puits ont été simulées par un pompage d'un débit de $52 \text{ m}^3/\text{j}$, soit environ 50% de plus que les arrivées reconnues afin de maximiser l'effet de celles-ci.

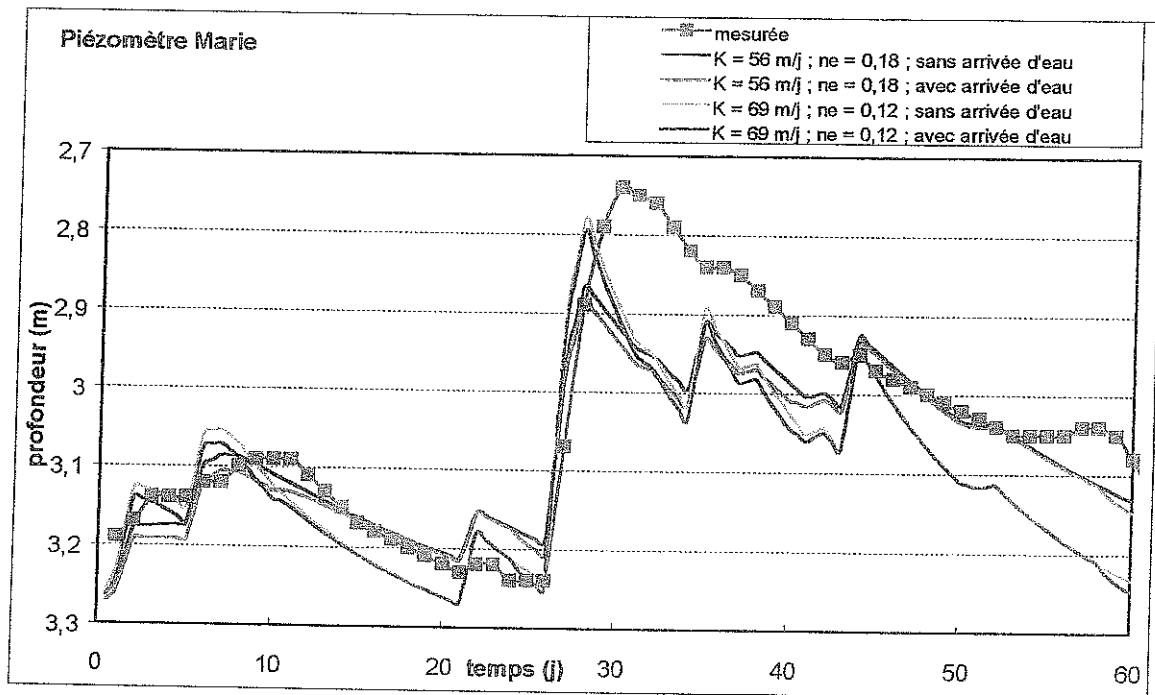


Figure 5 : Piézométrie simulée et mesurée du piézomètre du puits Marie pour différents couples de valeurs de porosité efficace ($ne = 0,12 - 0,18$) et de perméabilité ($k = 56 - 69 \text{ m/j}$)

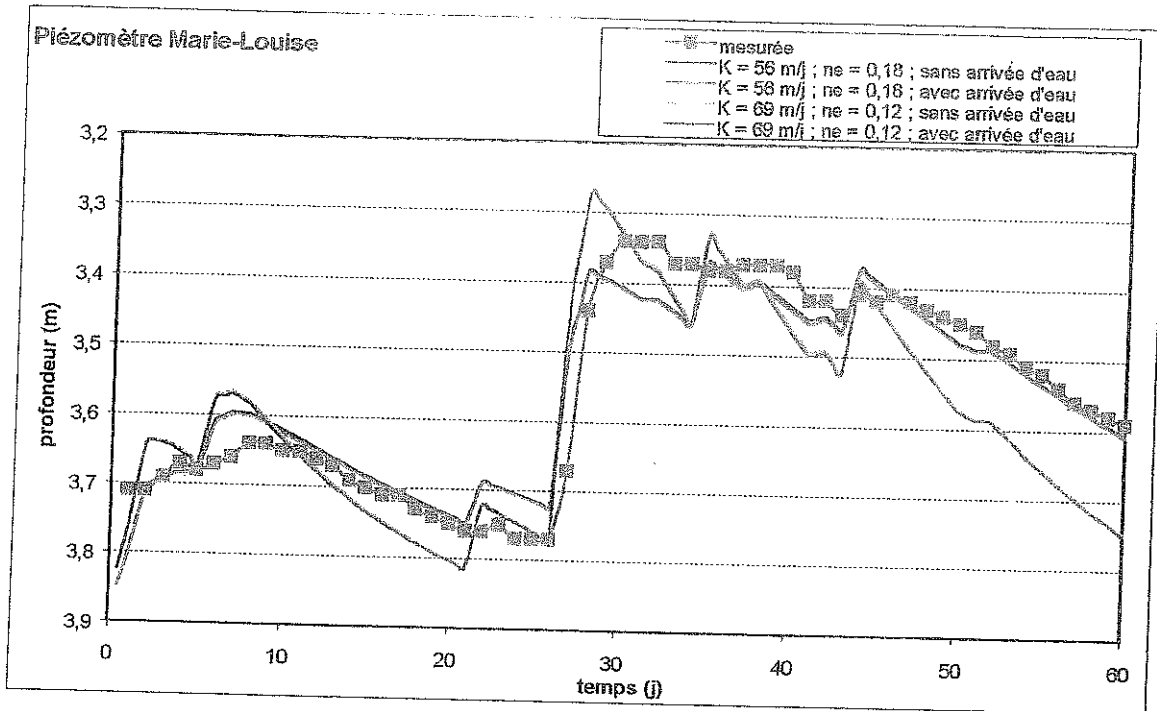


Figure 6 : Piézométrie simulée et mesurée du piézomètre du puits marie-Louise pour différents couples de valeurs de porosité efficace ($n_e = 0,12 - 0,18$) et de perméabilité ($k = 56 - 69$ m/j).

Ces modélisations montrent que les arrivées d'eau dans le puits Marie ont une légère influence sur le niveau piézométrique calculé dans le piézomètre Marie. La différence Δ entre les niveaux calculés avec arrivée d'eau et les niveaux calculés sans arrivée d'eau est présentée dans le tableau ci-dessous :

	$K = 6,4 \cdot 10^{-4}$ m/s, $n_e = 0,18$	$K = 8,0 \cdot 10^{-4}$ m/s, $n_e = 0,12$
Δ maximale (cm)	2,28	1,93

Cette différence reste particulièrement faible pour une valeur majorée du débit des arrivées et ne permet donc pas de suivre les variations de l'alimentation, du fait de la distance trop éloignée des piézomètres dans le cas d'une formation relativement perméable.

2.2.4 Estimation par excès de la perméabilité des bouchons

La descente de l'eau dans le puits Marie a été suivie suite au déversement de gravier et suite à une remontée artificielle de l'eau.

