

Analyse du Cycle de Vie de la filière de Stockage des Déchets Industriels Spéciaux Ultimes

FNADE

Fédération Nationale des Activités du Déchet et de l'Environnement

Rapport final après revue critique

09 / 12 / 2002

SOMMAIRE

1. OBJECTIF DE L'ETUDE	4
2. ORGANISATION DE L'ETUDE.....	4
3. PRESENTATION DE LA FILIERE.....	5
3.1 LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE ACTUEL	5
2.2 UN CONTEXTE REGLEMENTAIRE EN COURS D'EVOLUTION	7
4. PERIMETRE DE L'ETUDE	8
4.1 – FILIERE ETUDIEE	8
4.2 – METHODOLOGIE UTILISEE	8
4.3 – UNITE FONCTIONNELLE	8
4.4 – INDICATEURS DE CATEGORIE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	9
5. SYSTEME ETUDIE	10
5.1 MODELISATION DU STOCKAGE DES DIS EN CSDU DE CLASSE 1	10
5.2 DECOMPOSITION ET DELIMITATION DU SYSTEME ETUDIE	11
5.3 LES FRONTIERES PHYSIQUES DU SITE DE STOCKAGE	12
5.4 LES FRONTIERES TEMPORELLES DU SITE DE STOCKAGE.....	13
6. PROCEDURE DE TRAITEMENT DES DONNEES ET REPRESENTATIVITE DU SYSTEME ETUDIE	13
6.1 - COLLECTE DES DONNEES ET VALIDATION PAR LES PROFESSIONNELS	13
6.2 - CARACTERISATION DES DONNEES « MOYENNES ».....	13
6.3 - LE TRAITEMENT DES DONNEES MANQUANTES.....	15
6.4 - REPRESENTATIVITE DU SYSTEME ETUDIE.....	15
6.5 – SOURCES DE DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	15
7. DONNEES ET HYPOTHESES	17
7.1 - PARAMETRES GENERAUX.....	17
7.2 – MODULE 1 : STOCKAGE X CONSTRUCTION	17
7.3 – MODULE 2 : STOCKAGE X EXPLOITATION	20
7.4 - MODULE 3 : STOCKAGE X FERMETURE	23
7.5 - MODULE 4 : STOCKAGE X POST-EXPLOITATION	23
7.6 - MODULE 5 : TRANSPORT DECHETS SUR SITE X EXPLOITATION.....	24
7.7 - MODULE 6 : STABILISATION X CONSTRUCTION	24
7.8 - MODULE 7 : STABILISATION X EXPLOITATION	25
7.9 – DISTANCES DE TRANSPORT.....	25
7.10 – EMISSIONS DE POLLUANTS CONTENUS DANS LE LIXIVIAT	26
7.11 – UTILISATION DE LA SURFACE AU SOL	35
8 - RESULTATS	36
8.1 – BILAN ENVIRONNEMENTAL DU STOCKAGE DES DIS EN CSDU CLASSE 1	36
8.2 – LES SOURCES D'IMPACTS DE LA FILIERE DE STOCKAGE DES DIS	37
8.3 – LA DISPERSION DES RESULTATS SELON LES SITES DE STOCKAGE	40
8.4 – SUR L'AMPLEUR DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	41
9 – ANALYSES DE SENSIBILITE ET RECHERCHE DES PARAMETRES INFLUENTS.....	44
9.1 – STABILISATION DES DIS.....	44
9.2 – MEMBRANE SYNTHETIQUE ET DEBIT DE FUITE DU LIXIVIAT	47
9.3 – FABRICATION DES MATERIAUX SYNTHETIQUES UTILISES POUR LA CONSTRUCTION, L'EXPLOITATION ET LA FERMETURE DES CASIERS DE STOCKAGE	48
9.4 – DUREE DE LA PHASE D'EXPLOITATION DU SITE DE STOCKAGE.....	49
9.5 – TRANSPORT DES DECHETS SUR LE SITE	50
9.6 – TOPOGRAPHIE DU SITE DE STOCKAGE.....	51
10 – CONCLUSION ET PERSPECTIVES	52

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Indicateurs d'impact sur l'environnement

Annexe 2 : Questionnaire de collecte des données

Annexe 3 : Inventaires de cycle de vie

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1- Liste des sites de stockage de DIS autorisés en France ayant participé à l'étude	8
Tableau 2 - Quantité de DIS stockés en CSDU de classe 1 en France.....	8
Tableau 3 - Indicateurs de catégories d'impact sur l'environnement.....	9
Figure 1 - Le système de stockage des DIS en France	10
Tableau 4 - Les sous-systèmes étudiés.....	12
Tableau 5 - Quantités de déchets entrant sur les sites de stockage étudiés	17
Tableau 6 -Composition moyenne des bâtiments.....	17
Tableau 7 - allocation des matériaux de construction des bâtiments par tonne de DIS entrant	18
Tableau 8 - composition moyenne des routes	18
Tableau 9 - allocation des matériaux de construction des routes par tonne de DIS entrant	18
Tableau 10 - Matériaux utilisés pour préparer les alvéoles de stockage	19
Tableau 11 – bilan matière de la construction des alvéoles de stockage par tonne de DIS entrant.....	20
Tableau 12 - consommation annuelle de matières et d'énergies du laboratoire et des bureaux	20
Tableau 13 - Matériaux utilisés pour la couverture intermédiaire des alvéoles de stockage	21
Tableau 14 - bilan matière de la couverture intermédiaire des alvéoles de stockage par t de DIS entrant.....	21
Tableau 15 - composition moyenne du lixiviat produit en phase d'exploitation	22
Tableau 16 - Matériaux utilisés pour la couverture finale des alvéoles de stockage.....	23
Tableau 17 - bilan matière de la fermeture des alvéoles de stockage par tonne de DIS entrant	23
Tableau 18 - données sur le transport des déchets sur le site de stockage	24
Tableau 19 - consommation annuelle de matières et d'énergies des unités de stabilisation.....	25
Tableau 20 - distances de transport pour l'approvisionnement des matériaux	25
Tableau 21 - Emissions de lixiviat par tonne de DIS entrant.....	26
Tableau 22 - Fractions maximales mobilisables dans l'eau des déchets broyés.....	27
Tableau 23 - concentration en polluants du lixiviat, selon le type de déchet stocké.....	30
Tableau 24 - émissions en polluants du lixiviat associé au stockage des DIS stabilisés.....	31
Tableau 25 – Fractions maximales mobilisables pour le déchet stable.....	33
Tableau 26 - émissions en polluants du lixiviat associé au stockage des DIS stables en l'état	34
Tableau 27 - bilan environnemental du stockage de 1 t de DIS	36
Tableau 28 - sources d'impact environnemental du stockage des DIS.....	37
Figure 2 - dispersion des résultats selon les sites de stockage	40
Tableau 29 - bilan environnemental comparé du stockage des DIS et de la production d'électricité en France.....	42
Tableau 30 - bilan environnemental comparé du stockage des DIS et du transport de marchandises par route en France.....	43
Tableau 31 - influence de la stabilisation des déchets sur le bilan environnemental du stockage des DIS	44
Tableau 32 - influence des réactifs utilisés pour la stabilisation des DIS, sur le bilan environnemental du stockage des DIS	46
Tableau 33 - influence du débit de fuite du lixiviat sur le bilan environnemental du stockage des DIS	47
Tableau 34 - influence de la production des géomembranes sur le bilan environnemental du stockage des DIS	48
Tableau 35 - influence de la durée de la phase d'exploitation sur le bilan environnemental du stockage des DIS	49
Tableau 36 - influence du transport des déchets sur le site de stockage	50
Tableau 37 - influence de la topographie du site sur le bilan environnemental du stockage des DIS... 51	51

1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Environ 1 million de tonnes de déchets industriels spéciaux (DIS) sont stockés chaque année en France dans les centres collectifs d'enfouissement technique de classe I (désormais dénommés par la nouvelle terminologie européenne « centre de stockage de déchets ultimes (CSDU) de déchets dangereux »).

