

UTILISATION DES MATÉRIAUX GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LA GESTION ET LA DÉPOLLUTION DES SITES ET SOLS POLLUÉS (SSP)

THE USE OF GEOSYNTHETIC PRODUCTS IN REMEDIATION TECHNIQUES

Thierry GISBERT
ARCADIS, Le Plessis Robinson, France

RÉSUMÉ – Après une présentation de la problématique générale des sites et sols pollués, plusieurs exemples d'utilisation des matériaux géosynthétiques dans les techniques de dépollution des sols et des sites industriels sont présentés brièvement. Cette analyse permet un premier classement des domaines d'utilisation et des familles de produits géosynthétiques correspondants. Nous nous sommes attachés également à rechercher les principes conceptuels qui ont été suivis dans le cadre des chantiers étudiés, afin d'en proposer une analyse critique et de formuler des recommandations.

Mots-clés : Sites et sols pollués - dépollution - géosynthétiques - études de cas - conception

ABSTRACT – After a general presentation of the polluted sites set of problems, several case studies involving the use of geosynthetic materials for their remediation (including industrial former plants) have been analysed and are briefly presented. This allows a first classification of the panel of geosynthetic materials used according to the various remediation techniques that have been applied. We also tried to analyse the conceptual principles that have been followed for these remediation works and we propose a critical analysis and some recommendations.

Keywords: Polluted sites and soils - remediation - geosynthetic materials - case studies - design

1. La problématique « Sites et Sols Pollués » en France

Les pollutions sur sites sont de natures variées mais résultent toujours de la défaillance d'une activité industrielle passée ou présente ou d'accidents de transport de produits polluants. Seuls les systèmes « dégradés » ont donc généré les sites dont il est question dans cette publication. La gestion des polluants en contexte de fonctionnement industriel habituel (ou de routine) n'est pas considérée ici.

1.1 Origines multiples et nature des pollutions

Les sites dont nous parlons existent principalement depuis la fin du 19^{ème} siècle et il n'est pas rare d'avoir à intervenir, aujourd'hui, sur des pollutions dont la genèse est plus que centenaire voire bien davantage dans le cas des activités minières, par exemple, dont certaines remontent à la période romaine.

En contexte industriel, les polluants sont aussi variés que les procédés qui les ont générés : hydrocarbures, métaux et solvants chlorés constituent néanmoins les principales familles rencontrées.

Les accidents de transport ont également généré leur lot de pollutions multiples, souvent représentées par les hydrocarbures. Les marées noires sont les plus connues du grand public mais les déversements accidentels sont aussi inhérents à des accidents de la route ou du rail. À ce sujet, on se référera notamment aux publications du CEDRE : Centre de Documentation de Recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des Eaux.

1.2 Le contexte français de prise en compte des Sites et Sols Pollués (SSP)

La prise en compte, de manière structurée, de la problématique des SSP en France a commencé principalement dans les années 1980. Le contexte réglementaire national s'est étoffé dès le début des années 1990 (Loi « Barnier » en 1993) alors qu'augmentait la sensibilisation des acteurs concernés.

Dès 1994, sous l'égide du ministère en charge de l'Environnement, le BRGM a développé des inventaires des sites ayant été occupés par des activités de type industriel. La base de données BASIAS (Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service) est destinée au grand public et est accessible sur Internet. Par ailleurs, la base BASOL (site internet : <http://basol.environnement.gouv.fr>), présente la liste des sites pollués recensés par les pouvoirs publics et faisant l'objet d'une action.

Durant les 25 dernières années, de nombreux diagnostics ont été réalisés et le sont encore, pour connaître les problèmes posés par de tels sites et mettre en place les mesures permettant qu'ils ne soient pas générateurs de risque *compte tenu de l'usage qui en est fait*.

En effet, la prise en compte croissante des principes du Développement Durable (et aussi d'un certain pragmatisme lié au nombre de plus en plus important de sites pollués recensés) s'est traduit par une évolution des pratiques depuis le « j'enlève tout » des débuts jusqu'à l'approche inhérente à l'usage futur du site, qui est de mise aujourd'hui.

Un impact existe là où les usages des milieux sont compromis, notamment au regard des critères sanitaires. Les études de risques sont donc le préalable nécessaire à toute décision de dépollution réfléchie : les vecteurs de transfert eau, air et ingestion y sont considérés. L'eau reste le principal vecteur concerné mais n'est donc pas le seul. La limite de l'acceptabilité des impacts dépend de l'usage que l'on veut ou que l'on peut maintenir ou préserver ; à titre d'exemple, pour les eaux, les usages peuvent être : eaux potables, potabilisables, industrielles, etc.

En 2008, les sites et sols pollués sont évoqués dans l'article 38 de la loi « Grenelle 1 » et leur réhabilitation a été identifiée par le gouvernement comme un des points importants dans le récent plan de relance de l'économie.

Dès lors, la gestion des risques suivant l'usage du site :

- ne s'oppose pas à rechercher et à traiter les sources de pollution en tenant compte des techniques de dépollution disponibles et de leur coût ;
- permet de laisser des produits pollués en place *si les pollutions et les voies de transfert sont maîtrisées et à condition d'en garder la mémoire*.

Cette analyse des risques doit se baser sur un bilan environnemental global pour permettre une gestion équilibrée et transparente.

En 2009, polluer des milieux ou laisser des milieux pollués n'est pas admissible, alors qu'il existe une panoplie de techniques éprouvées qui permettent, avec discernement, non seulement de dépolluer (plus ou moins partiellement) des milieux impactés, mais aussi d'éviter de polluer les milieux.

2. L'utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des Sites et Sols Pollués

Les géosynthétiques trouvent tout naturellement leur place dans la gestion des SSP et dans la mise en œuvre des différentes techniques de dépollution. Ils suivent en cela l'évolution des techniques et des pratiques en la matière : les solutions appliquées à la gestion et au traitement des SSP ont été, dans un premier temps, transposées à partir de celles en vigueur dans le monde des déchets puis, l'expérience grandissant, adaptées ou développées pour ce contexte. Pour autant, les sols pollués ne sont pas considérés systématiquement comme des déchets, notamment s'ils restent sur le site de leur genèse.

L'application des géosynthétiques à des « systèmes dégradés » constitue l'objet de cette publication. Dès lors, l'utilisation des géosynthétiques pour la prévention de la migration de produits polluants, *en contexte de fonctionnement industriel habituel et prévisible*, n'est pas considérée ici. On pourra, par exemple, se référer à Touze-Foltz et Lupo (2009) pour avoir un panorama de l'utilisation des géosynthétiques dans les applications minières. Il reste que la distinction est parfois difficile à faire dans certains des cas que nous avons répertoriés.