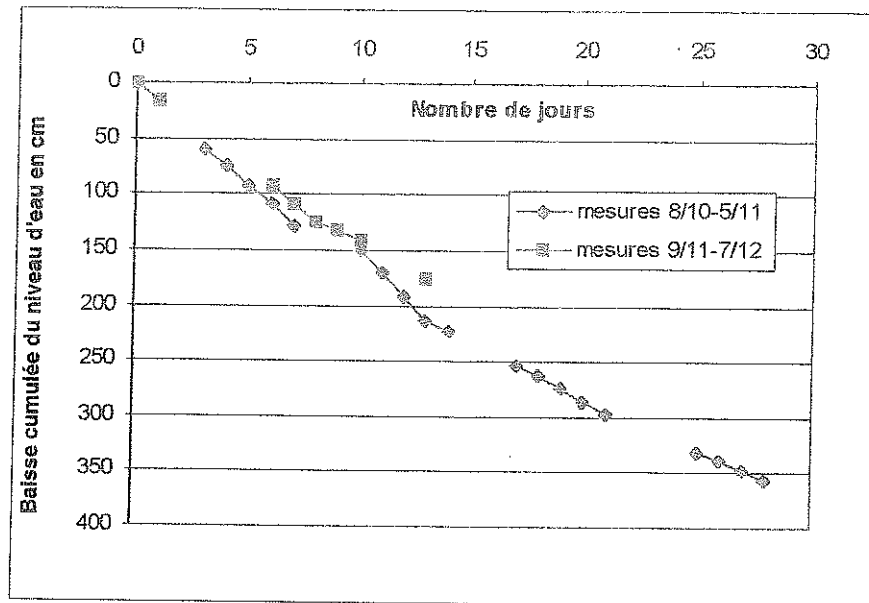


Figure 7 : Baisse successive du niveau de l'eau dans le puits Marie

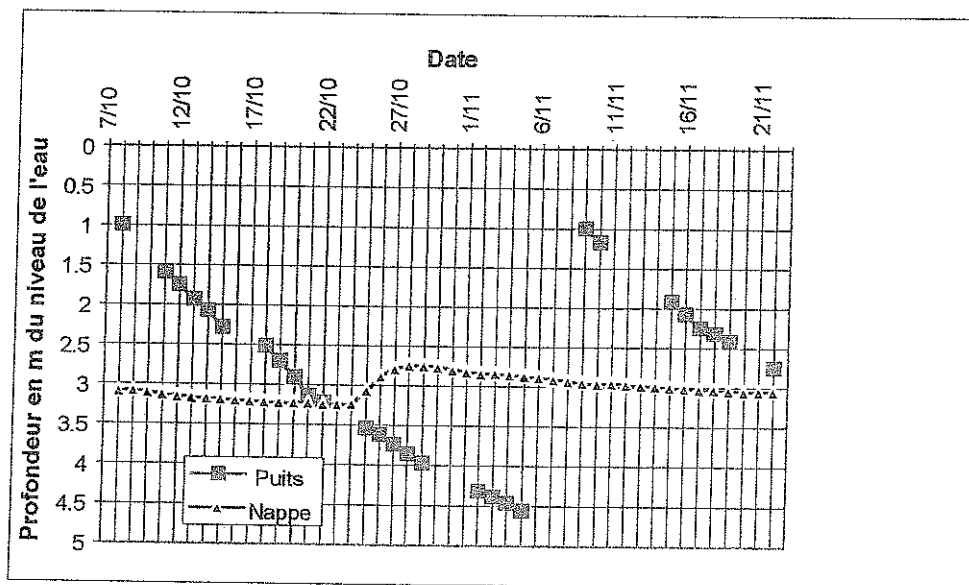


Figure 8 : Suivi du niveau de l'eau dans le puits et la nappe lors des baisses successives de l'eau dans le puits Marie

Durant les 13 premiers jours (du 8/10 au 21/10), le niveau du puits est supérieur à celui de la nappe alluviale : la descente de l'eau dans le puits est contrôlée par les infiltrations dans le bouchon de cendres et par celles provenant du cuvelage vers la nappe. On obtient alors une estimation par excès de l'infiltration maximale par le bouchon, soit ici $k = 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s.

3. ETUDE DU CHIMISME DES EAUX

3.1 OBJET DE L'ETUDE, PRELEVEMENTS ET MESURES REALISEES

L'objet de l'étude a été de suivre la variation du chimisme des eaux des puits Marie et Louise en fonction de la profondeur et de la qualité initiale des eaux. Une modification du chimisme des eaux lié à la dissolution de sels est en effet susceptible d'accroître la force ionique des eaux présentes au-dessus de la colonne de cendres. Un environnement fortement chargé en sels est également susceptible de modifier les caractéristiques de perméabilité des cendres mises en place sous eau.

Les analyses ont concerné 3 types d'eaux :

- les eaux de la nappe superficielle alimentant les puits et représentée par les eaux des deux piézomètres ;
- les eaux d'un puits d'extraction de la potasse (les eaux du puits Louise);
- les eaux d'un puits de service (les eaux du puits Marie).

Des prélèvements ont été réalisés par les MDPA à 25, 50, 100 et 150 m de profondeur par rapport au niveau libre des eaux. Les principaux anions et cations ont été analysés ainsi que le fer et les matières en suspensions.

3.2 ÉVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU Puits D'EXTRACTION

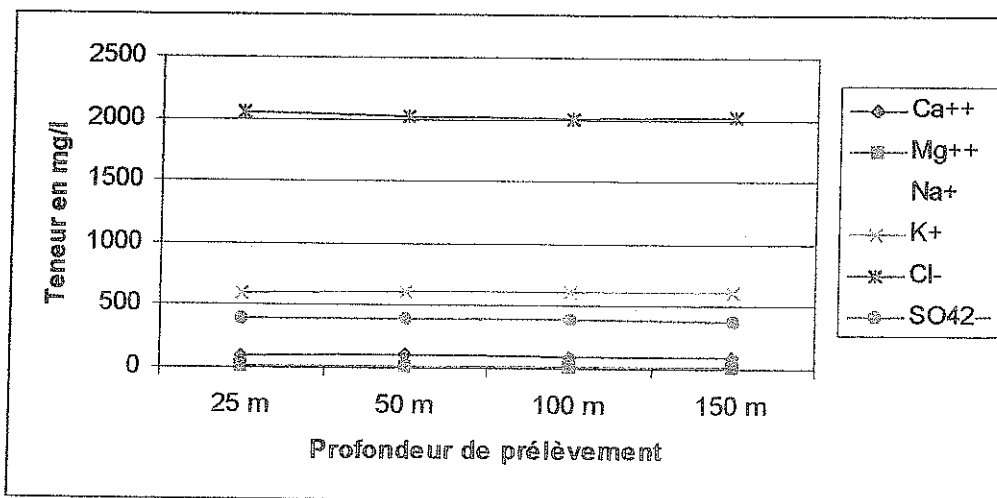


Figure 9 : Evolution des eaux du puits d'extraction de la sylvinite

Les eaux sont très fortement chargées en sels (eaux chlorurées sodiques). L'évolution de l'ensemble des paramètres analytiques avec la profondeur est également très faibles, la variation sur les paramètres principaux ne dépassant pas 5% (teneur en ion Na⁺ passant de 1 100 à 1 150 mg/l).

