

LE CONCEPT DE « CONFINEMENT RAISONNÉ », OUTIL DE GESTION DES POLLUTIONS EN PLACE : ÉTUDE DE CAS DU SITE DE FITIUU, POLYNÉSIE

THE « SUSTAINABLE CONFINEMENT » CONCEPT, A MANAGEMENT TOOL FOR POLLUTED SITE: CASE STUDY ON FITIUU, FRENCH POLYNESIA

Thierry CHASSAGNAC
3C, Lyon, FRANCE

RÉSUMÉ – Depuis l'avènement des solutions de confinement des sources polluantes, la tendance des concepteurs a souvent été de faire le choix d'une imperméabilité possédée dont l'objectif visait l'arrêt des transferts solides, liquides et gazeux vers l'extérieur. Ce concept peut poser le problème de la durabilité des solutions et de transfert du problème aux générations futures. Le contre-pied de cette tendance, obtenu en réglant les niveaux de transfert à des valeurs éco-compatibles, via des géosynthétiques sur mesure par exemple, permet de mettre à profit certains mécanismes d'atténuation pour viser une atténuation maîtrisée de la source de pollution tout en maintenant un niveau de risque acceptable pour l'homme et les milieux. La communication présente une étude de cas de maîtrise des transferts liquides et gazeux sur l'île de Bora-Bora.

Mots-clés : GSB, confinement durable, ammonium, dioxine, fenêtre d'oxydation passive.

ABSTRACT – Since the confinement techniques development, the trend used to be to search complete impermeable solutions to stop completely the transfers from or toward the polluted source. On the contrary, it can be interesting to take advantage from natural attenuation mechanisms, by using geosynthetics for example, to regulate the transfer ratio in order to obtain environmental compatible conditions. The paper presents a case study of gaseous and liquid transfer management in Bora Bora, French Polynesia.

Keywords: GCL, sustainable confinement, ammonium, dioxins, passive oxidation window

1. Contexte

1.1. Introduction

Depuis l'avènement des solutions de confinement en tant que méthode de maîtrise des risques liés aux sols pollués, la tendance pour les concepteurs a souvent été de faire le choix de solutions radicales en recherchant avant tout de hautes performances d'imperméabilité dont, l'objectif clairement affiché, visait l'arrêt quasi-total des transferts solides, liquides et gazeux depuis la source vers l'extérieur et vice versa. Si ce concept d'isolement complet de la source peut s'avérer judicieux dans le cas de problématiques aiguës (substances à fort potentiel risque, cibles très exposées, absence de réelle solution de traitement), il pose le problème de la durabilité des solutions de confinement et de transfert du problème aux générations futures.

De plus, en prenant le contre-pied de cette tendance, il peut apparaître intéressant, dans le cadre de solutions de confinement, de mettre à profit certains mécanismes d'atténuation (dégradation, lixiviation, dilution, volatilisation,...) pour viser une atténuation progressive et maîtrisée de la source de pollution tout en maintenant un rejet éco-compatible avec un niveau de risque acceptable pour l'homme et les milieux.

Certains géosynthétiques bentonitiques (GSB), dont la perméabilité est calée en usine, peuvent permettre une certaine maîtrise du débit de fuite

C'est ce concept de confinement dit « raisonné » qui devra être mis en œuvre sur le site de Fitiuu sur l'île de Bora-Bora confrontée à une problématique de stockage de sols pollués et de déchets

1.2. La problématique du site

1.2.1. Le « traitement » des déchets de l'île

Les surfaces constructibles disponibles sont denrées rares sur cette île de l'archipel des Iles Sous Le Vent de faible superficie (3km x 7km) et au relief escarpé. Cette rareté a poussé promoteur hôtelier et

collectivité locale à vouloir réutiliser un ancien site de traitement de déchets pour un projet de logement du personnel hôtelier.

Le traitement local des déchets ménagers était, jusque récemment encore, pratiqué par brûlage des matériaux à l'air puis mélange des cendres, mâchefers et résidus imbrûlés (plus de 50%) avec un sol prélevé sur site. Le « process » est pratiqué sans règles d'exploitation sur une surface limitée, dans des fosses aménagées à cet effet. Les matériaux anciens, déjà issus d'un traitement anciens sont sans cesse repris pour être remélangés aux nouveaux résidus. On aboutit ainsi à un site d'environ 2 ha, constitué d'un remblai de 2 à 5 m d'épaisseur issu d'un mélange de sols et de déchets plus ou moins brûlés en proportion volumique de 50/50 en moyenne. Du fait du manque de place, les déchets les plus récents sont stockés en andains, les plus anciens représentant la partie plane du site.