Plus d'une vingtaine d'études de cas d'utilisation des géosynthétiques dans la gestion des SSP ont été répertoriées, principalement à la lecture des multiples éditions des « Rencontres Géosynthétiques » qui se sont révélées être une mine d'informations précieuse !

Les tableaux I et II, rassemblent respectivement les références et le contexte de ces études de cas, numérotées de 1 à 25 ; on se référera également à la liste bibliographique, située en fin de publication.

Les premiers chantiers mentionnés remontent à la fin des années 1980, traduisant la prise en compte naissante de la gestion des SSP. La première publication parlant, dans les Rencontres, de technique adaptée « pour contenir les déperditions liquides » (Violas, 1993), date de 1993 mais les premiers témoignages de l'utilisation des géosynthétiques dans les chantiers de dépollution stricto-sensu ont été publiés dans les Rencontres en 1997 (Eberentz et Ouvry, 1997 ; Meusy et Eloy Giorni, 1997).

Il apparaît clairement que la fonction « étanchéité » est la principale fonction recherchée et le mot « confinement » revient souvent dans les exemples cités.

La lecture du tableau II montre que les polluants à traiter sont souvent métalliques, Cr, Fe, Mn, As, mais les cyanures, les hydrocarbures, le benzène, les polychlorobiphényles (PCB), les phtalates ou même les sels font partie des substances à traiter ou à confiner.

Tableau I. Références des études de cas, des chantiers ou des travaux répertoriés (voir aussi § 5)

n° cas étudié	Année du chantier	Année Publication	Source de la publication	Auteurs	Affiliation
1	1986 et ?	1999	Rencontres Géosynthétiques	Ballie, Studio et Breul	Colas
2	1990	1999	Rencontres Géosynthétiques	Ballie, Studio et Breul	Colas
3	1991	1999	Rencontres Géosynthétiques	Duwelz, Laureau, Mercier et Breul	DDE Nord et Colas
4	1990 et 1994	1999	Rencontres Géosynthétiques	Duwelz, Laureau, Mercier et Breul	DDE Nord et Colas
5	1992	1993	Rencontres Géosynthétiques	Violas	Fournier SA
6	1994	sans objet	Communication personnelle	Gisbert	Arcadis
7	1995	1997	Rencontres Géosynthétiques	Eberentz et Ouvry	Antea
8	1995 et 1996	1999	Rencontres Géosynthétiques	Duwelz, Laureau, Mercier et Breul	DDE Nord et Colas
9	1996	1999	Rencontres Géosynthétiques	Bourassin, Fayoux et Morizot	Fillon, Alkor Draka et Menard-Soltraitement
10	< 1997	1997	Rencontres Géosynthétiques	Eberentz et Ouvry	Antea
11	< 1997	1997	Rencontres Géosynthétiques	Eberentz et Ouvry	Antea
12	< 1997	1997	Rencontres Géosynthétiques	Meusy et Eloy-Giorni	Agru France
13	< 1997	1997	Rencontres Géosynthétiques	Eberentz et Ouvry	Antea
14	1997	1999	Rencontres Géosynthétiques	De Bont et Ouvry	Agri France et Antea
15	1998	1999	Rencontres Géosynthétiques	Faure et Itty	Sacer
16	1998	1999	Rencontres Géosynthétiques	Duwelz, Laureau, Mercier et Breul	DDE Nord et Colas
17	2003	2006	Rencontres Géosynthétiques	Ouvry et Pecci	Antea
18	2005	2009	Rencontres Géosynthétiques	Meusy	Agru Environnement France
19	2002 à 2006	2009	Rencontres Géosynthétiques	Benchet, Chalot, Steiner et Jacquemin	Siplast, Bec Frères, Ademe
20	2005 - 2007	2009	Rencontres Géosynthétiques	Ouvry et Hoang	Antea
21	2007	2009	Rencontres Géosynthétiques	Ouvry et Baghri	Antea et Somas
22	2008	2009	Rencontres Géosynthétiques	Meusy	Agru Environnement France
23	2008	2008	Lettre du CEDRE 24/04/2008	CEDRE	CEDRE
24	2008 à 2013 ?	2008	1 st Int. Conf. on Haz. Waste Management	Gisbert, Ferrière et Thépaut	Arcadis
25	> 1990	sans objet	Nombreux chantiers ; peu de publications	Sans Objet	sans objet

Tableau II. Contextes des études de cas répertoriés

n° cas étudié	Année du chantier	Contexte de l'étude de cas, du chantier ou des travaux
1	1986 et ?	Recouvrement d'un terril de charrées de chrome par une géomembrane pour empêcher la lixiviation du Cr VI
2	1990	Transport et confinement de 18 000 m3 de charrées de chrome d'un remblai SNCF vers un terril préexistant
3	1991	Recouvrement d'un terril de charrées de chrome par une géomembrane pour empêcher la lixiviation du Cr VI
4	1990 et 1994	Suite à pollution par le Cr VI, reprise d'étanchéité sur un remblai autoroutier réalisé en 1969 avec 450 000 tonnes de résidus chromés
5	1992	Paroi verticale en géomembrane pour détourner les eaux souterraines d'une ISD
6	1994	Recouvrement du flanc d'un terril de résidus de traitement de pyrite ; site minier
7	1995	Site industriel - Sol pollué aux PCB en zone urbaine : paroi étanche et couverture
8	1995 et 1996	Couverture étanche de résidus chromés stabilisés, provenant d'une ancienne usine de galvanoplastie
9	1996	Confinement, drainage et captage des émanations gazeuses provenant de la pollution aux hydrocarbures sous le stade de France
10	< 1997	Complexe sidérurgique - Sol pollué par huiles de laminoir : paroi étanche + couverture
11	< 1997	Site Industriel - Nappe polluée par benzène et phtalates : paroi étanche et drainante
12	< 1997	Site Industriel - Nappe polluée par phtalates : paroi étanche et drainante
13	< 1997	Complexe sidérurgique - Sol pollué par métaux, cyanures et hydrocarbures : excavation puis lixiviation en tas
14	1997	Reprise de la couverture d'un "tombeau d'arsenic" suite à une défaillance du confinement réalisé en 1991
15	1998	Réalisation du dispositif d'étanchéité basal d'une aire de maturation des mâchefers
16	1998	Extension d'un parking d'hypermarché : reprise d'un échangeur sur l'A22 et confinement des charrées de chrome extraites lors des travaux
17	2003	Après étude de risque : le captage des gaz du sol, sous un bâtiment recevant du public, est amélioré par la mise en œuvre d'une géomembrane
18	2005	Etanchéité d'une cuve béton enterrée, soumise à des contraintes mécaniques et chimiques en cas de déversement accidentel de polluants
19	2002 à 2006	Site minier ; confinement de déchets et sols arsénisés : création d'un casier étanche (6300 t) puis couverture d'une zone moins polluée (500 000 m ³).
20	2005 - 2007	Création de bassins pour le traitement passif d'eaux d'exhaure de mine, chargées en fer et manganèse
21	2007	Prévention de pollution : création d'un casier pour le stockage du sel d'encroûtement extrait lors de la réfection d'un bassin de stockage de saumures.
22	2008	Confinement vertical en périphérie d'un site de stockage de phosphogypses, générant une pollution de l'aquifère
23	2008	Utilisation de géosynthétiques en urgence pour aider au nettoyage après une marée noire
24	2008 à 2013 ?	Bio-traitement in situ d'un terril de charrées de chrome par injection de nutriments et précipitation de Cr III.
25	> 1990	Traitement de terres polluées par hydrocarbures (principalement) en biocentres ou biopiles