Ce comportement singulier est lié aux fortes teneurs en chlorures de sodium et de potassium provenant de l'exploitation de la sylvinite. Celles-ci masquent de par les équilibres de dissolution/précipitation les éventuelles variations de teneur dues à la présence du bouchon. Les analyses effectuées permettent d'estimer que le milieu de dépôt des cendres a des caractéristiques proches de celle d'une eau chlorurée sodique de relativement forte force ionique.

3.3 EVOLUTION DU CHIMISME DES EAUX DU Puits DE SERVICE

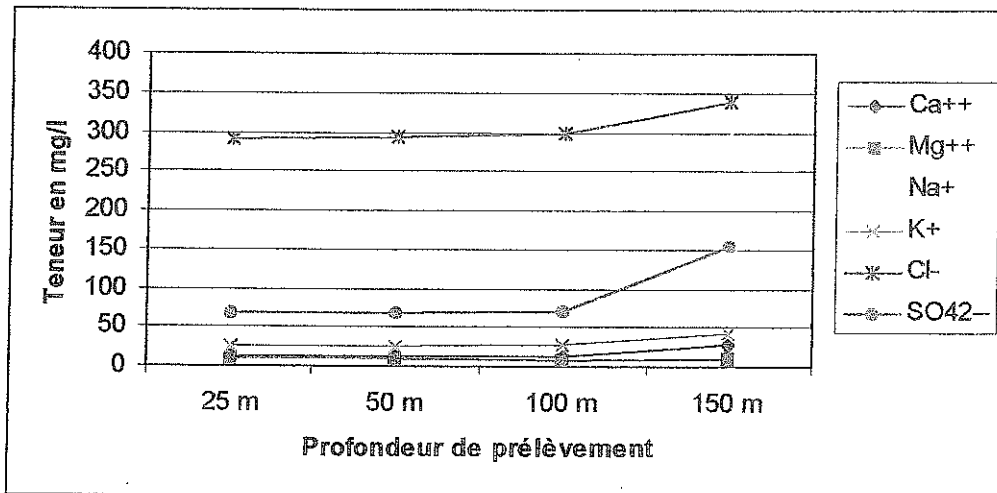


Figure 10 : Evolution avec la profondeur du chimisme des eaux du puits de service

On constate les augmentations suivantes de teneurs avec la profondeur :

- Une faible augmentation de la teneur en ions chlorures (290 mg/l à 25 m, 338 mg/l à 150 m) et en ion Na⁺ (260 mg/l à 25 m, 290 mg/l à 150 m) ;
- Une augmentation essentiellement visible sur les résultats du prélèvement effectué à 150 m de la teneur en ion K⁺ (25 mg/l à 25 m, 28 mg/l à 100m, 44 mg/l à 150 m) et de la teneur en ion sulfate (67 mg/l à 25 m, 70 mg/l à 100m, 155 mg/l à 150 m).

Une augmentation est également notée sur la teneur en ions Ca²⁺ sur le prélèvement effectué à 150 m.

A l'exception des teneurs en ions chlorures, sodium et potassium, les augmentations de teneurs relevées à proximité du bouchon peuvent être expliquées par les analyses des cendres : une dissolution des sulfates des cendres volantes est probable, ainsi qu'un apport en Ca²⁺.

La modification de la force ionique engendrée par la présence des cendres est moins importante que celle liée à la présence des sels. Les phénomènes de dissolution/précipitation des sels sont donc possibles, permettant une évolution de la qualité des eaux et une dissolution des sels de sulfates présents dans les cendres. L'évolution attendue de la perméabilité des cendres est néanmoins moins importante que celle constatées sur les dépôts de cendres en surface

4. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

4.1 DOCUMENTS ANALYSES

L'étude bibliographique menée précédemment (rapport INERIS-DRC-01-22780/DESP-R02) avait permis de sélectionner 13 références à partir de la consultation des banques de données concernant essentiellement l'énergie. En accord avec M. LOURDEL des Mines de Potasse d'Alsace, cette recherche a été étendue à la thématique géotechnique dans le but de disposer de références plus nombreuses et traitant du remblayage par les cendres volantes. Les références concernant les compte-rendus des réunions de travail traitant du colmatage des forages et des puits ont été plus spécialement étudiées. Des références récentes complémentaires concernant la conception des scellements et obturation de puits ont également été considérées.

4.2 DIFFERENTES THEMATIQUES ABORDEES CONCERNANT LE TRAITEMENT DES PUIITS

La recherche systématique a été étendue par les mots clés « puits », puis « scellements » ou « bouchon » et leur équivalent en terminologie anglaise (shaft, seal and plug) dans les bases de données générales. Les compte-rendus des réunions de travail organisées par l'agence de l'OCDE et le département de l'énergie sur le thème du colmatage des forages et des puits (mai 1980) ont également été étudiées sous l'angle du scellement des puits, l'ouvrage traitant :

- des dispositifs généraux d'étanchéification des stockages souterrains (compte-rendu de la séance 1) ;
- des dispositifs particuliers d'étanchéification (compte-rendu de la séance 2),
- des programmes de recherche concernant les opérations d'isolation des déchets (compte-rendu de la séance 3).
- des implications en terme de suivi et de comportement à long terme des dispositifs (compte-rendus de la séance 4).

Le plan proposé suit thématiques suivantes :

- Conception générale des dispositifs d'étanchéification des puits ;
- Dispositifs particuliers d'étanchéification ;
- Comportement à long terme des dispositifs d'étanchéifications.

Les références traitant de l'utilisation des cendres volantes sont développées et citées dans le texte.

4.3 CONCEPTION GENERALE DES DISPOSITIFS D'ETANCHEIFICATION DES PUIITS

4.3.1 Conception générale de l'ensemble du dispositif

Les dispositifs d'étanchéité ont été particulièrement étudiés dans le cadre du stockage des déchets radioactifs (Hansen & Knowles, 2000). Dans le cas d'un site pilote d'enfouissement des déchets, un programme de recherche concernant le dépôt des déchets radioactifs d'éléments transuraniens a été mené. Quatre puits de diamètres compris entre 3,5 et 6,1 m de diamètre sont en connexion avec le dépôt de déchets. L'étanchéification des puits constitue un des éléments important du système. Dans ce cadre, la conception et les calculs de performance ont fait l'objet d'important travaux techniques de qualification en vue du respect de la réglementation de l'agence fédérale pour la protection de l'environnement (EPA).

L'horizon de dépôt est un niveau de halite situé à une profondeur d'environ 655 m. Le site est caractérisé par des couches géologiques à faible transmissivité constituées essentiellement de sels. La réglementation de l'EPA concernant les sites de stockage des déchets transuraniens impose la présence de barrières ouvragées et naturelles limitant la migration des éléments dangereux provenant du dépôt et accessibles à l'environnement.

