

**16) Calcul d'équivalence hydraulique la barrière passive
et traitement de la craie : INSA**

COVED
DIRECTION REGIONALE NORD ET ILE DE FRANCE
78147 VELIZY CEDEX

CSD DE NURLU (80)

CALCUL D'EQUIVALENCE HYDRAULIQUE :
TRAITEMENT D'UNE CRAIE A LA BENTONITE
(EN VUE DE LA RECONSTITUTION D'UNE BARRIERE DE SECURITE PASSIVE)

Rapport final

Affaire n° : 2131/171

Affaire suivie par : Gérard DIDIER
 Alain COURADIN

Vendredi 29 mars 2002



Unité de Recherche en Génie Civil

Introduction

La société COVED (Direction régionale Nord et Ile-de-France) a confié au laboratoire de géotechnique environnementale de l'INSA de Lyon, la réalisation d'essais de perméabilité d'une craie en vue de son traitement éventuel avec de la bentonite.

En effet, la perméabilité naturelle de la craie ($k = 2 \cdot 10^{-5}$ à $4 \cdot 10^{-5}$ m/s, résultat obtenu lors de la réalisation d'essais de type Nasberg) ne permet pas d'atteindre les objectifs mentionnés par l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés (un guide de lecture et d'application du mois de novembre 1997 et diffusé par le MATE vient fournir les recommandations ou les orientations pour l'élaboration et l'instruction des dossiers au titre de la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement, à laquelle se réfèrent les installations de stockage de déchets).

Dans ce cas de figure, l'exploitant peut soumettre aux autorités administratives compétentes en la matière, au moins un scénario alternatif équivalent en terme de transfert hydraulique à celui retenu par le scénario de base et réglementaire.

L'objectif visé étant de garantir une sécurité environnementale du site vis à vis de la maîtrise de ses effluents liquides (les lixiviats) équivalente ou voir plus performante.

Ce rapport fait la synthèse entre les essais de perméabilité qui ont été déjà réalisés sur la craie (se reporter au rapport INSA en date du 17 janvier 2001 et figurant en annexe 4 de ce rapport) et ceux qui ont été menés depuis.

En rappel, les premiers essais menés sur la craie provenant du CSD de Nurlu (80) avaient permis de dégager les constats suivants :

- ⇒ Les essais de perméabilité pratiqués initialement à l'énergie Proctor normal (craie naturelle et craie traitée à 4 et 6 %) se sont révélés peu adaptés à la nature inhomogène du matériau eu égard à l'objectif souhaité.
- ⇒ C'est pourquoi, il a été décidé de poursuivre les essais sur un matériau compacté à l'énergie Proctor modifié et traité ou non à la bentonite.

Le plan de ce rapport se décline en deux parties avec en première partie une présentation du code de calcul et des solutions alternatives retenues pour établir l'équivalence hydraulique et en seconde partie, la démonstration par le calcul de l'équivalence hydraulique pour au moins trois solutions alternatives.

1. Principe de la méthode

1.1 Généralités

En fonction des résultats acquis à partir de la campagne de reconnaissance en vue de la création d'un centre de stockage de déchets (CSD) ménagers et assimilés et lorsque ceux-ci ont mis en évidence une lacune dans la nature géologique des terrains pour constituer une barrière de sécurité passive (telle que celle définie dans la réglementation), la pratique peut laisser la possibilité au gestionnaire du centre de stockage de déchets de reconstituer cette barrière à l'aide de matériaux rapportés, compactés, voir traités à la bentonite.

Cette possibilité peut également évoluer vers une solution alternative consistant à substituer en partie (dans son épaisseur), la couche de matériaux rapportés par un géosynthétique bentonitique (appelé GSB).

Rappel : Les GSB contiennent généralement de la bentonite sodique, en poudre ou en granulé, entre deux nappes de géotextiles (généralement en polypropylène). Une des caractéristiques de la bentonite sodique est de posséder une bonne capacité de rétention d'eau grâce à la présence du cation monovalent Na^+ (fortement hydrophile) en position interfoliaire. Ainsi, la bentonite sodique est un matériau gonflant en présence d'eau et cette propriété lui vaut une faible (à très faible) conductivité hydraulique (de l'ordre de 10^{-11} à 10^{-12} m/s selon les conditions d'exploitation du site). Ces GSB sont des produits utilisés dans les dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques depuis une dizaine d'années en France. Dans le cadre des travaux d'aménagement des centres de stockage de déchets, ils peuvent être utilisés d'une part en couverture (seul ou en association avec un sol compacté voir une géomembrane) et d'autre part en renforcement de la barrière passive en fond ou sur les talus.

Si la qualité et la fonction des matériaux géosynthétiques bentonitiques ne sont plus à démontrer pour ce type d'application, en revanche, la substitution d'une partie de la barrière de sécurité passive par le GSB appelle une démonstration et une vérification par le calcul de l'équivalence hydraulique.

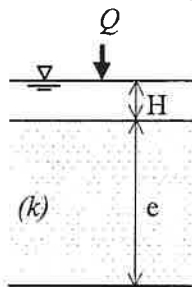
En effet, lorsqu'un GSB est utilisé en association avec une couche de sol compacté, il permet de réduire l'épaisseur de la couche d'argile associée moyennant la justification par le calcul de l'équivalence de performance hydraulique.

Ce calcul vise à établir les flux émis par le CSD en fonction de différentes alternatives envisageables pour le site et son environnement. Le code de calcul sera analytique et s'appuiera sur le principal phénomène d'écoulement en milieu poreux et saturé, à savoir, la convection. Le résultat sera exprimé en terme de débit de fuite ($\text{dm}^3/\text{m}^2/\text{j}$) et en temps de transfert convectif (année, dans le cas d'un mouvement convectif vertical, on parle de mouvement advectif).

Ce mode d'écoulement est régi par la relation de Darcy qui relie la vitesse et le gradient hydraulique à l'aide d'un coefficient de perméabilité.

1.2 Code de calcul

Le débit traversant un profil de sol homogène sous l'action d'un gradient de charge hydraulique positive peut être calculé à partir de la loi de Darcy. On admet que la vitesse d'écoulement de l'eau dans un milieu poreux est décrite par la perméabilité, notée k . La perméabilité est le coefficient de proportionnalité de la loi de Darcy (équation [1]) qui peut être exprimée en terme de débit Q :



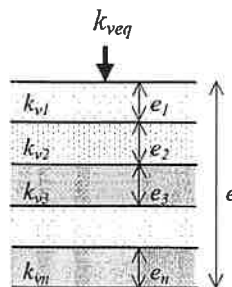
$$Q = k i A = k \frac{H+e}{e} A \quad [1]$$

où :

Q est le débit de percolation à travers la surface A perpendiculaire à l'écoulement, k est la perméabilité, H la charge hydraulique appliquée au profil et e l'épaisseur totale du profil.

Pour déduire de la relation [1] un temps de transfert de l'écoulement, il faut connaître la vitesse réelle de l'écoulement. Cette vitesse s'obtient à partir de la porosité cinématique du milieu saturé (MARSILY DE G. (1981) Hydrogéologie quantitative, page 30). La porosité cinématique se déduit de la porosité totale par différence avec la capacité de rétention du sol saturé à l'eau.

Si la perméabilité n'est pas constante sur un profil de sol vertical, une perméabilité équivalente peut être déterminée à partir de la formule suivante ([2], voir note ci-dessous) :



$$k_{veq} = \frac{e}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{k_{vi}}} \quad [2]$$

où :

k_{veq} est la perméabilité équivalente verticale (LT^{-1})

e l'épaisseur totale du profil

e_i l'épaisseur de la $i^{ème}$ couche de perméabilité k_{vi}

Note : Pour des perméabilités en série, la perméabilité moyenne s'obtient par une moyenne harmonique calculée à partir de l'ensemble des valeurs de perméabilité pondérée par l'épaisseur de chaque tronçon de même perméabilité (MARSILY DE G. (1981) Hydrogéologie quantitative, page 72).