Nous avons classé ces différentes études de cas en fonction de la famille à laquelle appartient la technique de dépollution utilisée, hors site, sur site ou in situ (Tableaux III à VI) :

- *Hors Site* : les matériaux pollués sont excavés, transportés et traités hors du lieu de leur genèse ;
- *Sur Site* : Les matériaux pollués sont traités sur le site, au sens de la propriété foncière, mais ils sont déplacés ou excavés pour le traitement ; les terrassements restent importants ;
- *In Situ* : la pollution est traitée ou confinée en place, sans excavation des matériaux pollués ; les terrassements sont minimes et l'opération est réalisée sur le lieu même où la pollution a été générée.

2.1 Chantiers Sur Site et Hors Site : terrassements significatifs

16 études de cas se rapportent à ces deux familles de procédés dont le point commun est la nécessité du déplacement des matériaux pollués, ce qui se traduit en général par des terrassements significatifs.

2.1.1. Les confinements sur site

Les chantiers de confinement sur site représentent, à eux seuls, près de la moitié de l'ensemble des chantiers répertoriés (Tableau III) entre 1986 et 2008. Ils ne sont donc pas typiques d'une époque ou d'une autre. Ce type d'intervention est fréquent dès lors que le produit pollué *peut être laissé dans l'emprise du terrain à dépolluer mais doit être déplacé*, pour des raisons :

- de technologie disponible : charge polluante trop importante ou traitement in situ inadapté ;
- de temps disponible : les traitements in situ requièrent en général davantage de temps ;
- d'usage futur du site : gestion du risque requérant d'enlever et d'isoler tout ou partie des matériaux.

Les polluants, métalliques dans 50 % des cas répertoriés, proviennent d'industries chimiques ou minières : Cr VI (4 cas), résidus acides de pyrite (1 cas), résidus arséniés (2 cas), PCB (1 cas), sel de lessivage (1 cas), hydrocarbures (marée noire : 1 cas), inconnus (cuve « préventive » : 1 cas).

Dans les chantiers de confinement sur site, l'étanchéité est la fonction principale recherchée puisqu'il s'agit souvent, soit de créer une sorte de casier de stockage comparable à ceux utilisés dans les installations de stockage de déchets, soit de mettre en œuvre une couverture sur les matériaux pollués pour les isoler des eaux de pluie : il s'agit là clairement de transferts de technologie depuis le « monde des déchets ». La durée de vie à atteindre est très longue (en dehors des rares cas rapportés d'usage temporaire ou préventif : cas n°18 et 23), puisqu'en général les produits confinés, n'étant pas modifiés chimiquement ou physiquement, gardent leur potentiel de dangerosité sur le très long terme.

Tableau III. Recensement d'utilisations de géosynthétiques dans les chantiers de confinement sur site

n° cas étudié	Année Chantier	Lieu / Chantier	Produits utilisés	Fonctions des géos.	Commentaires / chantier	Type de confinement	Commentaires relatifs à la conception
1	1986 et ?	Couverture du "Grand Terril" des Charrées de chrome de Wattrelos ; Nord	Géomembrane bitumineuse 3,9 mm	Etanchéité	Géomembrane posée sur les déchets (pH 12) et exposée aux intempéries	Couverture	Peu d'informations sur la conception ; Talus recouverts plus tard
3	1991	Terril de 180 000 m ³ ; Nord	Géomembrane bitum., géotextiles, gabions + terre	Etanchéité	Recouvrement en tuiles de la géomembranes sur les talus	Couverture	Géomembrane choisie en raison de son "très faible coefficient de dilatation thermique" permettant un recouvrement en tuiles
4	1990 et 1994	Imperméabilisation des talus et plates-formes de l'autoroute A22 à Marcq en Baroeuil ; Nord	Géomembrane bitumineuse et géotextile drainant en sous face (talus) + gabions et terre	Etanchéité Drainage Protection	Travaux réalisés en conditions difficiles (circulation, risques de pollution et toxicité pour le personnel)	Casier et Couverture	Pas d'informations sur les raisons du choix des produits ni sur les aspects conceptuels
6	1994	Mine de Chizeuil ; Saône et Loire	Géosynthétique Bentonitique	Etanchéité	GSB posé sur les déchets (pH 2 à 4) et recouvert de terre végétale	Couverture	Pas d'information sur la conception ou les raisons du choix du produit
8	1995 et 1996	Normandie	Géotextile inférieur, géomembrane bitumineuse 4,8 mm, sable drainant et terre	Etanchéité Protection	Casier de type "ISD" réalisé sur site	Casier et Couverture	Géomembrane choisie en raison de son "très faible coefficient de dilatation thermique" permettant un recouvrement en tuiles
14	1997	Ancienne usine d'engrais Cofaz à Pierrefitte Nestalas ; Hautes Pyrénées	Géomembrane PEHD 1,5 mm + géotextiles de protection + géosynthétiques de drainage gaz et eau	Etanchéité Protection Drainage	Couverture de type ISDD réalisée sur site (déchets déplacés)	Couverture	Pollution métallique : conception de type ISDD avec géomembrane PEHD - dimensionnement des géosynthétiques présentés.
16	1998	Travaux de reprise de l'échangeur de Roncq et extension du parking Auchan ; Nord	Géomembrane bitumineuse 3,9 mm ; terre de recouvrement stabilisée sur les talus par un par géoespaceur	Etanchéité Anti-érosion	Travaux réalisés en conditions difficiles (risques de pollution environnementale et de toxicité pour le personnel)	Couverture	Choix de la géomembrane argumenté en raison de son "très faible vieillissement" et de sa "très longue durée de vie"
18	2005	Industriel non précisé, Paris ; Seine	Plaques PEHD, 3 mm à crampons ; cuvelage	Etanchéité	Cuve permettant d'empêcher une pollution de la Seine en cas de déversement accidentel de polluants	Cuvelage Rétention	Conception et réalisation des travaux délicats. Dispositif préventif : la cuve est destinée à rester vide la plupart du temps
19	2002 à 2006	Réhabilitation de la Mine d'Or de Salsigne ; Aude	Géomembranes PEHD (2 mm), GSB (4,8 kg/m ²) et géotextiles (300 et 700 g/m ²)	Etanchéité Séparation Drainage Protection	Casier de type "ISD" ; Travaux réalisés en conditions difficiles (risques de pollution et de toxicité pour le personnel)	Casier et Couverture	Conception et dimensionnement de type "ISDD" ; Questionnement sur la durée de vie des ouvrages ; la performance environnementale est suivie en continu
21	2007	Sidi Larbi ; Maroc	Géomembrane PEHD 2 mm, géotextiles et géodraines	Etanchéité Filtration Drainage Protection	Le sel (pollué par des hydrocarbures) provient du lessivage de couches profondes, dédiées au stockage de gaz	Casier et Couverture	Produits choisis pour résister au sel ; données sur le dimensionnement ; choix d'entreprises et de produits certifiés ASQUAL
23	2008	Accident de la raffinerie de Donges ; Loire Atlantique	Géomembranes, Géofilms, Géotextiles	Etanchéité, Séparation	Utilisation sur les plages lors du nettoyage et des opérations d'urgence	Rétention temporaire	Peu d'informations sur la conception : situation d'urgence