Afin de réduire l'incertitude concernant les matériaux utilisés, les matériaux suivants ont été sélectionnés :

- Argile ;
- Sels fortement compactés ;
- Etanchéification par l'asphalte ;

Des essais à petite échelle in situ sur plusieurs années ont montré que l'étanchéification par le béton et la bentonite permettait le maintien de faible perméabilité dans l'environnement étudié. Un essai de compaction dynamique à large échelle a établi que le sel broyé et concassé pouvait être réellement compacté. Des tests de laboratoires ont montré que le sel broyé compacté se consolidait lentement après la fermeture des puits de manière à atteindre un état suffisamment dense où la perméabilité est proche du sel des niveaux environnants.

La conception des puits retenus comprend les niveaux suivants :

- Un niveau de béton saturé de sel. Les caractéristiques du béton sont dimensionnées pour permettre d'atteindre la résistance et la stabilité requise ;
- La bentonite sodique est utilisée pour la réalisation de trois colonnes d'argile compactée. La consistance de l'argile permet une cicatrisation des fractures dans le sel situé à proximité de la base des puits, permettant d'annuler les transferts par la zone perturbée à proximité du puits.
- Un bouchon béton-asphalte comprenant une partie supérieure et inférieure de béton et une zone centrale d'asphalte permet de limiter encore la migration des fluides. L'utilisation de béton saturé en sels permet une meilleure liaison avec le sel de la formation géologique. Les mouvements du sel contre les éléments rigides en béton établissent un état de contrainte permettant une cicatrisation rapide du sel de la zone perturbée à proximité du puits.

Concernant la colonne de sel compacté additionné de 1,5 pour-cent massique d'eau, les expériences ont montré que le sel pouvait être compacté de manière dynamique à une densité équivalente à environ 90 pour-cent de la densité moyenne de la formation salifère hôte.

Une mixture d'agrégats d'asphalte est utilisée pour la colonne d'asphalte. Cette étanchéification imperméable aux saumures, est réalisée au moyen d'un dispositif chauffé. (heated slickline). Un bouchon de ciment est disposé au-dessus de la colonne d'asphalte.

Du fait de l'environnement géologique et hydrogéologique, le volume de saumure susceptible d'atteindre les bouchons de béton est réduit. Un volume correspondant à environ 100 volumes de pore est nécessaire pour initier les phénomènes de dégradation du ciment.

De même l'asphalte est utilisé dans un milieu anaréobique, éloigné de la lumière ultraviolette. Une assurance contre la dégradation microbiologique est fournie pour l'ajout de chaux.

Les performances de la barrière ont été étudiées par modélisation. Les paramètres étudiés concernent la perméabilité effective de la zone endommagée, la perméabilité fonction de la densité du sel broyé, et la pression de gaz du dépôt appliquée à la base du système d'étanchéification du puits.

L'étude a concerné essentiellement la migration de gaz et la consolidation de la colonne de sel. Trois processus sont identifiés comme permettant une augmentation de la pression de pore :

- Le flux d'eau souterraine ;
- La migration de gaz du dépôt ;
- La migration naturelle de fluide.

Les simulations sont conduites sur 200 ans afin de connaître l'effet de ces processus sur la période initiale. La consolidation est une fonction du temps et de la profondeur. La capacité de l'argile à prévenir la migration de gaz dépend de l'état de sa saturation. Les argiles situées le plus bas ont une saturation d'environ 80% et des portions de la colonne atteignent des saturations d'environ 100% . La migration de gaz est réalisée essentiellement par la zone endommagée avant la phase de cicatrisation. Cette prédiction des modèles a été validée par des expériences in situ montrant que l'étanchéité réalisée par des bentonites saturées en saumure permet de prévenir des flux de gaz jusqu'à des pressions différentielles de 4 MPa.

Cet article constitue en fait une synthèse des expérimentations réalisées dans le programme de colmatage des puits du Sandia National Laboratories dans un environnement comparable (formation salifère) à celui existant dans le cas des puits des Mines de Potasse d'Alsace.

4.3.2 Mise en place de bouchon étanche

Seul un article (Pierau, 1989) traite du problème particulier du remplissage du puits en prenant en compte les circulations parasites à l'extrados du cuvelage par les fissurations existantes dans le terrain naturel.

Le remplissage du puits est prévu en effet par un mélange de matériaux argileux comprenant une fraction fine pour réaliser l'étanchéité désirée. L'étanchéité des niveaux fissurés est supposée réalisée par le gonflement des matériaux argileux existant ainsi que par l'injection sous pression d'une suspension d'argile.

Dans le cas du stockage de déchets radioactifs, la barrière est supposée avoir une efficacité pendant une période de plus de 10 000 ans. Les matériaux tels que le béton ou les autres matériaux artificiels n'ont pas été sélectionnés pour les critères de durabilité. Trois portions du puits ont été isolées afin de définir des critères de perméabilité du remplissage du puits, la difficulté consistant à prévoir le traitement particulier à réaliser dans la zone située à l'extrados du puits.

Les considérations de l'effet silo sur les parois du puits et des contraintes résultantes sur les fissures sont abordées. La réalisation de bouchons étanches est recherchée pour les applications de stockage de gaz. Dans le cas du bouchage de puits non initialement remblayé la méthode classique de mise en place de béton et d'injection de boues de ciment est pratiquée. Dans le cas de puits déjà remblayé ou endommagé, la congélation des parois du puits a été appliquée avec succès (Butteiens, 1979) afin de renforcer celui-ci avant l'évacuation des déblais et la réalisation d'un nouveau bouchon.

4.4 DISPOSITIFS PARTICULIERS D'ÉTANCHEIFICATION

4.4.1 Développement des coulis d'étanchéification

Des coulis ont été testés dans le cadre du programme BELL CANYON TEST (BCT). (Gulick, Boa, Buck, 1980). L'utilisation des cendres volantes dans les coulis a été étudiée pour déterminer leur effet sur la perméabilité et la durabilité par combinaison avec les hydroxydes de calcium. Une augmentation de résistance à l'attaque par les sels de sulfates est également recherchée.

Ces coulis peuvent contenir des sels afin d'être moins sensibles à l'environnement. Une composition typique de ces coulis est présentée ci-dessous (cf Tableau 2).

Composant	Proportion massique en %
Ciment de classe H	50,1 – 50,6
Eau	19,2 – 19,5
Cendres volantes	16,9 – 17,8
Sel (NaCl)	5,8 – 6,5
Additif d'expansion	5,3 – 6,7

Tableau 2 : Composition d'un coulis adapté à l'environnement de la formation hôte

Les perméabilités atteintes par ces coulis sont de l'ordre de 10^{-10} m/s. Les caractéristiques des coulis ne comportant pas de sel sont plus élevées mais ceux-ci ne sont pas conseillés dans le cas où la formation hôte est constituée essentiellement de sels fortement solubles (halite).

Dans le cas du remblayage d'une galerie (Fishle, 1980), le but est de réaliser une digue d'une grande densité et homogénéité. Cette galerie recoupe essentiellement les niveaux de carnallite, polyhalite, kiserite et halite. Environ 50% de la galerie testée est située dans le niveau de carnallite. Ce minéral est un sel de potassium très soluble. Le matériau employé pour ce remblayage ne doit pas laisser s'échapper de l'eau lors de la mise en place et de la phase de cure. Il doit être fortement lié au toit de la galerie et gonfler de manière à occuper tout l'espace disponible. Une série de matériaux a été testée en laboratoire. Un matériau basé sur les cendres volantes a été sélectionné pour des tests in situ. La prise de cette poudre sèche nécessite un apport de 25% d'eau. Le matériau atteint une force de compression de 10 N/mm^2 après un gonflement d'environ 10%. Ce matériau, la katasite, a été mise en place selon le procédé polonais breveté. Ce matériau n'est pas utilisé pour le colmatage des forages et des puits.