La combustion des déchets génère une fumée épaisse en quasi permanence, combustion entretenue par des reprises de feu spontanées liée à une production résiduelle de biogaz, le matériaux reste en effet riche en matière organique (quelque %).

1.2.2. L'état environnemental du site

Un diagnostic du site a été prescrit par les autorités territoriales et réalisé par le groupement INERIS – 3C, il a montré les résultats suivants :

Le contexte géologique et hydrogéologique est sensible :

Le contexte du site se présente sous forme d'un flanc basaltique raide, constitué d'un complexe de coulées pendant vers la mer, affleurant en partie haute et recouvert dans la partie basse par des formations diverses constituées comme suit :

*en pied de versant, le socle basaltique est recouvert par une frange de sols meubles issus de l'altération du substratum et constitués de sables limono argileux marron (dits mamu).

*au niveau du rivage, le basalte est surmonté par la formation corallienne constituée de bas en haut par le récif en lui même, massif et dur, qui constitue le platier corallien, localement surmonté par une frange de sables et graves coralliens dits « soupe corallienne », ainsi qu'un niveau d'anciens sols, argilo-limono vasards, très riches en matière organique (système racinaire de cocotiers notamment).

L'ensemble des sols meubles ci-dessus a été remanié par l'exploitation du site jusqu'au platier ou au basalte.

Du point de vue hydrogéologique, L'ensemble des formations décrites ci-dessus possède une porosité, faible pour les faciès dur, basalte et platier, et plus importante pour les sols meubles, qui permet une infiltration et une circulation des eaux infiltrées. La nappe souterraine ainsi constituée montre un sens d'écoulement vers le lagon qui constitue son exutoire. Ce milieu écologiquement très sensible est essentiel pour l'activité économique locale orientée vers le tourisme.

Le niveau de la nappe varie fortement en fonction des précipitations qui représentent plus de 2m d'eau par an. Cette nappe, peu développée, n'est pas exploitée localement. On a ainsi un massif de déchets lixivié par d'importante quantité d'eau qui se déversent au final dans un milieu très sensible. Le schéma conceptuel du système est présenté sur la figure 1. La figure 2 montre la conformation du site.

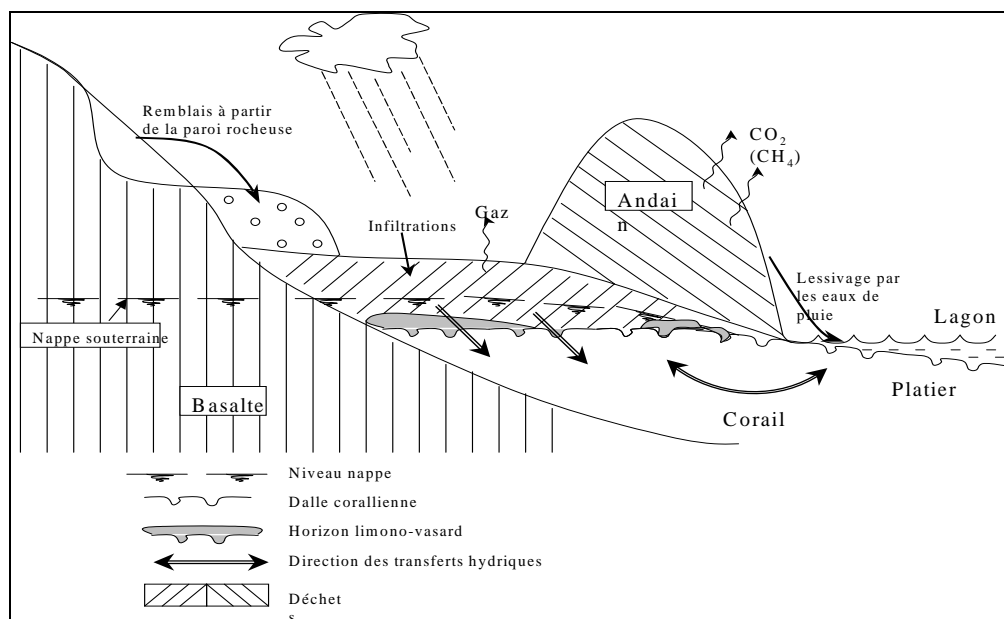


Figure 1. Schéma conceptuel du fonctionnement hydraulique du site de FITIUU (octobre 2007)