De fait, les aspects liés au vieillissement des géosynthétiques sont parfois mentionnés dans les commentaires conceptuels. Par contre, malgré une large gamme de pH (2 à 12) et une nature chimique variée (métaux, sels, polluants organiques), seule l'étude de cas n°21 (sel de lessivage) fait état d'un choix de la géomembrane argumenté sur la compatibilité chimique avec les polluants à confiner. Les produits d'étanchéité utilisés sont d'ailleurs assez variés : géomembranes PEHD ou bitumineuses, géosynthétiques bentonitiques. De même, on trouve assez peu d'argumentations sur la conception des fonctions potentiellement associées à l'étanchéité : protection, drainage, filtration ou anti-érosion. Pourtant, des géosynthétiques assurant ces fonctions sont intégrés aux ouvrages mais leur choix semble s'appuyer souvent sur le retour d'expérience, peut être en raison de l'absence de recommandations formalisées. Les exemples publiés de tels dimensionnements sont rares et les chantiers témoignent parfois d'un manque de précaution en la matière (Figure 1). Il faut noter que les chantiers correspondants ont souvent été réalisés en conditions difficiles, en raison de l'urgence ou de la dangerosité des produits à manipuler ; ce point fait plus souvent l'objet du propos des auteurs.



Figure 1. poinçonnement possible lors du remplissage d'un confinement «sur site »

Les figures 2 et 3 illustrent les ouvrages de confinement sur site, issus des cas répertoriés.



Figure 2. Confinement sur site, par géomembrane bitumineuse, des charrées de Cr VI excavées sous un parking Auchan en 1998 (Duwelz et al., 1999)



Figure 3. « Tombeau d'arsenic » étanché par géomembrane PEHD en 1997 (De Bont et Ouvry, 1999)

2.1.2. Les chantiers de traitements hors site

Trois études de cas répertoriées présentent l'utilisation de géomembranes, géotextiles ou géocomposites drainants dans des traitements de sols pollués, hors site (cf. tableau IV). On relève peu de références donc, mais dans la très grande majorité des cas où les sols pollués sont excavés puis évacués hors du site, ils sont considérés comme des déchets, au sens réglementaire ; ils sont, dès lors, éliminés dans des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), notamment des installations de stockage de déchets (ISD) et la spécificité « Sites et Sols Pollués » n'est plus de mise.

Une exception notable est celle de l'étude n°2 où des résidus de traitement de minerai (charrées) de Chrome VI (pH 12 et toxicité forte) ont été « rapportés » contre un terroir préexistant, de fait assimilé à une installation de stockage de déchets dangereux, sans que celui-ci soit une ISD répertoriée (figure 4).



Figure 4. Le « Grand terroir de Cr VI » de Wattrelos : au premier plan, son annexe, rapportée en 1998, est un confinement « hors site » par géomembrane bitumineuse (Ballie et al., 1999)

Tableau IV. Recensement d'utilisations de géosynthétiques dans les chantiers hors site

n° cas étudié	Année Chantier	Lieu / Chantier	Produits utilisés	Fonctions des géos.	Commentaires / chantier	Hors Site			Commentaires relatifs à la conception
						Lixiviation / Maturation	Biocentre	Confinement	
2	1990	Casier raccordé au flanc du "Grand Terril" de Cr de Watrelos pour stocker les charrées de Carilhem ; Nord	Géomembrane bitumineuse, géotextiles, gabions + terre	Etanchéité Drainage Protection	Géomembrane partiellement exposée aux intempéries			X Casier et Couverture	Peu d'informations sur le dimensionnement
13	< 1997	Non précisé	DEDG basal = géomembrane + géotextile + géocomposite drainant	Etanchéité Drainage	Aires de lixiviation de type "activité minière"	X Lixiviation			Peu d'informations sur la conception
15	1998	Aire de maturation des mâchefers d'Allonnes ; Sarthe	Géomembrane bitumineuse 4,8 mm et sables et gravés en couches de protection et de roulement	Etanchéité Protection	L'aire de maturation devait permettre la circulation des engins (béton bitumineux en surface)	X Maturation			Géomembrane et dispositif choisis pour permettre le roulement ; pas d'essais de poinçonnement mentionnés
25	> 1990	Nombreux sites pollués ou installations de traitement de déchets (ISD, etc.)	Films et géomembranes PEHD, le plus souvent ; géotextiles	Etanchéité Protection	Sites de durée de vie limitée		X Casier et Couverture		Peu d'information sur la conception des ouvrages

Les aires de maturation pour mâchefers ou de lixiviation des résidus pollués d'une activité minière devraient être conçues comme les aires de lixiviation de minerais, dont les spécificités sont notamment l'importance de la pérennité du drainage basal et les fortes contraintes mécaniques subies par le dispositif inférieur (voir Touze-Foltz et Lupo, 2009). Peu d'informations sont données sur la conception de ces deux ouvrages (tableau IV, études de cas n°13 et 15), datant d'une dizaine d'années.

Il est surprenant de constater l'absence de publication répertoriée, concernant l'utilisation des géosynthétiques dans les biocentres ou les biotertres (sur site ou hors site, d'ailleurs). De telles installations sont pourtant nombreuses, au sein des ISD ou en dehors, ayant statut d'ICPE (Installation Classée pour la Protection de l'Environnement) ou non. Les biotertres (appelés aussi « biopiles ») comportent souvent des géomembranes ou des géofilms en PEHD mais pas exclusivement, ainsi que des géotextiles (voir figures 5 à 7). Il est possible que la durée de vie plus limitée (moyen terme) de ces ouvrages n'ait pas incité leurs exploitants ou concepteurs à publier sur le sujet de leur conception. De fait, la fonction « étanchéité » est moins critique pour ces ouvrages qui comportent fréquemment des drains et des tuyaux traversant le dispositif de couverture pour favoriser la circulation de l'air : en effet, la dégradation recherchée des polluants (le plus souvent des hydrocarbures) est aérobie, à la différence des mécanismes, anaérobies, des principales ISD.