Les cendres volantes sont utilisées également dans la colonne du bouchon afin de gonfler, après avoir été saturées par les saumures et du fait des propriétés d'échange d'ions. La possibilité d'utiliser le sel broyé et éventuellement les cendres volantes a été également évoquée (Hamstra, 1980)

4.4.2 Les dispositifs d'étanchéité utilisés en digue

L'article de Penman (1985) concernant les éléments étanches utilisés pour la réalisation des digues met en évidence les problèmes de mise en place et de pérennité des barrages d'argiles. Ces problèmes apparaissent relativement similaires à ceux pouvant être rencontrés dans un puits minier.

Les premiers noyaux d'argiles ont été mis en place historiquement par compactage manuel, les argiles étant mélangées à des volumes d'eaux fortement supérieurs aux valeurs de l'optimum Proctor permettant de réduire la résistance au cisaillement à de valeur de $C_u = 10$ à 20 kN/m^2 .

Même avec ces précautions, des différences de tassement entre le noyau d'argile et la périphérie conduisent à une forte réduction de la pression totale verticale du fait de l'effet silo. Les problèmes d'érosion évoqués dans les digues du fait des circulations d'eau peuvent également être rencontrés au sein du bouchon d'un puits minier.

L'auteur juge les spécifications de teneur en eau en relation avec l'optimum Proctor peu opérationnelles pour le suivi de la construction et préfère les spécifications concernant les valeurs de C_u et cite en particulier les spécifications de valeurs de C_u comprises entre 50 et 110 kN/m^2 utilisées pour mesurer la flexibilité du noyau argileux dans le cas de 9 barrages.

Dans le cas de la recherche de matériaux étanches, des bétons bitumineux sont cités. Ceux-ci pouvant de même être couverts par du bitume et du filler.

La construction à partir d'agrégats couverts par du bitume est présentée. De manière idéale, les vides des agrégats devant être comblés par le bitume doivent être larges et plutôt à température tiède. Des tests de laboratoires montrent une pénétration sur une profondeur de 20 à 30 cm du bitume sur des agrégats arrondis de dimensions comprises entre 19 à 76 mm et à une température environnante supérieure à 3°C , le bitume étant versé à une température de 160°C .

L'utilisation de "béton plastique" est également évoquée ainsi que celle de béton bitumineux pour la construction de diaphragmes verticaux étanches. Ces compositions sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf Tableau 3).

Formulation "béton plastique" n°1	Formulation "béton plastique" n°2	Formulation béton bitumineux
<ul style="list-style-type: none"> - 12% de ciment Portland - 2,5 % de bentonite 570 Fullbent - 85,5 % d'agrégats de 12 mm - un ration eau/solide de 0,24. 	<ul style="list-style-type: none"> - 5% de ciment Portland - 10% d'argile - 15% de silt - 85% de sable silteux placé à une teneur en eau de 30% 	<ul style="list-style-type: none"> - calcaires de 12 à 25 mm complétés avec des fines - vides comblés par 7,5 à 8,5 % de bitume. - Le tout est mixé à une température de 160 à 210 °C

Tableau 3 : Formulation de béton pour la réalisation de diaphragmes verticaux étanches

Les boues de ciment expansé (une forme de béton cellulaire) sont citées également (Clark A.G., Virta M.R., Colaizzi G.J., 1989) en tant que matériau pouvant être utilisé dans les remblais de galeries. Les bétons cellulaires sont des formes de béton contenant des cellules stables de gaz uniformément distribuées dans le mélange. Ces bétons sont généralement relativement perméables du fait de leur caractère expansé mais peuvent en fonction des adjuvants avoir une perméabilité réduite. Les boues de ciment expansives testées présentent des perméabilités échelonnées entre $4 \cdot 10^{-9}$ m/s et $6 \cdot 10^{-4}$ m/s. Des études sur un mélange particulier montrent que le coefficient de perméabilité est inversement proportionnel au poids unitaire de l'échantillon.

On ne dispose néanmoins que de peu de mesure permettant de connaître les compositions et les perméabilités atteintes par les mélanges ciment-additifs, bien que soit cité un réactif permettant de créer des mélanges de qualité plus imperméable.

Pour ce qui concerne le renforcement de l'étanchéité, un renforcement par des feuilles plastiques est cité (Penman, 1985). Des feuilles de plastiques de 0,76 mm d'épaisseur ont été utilisées en renforcement de l'étanchéité de noyau argileux des barrages.

4.4.3 Les rideaux de coulis

Les rideaux de coulis sont souvent utilisés pour permettre la foration en limitant les intrusions d'eau.

Ces coulis sont distingués selon le type de ciment et leurs composants. Ils comprennent :

- les solutions à base de polymère inorganiques ;
- les solutions à base de polymères organiques (bitumes, latex, résines) ;
- les solutions à base de substances synthétiques et de minéraux naturels (ciment et ajout).

Les coulis à base d'argile présentent l'avantage d'être peu onéreux pour une mise en place à l'échelle des travaux d'étanchéification.

Les propriétés des coulis à base d'argile dépendent de la composition et de la teneur de leur constituant. L'expérience de l'auteur sur des échantillons provenant de 60 mines de minéraux argileux a amené à la conclusion que le meilleur matériau pour la constitution de coulis sont les argiles polyminérales composées d'illite et de kaolinite par comparaison aux argiles constituées exclusivement de montmorillonite.

A partir du choix d'une mixture d'argile (caractérisée physiquement par la densité, la viscosité, la contrainte de cisaillement, la quantité de sable, le pourcentage de précipitation en 24H), l'addition du type de ciment est déterminée par les conditions locales, soit la température et la composition chimique de l'eau souterraine.

Une application de solution de coulis sur la base d'une argile polyminérale sous des conditions d'apparition d'eaux très chargées en sels est décrite, en particulier la construction de rideaux d'étanchéité dans des formations salifères. La minéralisation liée aux horizons de gypse puis de sels atteint en effet des teneurs de 130 à 320 g/l. Des réactifs ont été nécessaires du fait de la forte concentration en sels de magnésium (30-120 g/l).

La solution a consisté en :

- 21-24% d'argiles polyminérales ;
- 7,2 - 10,5 % de réactifs (non renseignés) ;
- eau salée (complément à 100%).

Une mixture de ce type, composée de matériaux locaux, a également été préparée pour réaliser une couverture étanche autour d'une exploitation souterraine de diamant en Sibérie. Les eaux étaient fortement agressives et minéralisées (90-130 g/l de sels, teneur en sulfate de 6g/l, température de -2°C).