Figure 2. Vues du site

Le massif de déchets conserve un potentiel polluant non négligeable :

Les analyses des déchets, des gaz et des lixiviats, associées aux reconnaissances à la pelle mécanique du massif, ont mis en évidence une dégradation avancée des déchets, en dehors des zones de déchets récents. Les processus de dégradation actifs à cette date sont :

- * essentiellement représentés par une dégradation aérobie,
- * localement constitués de foyers résiduels anaérobies ou mixtes,
- * ponctuellement représentés par une oxydation par combustion.

La charge organique émise par cette décharge est relativement limitée et se traduit par l'émission d'une eau à Demande Chimique en Oxygène (DCO) modérée et d'un débit de biogaz faible à modéré constitué de CO₂, de méthane et de faibles traces de Composés Organiques Volatils (COV). La charge minérale est essentiellement constituée de sels et d'ions majeurs à des concentrations inférieures au milieu marin.

Le potentiel polluant du site peut être qualifié de modéré et en voie d'épuisement, en ce qui concerne les déchets les plus anciens. En revanche les andains aériens, formés de déchets plus récents, possèdent encore un potentiel polluant non négligeable.

Le massif se caractérise également par la présence de micropolluants essentiellement représentés par des dioxines et furanes en quantité significative.

Ces substances sont entraînées par les eaux sous forme adsorbée sur les particules fines et se déposent en partie dans le lagon générant un risque de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire.

1.2.3. Orientation des solutions de traitement du site

Compte tenu de ces constats, les risques pour l'homme et pour l'environnement ont été jugés inacceptable et il a été décidé d'extraire les sols pollués et déchets et de les stocker localement dans des conditions limitant les risques pour l'homme et les milieux.

Du fait des faibles capacités du Centre d'Enfouissement Technique (CET) local, la solution s'est orientée vers un stockage dédié à proximité immédiate du dépôt actuel.

2. Dimensionnement de la solution de confinement

2.1. Objectifs du confinement

Le diagnostic de la décharge de FITIUU a montré que le potentiel polluant des déchets était en partie épuisé mais que ces derniers conservaient toutefois un potentiel de dégradation qui se manifeste notamment par une production résiduelle de biogaz.

Dans un esprit de développement durable, les concepteurs du projet ont proposé de ne pas rechercher un confinement total des déchets mais d'orienter la solution vers un système conduisant à moyen terme à la stabilisation de la source polluante.

Afin d'épuiser complètement ce potentiel polluant, il convient de conserver les légères entrées d'eau nécessaires aux bactéries pour la dégradation complète des déchets et à leur stabilisation définitive à

terme sans pour autant générer un flux polluant non assimilable par le milieu. Ainsi, un confinement de surface suffisamment performant mais non complètement étanche à l'eau sera recherché.

La production gazeuse résiduelle reste suffisamment faible pour être complètement traitée par oxydation bactérienne au sein de son transfert au travers de la couverture. Des fenêtres oxydantes perméables au gaz seront ménagées dans ce but. Ces fenêtres ne devront pas être plus perméables à l'eau que le reste de la couverture.

De plus, le dispositif de confinement devra être équivalent au dispositif réglementaire qui prévoit la constitution d'une barrière passive de fond d'une perméabilité maximale de 10^{-7} m/s.

2.2. Fixation du flux polluant acceptable par le milieu

L'objectif est de fixer une performance globale du dispositif de confinement soit un débit de fuite admissible (Q_{obj}) sans risque pour le milieu. Le dimensionnement s'est basé sur les règles et hypothèses suivantes :

- * le flux de lixiviat exfiltré par le système ne devra pas se traduire par un impact mesurable sur le milieu. Les concentrations en polluant émis devront rester sous le seuil de quantification analytique (C_{LQ}) au niveau du premier milieu récepteur (la nappe) ;

- * les concentrations du lixiviat émis C_{lix} sont les concentrations maximales du lixiviat mesurées au sein du massif de déchets lors du diagnostic, affectées d'un coefficient de sécurité de 2 ;