Les professionnels du secteur, regroupés au sein de la Fédération Nationale des Activités De la Dépollution et de l'Environnement (FNADE) ont décidé, en partenariat avec l'ADEME, d'évaluer les impacts environnementaux de l'élimination des déchets industriels spéciaux ultimes en centre de stockage de classe I.

L'objectif de ce projet est de parvenir à une meilleure connaissance de la filière sur le plan de ses impacts sur l'environnement, en se fondant sur une méthodologie reconnue et normalisée au niveau international : l'analyse de cycle de vie (normes ISO 14040 à 14043).

L'Analyse de cycle de vie (ACV) est une technique comptable des impacts sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un service (du berceau à la tombe), intégrant extraction des matières premières, transformation, utilisation, recyclage ou traitement en fin de vie.

Pour les opérateurs, cette étude doit donner les moyens :

- d'appréhender dans leur ensemble les impacts environnementaux de la filière,
- d'améliorer leurs performances tant d'un point de vue environnemental qu'économique,
- d'apporter des réponses spécifiques à leurs clients. Les industriels producteurs de déchets spéciaux pourront ainsi intégrer à l'analyse des impacts associés à leurs produits, les impacts potentiels propres au stockage en classe I des déchets qu'ils génèrent.

Le travail mené ne vise pas à comparer les impacts environnementaux :

- associés à la filière stockage par rapport à d'autres filières de traitement des déchets industriels spéciaux,
- spécifiques à chacun des sites de classe I présents sur le territoire français.

Ce rapport décrit la démarche développée pour évaluer les impacts sur l'environnement de la filière de stockage des DIS, et présente les principaux résultats de cette évaluation.

2. ORGANISATION DE L'ETUDE

La mise en œuvre de ce projet a été coordonnée par la Fédération Nationale des Activités De la Dépollution et de l'Environnement (FNADE) pour répondre à une demande de la profession.

Cette étude a été suivie par un comité de pilotage, présidé par un membre de la FNADE, et comprenant un représentant de l'ADEME ainsi que des représentants de chacun des opérateurs (EMTA/ONYX, Séché Environnement, France Déchets/SITA). Le rôle de ce comité a été de valider les choix méthodologiques et d'apporter les réponses techniques spécifiques au métier.

Une revue critique portant sur la méthodologie employée, les données utilisées ainsi que sur la présentation du rapport a été confiée à Monsieur Bernard de Caevel (RDC Environnement, Bruxelles) de façon à consolider le travail rendu et pouvoir communiquer sur le projet.

Les résultats de cette revue critique sont présentés en annexe.

3. PRESENTATION DE LA FILIERE

Cette présentation vise à identifier l'ensemble des constituants de la filière de stockage des déchets industriels spéciaux en France.

3.1 LE CONTEXTE REGLEMENTAIRE ACTUEL

En France, les modalités de stockage des déchets industriels spéciaux reposent sur les Arrêtés Ministériels du 18 décembre 1992. Ces arrêtés précisent respectivement pour les installations nouvelles et existantes :

- la nature des déchets acceptés,
- les critères d'implantation, de conception et d'aménagement des sites avant exploitation,
- les règles d'exploitation,
- les modalités de réaménagement,
- les procédures de contrôles et de suivis.

◆ Déchets acceptés

Les déchets admissibles sur un centre de classe 1 proviennent de processus industriels ou d'installations de dépollution. Ce sont des déchets dits ultimes c'est à dire qui ne sont plus susceptibles de faire l'objet d'un traitement supplémentaire compte tenu des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant. De tels déchets sont essentiellement solides, minéraux, avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs et très peu solubles. Ces déchets doivent de plus être stabilisés c'est à dire présenter une fraction lixiviable réduite.

Pour être admis dans une installation de stockage, les déchets doivent satisfaire :

- à une procédure d'acceptation préalable,
- à un contrôle à l'arrivée sur le site.

La durée maximale d'exploitation et le volume maximal de déchets stockés sont fixés par l'autorisation préfectorale d'exploiter ; ils peuvent donc différer d'un site à un autre.

Les déchets admissibles sur les centres de stockage de classe I sont :

- résidus de l'incinération,
- résidus de traitement de déchets,
- résidus de la métallurgie,
- résidus de stations d'épuration d'eaux industrielles,
- résidus de peinture,
- déchets minéraux de traitement chimique,
- déchets d'amiante,
- terres souillées.

Tout déchet fermentescible, liquide, radioactif, hospitalier, explosif ou inflammable est interdit sur ces sites.

◆ Caractéristiques des sites

Des conditions géologiques et hydrogéologiques favorables sont imposées pour l'implantation des centres de stockage de classe I avec une perméabilité en fond requise de 10^{-9} m/s sur une hauteur de 5 mètres. A cette barrière naturelle ou reconstituée dite passive est ajoutée une barrière dite active soit un système d'étanchéité et de drainage des lixiviats constitué de matériaux géosynthétiques.

◆ Fonctionnement du centre de stockage de classe I

Procédure d'entrée des déchets sur le site

Le déchet fait d'abord l'objet d'un contrôle administratif lors de son entrée sur le site. Le chauffeur présente deux documents : un certificat d'acceptation valable un an délivré à l'issue d'une analyse initiale du déchet et un bordereau de suivi des déchets industriels (BSDI) comportant notamment les caractéristiques du déchet et sa traçabilité de sa production à son arrivée sur le centre de stockage. Chaque camion est pesé à son arrivée et à son départ et ce sous contrôle vidéo. Dès l'entrée sur l'installation de stockage, la non-radioactivité du chargement est contrôlée.

Analyses menées par le laboratoire

Le laboratoire a pour mission de vérifier préalablement à l'arrivée du déchet qu'il est bien redevable d'un centre de classe 1. Au terme de l'analyse approfondie (pH, fraction soluble, métaux lourds, ...) et suivant les seuils d'acceptation fixés par la réglementation, les déchets sont classés en deux catégories : « **stables en l'état** » (stockage direct) ou « **à stabiliser** » (devant subir un traitement avant stockage). Une étude pour son traitement est alors initiée. Un certificat d'acceptation ou de refus est alors émis.

Une analyse du déchet entrant est ensuite effectuée en vue de vérifier sa conformité avec le certificat d'acceptation préalable.