4.5 COMPORTEMENT DES CENDRES SOUS EAU

4.5.1 Comportement physico-chimique

Le comportement des cendres a été souvent étudié du point de vue de leur impact en terme de métaux lourds et plus particulièrement pour les cendres provenant de l'incinération des ordures ménagères. Les effets négatifs reportés concernant l'utilisation des cendres dans les travaux souterrains concernent l'augmentation du pH jusqu'à des valeurs de 12 et une augmentation des teneurs en sels, en particulier en sulfate.

Le relargage de sulfate à partir de cendres est un phénomène commun. Les résultats de test de lixiviation sur les cendres de centrales de l'article (Cempiel & al., 2000) montrent des taux de sels lixiviés atteignant 6,8 à 5,5 % de la masse de cendres. Les expériences montrent une lixiviation des chlorures suivie de celle des sulfates, dont le processus est plus lent.

Un lessivage des cendres a été réalisé par une eau de mine saumâtre relativement minéralisée et légèrement alcaline : 20 g/l de minéralisation contenant 9 600 mg/l de chlorures et 1 050 mg/l de sulfates. Une quantité d'eaux minières de 9 l a ainsi percolé des échantillons de 500 g de cendres.

Les eaux minières ont lixivié une part massique de cendres plus faible que l'eau distillée et égale à environ 5,4 % à 4,5 % des cendres.

Les expériences montrent une augmentation significative de la minéralisation des premiers litres de filtrat liée en particulier au lessivage des chlorures. Les sulfates sont relargués plus lentement mais leur quantité augmentent significativement dans le temps. Dans le cas étudié, la teneur en chlorures double alors que celles en sulfates triple. Ces changements ne sont visibles que sur les deux premiers filtrats correspondant à deux percolations successives de 1 l.

Les cendres étudiées ne sont pas calciques (teneur en CaO inférieure à 10%). Leur forte teneur en fer (8% en terme de Fe₂O₃) n'induit pas de forme soluble du fait de la prédominance des formes de sulfures. En tant que matériau les cendres étudiées étaient fortement poreuses (n = 44 à 52%) mais sujettes à la compaction (n = 11 à 13%).

Ces cendres silico-alumineuses des centrales polonaises de Laziska et de Lagiska sont de qualité comparable à celles provenant de la centrale Emile Huchet de Freyming Merlebach utilisé par les MDPA. Les principales caractéristiques physico-chimiques sont décrites (cf Tableau 4).

Constituant chimique	Centrales de Laziska et Lagisza	Centrale Emile Huchet
SiO ₂	42,7 - 45 %	43 - 54 %
Al ₂ O ₃	25,7 - 29,6 %	22 - 32 %
Fe ₂ O ₃	8,2 - 10,1 %	4 - 15 %
CaO	3,2 - 5,5 %	1 - 8 %
MgO	2,5 - 3,5 %	1 - 3 %
Humidité	0,95 - 1,79 %	< 20 %
Granulométrie	80% < 0,1 mm	0,2 - 0,0005 mm

Tableau 4 : composition des cendres silico-alumineuses étudiées

Dans le cas des régions ayant plus de 800 mm de précipitations météoriques annuelles, la teneur en eau des cendres ainsi exposées aux précipitations météoriques atteignait des valeurs comprises entre 33 % et 60% pour une mise en place à une teneur en eau comprises entre 25 % et 33%.

Composant relargué	Centrales de Laziska et Lagisza, teneur en mg/l Essai statique 24H	Centrale Emile Huchet, teneur en mg/l Lixiviation X31-210
Ca ²⁺	393 - 569	1 291
Mg ²⁺	49 - 58	299
Cl ⁻	1 697 - 1653	30
SO ₄ ²⁻	468 - 683	4 300
HCO ₃ ⁻	61 - 97	600

Tableau 5 : comparaison du relargage des différentes cendres (données MDPA et Cempiel, 2000).

Il faut noter que les sulfates et les carbonates sont lixiviés moins rapidement dans le cas des cendres volantes des centrales de Laziska et de Iagisza car les essais statiques de 24 H fournissent des valeurs par défaut, en comparaison au protocole de lixiviation en milieu agité de la norme X31-210 utilisé pour les cendres volantes produites par la centrale Emile Huchet. On remarque néanmoins que les teneurs du lixiviat en chlorures sont moins élevées sur les cendres de la centrale Emile Huchet alors que celles en sulfates sont plus élevées.

Dans le cas de cendres à caractère plus calcique ou sulfocalcique, les ions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , et Cl^- dominant souvent la chimie des lessivats (Jaroslav & al., 1995).

Les cendres polonaises stockées dans les travaux miniers ont présenté des teneurs en sels beaucoup plus importantes que les cendres fraîches du fait des chlorures et sulfures présents dans les eaux de préparation des mélanges de cendres/eau lors de la mise en place.

La filtration ou percolation de ces cendres par les eaux minières à 20 g/l de minéralisation produit moins de composés solubles que la lixiviation statique de l'échantillon. L'alcalinisation de l'eau par les cendres fraîches (pH supérieur à 10) n'a pas été observée après plusieurs années de stockages des cendres dans les travaux miniers.

Les études à réaliser dans le cadre du comportement géochimique à long terme sont citées essentiellement dans le cas des matériaux de type ciment ou de type argileux utilisés pour l'étanchéité des puits (Melchior, 1988). Les réactions de dissolution/précipitation, de changement de phase et d'échange cationique sont citées comme pouvant influencer de manière sensible la perméabilité des matériaux formant le bouchon d'un puits.

Dans le cas des bétons, la dissolution d'un des composants des bétons est citée comme un exemple de la dégradation de ces qualités d'étanchéification. De même l'échange de cation en milieu saturé en sodium (eaux saumâtres salées) est cité comme un exemple de la transformation des propriétés de gonflement et donc d'étanchéité des argiles.

4.5.2 Comportement en terme de perméabilité

4.5.2.1 Données provenant d'études réalisées à l'INERIS

Dans le cadre d'expertise et d'études l'INERIS a réalisé des mesures de perméabilité en laboratoire et sur site de cendres volantes. Ces essais ont été réalisés principalement sur des stockages mis en place par compactage mécanique en surface. Les essais ne concernent pas ou peu les matériaux mis en place hydrauliquement. Les valeurs de perméabilité obtenues ont été le plus souvent comprises entre $1 \cdot 10^{-7}$ m/s et $5 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Il faut noter que pour ce qui concerne les serrements de puits, des fluides consistant en des boues de forage additionnées de bentonite ou des bitumes/asphaltes ont été cités dans des études bibliographiques. Dans le cas où une imperméabilité optimale serait recherchée l'étanchéité peut être renforcée par la mise en place de couches successives de matériaux imperméables et le traitement du joint ouvrage/rocher (en particulier dans le traitement de puits en communication avec un stockage de gaz).