- * les concentrations dans le milieu récepteur C_{nappe} , issue de la dilution du débit de fuite du stockage par la nappe sont calculées à partir des concentrations C_{lix} et du débit naturel de la nappe transitant sous le stockage Q_{nappe}

Ainsi, le principe de conservation de la masse permet d'écrire les équations suivantes :

$$\text{avec } C_{lix} \times Q_{obj} = Q_{nappe} \times C_{nappe} \quad (1)$$

$$C_{nappe} = C_{LQ} \quad (2)$$

d'où

$$Q_{obj} = Q_{nappe} \times (C_{nappe} / C_{lix}) \quad (3)$$

Les débits de fuite ont été calculés pour chaque polluant significatif et le flux le plus faible a été retenu. Ainsi on a retenu la valeur objectif de débit de fuite de *5 litres/m²/an*.

On notera toutefois que ce débit induit une concentration d'ammonium dans la nappe au dessus de l'objectif C_{LQ} . Afin d'éviter un impact de ce polluant néfaste pour la vie aquatique mais facilement dégradable, un dispositif de traitement par lagunage naturel devra être aménagé en aval hydraulique souterrain du stockage.

2.3. Concept général de confinement

Le concept de confinement comprend un élément de fond (ou sole) du stockage et des éléments de surface : écran peu perméable à l'eau et fenêtres d'oxydation.

Les caractéristiques hydrauliques de la sole ont été fixées à des valeurs respectant les valeurs réglementaires. (Épaisseur minimale : 0,5m, Perméabilité : 10-8m/s). Outre l'aspect réglementaires, la fonction de la sole est de filtrer les particules afin d'éviter l'entraînement des dioxines adsorbées sur les fines.

Le confinement supérieur consistera en une succession de gradins à toits étanchéifiés et à flancs non étanchéifiés.

Les toits, de faible pente, ont pour fonction principale de régler le débit admissible dans le massif et d'évacuer le surplus d'eau non autorisé. Les eaux retenues par les toits seront drainées et évacuées par un système de drainage. Les eaux de ruissellement seront collectées à « contre pente » de manière à éviter une surcharge hydraulique sur les flancs et leur infiltration.

Les flancs constitueront des fenêtres oxydantes. Elles ne seront pas équipées d'étanchéité afin de permettre le transfert des gaz pour oxydation naturelle du méthane en gaz carbonique via le développement spontané de colonies méthanotrophes. L'absence d'infiltration d'eau sera obtenue par une pente suffisante pour évacuer la majeure partie de l'eau via le ruissellement, complété par l'évapotranspiration. Le calage des flux s'obtient de façon itérative via un bilan hydrique en faisant varier le paramètre pente (donc le coefficient de ruissellement) de façon à obtenir le débit entrant approprié.

2.4. Dimensionnement des fenêtres oxydantes

* En termes de flux gazeux oxydable

La production résiduelle gazeuse a été estimée à quelque m³/h du fait d'un taux de brûlage important et à de bonnes conditions de dégradation aérobie.

La capacité naturelle d'oxydation est évaluée, dans les conditions régnant sur site (température proche de 25°C en permanence, forte humidité) à plusieurs dizaines de m³/h/ha. La dégradation du débit résiduel pourra ainsi être obtenu sur quelques centaines de mètres carrés.

* En termes de flux hydrique

La performance hydraulique des fenêtres oxydantes est testée par un calcul de bilan hydrique. Les données considérées sont les suivantes : paramètres climatologiques : T°C et précipitation, évapotranspiration : ETP, coefficient de correction de l'ETP, coefficient de ruissellement variable selon la pente prise en compte, RFU max dépendant de la nature et de l'épaisseur du recouvrement de l'écran.

Notons que le terme de perte en eau via le biogaz généré a été négligé dans le calcul.

Le calcul de bilan hydrique ci-dessous, montre qu'au delà d'une certaines pentes (ici 1V/2H avec un coefficient de ruissellement de 0,6), l'évapotranspiration consomme toutes les eaux infiltrées et que l'objectif de 5 l/m²/an est respecté.