Lorsqu'une solution alternative prévoit la mise en œuvre d'un géosynthétique bentonitique, le débit de fuite se calcule en combinant les équations [1] et [2], pour aboutir à la relation [3] :

$$Q = A \frac{H + e_{GSB} + e_{sol}}{\frac{e_{GSB}}{k_{GSB}} + \frac{e_{sol}}{k_{sol}}} \quad [3]$$

L'équation [3] n'est pas applicable dans tous les cas. Afin que la condition de saturation du profil et de pression positive soit respectée, l'inégalité [4] suivante doit être vérifiée (GIROUD J.-P., (1997), Comparison of leachate flow trough compacted clay liners and geosynthetic clay liners in landfill system, Geosynthetics International, vol. 4, Nos 3-4, pp. 341 à 391) :

$$K_{veq} \leq k_{GSB} \left(1 + \frac{H}{e_{GSB}} \right) \quad [4]$$

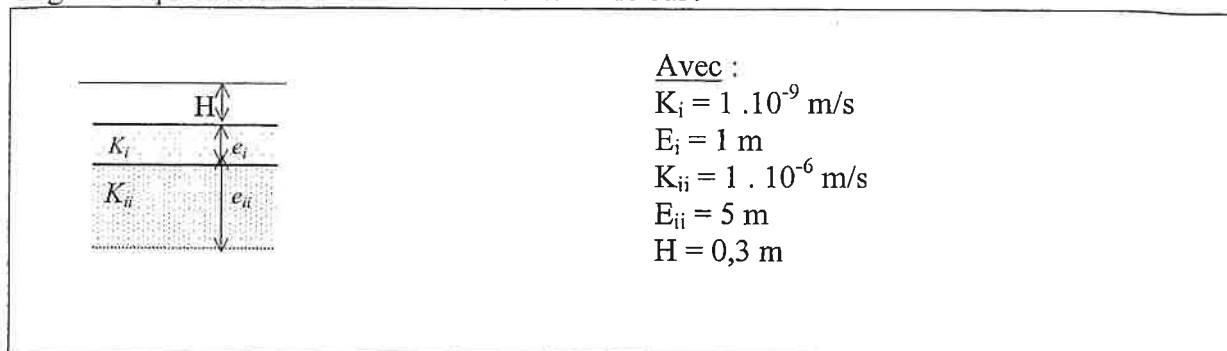
1.3 Disposition constructive de la barrière de sécurité passive

1.3.1 Solution de base

A défaut de l'arrêté préfectoral spécifique au site du CSD de Nurlu, nous retenons en solution de base celle définie par l'arrêté ministériel du 7 septembre 1997.

En effet, l'arrêté dans son article 11 mentionne deux seuils de perméabilité pour chacune des deux couches étanches de la barrière de sécurité passive, avec « *La barrière de sécurité passive est normalement constituée par le substratum du site qui doit présenter de haut en bas, une perméabilité inférieure à $1 \cdot 10^{-9}$ m/s sur au moins 1 mètre et inférieure à $1 \cdot 10^{-6}$ m/s sur au moins 5 mètres.* ».

Fig.1 : Disposition constructive de la solution de base



1.3.2 Solutions alternatives

Le même article prévoit également que « *Lorsque la perméabilité naturelle du substratum ne répond à ces exigences, des mesures compensatrices pourront être proposées par l'exploitant pour assurer un niveau de protection équivalent.* ».

Ce paragraphe est dédié à la présentation des solutions alternatives. Les résultats de la campagne d'essais de perméabilité de la craie provenant du CSD de Nurlu (80) en vue de son traitement éventuel fait l'objet d'une synthèse en annexe 1.

La lecture des résultats soulève les observations suivantes :

- 1) Une tendance à la baisse de la perméabilité en fonction de l'augmentation du degré de l'énergie de compactage employée, ceci quel que soit le matériau (non traité ou traité).
- 2) La bentonite de type FVO améliore sensiblement le traitement de la craie vers le domaine des faibles perméabilités.
- 3) Par rapport à la FVO, l'IMPERSOL améliore la conductivité hydraulique des éprouvettes (de $2,7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ avec la FVO à $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ avec l'IMPERSOL dans le cas d'une énergie Proctor normal et avec un traitement à 4%).
- 4) La conjugaison IMPERSOL et Proctor modifié conduit à un coefficient de perméabilité proche de 10^{-9} m/s (traitement à 4 % en bentonite).

Au vue de ces observations, nous présentons trois solutions alternatives (en substitution de la couche de matériaux naturels à $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ sur une épaisseur de 1 mètre), avec pour chacune la présence d'un géosynthétique bentonitique (de masse surfacique en bentonite sodique supérieure ou égale à 5.000 g/m^2 et possédant un coefficient de perméabilité au moins égale à $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ dans les conditions d'exploitation du site), qui sera placé en partie sommitale de la barrière de sécurité passive :

- ☞ Solution alternative 1 : Craie naturelle compactée à l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur de 1 mètre (soit au moins trois couches de matériaux naturels, rapportés et compactés).

- ☞ Solution alternative 2 : Craie traitée à 4 % avec la bentonite de type IMPERSOL à l'optimum Proctor normal sur une épaisseur de 0,6 mètre (soit au moins deux couches de matériaux naturels, rapportés, traités et compactés).
- ☞ Solution alternative 3 : Craie traitée à 4 % avec la bentonite de type IMPERSOL à l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur de 0,3 mètre (soit au moins une couche de matériaux naturels, rapportés, traités et compactés) et Craie naturelle à l'optimum Proctor modifiée sur une épaisseur de 0,9 mètre.

Dans les trois cas, la barrière de sécurité passive se prolonge par la présence de la craie naturelle. La reconstitution schématique de la barrière de sécurité passive offre la disposition constructive suivante :

Fig. 2 : Disposition constructive des solutions alternatives

<u>Solution 1</u>	<u>Solution 2</u>	<u>Solution 3</u>
<p><u>Avec :</u></p> <p>$k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s</p> <p>$e_{GSB} = 0,01$ m</p> <p>$k_{Cn(OPm)} = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s</p> <p>$e_{Cn(OPm)} = 1$ m</p> <p>$k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s</p> <p>$e_{Cn} = 4,99$ m</p> <p>$H = 0,3$ m</p>	<p><u>Avec :</u></p> <p>$k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s</p> <p>$e_{GSB} = 0,01$ m</p> <p>$k_{CtIMP4\%(OPn)} = 3 \cdot 10^{-9}$ m/s</p> <p>$e_{CtIMP4\%(OPn)} = 0,6$ m</p> <p>$k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s</p> <p>$e_{Cn} = 5,39$ m</p> <p>$H = 0,3$ m</p>	<p><u>Avec :</u></p> <p>$k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s</p> <p>$e_{GSB} = 0,01$ m</p> <p>$k_{CtIMP4\%(OPm)} = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s</p> <p>$e_{CtIMP4\%(OPm)} = 0,3$ m</p> <p>$k_{Cn(OPm)} = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s</p> <p>$e_{Cn(OPm)} = 0,9$ m</p> <p>$k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s</p> <p>$e_{Cn} = 4,71$ m</p> <p>$H = 0,3$ m</p>

k : Coefficient de perméabilité ; **e** : Epaisseur ; **H** : Charge hydraulique ; **GSB** : Géosynthétique bentonitique ; **Cn** : Craie naturelle ; **Ct** : Craie traitée à la bentonite ; **IMP** : Bentonite IMPERSOL de la SFBD ; **OPn** : Compactage à l'énergie Proctor normal ; **OPm** : Compactage à l'énergie Proctor modifié

1.4 Choix et hypothèses de calcul

Le choix du code de calcul et de ses hypothèses doivent être étayés et argumentés en fonction des conditions environnementales spécifiques au site et du consensus scientifique national en la matière.

1.4.1 Conditions environnementales du site

Dans son rapport, la société ANTEA (« Examen géotechnique complémentaire », août 2001, note d'avancement au 2 août 2001) ne mentionne pas l'existence de nappe dans la craie.

Remarque : Nous savons que la notion de risque en environnement et plus particulièrement en matière de transfert de polluants repose sur l'existence simultanée des trois termes suivants, la source, le transfert et la cible [$R = F(S, T, C)$].

En effet, aucun des sondages pratiqués sur le site n'est venu rencontrer des venues d'eau (ce qui laisse supposer l'absence d'un niveau piézométrique), ceci malgré la profondeur de 80 mètres atteinte pour le sondage carotté (jusqu'à 50 mètres), poursuivi en destructif (jusqu'à 80 mètres) et équipé en piézomètre.

D'autre part, les essais de perméabilité de type Nasberg (réalisés en SP1 et SP2, entre 15 et 20 mètres de profondeur) sont des essais pratiqués en milieu non saturé.

1.4.2 Consensus national

Nous savons que lorsque la perméabilité du milieu est supérieure à 10^{-7} m/s, l'écoulement de l'eau gravitaire est dominé par l'advection alors que pour un milieu de perméabilité inférieure à 10^{-9} m/s, l'écoulement est régi à la fois par la dispersion-diffusion et l'advection.

1.4.3 Choix du code de calcul

Compte tenu des données spécifiques au site, à savoir l'absence d'une nappe (jusqu'à 80 mètres de profondeur) et la valeur des coefficients de perméabilité des différentes entités géologiques rapportées à leur épaisseur respective, nous considérons que le calcul peut se conduire en ne considérant que la convection.

Remarque : La solution de calcul retenant la convection possède l'avantage d'une part de se rapprocher de la notion de seuil de perméabilité défini par l'arrêté ministériel, et d'autre part, de fournir à la démarche une cohérence nationale dans la prise de décision.

1.4.4 Hypothèses de calcul

Dans ce cas, les hypothèses de calcul peuvent se résumer aux conditions suivantes :

- 1) Le milieu est considéré comme étant poreux, homogène, isotrope, indéformable et saturé en eau pure.
- 2) Le calcul du coefficient de perméabilité est conduit en considérant un écoulement uniforme et gravitaire de l'eau pure par advection.
- 3) La recharge en liquide (terme source) venant saturer le sous-sol est supposée infinie dans le temps.

- 4) L'interaction de la phase liquide interstitielle avec la phase solide du sous-sol (terme transfert) est considérée comme nulle.

