

# Le « confinement raisonné », outil de gestion des pollutions en place : étude de cas et retour d'expérience du site de Fitiuu en Polynésie française

Thierry Chassagnac

**D**epuis 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. L'objectif clairement affiché était la recherche de hautes performances d'imperméabilité, c'est-à-dire 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 soulève la question de la durabilité des solutions de confinement et pose le problème du transfert 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 permettent 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.

## La problématique du site

### Le « traitement » des déchets de l'île

Les surfaces constructibles disponibles sont rares sur cette île de l'archipel des Iles Sous Le Vent dont la superficie est faible (3 km x 7 km) et le relief escarpé. Cette rareté a poussé promoteur hôtelier et collectivité locale à réutiliser un ancien site de traitement de déchets pour un projet de logement du personnel hôtelier.

Jusque récemment encore, le traitement local des déchets ménagers était 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 ancien sont sans cesse repris pour être re-mélangés 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 matériau reste en effet riche en matière organique (2 à 10 %).

#### Les contacts

7 Place de la salle des fêtes, 69480 Morancé

1. Institut national de l'environnement industriel et des risques.

▼ Figure 1 – Schéma conceptuel du fonctionnement hydraulique du site de Fitiuu (octobre 2007). Les sols présentent une porosité plus ou moins importante permettant une infiltration conséquente dont l'exutoire se situe dans le lagon (source : Ineris-3C).

### L'état environnemental du site

Un diagnostic du site a été prescrit par les autorités territoriales et réalisé par le groupement Ineris<sup>1</sup>-3C, il a montré les résultats suivants.

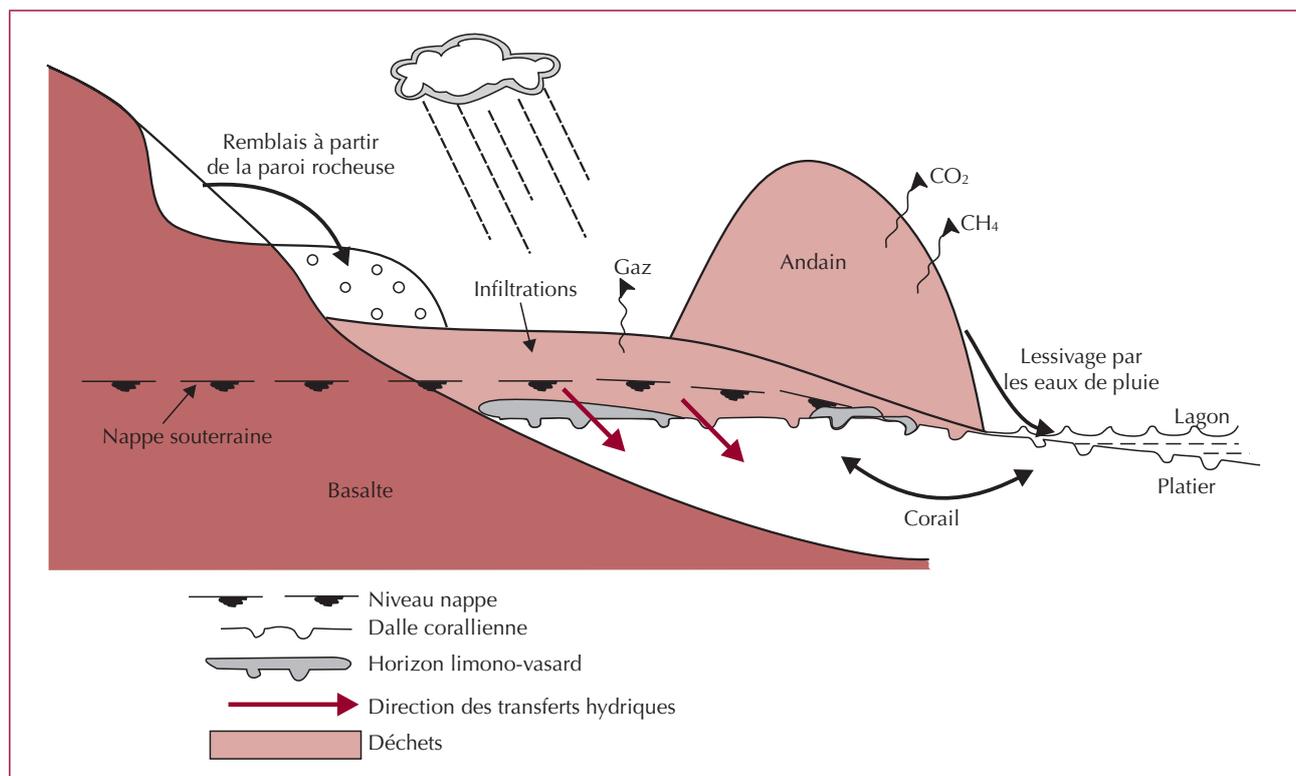
Le contexte géologique et hydrogéologique du site est sensible. Il se présente sous forme d'un flanc basaltique raide, constitué d'un complexe de coulées pendant vers la mer, affleurant en partie haute et recouvert dans la partie basse par des formations diverses constituées comme suit :