Tableau I. Bilan hydrique sur les fenêtres oxydantes

Données	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annue I
ETP	110,6	111,6	160,2	177,4	181,4	171,7	178,4	181,8	167,8	150,1	125,4	99,6	1816,0
ETP corrigée	110,6	111,6	160,2	177,4	181,4	171,7	178,4	181,8	167,8	150,1	125,4	99,6	1816,0
Pluie	247,0	236,0	179,0	184,0	11,0	92,0	75,0	98,0	65,0	101,0	182,0	271,0	1741,0
Ruissellement entrant	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Apports	247,0	236,0	179,0	184,0	11,0	92,0	75,0	98,0	65,0	101,0	182,0	271,0	1741,0
Ruissellement sortant	148,2	141,6	107,4	110,4	6,6	55,2	45,0	58,8	39,0	60,6	109,2	162,6	1044,6
Apports - Rext	98,8	94,4	71,6	73,6	4,4	36,8	30,0	39,2	26,0	40,4	72,8	108,4	696,4
RFU	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	
ETR	107,0	94,0	72,0	74,0	4,0	37,0	30,0	39,0	26,0	40,0	73,0	99,6	695,6
Production de lixiviats	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

2.5. Dimensionnement de l'écran semi perméable en GSB

Le choix du matériau d'étanchéité s'est porté sur les Géosynthétiques Bentonitiques (GSB) du fait des difficultés à approvisionner le site avec des argiles naturelles et des possibilités, offertes par certains fabricants de GSB, de fournir des produits à perméabilité fixée sur mesure.

Pour obtenir l'efficacité maximum du GSB et limiter la charge hydraulique sur l'écran, il est nécessaire de le drainer. On préférera pour cela un géosynthétique de drainage du fait du coût et du manque de disponibilité des matériaux naturels et des conditions de pose plus aisées.

Le choix du GSB approprié consiste à déterminer ses caractéristiques de perméabilité en fonction de l'objectif fixé (5 l/an/m²). Pour cela on calcule le flux traversant le produit pour différentes perméabilités et en fonction du régime des pluies.

Le calcul est basé sur l'équation de Darcy et est réalisé en conditions extrêmes en considérant que les pluies significatives génèrent une saturation complète et permanente du drainage sur toute la durée de la pluie.

Les paramètres testés sont la perméabilité du GSB (K) et la durée des précipitations.

Les paramètres fixés sont la hauteur H de charge hydraulique sur l'écran, pris égal à l'épaisseur du géodrain, considéré comme non mis en charge, l'épaisseur de l'écran géosynthétique,

De plus on prend en compte les hypothèses suivantes :

- * un jour de pluie correspond à un jour de saturation du drain;
- * un jour sans pluie correspond à un drain non chargé (pas d'infiltration) ;

* il n'y a pas d'infiltration pour une pluie inférieure à 1mm/j, un début d'infiltration apparaissant pour les pluies entre 1 et 10mm/j.

Tableau II. Valeurs du flux d'infiltration en fonction de la perméabilité du GSB et de la durée de pluies

K (m/s)	flux infiltré (m ³ /s)	infiltration sur 100j* (L/m ²)	infiltration annuelle (L/m ²)			
			50j de pluie	100j de pluie	150j de pluie	200j de pluie
10 ⁻⁷	2,3.10 ⁻⁷	2016	1008,0	2016,0	3024,0	4032
10 ⁻⁸	2,3.10 ⁻⁸	201,6	100,8	201,6	302,4	403,2
10 ⁻⁹	2,3.10 ⁻⁹	20,16	10,1	20,2	30,2	40,32
10 ⁻¹⁰	2,3.10 ⁻¹⁰	2,02	1,0	2,0	3,0	4,04
10 ⁻¹¹	2,3.10 ⁻¹¹	0,202	0,1	0,2	0,3	0,4032

*: calculé pour une durée de 100j de pluie saturant les sols à 100% (cas extrême, hypothèse fortement majorante)
valeurs supérieures à quelques litres par an

Ainsi le produit déterminé devra posséder une perméabilité de l'ordre de 10⁻¹⁰ m/s

3. Design des solutions

3.1. Drainage préalable

La réalisation préalable d'un drainage du fond correspond à la recherche de plusieurs objectifs :

- Permettre un accès aisé pour les engins dans un contexte de nappe affleurante et en charge
- reconstituer une zone non saturée sous la sole du stockage et permettant de meilleures conditions d'atténuation naturelle
- canaliser les eaux de nappe vers la lagune aval afin de permettre la nitrification de l'ammonium (oxydation en nitrate) potentiellement contenu dans les lixiviats exfiltrés du massif.