Figure 5. Dispositif basal d'un biotertre comportant un géofilm en polyéthylène



Figure 6. Couverture d'un biotertre exposé aux intempéries : géofilm en polyéthylène



Figure 7. Mise en place de drains d'aspiration dans un biotertre

2.1.3. Cas particuliers des bassins de traitements

Deux des études de cas répertoriées présentent des bassins de traitement ou de décantation (voir tableau V). Ils servent respectivement au stockage des saumures issues du lessivage de formations géologiques profondes ou à la décantation et au traitement passif d'eaux d'exhaures de mine.

Leurs dispositifs d'étanchéité comportent une géomembrane PEHD, des géotextiles de protection et des géosynthétiques de drainage ; ces études de cas témoignent du soin apporté à la conception, au dimensionnement et au choix des prestataires. Ces travaux récents sont à apparenter à la conception, plus classique, des bassins de stockage. La spécificité de leur conception réside respectivement dans les produits à stocker (forte salinité et agressivité potentielle prises en compte dans l'étude de cas n° 21) ou dans le mode d'exploitation prévu (développement de macrophytes pour l'étude de cas n°20).

Tableau V. Recensement d'utilisations de géosynthétiques dans les bassins associés aux SSP

n° cas étudié	Année Chantier	Lieu / Chantier	Géosynthétiques utilisés	Fonctions des géos.	Commentaires / chantier	Sur Site		Commentaires relatifs à la conception
						Bio centre	Traitement des eaux	
20	2005 - 2007	Charbonnage de France ; Mine de charbon de la Houve, Creutzwald ; Moselle	Géomembrane PEHD 1,5 mm, géotextiles (500 g/m ²) et géodraines	Etanchéité Protection Drainage	Bassins de stockage, de traitement passif et de décantation		X Bassins	Peu d'informations sur le choix des produits ; choix des entreprises justifié par leur certification et le respect des règles de l'art.
21	2007	Sidi Larbi ; Maroc	Géomembrane PEHD 2 mm, géotextiles et géodraines	Etanchéité Filtration Drainage Protection	Le sel (pollué par des hydrocarbures) provient du lessivage de couches profondes, dédiées au stockage de gaz		X Bassins	Produits choisis pour résister au sel ; données sur le dimensionnement ; choix d'entreprises et de produits certifiés ASQUAL

2.2 Chantiers In Situ ; terrassements limités

Nous avons vu que les travaux in situ ne sont pas toujours possibles. Néanmoins, nous avons répertorié, dans le tableau VI, une dizaine d'études de cas se rapportant à cette famille de procédés dont le point commun est de réduire les impacts sur les milieux, tout en laissant les matériaux pollués en place. Ceci se traduit en général par des terrassements restreints. En cela, les chantiers in situ sont à priori plus respectueux des principes du Développement Durable puisqu'ils limitent la consommation d'énergie ; aussi, leur coût de revient par m³ de sol traité est généralement moins élevé.

Tableau VI. Recensement d'utilisations de géosynthétiques dans les travaux et chantiers in situ

n° cas étudié	Année Chantier	Lieu / chantier	Géosynthétiques utilisés	Fonctions des géosynthétiques	Commentaires	In Situ		Commentaires relatifs à la conception
						Confinement	Bio stabilisation	
5	1992	ISD Laimont SITA ; Mame	Géomembrane PVC épaisseur ?	Etanchéité	Idée d'utilisation de parois avec géomembranes pour contenir des "déperditions hydrauliques"	X Paroi		Géomembrane PVC et ancrage basal dans l'argile ; pas d'agressivité chimique attendue puisqu'il s'agit d'empêcher l'eau propre de rentrer dans le site
7	1995	Non précisé	Géomembrane PEHD 2 mm + géotextile de protection	Etanchéité Protection	Parking réalisé sur un confinement horizontal in Situ	X Paroi		Géomembrane PEHD et ancrage basal dans l'argile ; Couverture en gmb PEHD + gtx de protection
9	1996	Stade de France ; Seine Saint Denis	Géomembrane PVC 1 mm (zone centrale) et géofilm 0,25 mm (gradins) + géotextiles de protection	Etanchéité (associée à un drainage granulaire des gaz du sol) Protection	Géomembrane placée sur la zone traitée par pompage, écrémage et venting ; surveillance continue ensuite	X Paroi au coulis, Couv. en gmb. + captage gaz		Une des raisons du choix est le pré-assemblage en usine des lés de géomembrane PVC en panneaux de 30 x 18 mètres
10	< 1997	Non précisé	Géofilm PVC en couverture ; paroi étanche latérale bentonite/ ciment	Etanchéité	Couverture de type provisoire	X Paroi et Couv. provisoire		Le caractère provisoire de la couverture justifie l'emploi d'un géofilm de faible épaisseur
11	< 1997	Non précisé	Géomembrane PEHD 4 mm + massif drainant granulaire	Etanchéité	Panneaux de PEHD et enfillement de clé	X Paroi		La sensibilité du milieu environnant (base de loisir) explique le choix de la solution retenue
12	< 1997	Non précisé	Géomembrane PEHD 4 mm + massif drainant granulaire	Etanchéité	Panneaux de PEHD et enfillement de clé	X Paroi		Calculs de perméabilité fournis par les auteurs
17	2003	Non précisé ; Ile de France	Géocomposite de drainage des gaz, géomembrane PVC 1,5 mm et géotextile de protection sous sable	Etanchéité Protection Drainage	L'utilisation de la géomembrane résulte de l'étude de risque et permet la mise en œuvre d'une solution plus "légère"	X Couv. en gmb. + captage gaz		La complexité du chantier et, notamment, des raccordements semble avoir guidé le choix de la géomembrane
19	2002 à 2006	Réhabilitation de la Mine d'Or de Salsigne ; Aude	Géomembrane bitumineuse (4 mm) et géotextiles (300 et 700 g/m ²)	Etanchéité Séparation Drainage Protection	Couverture d'une zone ayant reçu 500 000 m ³ de résidus pollués	X Couverture		Conception et dimensionnement de type "ISDD" ; Questionnement sur la durée de vie des ouvrages ; la performance environnementale est suivie en continu
22	2008	Site non précisé ; Tunisie	Palfeuilles PEHD 3 mm dans un coulis bentonite/ciment	Etanchéité	Panneaux de PEHD de 20 mètres, fabriqués sur site et enfillement de clé	X Paroi		Fabrication des palfeuilles sur site pour s'adapter aux variations de la profondeur à atteindre ; Calcul d'étanchéité globale présenté
24	2008 à 2013 ?	"Grand Terril" des Charrées de chrome de Watrelos ; Nord	Géomembrane bitumineuse 3,9 mm	Etanchéité	La géomembrane, installée en 1986, confine le terril et favorise l'établissement de conditions réductrices	X Paroi et Couverture en gmb	X Bio-stabilisation	Le traitement en cours sera facilité par la présence du confinement déjà en place : géomembrane et paroi

On peut distinguer deux grands concepts dans les chantiers in situ :

- le confinement : les parois ou les couvertures étanches sont réalisées in situ, les matériaux pollués (sols ou résidus) n'étant pas modifiés chimiquement ou physiquement ;
- le traitement : les polluants sont traités in situ par injection de réactifs ou de nutriments, pompage des liquides, captage et élimination des gaz du sol, etc.