Des essais au laboratoire montrent que la perméabilité des échantillons compactés de cendres volantes varie le plus souvent entre $1 \cdot 10^{-7}$ m/s et $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Avec un apport de ciment ou de chaux, les cendres silico-alumineuses atteignent une perméabilité de l'ordre de $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. L'apport de bentonite permettrait d'atteindre des valeurs de perméabilité de l'ordre de $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

4.5.2.2 Données publiées

Les mesures de la conductivité hydraulique des cendres des centrales de Laziska et de Lagisza sont comprises entre $1,3 \cdot 10^{-6}$ m/s à $3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s. La conductivité de cendres à caractère plus calcique a été mesurée par perméamètre de Guelph et par mesure en laboratoire sur des cendres exposées aux précipitations dans des lysimètres (Jaroslav & al., 1995).

Les valeurs mesurées en laboratoire sont comprises entre $8 \cdot 10^{-6}$ m/s et $1,5 \cdot 10^{-8}$ m/s alors que celles mesurées sur le terrain sont comprises entre $1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s et $1 \cdot 10^{-6}$ m/s pour une exposition de deux ans des cendres aux précipitations avant couverture par de la terre de la cellule lysimétrique. Les valeurs mesurées sur le terrain sont plus élevées de un à deux ordres de grandeur. Ces fortes perméabilités sont attribuées à la formation de microfractures générées par les mécanismes de dissolution, minéralisation, précipitation et alternance de phases de gel/dégel.

Il faut noter que la formation de microfractures liées aux phases de gel/dégel a également été observée par l'INERIS sur des cendres disposées sur des terrils. Une augmentation de perméabilité d'un ordre de grandeur par rapport aux mesures en laboratoire avait été également constatée.

La présence d'eau fortement minéralisée est connue pour influencer fortement les résultats des essais de perméabilité par les processus de dispersion et de floculation. Les essais réalisés avec des eaux minières relativement minéralisées (1,2 g/l de sulfate, 32 g/l de chlorures, 12 g/l de Ca^{2+} , 6 g/l de Na^+) montrent une forte augmentation de la perméabilité par rapport à de l'eau de qualité potable.

4.5.2.3 Comportement en mélange avec de l'argile

Les cendres volantes peuvent également être utilisées dans les produits argileux. Une amélioration des qualités mécaniques, dimensionnelles et de teneur à l'eau a été notée avec l'utilisation des cendres silico-alumineuses du fait en particulier de l'effet pouzzolanique. Des tests sont présentés par Temini (1992) dans le cas d'étude de produits argileux mis en forme par extrusion. Les mélanges d'argile (kaolinite), cendres silico-alumineuses, liants (ciment ou chaux) et eau ont été étudiés vis à vis de la stabilisation des qualités dimensionnelles et mécaniques.

La tenue à l'eau est améliorée. Les éprouvettes de mélanges contenant des cendres n'ont pas présenté de dégradation après plusieurs mois d'immersion dans l'eau.

4.5.2.4 Comportement d'un additif : la bentonite

Les interactions des contaminants avec la bentonite sont citées comme plus importantes lorsque celle-ci se trouve sous forme de boue (Alther, 1987)

Les phosphates, essentiellement ceux de sodium, diminuent la viscosité de la boue par dispersion mais également diminue la perméabilité en permettant par la suite un dépôt en amont du filtre des particules argileuses sous forme de feuillets parallèles.

Les effets des eaux saumâtres sont décrits comme modérés sur la faible perméabilité apportée par les bentonites, soit une augmentation de perméabilité inférieure à un facteur 5.

L'étanchéité est corrélée au gonflement des bentonites. Ce gonflement peut être augmenté par des additions de polymères. La floculation est alors prévenue également par l'addition de dispersants comme le lignite ou les polyphosphates.

Il faut noter l'importance de la préhydratation dans les applications où l'étanchéité est recherchée afin d'augmenter la résistance aux contaminants. Dans les cas des eaux saumâtres, il est conseillé d'utiliser une bentonite calcique ou une attapulgite et de diminuer la perméabilité par l'apport de matériaux fins.

L'action dispersive des polymères permet également une meilleure réaction face aux contaminants. Dans ce cas l'utilisation de polymère (1% en poids de polymère "C") est susceptible de fortement diminuer l'augmentation de perméabilité liée à la minéralisation de l'eau pour un essai de perméabilité d'une durée de 30 jours (cf Tableau 6).

Système d'étanchéité	Perméat : Eau potable	Perméat : Eaux minières synthétiques
Sol (sable fin)	$> 1 \cdot 10^{-6}$ m/s	$> 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
Sol + bentonite NPB (Wyoming)	$2,1 \cdot 10^{-11}$ m/s	$3,5 \cdot 10^{-9}$ m/s
Sol + bentonite NPB + polymère C	$2 \cdot 10^{-11}$ m/s	$4 \cdot 10^{-11}$ m/s

Tableau 6 : évolution de la perméabilité des matériaux liée à la percolation d'eaux minières

Le procédé utilise une boue contenant 8 à 12% de mélange polymère-bentonite et la dispersion par pulvérisation de cette boue. Le flux d'eau transporte ainsi la boue plus profondément dans les vides de la roche ou du sol. Le scellement se réalise par le gonflement en place de l'argile, ce qui nécessite l'application immédiate de la boue ainsi préparée. Cette application ne peut donc être réalisée sous eau.

Les polymères utilisés sont le plus souvent des polymères linéaires de type polyacrylique tel que les polyacrylamides et les acides polyacryliques. Les composants majeurs des polymères de type "C" utilisées sont décrits comme des polymères gonflant à l'eau qui peuvent être obtenus par polymérisation de monomères tels que l'acrylamide, méthacrylamide, N-propylacrylamide et acide acrylique.

Des tests de laboratoire sont nécessaires pour connaître le comportement des mélanges bentonite/polymère vis-à-vis de la chimie des fluides. Il faut noter que ces monomères peuvent être fortement toxiques et que leur emploi est donc restreint.

5. CONCLUSIONS

5.1 SYNTHÈSE CONCERNANT LES PUIITS MARIE ET LOUISE

Les mesures réalisées par les MDPAs sur les deux puits étudiés, le suivi et les modélisations réalisées par l'INERIS sur les piézomètres pendant le remblayage du puits Marie ont permis d'acquies les résultats suivants :

- une perméabilité d'au plus $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s du bouchon de cendre a pu être déduite du suivi réalisé par les MDPAs de la descente du plan d'eau du puits Marie vers sa cote d'équilibre avec la nappe alluviale ;
- l'analyse par modèle analytique de la remontée a permis essentiellement de reconnaître et d'estimer les variations de débits existant lors de la remontée en fonction de la gamme de perméabilité attendue, sachant qu'il n'a pas été possible d'affiner les perméabilités au-delà de la valeur de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s ;
- le suivi piézométrique de la nappe alluviale et l'analyse par modélisation numérique du comportement de celle-ci mettent en évidence une faible interaction hydraulique existant entre le puits et les piézomètres, du fait de la perméabilité des alluvions quaternaires ($6,5 \cdot 10^{-4}$ et $8,0 \cdot 10^{-4}$ m/s) et de l'éloignement des piézomètres ;
- les analyses chimiques réalisées à plusieurs profondeurs dans l'eau des puits mettent en évidence une faible évolution des teneurs en éléments majeurs du bilan ionique, essentiellement liés à l'augmentation de la teneur en sulfate et visible seulement dans les eaux peu chargées en sels. Cette augmentation peut être attribuée a priori aux cendres déversées ;
- un programme de suivi et de reconnaissance du comportement du bouchon de cendres mis en place a été élaboré.