1.5 Commentaire des hypothèses

Les hypothèses formulées ci-dessus appellent de notre part les commentaires suivants :

- 1) Du point de vue de l'écoulement, les matériaux rapportés et présents sur le site peuvent être assimilés à des milieux poreux, par opposition à des milieux fracturés. La reconstitution d'une barrière de sécurité passive (BSP) par des méthodes éprouvées, comme le compactage et le traitement, aura comme principal intérêt de gommer les hétérogénéités spatiales propres aux milieux naturels. La mise en casier successive du gisement de déchets va conduire à une déformation de la BSP et provoquer des tassements qui auront tendance à modifier l'arrangement des grains du squelette solide vers une diminution du volume des vides. Bien que située en zone non saturée, la BSP pourra néanmoins présenter des profils hydriques proches de la saturation (au moins pour les couches de matériaux rapportés). D'autre part, la saturation de la BSP se fera non pas par de l'eau pure, mais par le lixiviat, dont il conviendra de s'assurer de l'effet à long terme sur les performances hydrauliques du système d'étanchéité.
- 2) L'écoulement uniforme suggère qu'à l'échelle du fond de casier le débit de fuite soit le même partout, or la présence d'une géomembrane en barrière de sécurité active empêche qu'il y ait une infiltration sur toute la surface du casier (celle-ci sera limitée au droit des défauts). L'écoulement gravitaire suppose que la condition de saturation du profil et de pression positive soit respectée au sein de la BSP. Seul le calcul de l'écoulement par advection est retenu car le transport par dispersion et diffusion des solutés demande l'acquisition d'un grand nombre de données spécifiques au site et dans notre cas ces données sont inaccessibles (car leur acquisition demande au préalable la mise en œuvre d'essais expérimentaux en laboratoire ou une instrumentation appropriée in situ). En effet, la prise en compte de la dispersion-diffusion fait appel à la notion de transport de polluants en solution et en plus des phénomènes d'écoulement, implique de considérer les nombreux mécanismes d'atténuation naturelle de la barrière de sécurité passive.
- 3) La recharge en liquide du terme source (le lixiviat) est assimilée constante pour assurer au calcul une résolution en régime permanent alors que dans la réalité cette recharge devrait tarir (si le dispositif d'étanchéité et de drainage de la couverture du CSD joue pleinement son rôle). Dans ce dernier cas, la conséquence prévisible sera de limiter le volume saturé de l'espace poral lors de l'infiltration des lixiviats.
- 4) Sous l'influence d'un faible gradient hydraulique, l'écoulement de l'eau à travers des matériaux de très faibles perméabilités peut être influencé par les interactions entre l'eau interstitielle et les minéraux argileux de ces matériaux.

2. Calcul et résultats

2.1 Paramétrage de la solution

La compréhension des phénomènes d'écoulement et la saisie de paramètres fiables d'entrée des solutions analytiques est une problématique essentielle à la bonne résolution des équations de base (voir [1] à [3]).

Dans le cas de la relation de Darcy ([1], calcul d'un flux convectif), la conductivité hydraulique est l'une des rares variables mesurées dans la nature qui présente une plage de variation couvrant plus de 12 ordres de grandeur en puissance de 10.

Dans notre cas, il en découle inévitablement une des principales sources de variabilité liées à l'estimation des flux et des temps de transfert.

C'est pourquoi, nous avons pris soin au préalable de quantifier ce paramètre sur une série d'éprouvettes de craie naturelle (ou traitée), compactées à l'énergie Proctor normal (ou modifié), afin de conduire le calcul avec un souci de réalisme.

Remarque : Le calcul du temps de transfert de l'écoulement à travers la barrière de sécurité passive requiert la connaissance de la porosité cinématique de la craie. Sachant que la porosité totale de la craie s'échelonne entre 8 et 37 %, nous prenons pour réaliser notre calcul une porosité cinématique égale à 30 % (ce choix implique une bonne connexion des pores entre-eux et donc un écoulement facilité, alors que dans le cas des matériaux rapportés, compactés et à fortiori traités par de la bentonite, l'effet de l'amélioration des caractéristiques mécaniques et hydrauliques aura comme conséquence de provoquer une baisse du volume des vides et donc de la porosité cinématique).

La hauteur de charge hydraulique correspondant à la hauteur de lixiviat a été estimée à 0,3 m (le flux de lixiviat sera géré de façon gravitaire).

Pour ce qui concerne l'estimation de la conductivité hydraulique du GSB en condition réelle, nous rappelons que le laboratoire de géotechnique environnementale de l'INSA de Lyon dispose dans ce domaine d'un retour d'expérience significatif qui lui vaut une notoriété d'ordre national et international.

En effet, de nombreux travaux de recherche et de développement en matière d'expérimentation et de mise au point de protocole expérimental de la mesure de la conductivité hydraulique au travers de matériaux peu perméables y ont été accomplis depuis de nombreuses années.

Nous rappelons que la synthèse des résultats des essais de perméabilité effectués sur la craie est située en annexe 1 à ce document. D'autre part, les résultats des trois derniers essais de perméabilité (ceux retenus dans le cadre de cette expertise) figurent en annexes 3 à 4.

2.2 Résultats

Le tableau 1 opère la synthèse des différentes valeurs significatives pour établir le calcul en équivalence hydraulique (à partir de la disposition constructive de la solution de base et des solutions alternatives présentées en figures 1 et 2 de ce document) et ainsi opérer une comparaison entre les différentes solutions.

Tabl. 1 : Synthèse des résultats de calcul

Paramètre	Unité	Solution de base	Solution 1	Solution 2	Solution 3
k_{veq}	m/s	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
Q	$m^3/m^2/j$	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$
t	an	9,6	10	11,4	14,8

k_{veq} : Coefficient de perméabilité vertical équivalent ; Q : Débit de fuite ; t : Temps de transfert à travers la barrière de sécurité passive (avec une porosité cinématique de la craie égale à 0,3).

Les solutions 1 à 3 sont satisfaisantes en terme de performance hydraulique, de débit de fuite et de temps de transfert.

Il faut maintenant vérifier que la condition de la relation [4] sera bien respectée, ce qui amène à déterminer la valeur minimale de charge hydraulique pour que la relation soit vérifiée ($k_{veq} < [4]$) :

- ☞ Solution alternative 1 : **Il faut $H > 1$ m**
- ☞ Solution alternative 2 : **Il faut $H > 0,5$ m**
- ☞ Solution alternative 3 : **Il faut $H > 0,25$ m**

La solution n° 3 est la mieux adaptée pour répondre au mode de gestion des lixiviats en écoulement gravitaire.

Remarque : Dans le cas de la vérification de la relation [4], le calcul du coefficient de perméabilité vertical équivalent ne prend pas en compte la couche de craie naturelle ($k = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s), qui se comporte comme un niveau drainant.

Le détail des calculs et de leur résolution se situent en annexe 2. Ces résultats sont obtenus avec les valeurs de teneur en eau et de poids volumique sec suivantes :

Tabl. 2 : Paramètres d'identification de la craie compactée à l'optimum Proctor

Désignation	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Eprouvette	Cn(OPm)	CtIMP4%(OPn)	CtIMP4%(OPm)
Teneur en eau (%)	23	23	23
Poids volumique sec (kN/m^3)	15,70	14,38	15,89

Cn : Craie naturelle ; **Ct** : Craie traitée à la bentonite ; **IMP** : Bentonite IMPERSOL de la SFBF ; **OPn** : Compactage à l'énergie Proctor normal ; **OPm** : Compactage à l'énergie Proctor modifié

2.3 Recommandations de mise en oeuvre

Le but déclaré de l'essai de compactage en laboratoire est de déterminer les conditions de teneur en eau à atteindre pour avoir un compactage optimal (c'est à dire une compacité maximale du matériau) pour une énergie de compactage donnée (correspondant à type d'engin de chantier déterminé).

Ces conditions sont les suivantes :

- ☞ Teneur en eau : 23 %
- ☞ Energie de compactage : Compacteur vibrant à pieds dameurs (classe VP4 ou VP5)

Lors de la phase de traitement de la craie sur site, des planches d'essais pourront être programmées afin de contrôler l'épandage de l'argile, de s'assurer de l'efficacité du malaxage, de définir les modalités de régaling et de compactage et enfin de déterminer les épaisseurs optimales de mises en œuvre permettant d'atteindre le poids volumique sec reconnu par l'étude laboratoire ($\gamma_d = 15,89 \text{ kN/m}^3$). A la fin de chaque planche, des essais *in situ* seront réalisés pour contrôler la performance hydraulique du matériau.

Conclusion

Cette étude a satisfait les règles de travail établies en la matière et répond ainsi aux principes de spécificité, de proportionnalité et de transparence.

- ☞ Spécificité : La conduite de l'étude a tenu compte des conditions environnementales spécifiques au site (présence de craie sur une grande épaisseur, absence de nappe même à grande profondeur).
- ☞ Proportionnalité : La nature et le nombre des essais de caractérisation et d'amélioration géotechnique de la craie répondent à l'objectif visé en terme réglementaire et technique.
- ☞ Transparence : Les hypothèses, le choix du code de calcul ainsi que l'écriture des relations établissant la démonstration de l'équivalence hydraulique sont présentés et argumentés.