Il existe aussi des traitements par « barrières réactives » mais l'utilisation de géosynthétiques dans ces ouvrages, si elle existe, n'a pas été répertoriée.

Les matériaux géosynthétiques sont utilisés dans les chantiers in situ, aussi bien dans les confinements que dans les traitements stricto sensu mais leur rôle y est différent :

- dans les confinements in situ, les géosynthétiques constituent l'élément principal assurant la performance du dispositif puisque la fonction étanchéité est pratiquement la seule permettant la limitation des transferts de polluants et donc des impacts et ce, sur le long terme ;
- dans les traitements in situ, l'étanchéité est aussi la fonction principale des géosynthétiques mais elle est connexe au procédé de traitement mis en œuvre : l'étanchéité est là pour favoriser ou améliorer la performance du traitement réalisé sur les polluants. Dès lors, la durée de vie attendue du dispositif d'étanchéité peut être plus courte et l'exigence de performance absolue devient moins critique.

2.2.1. Les confinements in situ : parois et couvertures étanches

Les parois réalisées avec une géomembrane mise en œuvre à l'intérieur d'une tranchée se sont développées dans les années 90. Le premier cas rapporté date de 1992 (cas n°5) et concerne une ISD que l'on voulait préserver des entrées d'eau de nappe. Parmi les études répertoriées, c'est le seul cas d'utilisation d'une géomembrane PVC en paroi mais cette application diffère un peu des « SSP ».

Dans les 6 autres cas répertoriés, 4 parois comprennent des géomembranes PEHD de 2, 3 ou 4 mm d'épaisseur (enroulées ou en feuilles, souvent appelées « palfeuilles ») et généralement associées à un coulis bentonite/ciment. Deux autres parois ne comprennent pas de géosynthétiques.

A l'exception d'un site de phosphogypse, ces parois « géosynthétiques » ont été mises en œuvre pour le confinement de produits organiques : huiles, benzène, phtalates ou PCB. Pour autant, le PEHD semble généralement choisi pour sa rigidité et parce qu'un système particulier d'enfilement de clé (à joint gonflant) a été développé spécifiquement avec ce produit (Figures 8 et 9).



Figure 8. Deux dispositifs de mise en œuvre de géomembrane PEHD en parois : enroulement et palfeuilles ; avec l'accord d'Agro France



Figure 9. Différentes étapes de la mise en œuvre d'une palfeuille PEHD dans une tranchée au coulis bentonite/ciment ; avec l'accord d'Agru France

Les couvertures géosynthétiques in situ sont, soit :

- un complément au confinement par paroi : exemple du cas n°10 ; géofilm PVC mis en œuvre sur un sol pollué par des huiles de laminoir (durée de vie courte attendue) ;
- mises en œuvre seules : cas n°19 ; résidus miniers arséniés recouverts par géotextile et géomembrane bitumineuse ; la géomembrane, certifiée ASQUAL, a été choisie en raison de « sa mise en œuvre aisée et de sa faible sensibilité au vent » (site exposé à des vents violents).

Pour les différents types de confinements in situ (parois ou couvertures), les géosynthétiques d'étanchéité sont de nature variée (PEHD, PVC, Bitume) et ont été choisis en raison des caractéristiques des projets : spécificités de mise en œuvre, profondeur des ouvrages et technologies disponibles. Ces confinements in situ doivent, pour la plupart, perdurer sur le long terme et le retour d'expérience sur leur performance est généralement très satisfaisant. Il reste que l'évolution des performances des ouvrages dans le temps mérite d'être suivie avec précision, notamment si l'on considère que les géomembranes sont susceptibles de laisser passer une faible fraction des polluants organiques par diffusion et que les conditions de mise en œuvre difficiles peuvent générer des défauts d'étanchéité.

2.2.2. Apport des géosynthétiques dans les traitements de polluants in situ

Dès lors que des traitements in situ sont réalisés pour diminuer significativement et durablement les impacts des polluants sur les milieux, l'étanchéité par géosynthétique devient un complément précieux du traitement mis en œuvre mais ne constitue plus le cœur du procédé.

Les cas n°9,17 et 24 (tableau VI) renvoient à cette problématique.

Deux cas présentent l'apport d'une géomembrane PVC en couverture (1 et 1,5 mm), pour améliorer l'efficacité d'un dispositif de captage des gaz du sol.

Dans le cas du stade de France (cas n°9 et figure 10), ce dispositif comprend des géosynthétiques de drainage et un pompage écrémage des hydrocarbures de la nappe sous-jacente, en plus du captage des gaz.

Dans le cas n°17, l'utilisation de la géomembrane PVC et du géocomposite de drainage des gaz, sous la dalle d'un bâtiment destiné à recevoir du public, est partie intégrante de la solution retenue à l'issue d'une étude de risque (voir figure 11).

La bonne connaissance de l'étanchéité aux gaz ou de la capacité drainante des géosynthétiques utilisés est donc un plus dans cette problématique.



Figure 10. Mise en œuvre d'un dispositif avec géomembrane PVC pour améliorer la récupération des polluants sous les pelouses du Stade de France en1996 (Bourassin et al., 1999)



Figure 11. Transformation d'un bâtiment en Centre de conférences (2003) ; Produits géosynthétiques mis en œuvre sous la dalle, avec détail de raccordement sur tube PVC (in Ouvry et Pecci, 2006)

Le dernier cas étudié (n°24) correspond à la reprise, en 2008, des travaux sur le « Grand Terril des charrées de Chrome » de Wattrelos, déjà évoqué (cas n°1 et 2, figure 4). Le bio-traitement in situ, en cours de mise en œuvre, requiert l'injection de nutriments (mélasse) dans la masse du terril pour générer un développement bactérien qui va rendre le milieu réducteur et permettre la précipitation du Cr VI en Cr III, non soluble, beaucoup moins toxique et stable à long terme. Il est clair que la présence de la géomembrane bitumineuse sur le terril et de la paroi étanche à sa périphérie favorisent l'établissement des conditions réductrices requises, en permettant le maintien d'un système quasiment fermé. Même si la géomembrane bitumineuse, exposée aux intempéries depuis plus de 20 ans, présente des signes évidents de vieillissement (voir figures n°12 et 13), le niveau d'étanchéité résiduel semble suffisant pour assurer le fonctionnement de la solution retenue.