De plus, le laboratoire de l'installation analyse régulièrement les eaux de surface et souterraines (piézomètres) du site. Cet autocontrôle est validé régulièrement par des mesures réalisées par un laboratoire extérieur agréé par le Ministère de l'Environnement.

L'usine de stabilisation et de solidification du déchet

Les usines de stabilisation utilisent la technique dite à froid à base de liants hydrauliques. Elle permet d'assurer la rétention chimique des éléments composants du déchet (stabilisation) et d'augmenter sa résistance mécanique (solidification). Des tests de conformité portant sur des critères chimiques et mécaniques sont réalisés par le laboratoire du site à échéances régulières en vue de valider le caractère « stable » du déchet après traitement.

Ce traitement spécifique nécessite l'utilisation d'eaux. Les lixiviats provenant du ruissellement des eaux météoriques sur le massif de déchets sont donc utilisés dans le process évitant tout rejet dans le milieu.

Les alvéoles de stockage

Les zones de stockage sont constituées d'alvéoles distinctes pour les déchets stables en l'état et les déchets stabilisés par liants hydrauliques.

L'objectif est de maîtriser constamment les interactions entre le déchet et son environnement par l'utilisation d'argile remaniée et de géomembranes imperméables dans le fond et sur les

flancs des alvéoles en exploitation couplé à un système de drainage des eaux en fond d'alvéole.

Une fois le profil définitif de la zone atteint, un complexe d'étanchéité-drainage associé à de l'argile est mis en place avant la couverture finale de terre végétale pour constituer le confinement supérieur qui isolera les déchets des eaux de pluie et de ruissellement.

2.2 UN CONTEXTE REGLEMENTAIRE EN COURS D'EVOLUTION

La politique européenne en matière de gestion des déchets va influencer de façon certaine la réglementation en cours.

◆ **Directive Européenne concernant la mise en décharge des déchets** (Directive 1999/31 du Conseil du 26 avril 1999) :

Cette Directive définit trois catégories de décharges selon le caractère dangereux, non dangereux, ou inerte du déchet qu'elles accueillent. Elle précise les caractéristiques générales pour chacune des catégories de décharge (annexe 1), les critères et les procédures d'admission des déchets (annexe 2) ainsi que les procédures de contrôle et de surveillance pendant les phases d'exploitation et de post-exploitation (annexe 3). La transposition en droit national de cette Directive est en cours. Elle implique l'élaboration de nouveaux outils de contrôle de la qualité des déchets acceptés et la fixation des seuils associés.

◆ **Catalogue européen des déchets**

En spécifiant le caractère dangereux ou non d'un déchet, il influence directement la qualité des déchets acceptés dans les centres de stockage pour déchets dangereux, dits de classe I en France (cette classification ne joue pas sur la qualité du déchet ; elle joue sur le nombre de déchets redevables de la classe 1). La liste des déchets dangereux à ce jour n'englobe pas la totalité des déchets industriels spéciaux.

4. PERIMETRE DE L'ETUDE

4.1 – FILIERE ETUDIEE

La filière étudiée est celle du stockage des déchets industriels spéciaux (DIS) en France, en CSDU de classe 1. Ce stockage est effectué dans des sites autorisés par les pouvoirs publics. Les dix principaux sites recevant la majeure partie du tonnage ont participé à cette étude.

Site de stockage	Exploitant
Bellegarde	France Déchets (SITA)
Drambon	
Jeandelaincourt	
Champteussé	
Villeparisis	
Argences	EMTA (ONYX)
St Cyr des Gâts	
Tourville	
Guitrancourt	
Changé	Séché Eco-Industries

Tableau 1- Liste des sites de stockage de DIS autorisés en France ayant participé à l'étude

Le gisement de déchets gérés annuellement par cette filière est donné dans le tableau suivant.

Type de déchet	Tonnage total entrant	
Amiante	55 868	47,4%
Terres polluées	153 213	
Déchets stables en l'état	226 356	52,6%
Déchets à stabiliser	483 461	
Total	918 898	

Tableau 2 - Quantité de DIS entrant en CSDU de classe 1 en France

(Source : SITA, EMTA, Séché Eco-Industries, 2000)

4.2 – METHODOLOGIE UTILISEE

Le présent rapport a été réalisé selon les prescriptions méthodologiques développées dans les normes ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042 et ISO 14043 relatives aux analyses de cycle de vie (ACV).

4.3 – UNITE FONCTIONNELLE

Dans les ACV, les impacts environnementaux sont évalués en référence à un service ou une fonction rendu. Dans cette étude, l'unité fonctionnelle est :

« stocker 1 tonne de DIS entrant sur un site de stockage ».

Il est important de noter que :

- si le déchet est stabilisé en l'état, la masse stockée est équivalente à la masse entrante,
- si le déchet nécessite un traitement préalable de stabilisation, la masse stockée sera supérieure à la masse entrante de par l'ajout de réactifs, d'eau (utilisation des lixiviats complétés par les eaux de ruissellement).

4.4 – INDICATEURS DE CATEGORIE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'ensemble des flux environnementaux (ex. : consommation d'eau, émissions de polluants dans l'air, dans l'eau et dans le sol) associés à une unité fonctionnelle ont été répertoriés dans cette étude (cf outil Excel réalisé dans le cadre de cette étude). Les impacts potentiels sur l'environnement considérés comme pertinents sont les suivants :

enjeu	catégorie	unité	Incertitude liée au calcul de l'indicateur	Robustesse de l'indicateur (état des connaissances)	Qualité des bases de données d'inventaire (cohérence, exhaustivité)
Ressources	consommation d'énergie primaire	MJ	± 0%	++++	++++
	consommation de matériaux de carrière	kg	± 10%	++++	+++
	épuisement ressources naturelles non renouvelables	an ⁻¹	nd	+++	+++
Pollution air	augmentation de l'effet de serre à 20, 100 et 500 ans	kg éq. CO2	± 30%	+++	++++
	acidification de l'air	g éq. H+	nd	++++	+++
	rejets de composés organiques volatils (COV)	g	nd	++	++
Pollution eau	eutrophisation des eaux	g éq. PO4	nd	+++	+++
	rejets liquides de matières organiques	kg	nd	++	++
Sols	utilisation de la surface au sol	m ²	nd	+++	+++
Déchets	déchets ultimes stockés en classe I	kg	± 0%	++++	+++
	déchets municipaux et industriels (cl II)	kg	± 0%	++++	++++
	déchets inertes (cl III)	kg	± 5%	+++	+
Risque toxique	écotoxicité aquatique	kg éq 1,4 dichlorobenzène	nd	+	+ / ++
	toxicité humaine	kg éq 1,4 dichlorobenzène	nd	+	+ / ++
	écotoxicité sédimentaire	kg éq 1,4 dichlorobenzène	nd	+	+ / ++
	écotoxicité terrestre	kg éq 1,4 dichlorobenzène	nd	+	+ / ++

Tableau 3 - Indicateurs de catégories d'impact sur l'environnement

Les méthodes d'évaluation sont présentées en annexe 1.