Au total, six essais de perméabilité ont été réalisés en laboratoire (se reporter également au rapport INSA en date du 17 janvier 2001).

Ces essais ont consisté à partir de l'identification des caractéristiques du matériau à l'optimum Proctor, de faire varier l'énergie de compactage, la teneur de la bentonite, la nature

de la bentonite. Ils ont permis de mettre en évidence une variation du coefficient de perméabilité de la craie allant de $2,7 \cdot 10^{-7}$ m/s (dans le cas d'une craie naturelle et compactée à l'énergie Proctor normal), à $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s (pour une craie traitée à 4 % en bentonite de type IMPERSOL et compactée à l'énergie Proctor modifié).

Au vue des résultats, notre choix en ce qui concerne la démonstration de l'équivalence hydraulique s'est porté vers les matériaux suivants :

- ☞ Solution alternative 1 : Craie naturelle compactée à l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur de 1 mètre (soit au moins trois couches de matériaux naturels, rapportés et compactés).
- ☞ Solution alternative 2 : Craie traitée à 4 % avec la bentonite de type IMPERSOL à l'optimum Proctor normal sur une épaisseur de 0,6 mètre (soit au moins deux couches de matériaux naturels, rapportés, traités et compactés).
- ☞ Solution alternative 3 : Craie traitée à 4 % avec la bentonite de type IMPERSOL à l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur de 0,3 mètre (soit au moins une couche de matériaux naturels, rapportés, traités et compactés) et Craie naturelle à l'optimum Proctor modifiée sur une épaisseur de 0,9 mètre.

Pour chacune de ces solutions (en substitution de la couche de matériaux naturels à $1 \cdot 10^{-9}$ m/s sur une épaisseur de 1 mètre), nous retenons la présence d'un géosynthétique bentonitique (de masse surfacique en bentonite sodique supérieure ou égale à 5.000 g/m^2 et possédant un coefficient de perméabilité au moins égale à $1 \cdot 10^{-11}$ m/s dans les conditions d'exploitation du site), qui sera placé en partie sommitale de la barrière de sécurité passive.

Dans les trois cas, la barrière de sécurité passive se prolonge par la présence de la craie naturelle.

Comme nous le démontrons par le calcul, ces trois solutions satisfont l'équivalence hydraulique, cependant dans un souci de performance hydraulique et pour se rapprocher du mode de gestion des lixiviats (par écoulement gravitaire), nous recommandons la solution alternative n°3 :

Tabl. 2 : Résultats du calcul entre la solution de base et la solution alternative n°3

Paramètre	Unité	Solution de base	Solution alternative n°3
k_{veq}	m/s	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
Q	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{j}$	$5,4 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$
t	an	9,6	14,8

K_{veq} : Coefficient de perméabilité vertical équivalent ; Q : Débit de fuite ; t : Temps de transfert à travers la barrière de sécurité passive (avec une porosité cinématique de la craie égale à 0,3).

La disposition constructive de la solution alternative n° 3 est illustrée en page 6 de ce rapport et en annexe 2.

Compte tenu d'une variabilité spatiale de la concentration en bentonite après malaxage *in situ*, nous recommandons de traiter la craie à une teneur en eau de 23 % pour une concentration de 5 % (bien que l'essai en laboratoire ait été réalisé avec une concentration de 4 %). Nous rappelons que cette concentration implique de traiter 100 kg de craie sèche par 5 kg de bentonite à sa teneur en eau de réception.



A. COURADIN

G. DIDIER

2

Annexes

- Annexe 1 :** Synthèse des coefficients de perméabilité
- Annexe 2 :** Résultats de calcul
- Annexe 3.1 :** Cinétique des perméabilités
- Annexe 3.2 :** Cinétique des perméabilités
- Annexe 4 :** Rapport du 17 janvier 2002

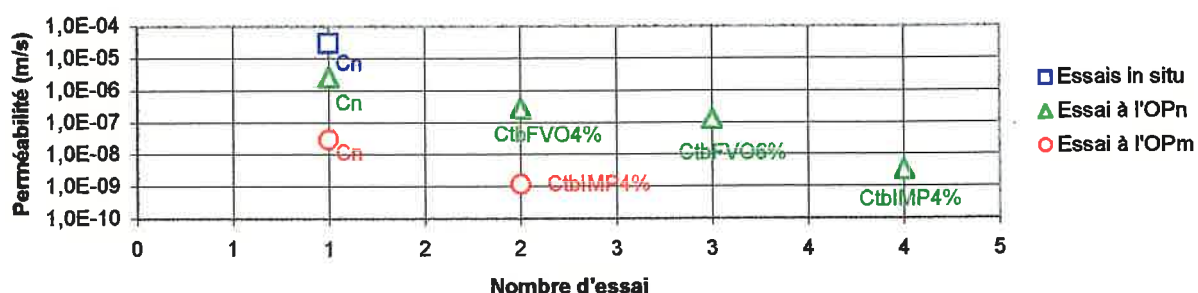
2


Synthèse des coefficients de perméabilité
- Comparaison des résultats d'essais in situ et en laboratoire -

Echantillon	K (m/s)	Durée (jour)	Charge (cm)	Descriptif des essais
Cn (Nasberg)	$3 \cdot 10^{-5}$	-	-	Essais In situ de type Nasberg (Rapport ANTEA du 2 août 2001)
Cn (OPn)	$2,7 \cdot 10^{-6}$	4	2,5	Craie naturelle à l'optimum Proctor normal (Rapport INSA du 17 janvier 2002)
CtbFVO4% (OPn)	$2,7 \cdot 10^{-7}$	4	2	Craie traitée à 4 % avec FVO à l'optimum Proctor normal (Rapport INSA du 17 janvier 2002)
CtbFVO6% (OPn)	$1,3 \cdot 10^{-7}$	5	1,5	Craie traitée à 6 % avec FVO à l'optimum Proctor normal (Rapport INSA du 17 janvier 2002)
Cn (OPm)	$2,0 \cdot 10^{-8}$	7	3	Craie naturelle à l'optimum Proctor modifiée
CtbIMP4% (OPn)	$3,0 \cdot 10^{-9}$	10	10	Craie traitée à 4 % avec IMPERSOL à l'optimum Proctor normal
CtbIMP4% (OPm)	$1,0 \cdot 10^{-9}$	4	20	Craie traitée à 4 % avec IMPERSOL à l'optimum Proctor modifié

Cn : Craie naturelle ; Ctb : Craie traitée à la bentonite ; FVO : Bentonite FVO de la SFBD (non gonflante) ; IMP : Bentonite IMPERSOL de la SFBD (gonflante) ; OPn : Compactage à l'énergie Proctor normal ; OPm : Compactage à l'énergie Proctor modifié

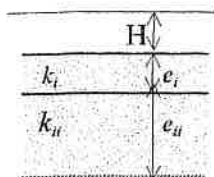
- Evolution de la perméabilité -



COVERED CSD de Nurlu (80)	Projet n° : 2131/171	Annexe A.1
	Date : 29/03/02	
Synthèse des perméabilités Equivalence hydraulique		Dess. : AC
		Ech. : -

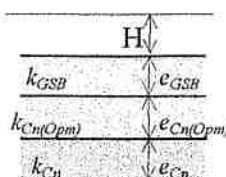
- Disposition constructive des différentes solutions -

Solution de base



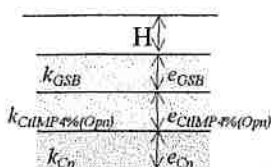
Avec :
 $k_i = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s
 $e_i = 1$ m
 $k_{ii} = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s
 $e_{ii} = 5$ m
 $H = 0,3$ m

Solution alternative n°1



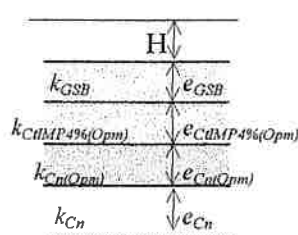
Avec :
 $k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s
 $e_{GSB} = 0,01$ m
 $k_{Cn(OPm)} = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s
 $e_{Cn(OPm)} = 1$ m
 $k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s
 $e_{Cn} = 4,99$ m
 $H = 0,3$ m

Solution alternative n°2



Avec :
 $k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s
 $e_{GSB} = 0,01$ m
 $k_{CtIMP4\%(OPn)} = 3 \cdot 10^{-9}$ m/s
 $e_{CtIMP4\%(OPn)} = 0,6$ m
 $k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s
 $e_{Cn} = 5,49$ m
 $H = 0,3$ m