Figure 12. Couverture du « Grand Terril des charrées de chrome » de Wattrelos, en 2008, 22 ans après la pose de la géomembrane bitumineuse

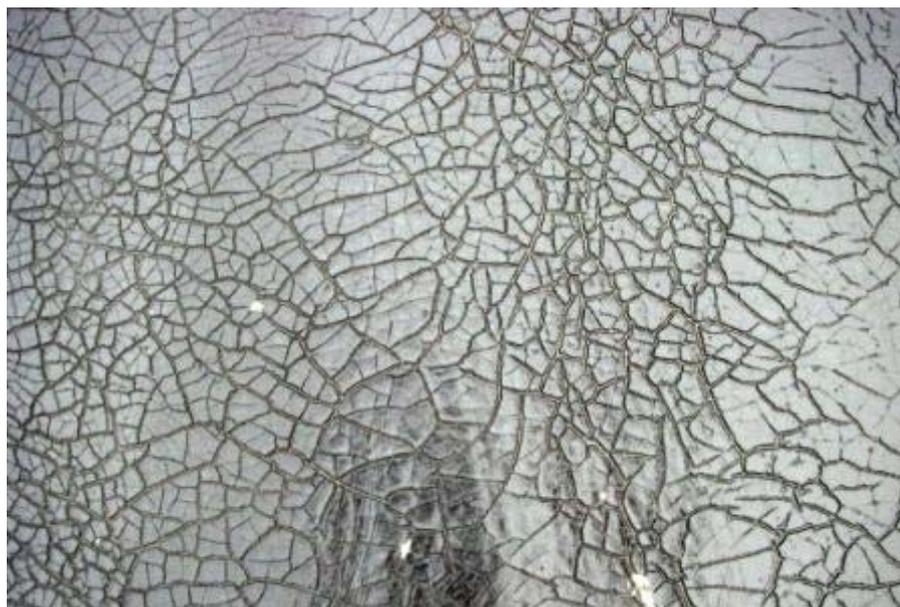


Figure 13. Détail des craquelures dues au vieillissement de la géomembrane bitumineuse exposée aux intempéries sur le terril de Wattrelos, en 2008.

3. Discussion : aspects conceptuels

Cette revue des études de cas et des chantiers « publiés », associée à des retours d'expérience personnels, permet de dresser un premier bilan des aspects conceptuels liés à l'utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des Sites et Sols Pollués.

Le tableau VII synthétise ces réflexions. Les cas étudiés y ont été regroupés selon les trois grands modes de gestion des SSP définis, Hors Site, Sur Site ou In Situ. La deuxième colonne présente les points qui nous semblent être les éléments clés dans la conception des ouvrages étudiés, dès lors qu'ils comportent des matériaux géosynthétiques. Les défaillances constatées ou redoutées ont permis d'alimenter la troisième colonne : axes d'amélioration. Enfin, les deux dernières colonnes renvoient, pour chaque famille étudiée, aux règles de l'art les plus proches et aux références CFG pertinentes en la matière. En effet, il n'existe pas de règles de l'art formalisées et dédiées spécifiquement à l'utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des Sites et Sols Pollués. Dès lors, il faut rechercher dans plusieurs domaines existants, ISD, mines, bassins ou cuvelage, pour trouver les règles de conception utilisables, moyennant certaines adaptations liées aux points clés identifiés. Dans certains cas, biotertres ou parois étanches, il n'est pas certain que de telles règles soient déjà formalisées à l'attention des concepteurs et utilisateurs et ceci pourrait faire l'objet de travaux futurs.

Tableau VII. Aspects conceptuels liés à l'utilisation des géosynthétiques dans la gestion des SSP

Modes de gestion des SSP	Points clés / conception	Axes d'amélioration proposés	Règles de l'art utilisables	Références CFG ou autres
Gestion des SSP Hors Site				
Confinements (casiers) <i>(cas exceptionnel, l'envoi en ISD constitue le cas général des confinements "hors site")</i>	- Etanchéité - Durée de vie très longue - Compatibilité chimique	- Dimensionnement des fonctions connexes : protection, drainage et filtration - Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker	Installations de Stockages de Déchets	<i>Fascicules du CFG n° 10, 11 et 12</i>
Aires de Lixiviation / Maturation	- Etanchéité et drainage - Durée de vie moyenne - Compatibilité chimique - Contraintes mécaniques fortes	- Dimensionnement des fonctions connexes : drainage, filtration et protection - Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker	Domaine minier : lixiviation en tas	- <i>Touze-Foltz et Lupo : Rencontres 2009</i> - <i>Fascicule du CFG n° 10</i>
Biocentres, biotertres	- Etanchéité - Durée de vie courte à moyenne - Poinçonnement	- Précautions lors du remplissage	non ; à formaliser ?	<i>Fascicule du CFG n° 10</i>
Bassins de traitement des eaux	- Etanchéité - Durée de vie courte à moyenne - Compatibilité chimique	- Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker / étanchéité	Bassins routiers	<i>Guide "Bassins" SETRA / LCPC</i>
Gestion des SSP Sur Site				
Confinements (casiers)	- Etanchéité - Durée de vie très longue - Compatibilité chimique	- Dimensionnement des fonctions connexes : protection notamment - Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker - Précautions lors du remplissage du casier	Installations de Stockages de Déchets	<i>Fascicules du CFG n° 10, 11 et 12</i>
Couvertures	- Etanchéité - Durée de vie très longue - Compatibilité chimique - Poinçonnement	- Dimensionnement des fonctions connexes : protection, drainage, filtration - Prise en compte de la physico-chimie des matériaux à stocker / étanchéité	Installations de Stockages de Déchets	<i>Fascicules du CFG n° 10, 11 et 12</i>
Cuvelage	- Etanchéité - Durée de vie moyenne - Compatibilité chimique - Cuve parfois vide et exposée	- Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker / étanchéité	Cuvelage : domaine spécifique	<i>Fascicule du CFG n° 10</i>
Rétention temporaire	- Etanchéité - Durée de vie très courte - Poinçonnement	- Prise en compte des contraintes physico-chimiques / étanchéité - Précautions lors du remplissage	Domaine minier : aires de rétention	- <i>Touze-Foltz et Lupo : Rencontres 2009</i> - <i>Fascicule du CFG n° 10</i>
Gestion des SSP In Situ				
Parois étanches	- Etanchéité - Durée de vie très longue - Compatibilité chimique - Mise en œuvre spécifique	- Prise en compte systématique des contraintes physico-chimiques / étanchéité	Domaine spécifique ; à formaliser ?	<i>Fascicule du CFG n° 10</i>
Couvertures seules	- Etanchéité - Durée de vie très longue - Compatibilité chimique - Poinçonnement	- Dimensionnement des fonctions connexes : protection, drainage et filtration - Prise en compte systématique de la physico-chimie des matériaux à stocker / étanchéité	Installations de Stockages de Déchets	<i>Fascicules du CFG n° 10, 11 et 12</i>
Couvertures liées aux traitements in situ	- Etanchéité aux liquides et aux gaz - Durée de vie courte à moyenne - Poinçonnement - contraintes climatiques si exposées	- Dimensionnement des fonctions connexes : protection et drainage gaz - Prise en compte des contraintes physico-chimiques et de l'étanchéité aux liquides et gaz	Installations de Stockages de Déchets	<i>Fascicules du CFG n° 10, 11 et 12</i>