- 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 gravas 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 durs (basalte et platier), et plus importante pour les sols meubles, ce qui permet une infiltration et une circulation des eaux infiltrées. La nappe souterraine montre un sens d'écoulement vers le lagon qui constitue son exutoire. Ce milieu écologiquement très sensible est essentiel pour l'activité économique locale principalement orientée vers le tourisme.

Le niveau de la nappe varie fortement en fonction des précipitations qui représentent plus de 2 m d'eau par an. Cette nappe, peu développée, n'est pas exploitée localement. On a ainsi un massif de déchets lixivie 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.

Le massif de déchets conserve un potentiel polluant non négligeable. Les analyses des déchets,





▲ Figure 2 – Vues du site, vues de l'est (à gauche) et de l'ouest (à droite) de l'andain de déchets anciens remaniés empiétant sur le lagon (photo : T. Chassagnac).

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  $\text{CO}_2$ <sup>2</sup>, 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

généralisant un risque de bio-accumulation dans la chaîne alimentaire.

### Orientation des solutions de traitement du site

Compte tenu de ces constats, les risques pour l'homme et pour l'environnement ont été jugés inacceptables 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.

### Dimensionnement de la solution de confinement

#### 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.

2. Dioxyde de carbone.

Afin d'épuiser complètement ce potentiel polluant, il convient de conserver de légères entrées d'eau nécessaires à la survie des bactéries pour assurer 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 aménagées 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.

### 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, qui sont utilisées pour calculer les débits de fuite des polluants.

$$C_{lix} \times Q_{obj} = Q_{nappe} \times C_{nappe} \quad C_{nappe} = C_{LQ}$$

d'où :

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

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/m<sup>2</sup>/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.

### 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 : 0,5 m ; perméabilité :  $10^{-8}$  m/s). Outre l'aspect réglementaire, 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.

## Dimensionnement des fenêtres oxydantes

### EN TERMES DE FLUX GAZEUX OXYDABLE

La production résiduelle gazeuse a été estimée à quelque m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/h/ha. La dégradation du débit résiduel pourra ainsi être obtenue 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 précipitations, ETP (évapotranspiration potentielle), coefficient de correction de l'ETP, coefficient de ruissellement variable selon la pente prise en compte, RFU (réserve facilement utilisable, 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 certaine pente (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/m<sup>2</sup>/an est respecté.

## Dimensionnement de l'écran semi-perméable en géosynthétiques bentonitiques

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/m<sup>2</sup>). 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 pendant toute la durée des pluies.

▼ Tableau 1 – Bilan hydrique sur les fenêtres oxydantes : le ruissellement important généré par la pente et le système de collecte en amont des talus, complété par l'évapotranspiration, évite la production de lixiviat au niveau des fenêtres oxydantes non étanchées

Données	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
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	1 816,0
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	1 816,0
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	1 741,0
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	1 741,0
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	1 044,6
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

▼ Tableau 2 – Valeurs du flux d'infiltration en fonction de la perméabilité du GSB et de la durée de pluies, la valeur de 100 et j/an est la plus probable ; cette hypothèse est majorée en supposant que la saturation des sols induite est totale.