Les aspects non liés aux flux de matières et d'énergies (bruit, gênes de voisinage, atteinte à l'esthétique du paysage, odeurs, animaux, ...) ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Note importante :

La catégorie d'impact intitulée « déchets stockés en classe 1 » décrit le tonnage de matière stockée dans les casiers de stockage (pour les déchets stabilisés, ce tonnage inclut les réactifs utilisés pour la stabilisation). Il faut préciser que l'objectif de cette ACV est de réaffecter à la tonne de DIS entrant sur un site de stockage l'ensemble des autres catégories d'impact quantifiées.

5. SYSTEME ETUDIE

La filière étudiée est celle du stockage des DIS en CSDU de classe I, conforme à la réglementation en vigueur (Arrêté Ministériel du 18 décembre 1992).

Les impacts sur l'environnement sont comptabilisés à partir de la réception des DIS sur le site de stockage. Le transport des DIS jusqu'au site de stockage n'est pas pris en compte.

5.1 MODELISATION DU STOCKAGE DES DIS EN CSDU DE CLASSE 1

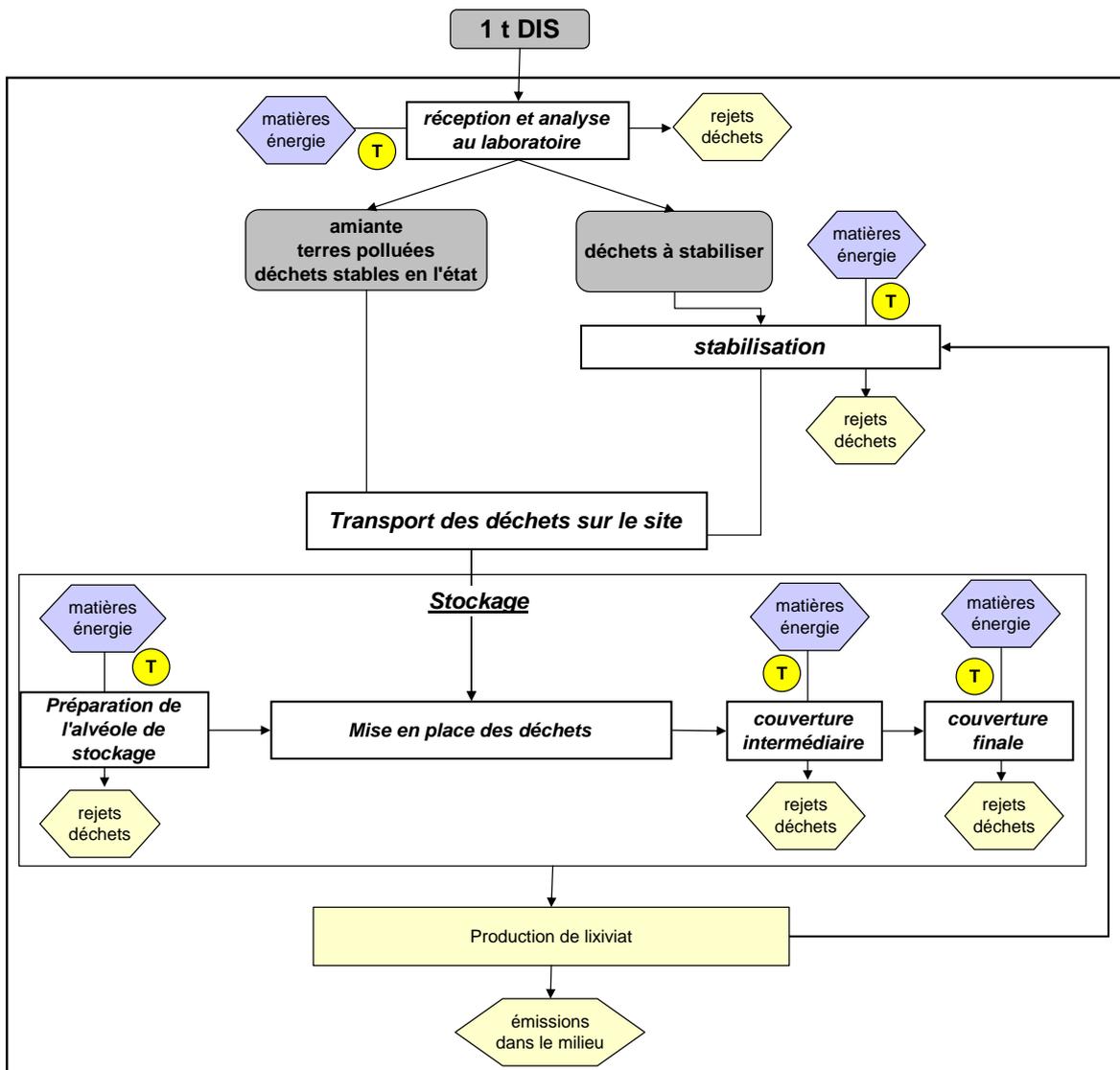


Figure 1 - Le système de stockage des DIS en France

Dès 1992, la réglementation française prévoit une stabilisation des déchets industriels spéciaux préalablement à leur stockage. Elle est effective pour l'ensemble des déchets depuis avril 1998. La stabilisation vise à réduire le transfert des polluants présents dans le déchet vers le milieu qui l'accueille. Différents procédés sont proposés. La stabilisation par liants hydrauliques est le principal procédé développé à l'échelle industrielle. Plusieurs phénomènes vont conduire à la réduction de la fraction mobilisable par l'eau et à la réduction de sa toxicité:

- modification de la spéciation des métaux avec l'ajout d'agents spécifiques tels que des oxydants (CrIV \rightarrow CrIII) et des liants hydrauliques (formation d'hydroxydes insolubles) ;
- intégration des éléments dans la matrice ciment notamment avec la substitution du calcium par les cations métalliques (cas du plomb – cf. étude minéralogique¹) ;
- modification de la porosité réduisant les surfaces d'échange avec l'eau.

Remarque : le terme d'alvéole est utilisé dans cette étude pour désigner un volume de stockage donné. Il ne correspond pas à la définition de l'Arrêté Ministériel qui précise qu'un centre de stockage est divisé en casiers hydrauliquement indépendants, eux-mêmes étant divisés en alvéoles dont la surface maximale ne doit pas dépasser 1500m² – réglementation permettant de limiter le volume de lixiviat produit.

5.2 DECOMPOSITION ET DELIMITATION DU SYSTEME ETUDIE

La filière a été modélisée en décomposant à la fois :

- les 4 étapes principales du fonctionnement du système :
 - phase de construction,
 - phase d'exploitation,
 - phase de fermeture,
 - phase de post-exploitation (après fermeture du site),
- les 3 opérations principales de l'activité du système (phases) :
 - traitement de stabilisation par liants hydrauliques,
 - stockage des déchets en alvéoles,
 - transport des déchets sur le site (mise en place).

Dans la pratique, ceci conduit au découpage suivant du système :

	Construction	Exploitation	Fermeture site	Post-exploitation
Stabilisation	+	+		
Stockage	+	+	+	+
Transport des déchets		+		

Dans le tableau ci-dessus, les cases avec un signe « + » indiquent les couples « étape x phase » au sein desquels : des matières premières et de l'énergie sont consommées, et des rejets dans l'environnement peuvent être émis. Sept modules spécifiques ont ainsi fait chacun l'objet d'un relevé des entrants et des sortants.