4. Conclusion

Les matériaux géosynthétiques jouent un rôle évident dans la gestion des Sites et Sols Pollués, trop souvent laissé au second plan en raison de l'importance, de la technicité et de la multiplicité des autres disciplines concernées : physique, chimie, géologie, écotoxicité, etc.

Ce rôle mériterait pourtant d'être davantage mis en exergue car l'apport des géosynthétiques est un élément déterminant dans la performance d'un projet de gestion des SSP et la pertinence de sa conception. C'est clairement ce qui ressort des études de cas qui ont fait l'objet de publications et qui sont présentées dans cette synthèse.

En termes de fonctionnalités recherchées, l'étanchéité est nettement prépondérante mais les autres fonctions élémentaires principales des matériaux géosynthétiques, drainage, filtration, séparation, protection, (sauf, peut être, le renforcement, trop peu utilisé) sont toutes utiles dans les exemples qui ont été référencés.

De même, toutes les familles de produits sont représentées : géomembranes, géotextiles, produits apparentés aux deux familles, géocomposites ...

D'un point de vue conceptuel, de nombreux transferts de technologies se sont plus ou moins spontanément exercés depuis les techniques développées pour les Installations de Stockage des Déchets, les bassins, le cuvelage ou le domaine minier. Il reste que le rôle des géosynthétiques est, dans certains cas, encore négligé et la conception sous-estimée au profit d'une « copie » de chantiers préexistants, ce qui est dommageable. De même, les contrôles de mise en œuvre sont un élément fondamental, parfois sous-estimé.

À la décharge des concepteurs et des maîtres d'œuvre, les règles de l'art concernant l'utilisation des matériaux géosynthétiques dans la gestion des Sites et Sols Pollués ne sont pas centralisées et peu, voire pas, formalisées : il s'agit clairement d'un axe d'amélioration sur lequel il est possible de se pencher.

5. Références bibliographiques

- Ballie M., Studio R., Breul B. (1999). Etanchéité de parois de terrils. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 99, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, 45-50.*
- BASIAS (Base des Anciens Sites Industriels et Activités de Service) *site Internet* (<http://basias.brgm.fr>).
- Benchet R., Chalot L., Steiner B., Jacquemin P. (2009). Utilisation des géosynthétiques dans le cadre de la réhabilitation du site de la combe du saut (Salsigne), *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Bourassin A., Fayoux D., Morizot J.C. (1999). Étanchéité par géomembrane sous la pelouse du stade de France. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 99, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, 51-57.*
- CEDRE (2008). Fiche de synthèse du 16/03/2008 - Raffinerie de Donges ; *site internet* (<http://www.cedre.fr>).
- CFG, fascicule n°10, Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géomembranes, *fascicule téléchargeable sur le site internet www.cfg.asso.fr*
- CFG, fascicule n°11, Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets, *fascicule (48 pages) et CD Rom.*
- CFG, fascicule n°12, Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques, *fascicule (56 pages ; disponible mais en cours de révision).*
- De Bont R., Ouvry J.F. (1999). Travaux d'étanchéité de couverture d'un tombeau d'arsenic. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 99, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, 21-27.*
- Duwelz A., Laureau D., Mercier F., Breul B. (1999). Confinement de terres polluées dans une géomembrane bitumineuse : exemple de la bretelle de sortie de Roncq sur l'A 22. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 99, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, 39-44.*
- Eberentz P., Ouvry J.F. (1997). Utilisation des géosynthétiques pour la réhabilitation de sites pollués. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 97, Reims, Delmas et Gourc éditeurs, tome 2, 87-93.*
- Faure B., Itty J. (1999). Étanchéité par géomembrane bitumineuse d'une aire de maturation de mâchefers. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 99, Bordeaux, Girard et Gourc éditeurs, tome 1, 35-38.*
- Gisbert T., Ferriere L., Thépaut B.E. (2008). Application of in situ reactive zones (IRZ) to the biological stabilization of Chromite Ore Processing Residues (COPR) heap and acid mine drainage. *CHANIA*

- 2008, 1st International Conference on Hazardous Waste Management; Chania, Crete, Greece, October 1st to 3rd 2008.
- Meusy J.L., Eloy-Giorni C. (1997). Un nouveau système de dépollution par confinement et drainage. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 97, Reims, Delmas et Gourc éditeurs, tome 2, 80-86.*
- Meusy J.L. (2009). Étanchéité d'une cuve en béton par coques PEHD. *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Meusy J.L. (2009). Confinement vertical d'un site pollué par palfeuille PEHD. *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Ouvry J.F., Baghri K. (2009). Réhabilitation de l'étanchéité d'un bassin de stockage de saumure sur le site de sidi-larbi au Maroc. *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Ouvry J.F., Hoang V. (2009). Aménagement du dispositif de traitement passif des eaux de la mine de La Houve (Creutzwald). *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Ouvry J.F., Pecci R., (2006). Réhabilitation d'un terrain pollué par des substances volatiles : utilisation de géosynthétiques en solution alternative ou complémentaire à une dépollution. *Rencontres Géosynthétiques 2006, Montpellier, CFG, 149-156.*
- SETRA et LCPC, guide technique, Étanchéité par géomembranes des ouvrages pour les eaux de ruissellement routiers.
- Touze-Foltz N., Lupo J. (2009). Utilisation des géosynthétiques dans les applications minières. *Rencontres Géosynthétiques 2009, Nantes, CFG, 1^{er} au 3 avril 2009.*
- Violas D. (1993). Étanchéité verticale : un procédé innovant. *Géotextiles - Géomembranes ; Rencontres 93, Joué-les-Tours, Delmas et Gourc éditeurs, tome 2, 489-498.*