Solution alternative n°3



Avec :
 $k_{GSB} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s
 $e_{GSB} = 0,01$ m
 $k_{CtIMP4\%(OPm)} = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s
 $e_{CtIMP4\%(OPm)} = 0,3$ m
 $k_{Cn(OPm)} = 2 \cdot 10^{-8}$ m/s
 $e_{Cn(OPm)} = 0,9$ m
 $k_{Cn} = 3 \cdot 10^{-5}$ m/s
 $e_{Cn} = 4,71$ m
 $H = 0,3$ m

k : Coefficient de perméabilité ; e : Epaisseur ; H : Charge hydraulique ; **GSB** : Géosynthétique bentonitique ; **Cn** : Craie naturelle ; **Ct** : Craie traitée à la bentonite ; **IMP** : Bentonite IMPERSOL de la SFBF ; **OPn** : Compactage à l'énergie Proctor normal ; **OPm** : Compactage à l'énergie Proctor modifié

- Résultats de calcul des différentes solutions -

Performance hydraulique

	Unité	sb	sa n° 1	sa n° 2	sa n° 3
e_1	m	1	0,01	0,01	0,01
k_1	m/s	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
e_2	m	5	1	0,6	0,3
k_2	m/s	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
e_3	m	-	4,99	5,39	0,9
k_3	m/s	-	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$
e_4	m	-	-	-	4,71
k_4	m/s	-	-	-	$3,0 \cdot 10^{-5}$
k_{veq}	m/s	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$5,7 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
H	m	0,3	0,3	0,3	0,3
Q	$m^3/j/m^2$	0,54	0,52	0,45	0,40
n_c	%	0,3	0,3	0,3	0,3
T	an	9,6	10	11,4	14,8

Simulation de la relation de GIROUD [4]

	Unité	sa n° 1	sa n° 2	sa n° 3
e_{GSB}	m	0,01	0,01	0,01
k_{GSB}	m/s	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
e_2	m	1	0,6	0,3
k_2	m/s	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
k_{veq}	m/s	$9,6 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$
H	m	0,96	0,50	0,23
[4]	m/s	$9,7 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$
[4]/ k_{veq}	-	1,008	1,003	1,006

Note : Sans objet pour la solution de base

COVER

CSD de Nurlu (80)

Projet n° : 2131/171

Date : 29/03/02

Annexe

A.2

Résultats de calcul
Equivalence hydraulique



Dess. : AC

Ech. : -

- Paramètres d'identification de la craie à l'optimum Proctor -

Les résultats des différents essais de perméabilité sont obtenus avec les valeurs de teneur en eau et de poids volumique sec suivantes (déterminés à l'optimum Proctor) :

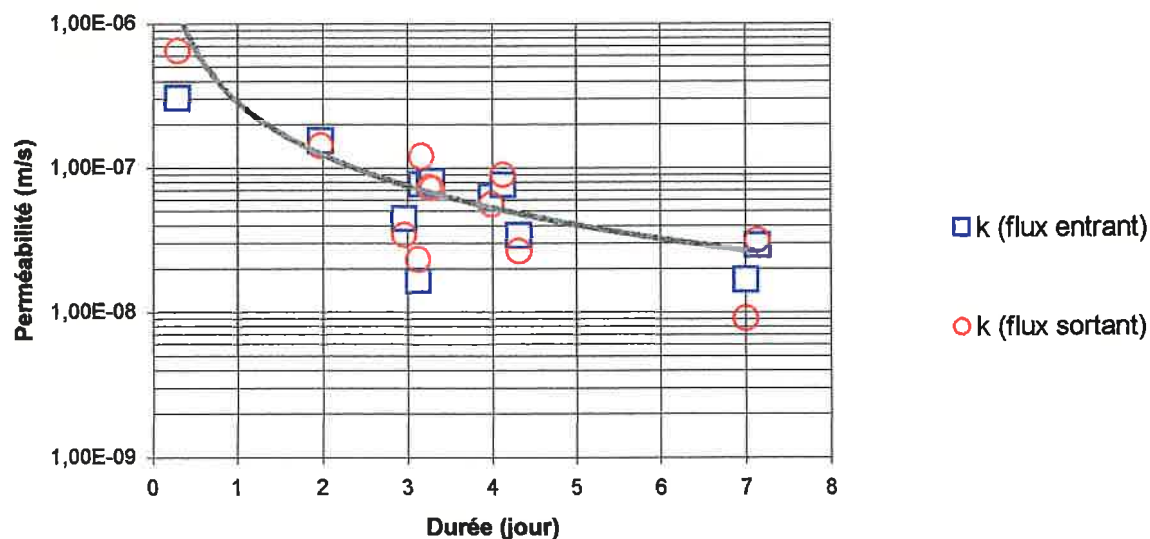
Paramètres d'identification de la craie compactée à l'optimum Proctor

Désignation	Solution 1	Solution 2	Solution 3
Eprouvette	Cn(OPm)	CtIMP4%(OPn)	CtIMP4%(OPm)
Teneur en eau (%)	23	23	23
Poids volumique sec (kN/m ³)	15,70	14,38	15,89

Cn : Craie naturelle ; Ct : Craie traitée à la bentonite ; IMP : Bentonite IMPERSOL de la SFBD ; OPn : Compactage à l'énergie Proctor normal ; OPm : Compactage à l'énergie Proctor modifié

- Cinétique des perméabilités -

Craie non traitée, compactée à l'énergie Proctor modifiée



COVERED

CSD de Nurlu (80)

Cinétique des perméabilités
Equivalence hydraulique

Projet n° : 2131/171

Date : 29/03/02

Annexe

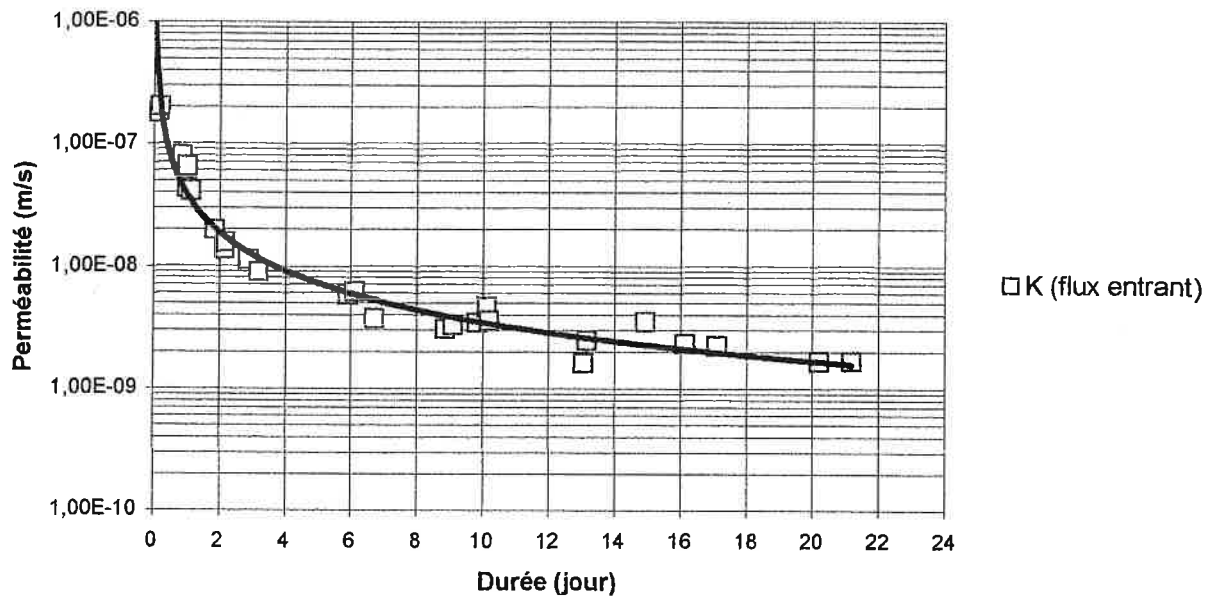
A.3.1

Dess. : AC

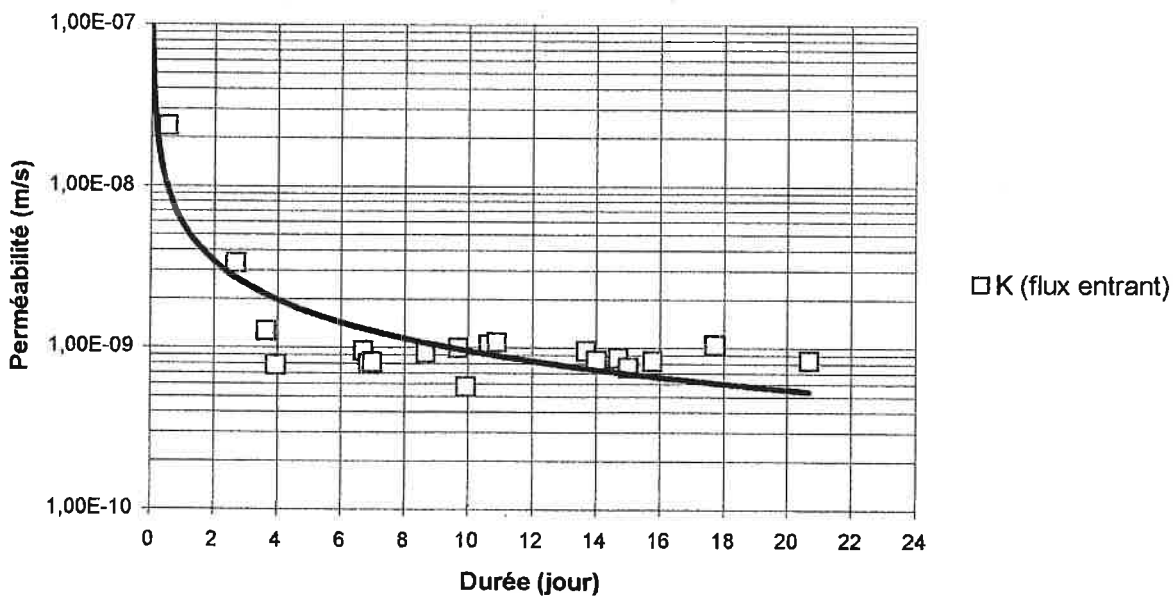
Ech. : -



Craie traitée (4% de bentonite de type Impersol), compactée à l'énergie Proctor normal