K (m/s)	flux infiltré (m <sup>3</sup> /s)	Infiltration annuelle (L/m <sup>2</sup> )			
		50 jours de pluie	100 jours de pluie	150 jours de pluie	200 jours de pluie
10	$2,3 \cdot 10^{-7}$	1008,0	2016,0	3024,0	4032
10	$2,3 \cdot 10^{-8}$	100,8	201,6	302,4	403,2
10	$2,3 \cdot 10^{-9}$	10,1	20,2	30,2	40,32
10	$2,3 \cdot 10^{-10}$	1,0	2,0	3,0	4,04
10	$2,3 \cdot 10^{-11}$	0,1	0,2	0,3	0,4032

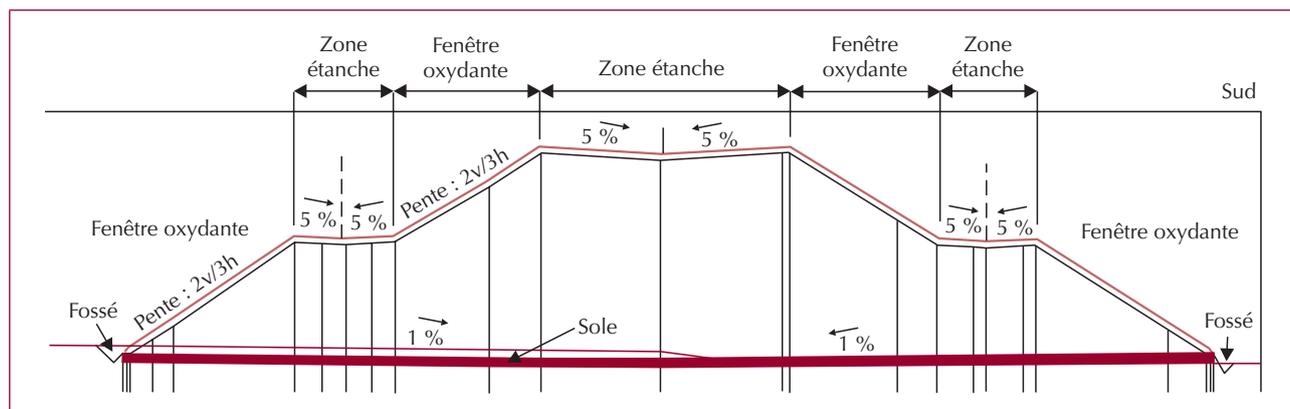
Les paramètres testés sont la perméabilité du GSB (K) et la durée des précipitations. Les paramètres fixés sont la hauteur H de charge hydraulique sur l'écran, pris égal à l'épaisseur du géodrain, considéré comme non mis en charge, l'épaisseur de l'écran géosynthétique...

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 1 mm/j, un début d'infiltration apparaissant pour les pluies entre 1 et 10 mm/j.

Ainsi le produit déterminé devra posséder une perméabilité de l'ordre de  $10^{-10}$  m/s.

▼ Figure 3 – Coupe en travers du stockage (conception : 3C).