Ces modules sont eux-mêmes décomposés en blocs élémentaires de manière à remonter jusqu'aux entrants et sortants les plus élémentaires (c'est à dire jusqu'à ce que les entrants soient des ressources naturelles prélevées dans le milieu naturel). On aboutit alors à un découpage en 22 niveaux comme indiqué dans le tableau ci-après.

Le tableau ci-dessous détaille, pour chaque module et chaque bloc élémentaire, les sous-systèmes inclus dans l'ACV. Certains sous-systèmes ont cependant été exclus de l'ACV par manque de données disponibles.

¹ J.Y. Bottero et al., 1995 - Actes du Congrès International sur les Procédés de Solidification et de Stabilisation des déchets – 28 novembre au 1^{er} décembre 1995 – Nancy (France) – J.M. Cases and F. Thomas Editors

DECOMPOSITION DU SYSTEME				DELIMITATION DE L'ACV		
phase	étape	module	bloc élémentaire	Inclus dans l'ACV	Exclus de l'ACV	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	stockage	construction	bâtiments (construction)	fabrication des matériaux de construction depuis l'extraction des matières premières	chantier de construction et démolition	
			route (construction)	fabrication des matériaux de construction depuis l'extraction des matières premières	mise en place et démolition	
			alvéole de stockage (aménagement)	matériaux (fabrication)	fabrication des matériaux rapportés depuis l'extraction des matières premières	
				transport matériaux (appro.)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication des camions et des infrastructures
				engins du site (utilisation)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication et fin de vie des engins
		exploitation	site (laboratoire, bureaux)	fonctionnement (consommables, énergie)	fabrication des matériaux depuis l'extraction des matières premières; production et utilisation de l'énergie	
			alvéole de stockage (couverture intermédiaire)	matériaux (fabrication)	fabrication des matériaux rapportés depuis l'extraction des matières premières	
				transport matériaux (appro.)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication des camions et des infrastructures
				engins du site (utilisation)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication et fin de vie des engins
		lixiviat (devenir des déchets stockés)	traitement et émissions	traitement du lixiviat (= utilisation comme eau de process de l'unité de stabilisation) et émission dans le milieu naturel		
		fermeture	alvéole de stockage (couverture finale)	matériaux (fabrication)	fabrication des matériaux rapportés depuis l'extraction des matières premières	
				transport matériaux (appro.)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication des camions et des infrastructures
				engins du site (utilisation)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication et fin de vie des engins
		post-exploitation	lixiviat (devenir des déchets stockés)	émissions	émissions à l'entrée des structures géologiques	
15 16 17	transport	exploitation	transport des déchets sur le site	fabrication véhicules	transformation des matériaux, assemblage et fin de vie	
			consommables (lavage, maintenance)	fabrication des produits de lavage, huiles et pneus	devenir après usage	
			carburant (utilisation)	fabrication, distribution, utilisation du carburant		
18 19 20 21 22	stabilisation	construction	bâtiments (construction)	fabrication des matériaux de construction depuis l'extraction des matières premières	chantier de construction et démolition	
			machines (construction)	fabrication des matériaux constitutifs depuis l'extraction des matières premières	transformation des matériaux, assemblage et fin de vie	
		exploitation	procédé de stabilisation	matériaux (fabrication)	fabrication des matériaux depuis l'extraction des matières premières	fabrication des réactifs spécifiques au déchet à traiter (5% de la masse totale de réactifs)
			procédé de stabilisation	transport matériaux (appro.)	fabrication, distribution, utilisation du carburant	fabrication des camions et des infrastructures
procédé de stabilisation	énergie process	production, distribution et utilisation de l'énergie				

Tableau 4 - Les sous-systèmes étudiés

5.3 LES FRONTIERES PHYSIQUES DU SITE DE STOCKAGE

Dans cette étude, la frontière physique du site de stockage a été fixée à la sortie de la barrière argileuse remaniée et contrôlée.

Les émissions dans le milieu extérieur sont comptabilisées à partir du moment où elles quittent la technosphère, c'est-à-dire lorsqu'elles apparaissent en dessous des 5 mètres d'argile du système de stockage.

Cette barrière dite passive dont les caractéristiques sont définies par la réglementation (5 mètres de perméabilité de 10^{-9} m/s ou système équivalent) est en mesure d'imposer des coefficients de retard tels que l'apparition des premiers éléments polluants ayant échappé au système d'étanchéité-drainage (barrière active) se produira bien au-delà de la durée moyenne d'exploitation du site - cf. travaux menés par ANTEA et l'Ecole des Mines de Paris/Centre d'Informatique Géologique de modélisation des transferts de polluants d'un centre de

stockage de déchets stabilisés (programme SITINERT sous conventions EUREKA et ADEME, 1992-1997)².

5.4 LES FRONTIERES TEMPORELLES DU SITE DE STOCKAGE

Dans cette étude, **les émissions dans l'environnement notamment de lixiviat ont été modélisées sur différentes périodes allant jusqu'à 10 000 ans après ouverture du site de stockage** (durée d'exploitation moyenne : 28 ans).

Faute de pouvoir justifier sur des bases scientifiques documentées une durée de référence, la valeur de 10 000 ans a été choisie car il s'agit de la durée maximale retenue dans le cadre de la filière électronucléaire pour rendre compte du contenu en radionucléides des déchets radioactifs à traiter en fin de vie³.

6. PROCEDURE DE TRAITEMENT DES DONNEES ET REPRESENTATIVITE DU SYSTEME ETUDIE

6.1 - COLLECTE DES DONNEES ET VALIDATION PAR LES PROFESSIONNELS

La réalisation de cette étude s'est déroulée selon la procédure suivante :

- 1) Mise au point d'un questionnaire de collecte des données, après échanges et réunion de travail avec les professionnels (voir format du questionnaire en annexe). 2) Recueil des données à l'aide du questionnaire adressé aux 10 sites, selon le découpage matriciel présenté plus haut.
- 3) Après traitement des données reçues : réunions de confrontation avec les professionnels, et finalisation des retours.

6.2 - CARACTERISATION DES DONNEES « MOYENNES »

Le site « moyen » est défini par :

- 1) **une valeur moyenne pour chaque paramètre (Px)** pris en compte dans l'ACV (ex. conso. des matériaux de couverture, conso. électricité du labo. ...).
- 2) **un tonnage moyen annuel de DIS entrant** sur le site (nécessaire pour ramener chaque valeur Px à 1 t de DIS entrant).

6.2.1 – Valeur moyenne pour chaque paramètre

Nous décrivons ci-après le principe général utilisé pour définir la valeur moyenne de chaque paramètre pertinent.

Le site moyen a été défini en effectuant une moyenne pondérée des données propres à chaque site, par le tonnage entrant en 2000.

3 types de paramètres identifiés :

- a) Valeur proportionnelle au tonnage entrant en 2000 (ex. kWh labo.)