Craie traitée (4% de bentonite de type Impersol), compactée à l'énergie Proctor modifié



COVER

CSD de Nurlu (80)

Projet n° : 2131/171

Date : 29/03/02

Annexe

A.3.2

Cinétique des perméabilités
Equivalence hydraulique



Dess. : AC

Ech. : -

COVED
DIRECTION REGIONALE NORD ET ILE DE FRANCE
78147 VELIZY CEDEX


CSD DE NURLU (80)

ESSAIS EN LABORATOIRE :
TRAITEMENT D'UNE CRAIE A LA BENTONITE
ESSAIS DE PERMEABILITE AU PERMEAMETRE A PAROI RIGIDE

Rapport intermédiaire

Affaire n° : 2131/171

Affaire suivie par : Gérard DIDIER
Alain COURADIN

COVED <i>CSD de Nurlu (80)</i>	Projet n° : 2131/171	Annexe A.4
	Date : 29/03/02	
Rapport du 17 janvier 2002 Equivalence hydraulique		Dess. : AC
		Ech. : -

Introduction

La société COVED (Direction régionale Nord et Ile-de-France) a confié au laboratoire de géotechnique de l'INSA de Lyon, la réalisation d'essais de perméabilité d'une craie en vue de son traitement avec de la bentonite.

L'objectif de ces essais est de définir un dosage à la bentonite de façon à obtenir une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s.

1. Essais

1.1 Programme

Le programme d'essais se scinde en deux étapes :

- Compactage d'un échantillon à l'énergie Proctor normal afin de déterminer les paramètres d'identification à l'optimum (poids volumique sec maximal – γ_{dmax} en kN/m^3 - et teneur en eau à l'optimum – W_{OPN} en % -), puis essai de perméabilité sur un échantillon compacté dont la teneur en eau se situe proche de l'optimum Proctor (W_{OPN}).
- Traitement de la craie à la bentonite (deux concentrations ont été choisies au vu du résultat du précédent essai de perméabilité), à une teneur en eau proche de la teneur en eau optimale, puis compactage à l'énergie Proctor normal et essais de perméabilité.

1.2 Méthodologie

La craie nous est parvenue le 28 novembre 2001 (semaine n° 48). La teneur en eau du matériau à réception est de 27 %. L'écraie à 20 mm du matériau nous a permis d'observer le manque d'homogénéité de la craie.

Les essais de perméabilité ont été réalisés à l'aide d'un perméamètre à paroi rigide (PPR, les dimensions sont équivalentes à celle d'un moule CBR) entre le 7 et 21 décembre 2001 .

L'essai de perméabilité au perméamètre à paroi rigide consiste à isoler un échantillon entre deux pierres poreuses placées dans des embases munies de joints toriques. L'essai est conduit à volume constant et à charge hydraulique constante (par l'intermédiaire d'une bouteille de Mariotte).

Dans le cas des échantillons de craie traitée à la bentonite, une phase préalable de saturation est nécessaire afin d'obtenir le gonflement de la bentonite dans l'espace poral de l'éprouvette (pour la craie naturelle cette phase n'est pas nécessaire). Puis, la phase d'écoulement peut être entreprise jusqu'à l'obtention d'un régime d'écoulement permanent permettant le calcul du coefficient de perméabilité.

2. Résultats

1.1 Perméabilité de la craie avant traitement

Les paramètres d'identification de la craie compactée à l'énergie Proctor normal sont les suivants :

Tabl. 1 : Valeurs des paramètres d'identification de la craie compactée à l'énergie Proctor normal

γ_d (kN/m ³)	14,38	14,75	14,87	14,76	14,62
W (%)	20,71	22,10	23,35	27,50	29,90

Ainsi, les caractéristiques de la craie à l'optimum Proctor sont les suivantes :

$$\gamma_{dmax} \text{ (kN/m}^3\text{)} = 14,87 \quad W_{OPN} \text{ (%) } = 23,35$$

Comme l'indique la courbe de la figure 1 ci-dessous, la teneur en eau proche de l'optimum Proctor est évaluée à 23 %.

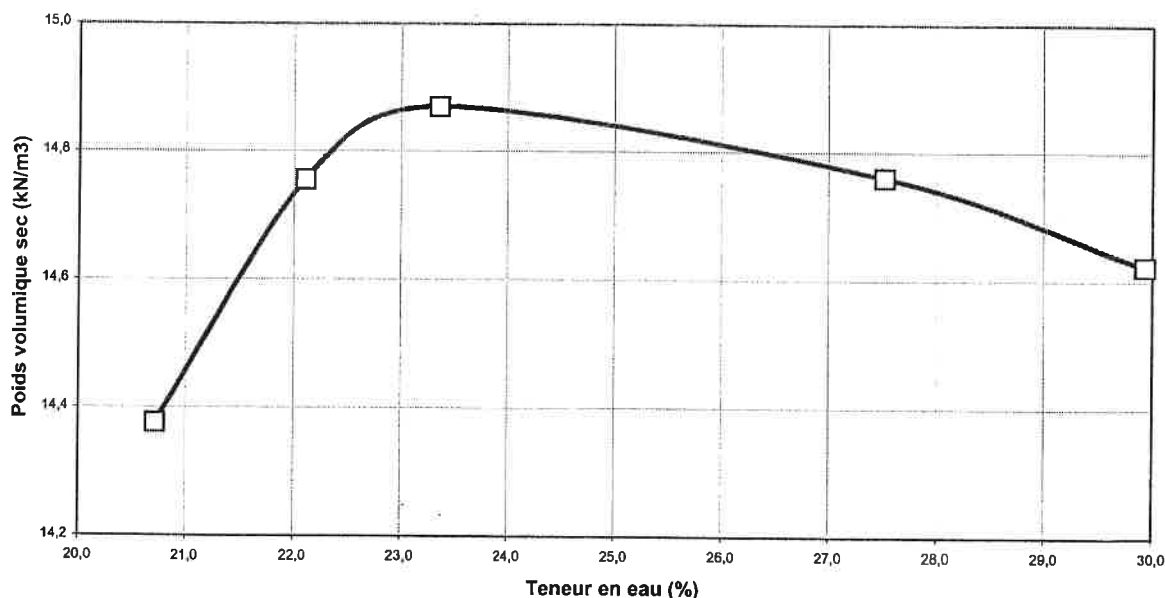


Fig. 1 : Courbe Proctor normal (moule CBR)

L'essai de perméabilité, qui a suivi la détermination des caractéristiques de la craie à l'optimum Proctor, permet d'obtenir le coefficient de perméabilité (k) de la craie avant son traitement, il est égal à $2,7 \cdot 10^{-6}$ m/s (soit un coefficient amélioré d'un facteur de 10 par rapport à celui obtenu lors des essais Nasberg réalisés in situ).

Remarque : Un premier essai de perméabilité a été conduit sur une éprouvette compactée à l'énergie Proctor modifié. Le compactage de cette éprouvette de craie à une teneur en eau de 21 % conduit à un poids volumique sec de $15,94 \text{ kN/m}^3$. L'essai de perméabilité réalisé sur cette éprouvette n'a pas été exploité en raison d'une fuite survenue au démarrage de l'essai.

Compte tenu de l'objectif à atteindre ($k \leq 5.10^{-9} \text{ m/s}$) et du résultat obtenu à l'essai de perméabilité sur la craie (après écrêtage et homogénéisation), il a été décidé de mener les deux essais de perméabilité de la craie traitée à la bentonite aux concentrations de 4 et 6 %.

1.2 Perméabilité de la craie après traitement

Une bentonite en poudre (type FVO, Société Française des Bentonites et Dérivés) a été utilisée (elle possède une teneur en eau de 11 % et 2 g sec ont un indice de gonflement de 6 cm^3 environ).

Après traitement puis compactage, les caractéristiques physiques des éprouvettes sont données dans le tableau suivant :

Tabl. 2 : Valeurs des paramètres d'identification de la craie traitée après compactage

Bentonite (%)	4	6
$\gamma_d \text{ (kN/m}^3\text{)}$	13,84	14,57
W (%)	19,75	20,40

Le poids volumique sec et la teneur en eau des éprouvettes ont été mesurés après malaxage de la craie avec la bentonite. Nous observons que le poids volumique sec des éprouvettes est en deçà des valeurs obtenues précédemment.