5.2 RECOMMANDATIONS CONCERNANT LE SUIVI DES RELATIONS HYDRAULIQUES ENTRE LES PUIITS ET LES AQUIFERES

Les modélisations effectuées ont montré que le suivi des relations hydrauliques entre le puits et les aquifères nécessite l'implantation des piézomètres à proximité immédiate du puits, les piézomètres de suivi de la qualité de la nappe étant généralement localisés à une distance trop importante du puits. La distance d'implantation des piézomètres est fonction de la largeur supputée de la zone perturbée du fait du fonçage du puits et de la perméabilité des aquifères.

5.3 SYNTHÈSE DE L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La recherche bibliographique a permis de noter :

- L'importance des conditions de la mise en place des cendres vis-à-vis du critère de perméabilité. Une mise en place homogène doit être recherchée telle que la mise en œuvre sous une faible profondeur d'eau. Des phénomènes de sédimentation différenciée induisent en effet dans le cas de fortes hauteurs d'eau la sédimentation initiale de strates de matériaux plus grossiers et donc plus perméables ;

- La possibilité d'utiliser les matériaux argileux malgré l'environnement a priori peu favorable. Cette utilisation doit être guidée par l'emploi de matériau moins sensible que les argiles les plus gonflantes et par l'ajout de réactifs tels que les dispersants pour éviter la formation de floccs d'argile ;
- La confirmation d'un phénomène général pour les cendres volantes d'une dissolution relativement rapide de la fraction soluble composée par les chlorures et les sulfates ;
- L'utilisation de géomembrane au sein de digue ou de bouchon pour limiter le flux d'eau.

5.4 AXES DE RECHERCHE POUR L'AMELIORATION DE LA PERMEABILITE DES BOUCHONS

5.4.1 Mise en place des bouchons de cendres

Les conditions optimales de la mise en place des cendres évoquées dans la littérature sont le suivi du niveau d'eau en vue d'effectuer le remplissage du puits par les cendres sous au plus quelques mètres d'eau en contrôlant le débit ou le niveau des arrivées d'eaux provenant du cuvelage. En effectuant ce remplissage sous faible hauteur d'eau, il serait possible également d'agir sur la chimie de l'eau du fait des volumes moindres d'eau mis en jeu. Ce contrôle n'est néanmoins pas envisageable dans le cas de fortes arrivées d'eaux. Ce contrôle permettrait d'utiliser éventuellement un ajout de bentonite qui serait dispersée par la présence de réactifs appropriés. Du fait de la forte dispersion des résultats de mesures perméabilité en fonction des conditions de mise en place des cendres (un à deux ordres de grandeur), il est ainsi probable qu'un meilleur contrôle des conditions de mise en place permettrait de diminuer de manière sensible la perméabilité du bouchon.

5.4.2 Mise en place de matériaux argileux

Il semblerait qu'il soit plus judicieux de privilégier l'utilisation de matériaux fins qui permettent d'envisager le colmatage des fissures du cuvelage. Dans ce cadre l'utilisation des matériaux argileux sous un contrôle du chimisme de l'eau et/ou des matériaux argileux à mettre en œuvre doit également être recherchée. Les références utilisées ne permettent néanmoins pas de déduire les perméabilités attendues. Des essais sont donc nécessaires en vue de qualifier les mélanges à mettre en œuvre.

5.4.3 Dispositif permettant de tester le colmatage périphérique.

Le dispositif doit permettre essentiellement de tester la propagation et puis le dépôt des particules fines vis-à-vis de l'interface cuvelage/rocher. Un dispositif de type piézomètre artificiel dont l'annulaire serait rempli de sable perméable représentatif de la perméabilité cuvelage/rocher permettrait de tester ces caractéristiques. Ce dispositif permettrait également de tester les différents mélanges ou mises en œuvre en vue de colmater les fuites dans le cuvelage du puits à l'échelle du laboratoire.

6. BIBLIOGRAPHIE

Alther G.R., 1987, "The qualifications of bentonite as a soil sealant", *Engineering Geology*, 23, pp 177-191

Bowders J.J., Head W.J., Sharma C., Usman A.A., 1991, "Fly ash grouts for subsidence control", *Int. Conf. On energy in the 1990 Pittsburgh h.*

Buttiens F.J. Ernest, 1979, "Conversion of abandoned collieries in southern Belgium into low pressure gas storage units, with description of special plugging of the various shafts", *Eng. Geol.*, 13, 531-539

Cempiel Edward, Grabowska krystyna, Pozzi Marek, Sowa Malgorzata, 2000, "Examination of fly-ashes stored in workings of Wujek coal mines in aspect of their influence on environnement", *International Mine Water Association Congress 2000*

Clark A.G., Virta M.R., Colaizzi G.J., 1989, "Development of containment Barriers Using Foaming Mud Cement, NTIS

Hansen F.D., Knowles M.K., « Design and analysis of shaft seal system for the waste isolation pilot plant », *reliability Eng. & System safety* , vol 69, Issues 1-3, september 2000

Gulik C W., Boa J.A., Buck A.D., « BELL CANYON TEST, cement development report », *Borehole and shaft plugging, proceedings, Columbus, U. S.*, may 1980

Fischle W., « Activities in the field of borehole and gallery plugging in the asse salt mine », *Borehole and shaft plugging, proceedings, Columbus, U. S.*, may 1980

Hamstra J ; « Draft plugging procedure for deep HLW disposal borehole in rock salt », *Borehole and shaft plugging, proceedings, Columbus, U. S.*, may 1980

Kus Roman, Polozov Yuriy, 2000, "Fighting water hazard by grouting - practical applications", *International Mine Water Association Congress 2000*

Jaroslav S., Foster H.J.& Butler R.D., 1995, "Environmental impact of fly ash disposal at Colorado, Illinois and Ohio test sites - hydrogeological approach", *Groundwater quality : Remediation and Protection, Prague Conference, May, 1995, IAHS Publ. N°225.*

Liao A.& Baroid N.L., 1988, "Evaluation of polymer-Bentonite/soil Admixture as Hydraulic Barriers for Oilfield Waste pits and Non-Oilfields Applications", IADC/SPE Drilling Conference

Melchior D, Glazier R., Marton R., "Geochemical performance of earthen and cementitious sealing materials for radioactive waste repositories", Waste Management 1988

Penman, A.D.M., 1985, "The waterproof element for embankment dams", Water Power Et Dam construction

Pierau. B, 1989, "Konzept für die verfüllung und abdichtung des schächte", Seminar on Geotechnical problems of underground disposal and transport processes - Aachen - 3 oct. 1989.

Striegel. K-H, 1993, "Underground disposal in working coal mines of Northrhine-Westfalia, Germany", Géoconfine 93, Arnould, Barrès & Côme (eds)

Temimi M., Ait-Mokhtar A., Camps J.P., Laquerbe M, 1992, "Utilisation des cendres volantes dans des produits argileux stabilisés à froid et mis en forme par extrusion", Materials and Structures, pp 397-403