## Design des solutions

### 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.

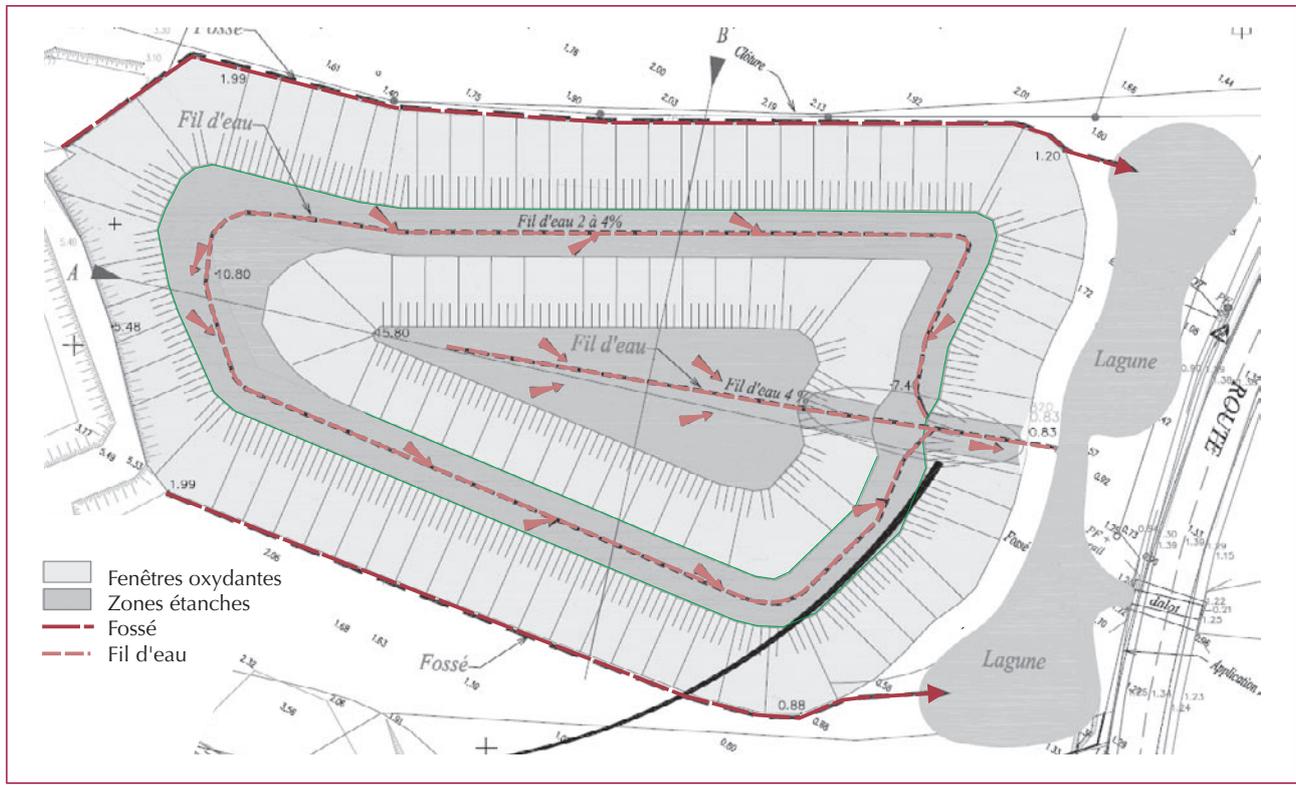
Un drainage sera donc réalisé à  $-2$  m sous le niveau fini de la sole, à partir de drains enfouis en périphérie et sous la sole. Il permettra le transfert de la totalité des eaux influencées par le stockage vers la lagune de traitement, cette dernière représentant l'exutoire principal des eaux souterraines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

### 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.

### 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 recommandée 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 (40 cm) et la nature de la végétalisation sélectionnée permettent d'optimiser les conditions d'oxydation passive du méthane (vingt fois plus puissant que le  $\text{CO}_2$  en termes d'effet de serre).

## Conclusion

Le confinement poussé des sources de pollution peut conduire à des phénomènes de type « *dry tomb* » (littéralement : tombe sèche) avec assèchement relatif des déchets sur-confinés et forte inhibition de la dégradation biologique. On peut ainsi s'attendre, suite à une ré-humidification des déchets, à des redynamisations des phénomènes de relargage du fait que les confinements construits perdront inévitablement leurs performances sur le long terme. L'expérience montre, notamment lors des nombreux diagnostics sur les anciennes décharges françaises, que des sites traités « intuitivement » par des couvertures modérément perméables peuvent, selon les conditions hydrogéologiques, émettre des charges polluantes suffisamment faibles pour induire un impact acceptable malgré un contenu polluant significatif. Le dimensionnement formel des barrières artificielles via le calcul et à un niveau tel que les flux traversants autorisés restent compatibles avec les contraintes de qualité souhaitées pour les milieux affectés est ainsi une solution qui permet à la fois l'obtention d'un impact acceptable, l'atténuation du niveau de pollution

▲ Figure 4 – Vue en plan du stockage (conception : 3C).

de la source polluante et la réduction du risque lié à l'effet « *dry tomb* ». Il est toutefois souhaitable de confirmer les résultats des calculs par un

suivi de qualité des milieux, notamment par un suivi piézométrique et des mesures d'émissions gazeuses. □

### 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 poussée 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.

### Abstract

Since the confinement technics 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.