Un drainage sera donc réalisé à -2m sous le niveau fini de la sole à partir de drains enfouis en périphérie et sous la sole. Il permettra le transfert de la totalité des eaux influencées par le stockage vers la lagune de traitement, cette dernière représentant l'exutoire principal des eaux souterraines du secteur.

3.2. La sole

La sole sera obtenue à partir du compactage des argiles locales (10⁻⁷ m/s environ) afin d'obtenir un niveau de faible perméabilité (objectif 10⁻⁸ m/s). Sa forme en V permettra de guider les infiltrations vers la lagune de traitement.

3.3. Couverture : écran et fenêtres oxydantes

Le fonctionnement du concept de la couverture est étroitement lié à la maîtrise des pentes et des écoulements superficiels et souterrains. Le design, illustré par les figures 3 et 4, comprend la création de zones peu pentues, en toit de massif et en risberme, avec écoulement central pour limiter les venues d'eau vers les talus, la pose d'un GSB correctement drainé, d'un géodrain et d'un réseau de drain de collecte acheminant les eaux vers la lagune aval. On notera que la rareté de sols utilisables ne permet pas le confinement du GSB par une épaisseur satisfaisante de sols (30 cm uniquement). Pour pallier le déficit d'imperméabilité qui risque d'en résulter à terme, une sécurité d'un facteur 10 a été recommandé quant au choix du GSB 10⁻¹¹ m/s au lieu de 10⁻¹⁰ m/s.

Les fenêtres oxydantes sont localisées au niveau de l'ensemble des talus du massif. La forte pente évite les infiltrations excessives d'eau afin de respecter l'objectif de flux autorisé. Les contre-pentes du toit évitent une surcharge hydraulique et son infiltration dans les talus. L'épaisseur de la terre végétale (40cm) et la nature de la végétalisation sélectionnée permettent d'optimiser les conditions d'oxydation passive du méthane (20 fois plus puissant que le CO₂ en termes d'effet de serre).