² H. Billard, B. Côme, P. Viennot, Modélisation de l'impact potentiel d'un centre de stockage de déchets stabilisés. Actes du congrès Stabilisation des Déchets et Environnement 99, Lyon-Villeurbanne, 13-16 avril 1999, pp104-109

³ Recherche d'une méthodologie pour évaluer des cycles électronucléaires sous l'angle environnemental et sanitaire. Document de synthèse du Forum Cogema / EDF / ANDRA / CEA / Framatome, 7 novembre 2002.

- b) Valeur constante (ex. durée exploitation, surface bâtie)
- c) Valeur proportionnelle au tonnage stocké sur n années (ex. construction alvéoles, couverture finale)

a - paramètres proportionnels au tonnage entrant en 2000.

$$P_{moy} = \sum_i (P_i \times T_i) / \sum_i T_i$$

P : paramètre étudié, lié au fonctionnement de l'année 2000 (e.g. proportionnel au tonnage entrant).
 i : n° du site
 T_i : tonnage de DIS entrant sur le site i en 2000
 P_i : valeur de P pour le site i en année 2000.

b - paramètres constants (non liés au tonnage entrant).

$$P_{moy} = \sum_i [(P_i / \text{durée exploitation site } i) \times T_i] / \sum_i T_i$$

Ceci revient à considérer que l'année 2000 est une année moyenne, représentative des autres années.

Cas particulier de la durée d'exploitation du site moyen : procédure idem a) c'est-à-dire moyenne pondérée par le tonnage entrant en 2000.

c - paramètres proportionnels au tonnage stockés sur n années.

$$P'_{moy} = \sum_i (P_i \times T'_i) / \sum_i T'_i$$

avec T'_i : tonnage stocké total concerné pour le site i.

6.2.2 - Tonnage de DIS entrant dans le site « moyen » en 2000

La quantité de DIS entrant sur le site moyen en 2000 correspond à la moyenne des tonnages entrants sur les 10 sites étudiés :

$$T_{moy} = \sum_i T_i (2000) / 10$$

soit pour le site « moyen » : 91 890 t de DIS entrant / an (cf données ci-après).

- P_{moy} par t DIS entrant = P_{moy} / 91 890
- P'_{moy} par t DIS entrant = P'_{moy} / (Σ T'_i/10)

6.3 - LE TRAITEMENT DES DONNEES MANQUANTES

Les questionnaires adressés aux professionnels n'ont pas tous été complétés avec le même niveau de complétude.

De manière générale, lorsqu'un site n'a pas fourni de donnée, il n'a pas été pris en compte dans le calcul de la valeur affectée au site « moyen » (i.e., le tonnage entrant sur ce site n'entre pas dans le calcul du tonnage total ΣT_i ou $\Sigma T'_i$ des équations précédentes).

Représentativité des données utilisées pour l'ACV :

Les valeurs « moyennes » caractérisant chaque paramètre de base ont été affectées d'un **score de représentativité** : ce score indique le % du tonnage total de DIS entrant dans les 10 sites pris en compte dans la définition du paramètre.

6.4 - REPRESENTATIVITE DU SYSTEME ETUDIE

- Représentativité géographique : **France**
- Représentativité temporelle : **2000**
- Représentativité technique :
 - **situation actuelle**
 - tous les DIS : **amiante, terres, déchets stables en l'état, déchets à stabiliser**
 - **les principaux sites K1** en France (10/12).

Au total, la filière modélisée est représentative du stockage d'1 tonne moyenne de DIS stockée sur les sites localisés en France.

Les données utilisées sont présentées au chapitre suivant, et correspondent à la **situation moyenne en France, en 2000**.

Pour garantir ce niveau de représentativité, les données ont été collectées sur les 10 principaux sites français, en se basant sur les données d'exploitation de l'année 2000. Les données ont été ramenées à 1 tonne de DIS en effectuant une moyenne des données de chaque site pondérée par le tonnage entrant.

Certaines données n'ont pu être renseignées pour certains sites. Nous avons donc indiqué pour chaque donnée utilisée, sa représentativité (tonnes de DIS concernées / tonnage total DIS stockés en France).

De plus, une analyse de la dispersion des données autour de cette moyenne a été effectuée, à partir du calcul de l'ACV de chacun des sites.

6.5 – SOURCES DE DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

Les inventaires de cycle de vie ont été calculés en utilisant les données professionnelles et les inventaires génériques compilés dans la base de données du logiciel WISARD (il s'agit d'un outil d'analyse environnementale de scénarios de gestion des déchets ménagers, développé par Ecobilan) : cette base de données a fait l'objet d'une revue critique en 1999.

Les inventaires utilisés dans cette étude ont été les suivants :

- production et distribution d'électricité (1 kWh),

- production, distribution et utilisation de fioul lourd (1 litre),
- production de carburant et d'huile lubrifiante (1 litre),
- émission des véhicules (1 litre),
- production de ciment, asphalte, béton, bentonite, acier, verre (1 kg),
- extraction d'argile, et de gravier (1 kg),
- production de polyéthylène haute densité (PEHD), polypropylène (PP), chlorure de polyvinyle (PVC), polyester (1 kg)
- production de soude (NaOH), acide sulfurique (H₂SO₄), chaux (CaCO₃), azote (1 kg),
- transport de marchandises par route (1 tkm)

7. DONNEES ET HYPOTHESES

7.1 - PARAMETRES GENERAUX

- Quantité totale de DIS réceptionnés sur les sites en 2000 en France (10 sites) : 918 890 tonnes entrant.
- Capacité totale autorisée de stockage des sites en France : 19 150 000 m³ de DIS (représentativité : 76% du tonnage).

Description du site moyen représentatif de la moyenne française (76%) :

- durée d'exploitation du site moyen : 28 ans (mini. 15 ans, maxi : 35 ans)
- surface occupée par le site (aire de stockage + alentours + laboratoire et bureaux) : 400 000 m² (de 60 000 m² à 650 000 m²)
- capacité totale de stockage sur la durée d'exploitation : 2 720 000 m³ (de 335 000 m³ à 5 300 000 m³).

Quantité et composition des déchets entrants annuellement sur le site moyen (100%)

- quantité de déchets stockés en 2000 sur le site : 91 890 tonnes
 - amiante : 5 586, 8 t
 - terres polluées : 15 321,3 t
 - déchets stables : 22 635, 6 t
 - déchets à stabiliser : 48 346,1 t

Type de déchet	Tonnage total entrant (t)		Volume de stockage (m ³ occupé par t de déchet)
Amiante	5 586,8	6,1%	1,25
Terres polluées	15 321,3	16,7%	0,77
Déchets stables	22 635,6	24,6%	1
Déchets à stabiliser	48 346,1	52,6%	1,25
Total	91 889,8		

Tableau 5 - Quantités de déchets entrant sur les sites de stockage étudiés

7.2 – MODULE 1 : STOCKAGE X CONSTRUCTION

Bloc 1 : bâtiments

Données FNADE :

- Surface moyenne bâtie du site moyen : 2000 m² (surface au sol des bureaux R+1⁴) (100% - de 315 m² à 7 450 m²)

Hypothèses ACV :

Matériaux de construction	Quantité moyenne
béton	300 kg / m ²
acier	50 kg / m ²
PVC	10 kg / m ²
verre	40 kg / m ²

Tableau 6 -Composition moyenne des bâtiments

⁴ Rez-de-chaussée + un étage

Le transport des matériaux jusqu'au site s'effectue par camion sur une distance de 50 km.