Cette différence peut être expliquée par le manque d'homogénéité de la craie. En effet, l'échantillon de craie, qui a servi à la confection des éprouvettes, possédait davantage de particules de la granulométrie des graviers par rapport à celui précédemment utilisé pour la recherche des paramètres à l'optimum Proctor.

Le dépouillement et l'interprétation des essais au perméamètre à paroi rigide donnent les résultats suivants (les annexes à ce rapport illustrent ces résultats au moyen de graphiques) :

Tabl. 3 : Valeurs des coefficients de perméabilité

Bentonite (%)	Coefficient de perméabilité (k en m/s)	Charge hydraulique (h en cm)
4	$2,7 \cdot 10^{-7}$	2
6	$1,3 \cdot 10^{-7}$	1,5

Comme l'indique la courbe de la figure 2 ci-dessous, l'évolution de la perméabilité des éprouvettes de craie traitée à la bentonite va dans un sens décroissant et tend à l'amélioration du coefficient de perméabilité vers le domaine des perméabilités moyennes (de l'ordre de 10^{-7} m/s).

Cependant, comme nous pouvons le constater, l'amélioration du coefficient de perméabilité apportée par le traitement de la craie à la bentonite n'est pas significatif (amélioration du coefficient d'un facteur de 10 par rapport à celui obtenu après compactage à l'optimum Proctor) et ne permet pas d'atteindre l'objectif recherché initialement, c'est à dire l'obtention d'un coefficient de perméabilité faible (de l'ordre de 10^{-9} m/s).

L'explication de ce manque de réussite tient à la fois à la trop faible énergie Proctor employée lors du compactage des éprouvettes (en effet, l'énergie au Proctor normal ne permet pas d'obtenir une bonne fragmentation du matériau), et au manque d'homogénéité du matériau qui ne permet pas d'atteindre un poids volumique sec optimal (des valeurs de l'ordre de 15,0 à 16,0 kN/m³ sont généralement attendues pour la même teneur en eau à l'optimum Proctor).

Ainsi, le coefficient de perméabilité n'est pas seulement affecté par l'énergie de compactage et la teneur en eau de l'éprouvette à l'optimum mais également par d'autres paramètres qui sont propres à la nature du matériau compacté comme l'existence d'une fraction grossière (à partir d'un certain pourcentage de fraction grossière, la fraction fine ne permet plus le comblement de tous les vides, ceci quel que soit l'énergie de compactage employée).

En conséquence et afin de se placer dans des conditions optimum, nous recommandons d'employer pour la mise en œuvre du matériau un moyen de compactage puissant (celui qui se rapproche le plus d'une énergie Proctor modifié).

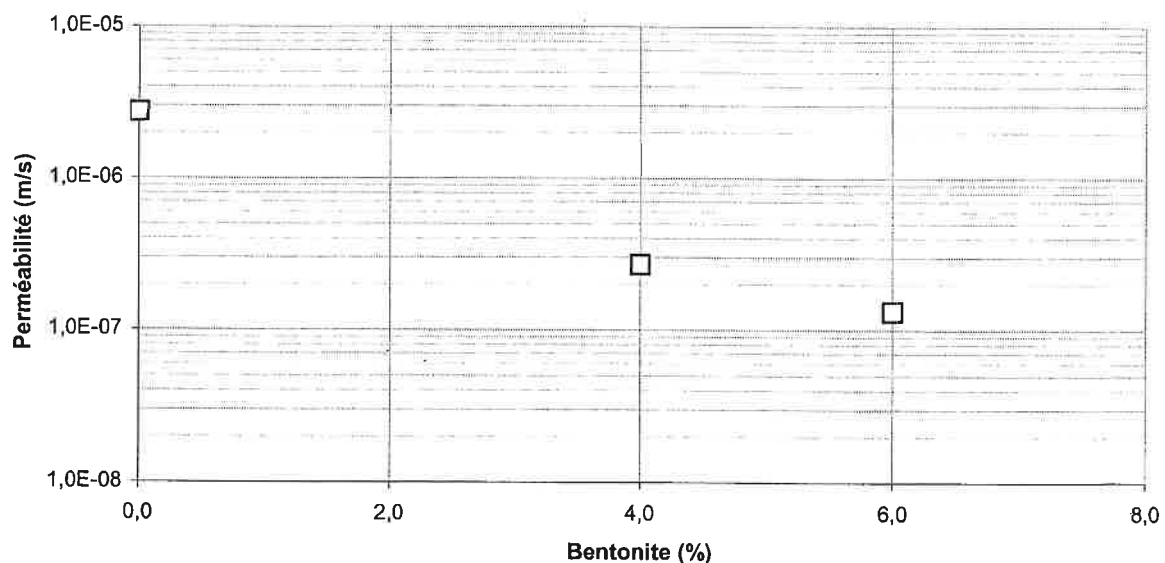


Fig.2 : Evolution de la perméabilité de la craie traitée à la bentonite

Conclusion

En totalité, trois essais au perméamètre à paroi rigide, à volume constant et charge hydraulique constante, ont été réalisés, comprenant un essai sur la craie naturelle (compactée et non traitée) et deux essais sur la craie traitée à des concentrations de 4 et 6 % de bentonite (à une teneur en eau proche de 23 %). Ces essais ont été conduits sur des éprouvettes de craie compactée à l'énergie Proctor normal.

Remarque : Un essai de perméabilité conduit sur une éprouvette de craie non traitée à la bentonite et compactée à l'énergie Proctor modifié n'a pas pu se poursuivre en raison de l'apparition d'une fuite à la base de la cellule.

Aucun des coefficients de perméabilité obtenus pour la craie traitée atteint l'objectif souhaité ($k \leq 5.10^{-9}$ m/s).

Les essais pratiqués sur ce matériau ont mis en évidence la nécessité d'employer une technique de compactage appropriée à la nature inhomogène du matériau. C'est pourquoi, nous recommandons d'employer sur site une technique qui se rapproche le plus de celle obtenue en laboratoire à l'énergie Proctor modifié.

Pour les besoins de la note de calcul en équivalence hydraulique, nous demandons à ce que ces essais soient poursuivis par un nouvel essai sur une éprouvette de craie compactée à l'énergie Proctor modifié. En effet, d'après les premières valeurs mesurées lors de l'essai infructueux, il semblerait que ce moyen de compactage soit plus appropriée pour atteindre l'objectif attendu (et ceci sans traitement à la bentonite de la craie).

D'autre part, la valeur du coefficient de perméabilité obtenue lors de cet essai nous permettra de simuler avec plus de réalisme le scénario concernant la disposition constructive de la barrière de sécurité passive projetée à ce jour, avec de bas en haut la succession suivante : la craie en place (k de l'ordre de 10^{-5} m/s), une couche de craie compactée et non traitée (k de l'ordre de 10^{-8} m/s), un géosynthétique bentonitique (k de l'ordre de 10^{-11} m/s).

Dans tout les cas de figures, et à la lecture des recommandations à venir concernant la disposition constructive de la barrière de sécurité passive et à sa mise en œuvre, il sera prudent d'envisager de réaliser sur site une planche d'essai (avant toute exécution du procédé à l'ensemble du nouveau casier), de façon à valider la faisabilité et la qualification du scénario retenu par des essais in situ.