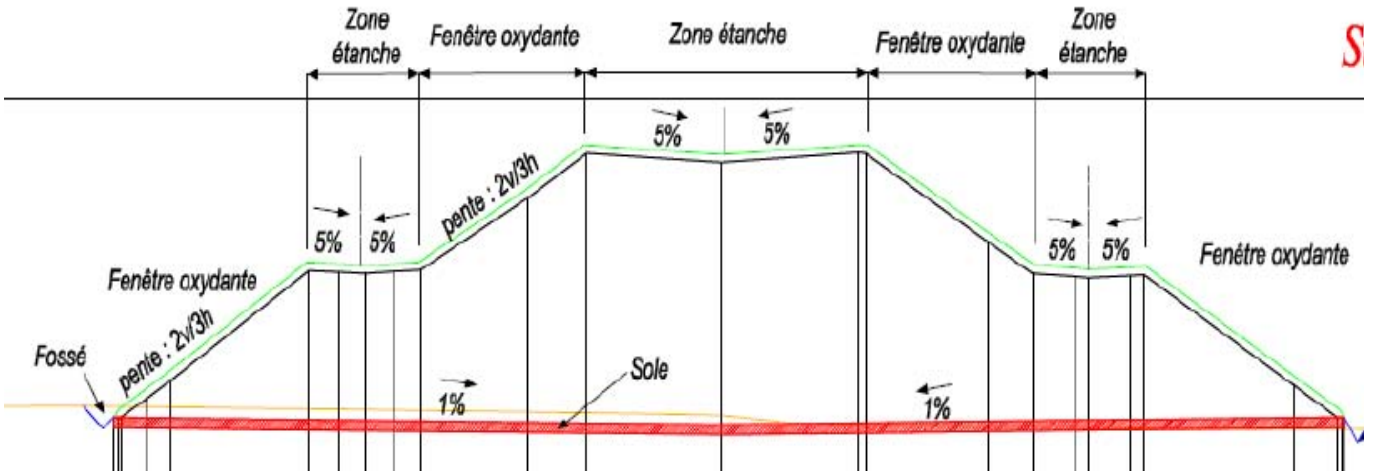


Figure 3. Coupe en travers du stockage

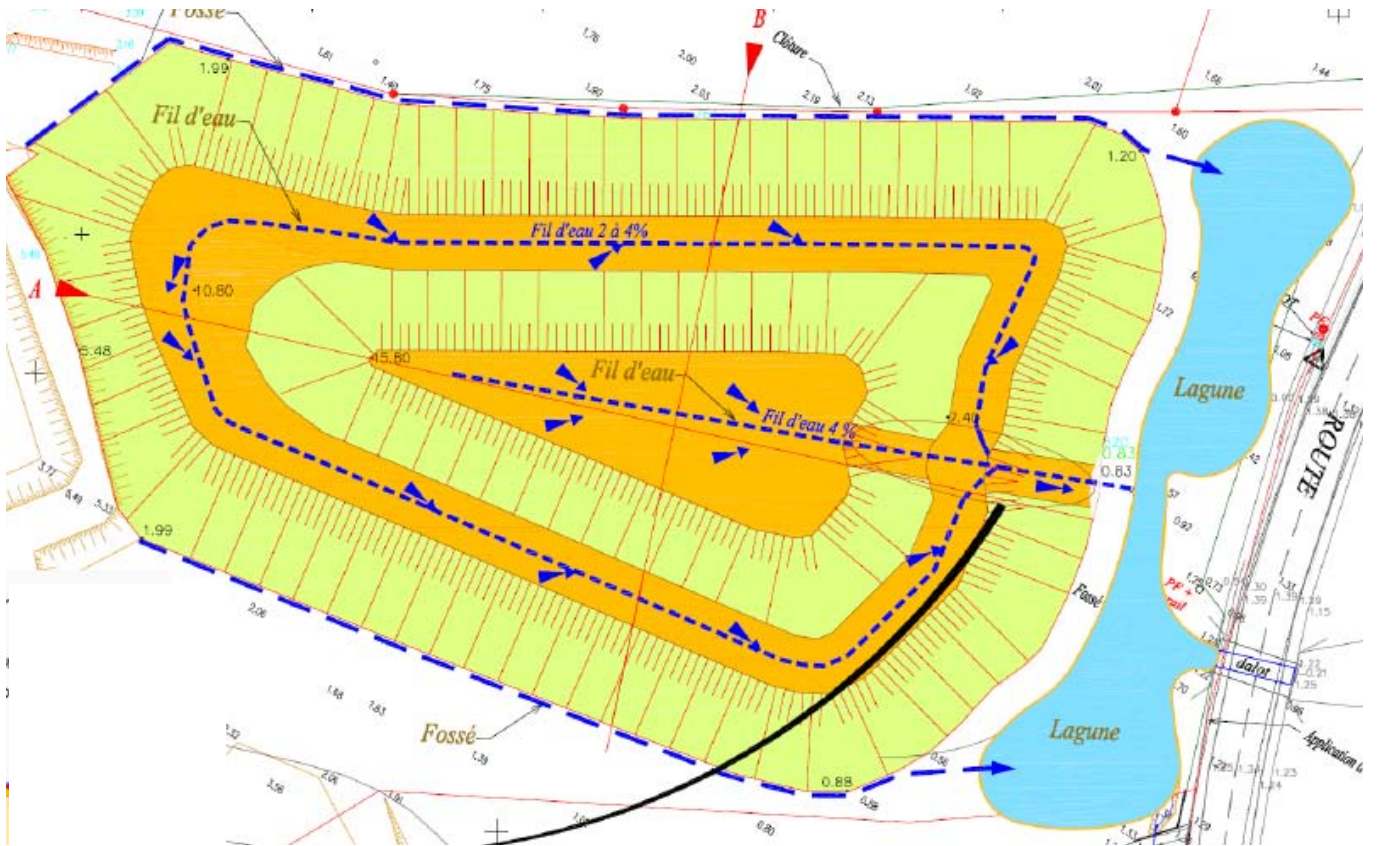


Figure 4. Vue en plan du stockage

4. Conclusions

Le confinement poussé des sources de pollution peut conduire à des phénomènes de type « dry tomb » et à des redynamisations des phénomènes de relargage à long terme du fait que les confinements construits perdront inévitablement leurs performances. Le dimensionnement des barrières artificielles à un niveau tel que les flux traversants autorisés restent éco-compatibles est une solution qui permet à la fois l'obtention d'un impact acceptable, l'atténuation du niveau de pollution de la source polluante et la réduction ou la suppression de l'effet « dry tomb ».