Pour chaque matériaux de construction, la quantité affectable à 1 t de DIS entrant a été calculée comme suit :

$$M_i \text{ (kg)} = Q_i \text{ (kg/m}^2\text{)} \times (\text{surface bâtie (m}^2\text{)} / \text{durée exploitation (an)}) / \text{tonnage annuel DIS entrants sur site (t / an)}$$

Les données utilisées sont donc les suivantes :

Matériaux	Quantité par t DIS
béton	233 g / t DIS
acier	39 g / t DIS
PVC	8 g / t DIS
verre	31 g / t DIS
Transport	0,016 t.km

Tableau 7 - allocation des matériaux de construction des bâtiments par tonne de DIS entrant

Bloc 2 : routes (voies de desserte)

Données FNADE :

- Surface moyenne de voirie sur le site moyen : 12 000 m² (2 km , 6 m de largeur) (100% - de 3000 m² à 21 000 m²).

Hypothèses ACV :

Matériaux	Epaisseur	Densité	Quantité
gravier	20 cm	1000 kg / m ²	200 kg / m ²
béton	20 cm	2000 kg / m ²	400 kg / m ²
bitume	2 cm	1700 kg / m ²	34 kg / m ²

Tableau 8 - composition moyenne des routes

Le transport des matériaux jusqu'au site s'effectue par camion sur une distance de 35 km pour le gravier, 20 km pour le béton et 50 km pour le bitume.

Pour chaque matériaux, la quantité affectable à 1 t de DIS entrant a été calculée en utilisant la même formule de calcul que celle proposée pour les matériaux de construction.

Matériaux	Quantité par t DIS
gravier	933 g / t DIS
béton	1,87 kg / t DIS
bitume	159 g / t DIS
Transport	0,078 t.km

Tableau 9 - allocation des matériaux de construction des routes par tonne de DIS entrant

Thème : alvéole de stockage

Bloc 3 : matériaux (cf ci-après)

Bloc 4 : transport des matériaux, voir fin du chapitre

Bloc 5 : engins du site

Données FNADE :

Les modalités de construction des alvéoles de stockage, notamment le choix des autres matériaux utilisés, sont très hétérogènes selon les sites. Certains aspects dépendent de la topologie du terrain (quantité de matériaux excavés) et de la nature des matériaux disponibles sur le site (sable, argile).

La diversité des matériaux utilisés pour la construction des alvéoles de stockage est illustrée par le tableau ci-dessous :

Matériaux	Nombre de sites concernés (sur 10)
argile rapportée	2
bentonite	1
sable	2
Béton*	4
Géomembrane PEHD	10
Géotextile PP	9
Membrane bitumineuse	1
polyester	1
gravier	9

(*) : Le béton est utilisé pour fabriquer les bassins de collecte des lixiviats.

Tableau 10 - Matériaux utilisés pour préparer les alvéoles de stockage

Hypothèses ACV :

Pour les paramètres ci-dessous, la caractérisation d'un site de stockage moyen représentatif a été effectuée en calculant simplement la valeur moyenne pondérée par le tonnage entrant sur chaque site (représentativité : 76% du tonnage total) :

- capacité de stockage d'une alvéole moyenne : 390 000 m³ (76% - de 27 000 m³ à 1 766 000 m³)
- surface (fond + flanc) d'une alvéole moyenne : 13 000 m² (76% - de 1 500 m² à 46 000 m²)
- dont surface de fond : 40%
- hauteur de stockage d'une alvéole moyenne : 31 m (dont couvertures intermédiaires) (73% - de 8 m à 65 m)
- densité moyenne du déchet en place (stocké) : 1,36 t / m³ (cette densité tient compte des réactifs incorporés aux déchets stabilisés) (100% - de 0,91 t / m³ à 1,76 t / m³).

Les quantités de matériaux utilisés et la consommation de carburant des engins du site pour la construction d'une alvéole de stockage sont présentées dans le tableau ci-dessous. Elles sont représentatives de la moyenne nationale, mais ne correspondent pas à la description d'un site réel (dans la réalité, aucune alvéole n'utilise tous les matériaux cités à la fois) : par exemple, un seul site utilise des membranes bitumineuses à hauteur de 243 g / t DIS entrant sur ce site, ce qui correspond après calcul à 35,69 g / t DIS entrant sur un site moyen en France.

Caractéristiques de construction des alvéoles de stockage :

Matériaux	Unité	quantité	représentativité	Site mini	Site maxi
argile rapportée	kg / t DIS	7,62	76%	0	345
bentonite	g / t DIS	66,21	76%	0	5 588
sable	kg / t DIS	1,13	76%	0	6,90
Béton*	kg / t DIS	3,70	76%	0	11,98
Géomembrane PEHD	g / t DIS	64,16	76%	31,37	339,28
Géotextile PP	g / t DIS	33,78	76%	0	79,05

Membrane bitumineuse	g / t DIS	35,69	76%	0	242,85
polyester	g / t DIS	4,19	76%	0	293,58
gravier	kg / t DIS	15,19	76%	0	55,34
matériaux excavés	t / t DIS	0,78	50%		
Diesel (excavation)	l / t DIS	0,01	50%		
Diesel (construction alvéole)	l / t DIS	1,23	46%		

(*) : Le béton est utilisé pour fabriquer les bassins de collecte des lixiviats.

Tableau 11 – bilan matière de la construction des alvéoles de stockage par tonne de DIS entrant

7.3 – MODULE 2 : STOCKAGE X EXPLOITATION

Thème : site (bureaux, laboratoire, routes)

Bloc 6 : fonctionnement du site

Données FNADE :

Consommations du laboratoire et des bureaux :

Tous les sites confondus (données cumulées, base 2000)			représentativité
Electricité	kWh / an	2 200 000	90%
Eau	m ³ / an	15 000	96%
acides	kg	150	78%
bases	kg	10	78%
Acides ou bases	kg	45	78%
Plastiques jetables	kg	1 250	31%
Solvants	litre	40	56%
Acétylène	m ³	55	52%
Argon	m ³	3 000	52%
Azote	m ³	3 000	52%
Air	m ³	350	52%

Tableau 12 - consommation annuelle de matières et d'énergies du laboratoire et des bureaux

Données ACV :

Les données du tableau ci-dessus se rapportent aux 918 890 tonnes de DIS entrant sur les sites en 2000. Elles ont été directement ramenées à 1 t de DIS entrant.

Pour le calcul de l'ACV, les consommations d'acétylène, d'argon, d'azote et d'air ont été négligées.

Thème : couverture intermédiaire de l'aire de stockage.

Bloc 7 : matériaux

(Bloc 8 : transport des matériaux, voir fin du chapitre)

Bloc 9 : engins du site

Données FNADE :

Comme pour la construction des alvéoles de stockage, les données concernant la couverture intermédiaire des déchets ont été fournies par les professionnels en kg de matière par m² d'alvéole et recouvrent les items suivants (NB : par site, utilisation d'un ou de deux matériaux) :

Matériaux	Nombre de sites concernés (sur 10)
Déchets inertes K III	1
Géotextile PP (polypropylène)	3
Géomembrane PEHD	2
Bâche agricole (PELD)	4
Sablon	1
terres	1
Goudron	1

Tableau 13 - Matériaux utilisés pour la couverture intermédiaire des alvéoles de stockage

Données ACV :

Procédure de traitement analogue à celle utilisée pour la construction des alvéoles de stockage.