A Couradin

A. COURADIN

G. DIDIER

Annexes

Essais de perméabilité au perméamètre à paroi rigide

A.1 : Craie traitée à 4 % avec de la bentonite

A.2 : Craie traitée à 6 % avec de la bentonite

2

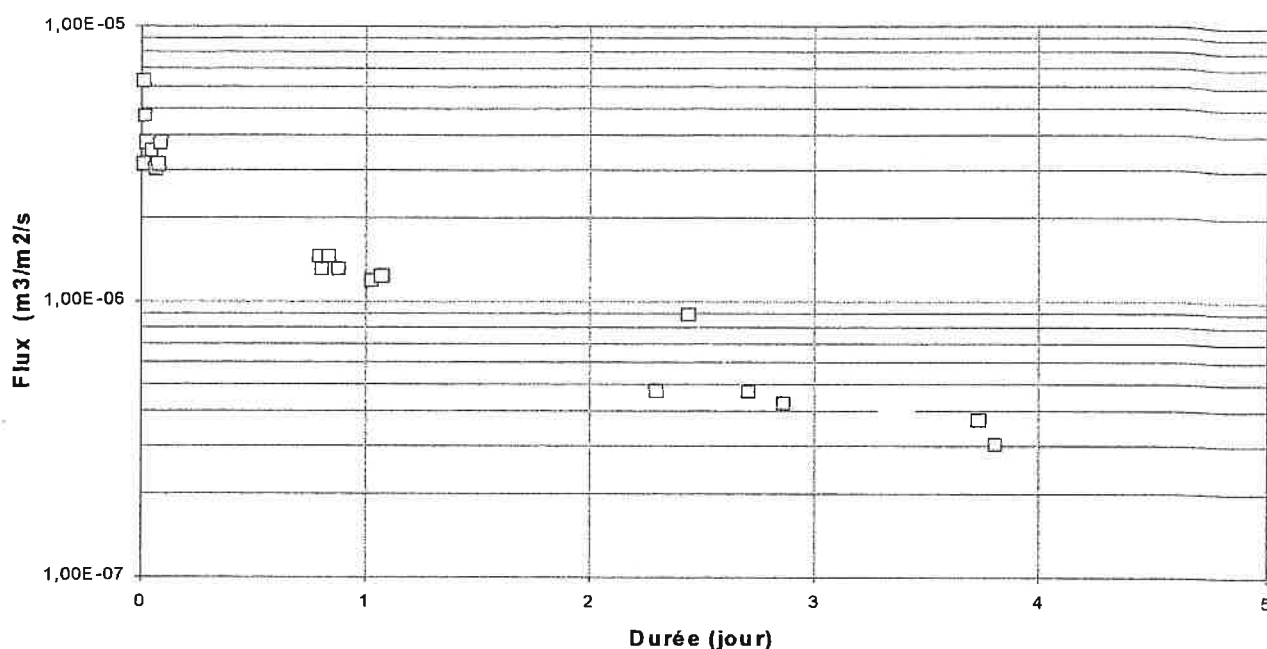


Fig. 1.1 : Evolution de la vitesse d'infiltration en fonction du temps

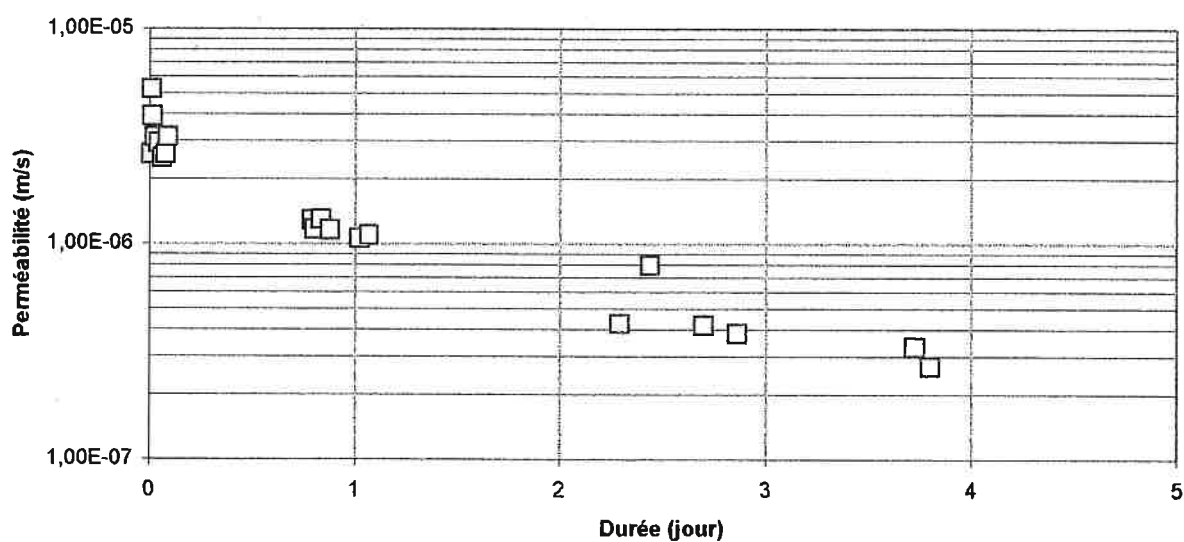



Fig. 1.2 : Evolution de la perméabilité en fonction du temps

COVERED CSD de Nurlu (80)	Projet n° : 2131/171	Annexe A.1
	Date : 17/01/02	
Perméamètre à paroi rigide Craie à 4 % de bentonite		Dess. : AC
		Ech. : -

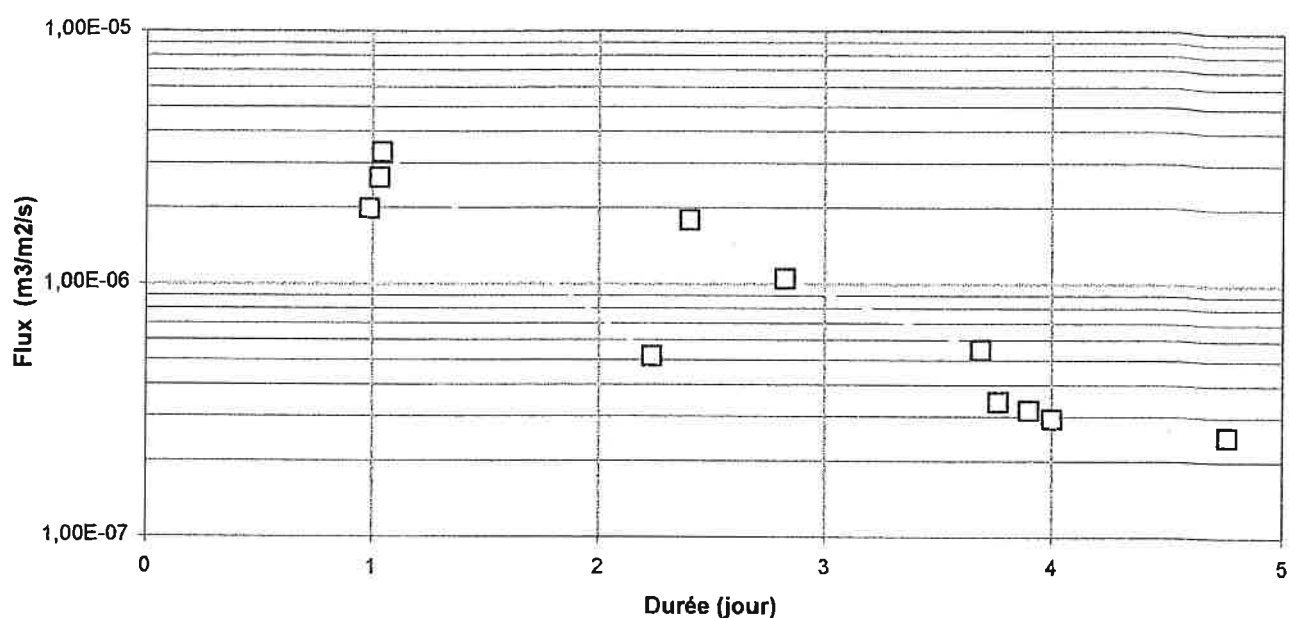


Fig. 1.1 : Evolution de la vitesse d'infiltration en fonction du temps

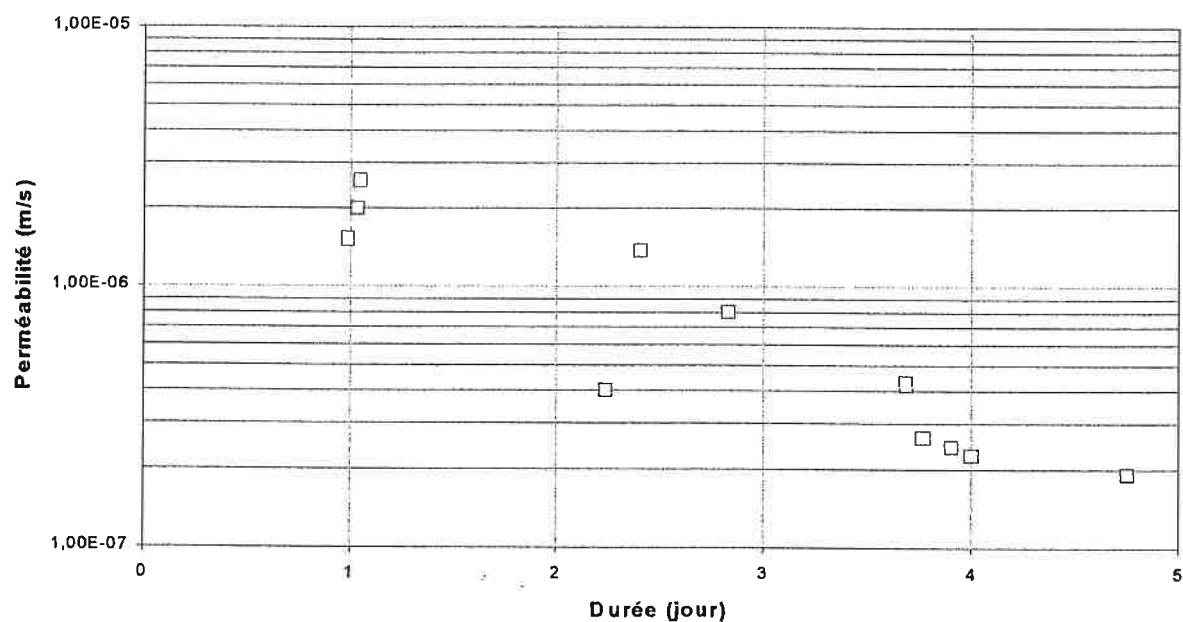



Fig. 1.2 : Evolution de la perméabilité en fonction du temps

COVED <i>CSD de Nurlu (80)</i>	Projet n° : 2131/171	Annexe A.2
	Date : 17/01/02	
Perméamètre à paroi rigide Craie à 6 % de bentonite		Dess. : AC
		Ech. : -