Couverture intermédiaire des alvéole de stockage (par t DIS entrant)

Matériaux	Unité	quantité	représentativité
Déchets inertes K III	kg / t DIS	32,45	81%
Géotextile PP (polypropylène)	g / t DIS	0,46	81%
Géomembrane PEHD	g / t DIS	4,6	81%
Bâche agricole (PELD)	kg / t DIS	0,22	81%
Sablon	kg / t DIS	0,42	81%
terres	vrac		
Goudron	kg / t DIS	0,27	81%
Diesel (engins)	Litre / t DIS	0,15	12%

Tableau 14 - bilan matière de la couverture intermédiaire des alvéoles de stockage par t de DIS entrant

Thème : lixiviat

Bloc 10 : traitement et émissions

Données FNADE :

En phase d'exploitation, le lixiviat produit est entièrement récupéré par le système de drainage et utilisé pour alimenter en eau l'unité de stabilisation (100%).

L'impact potentiel associé aux émissions de lixiviat dans l'environnement durant la phase d'exploitation sera conditionné :

- par le débit de fuite à travers le système d'étanchéité-drainage par géomembrane,
- par la qualité des lixiviats produits.

a) Débit de fuite

Les débits de fuite calculés sont compris entre 1,3 et 7 m³/ha de stockage/an suivant la qualité du contact entre la géomembrane et l'argile (source : calculs effectués par CREED/EMTA)⁵.

⁵ Le débit de fuite à travers une étanchéité composite de type « géomembrane sur niveau argileux » peut être évalué à partir des équations proposées par Giroud en collaboration avec Bonaparte (Bonaparte *et al.*, 1989 ; Giroud, 1997 ; Giroud *et al.*, 1998). Ce débit est lié :

- à la conductivité hydraulique et à la hauteur de la formation argileuse – caractéristiques imposées par la réglementation (5 mètres à 10⁻⁹ m/s),
- au nombre et à la surface des défauts, fonction du niveau de qualité des contrôles effectués lors de la mise en place. Il est communément admis un nombre moyen de défaut de 6,6 trous d'1 cm de diamètre par hectare de géomembrane,
- à la qualité du contact entre la géomembrane et l'argile,
- à la charge hydraulique soit à la hauteur de la lame d'eau au-dessus de la géomembrane. La hauteur de lixiviats en fond de site est limitée par la réglementation à 0,3 mètre limitant la charge hydraulique à 1,06. Cette valeur peut être garantie

Dans cette étude, nous avons considéré la valeur de débit de fuite de **7 m³/ha/an** pour estimer la charge maximale en polluants libérés en sortie de formation argileuse, en phase d'exploitation

b) Qualité des lixiviats produits

Le tableau ci-dessous présente les valeurs relevées sur sites :

Composition du lixiviat produit en phase d'exploitation		Moyenne	Représentativité	Minimum	Maximum
DCO (demande chimique en oxygène)	mg /l	1 419	70%	343	2600
COT (Carbone organique total)	mg /l	418	62%	62	993
Matières en suspension (MES)	mg /l	57	10%	35,3	75
Hydrocarbures totaux	mg /l	34	62%	< 0,1	164
Phénols (C ₆ H ₅ OH)	mg /l	573	66%	< 0,05	3140
Chlorures (Cl-)	mg /l	29 809	88%	1750	95000
Cyanures totaux	mg /l	0,165	5%	0,165	0,165
Cyanures libres (CN-)	mg /l	0,049	5%	< 0,05	< 0,05
Fluorures (F-)	mg /l	1,120	5%	1,12	1,12
Azote (Kjeldhal) (N-tot)	mg /l	166	17%	164	167
Métaux lourds totaux	mg /l	2,53	45%	0,33	5,57
dont Arsenic (As)	mg /l	0,307	64%	0,006	0,87
dont Cadmium (Cd)	mg /l	0,064	83%	< 0,005	0,29
dont Chrome (Cr VI)	mg /l	0,028	74%	0,009	< 0,05
dont Chrome total (Cr total)	mg /l	0,055	9%	0,032	0,084
dont Cuivre (Cu)	mg /l	0,123	74%	0,008	0,325
dont Plomb (Pb)	mg /l	0,419	83%	0,043	1,28
dont Mercure (Hg)	mg /l	0,036	79%	< 0,001	0,052
dont Nickel (Ni)	mg /l	0,318	78%	0,075	0,96
Zinc (Zn)	mg /l	0,325	26%	0,02	0,38

Tableau 15 - composition moyenne du lixiviat produit en phase d'exploitation

En réalité, la qualité des lixiviats formés est à relier à la qualité et à la quantité des déchets stockés.

La section 7.10 détaille la méthode utilisée pour caractériser :

- la composition du lixiviat selon le type de déchets - déchets stables en l'état versus déchets stabilisés par liants hydrauliques,
- les quantités de lixiviats émis durant la phase d'exploitation,

en phase d'exploitation 1) par le pompage des lixiviats, ou par écoulement gravitaire qui sont utilisés dans le process de stabilisation 2) par l'efficacité du système de drainage qui, sur cette période, ne sera pas remise en question.

- Bonaparte R., Giroud J.P. and Gross B.A., 1989, « Rates of leakage through landfill liners », Proceedings of Geosynthetics '89, Vol.1, IFAI, San Diego, California, February 1989, pp. 18-29
- Giroud J.P., 1997, « Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects », Geosynthetics International, Vol.4, N°3-4, pp. 335-348
- Giroud J.P., Soderman K.L., Khire M.V., Badu-Tweneboah K., 1998, « New developments in landfill liner leakage evaluation », Proceedings of Geosynthetics '98, pp.261-268

7.4 - MODULE 3 : STOCKAGE X FERMETURE

Thème : couverture finale de l'aire de stockage.

Bloc 11 : matériaux

(Bloc 12 : transport des matériaux, voir fin du chapitre)

Bloc 13 : engins du site

Données FNADE :

Comme pour la construction des alvéoles de stockage, les données concernant la couverture finale des déchets ont été fournies par les professionnels en kg de matière par m² d'alvéole et recouvrent les items suivants (NB : par site, utilisation d'un ou de deux matériaux):

Matériaux	Nombre de sites concernés (sur 10)
Argile du site	10
Argile rapportée	0
Terre végétale	10
Sable du site	5
Paille	1
Gravier du site	5
Bentonite	2
Géomembrane PEHD	10
Géotextile PP (polypropylène)	4
Géotextile PVC	3

Tableau 16 - Matériaux utilisés pour la couverture finale des alvéoles de stockage

Données ACV :

Procédure de traitement analogue à celle utilisée pour la construction des alvéoles de stockage.

Matériaux	Unité	quantité	représentativité
Argile du site	t / t DIS	0,661	76%
Argile rapportée	t / t DIS	0	76%
Terre végétale	t / t DIS	0,167	76%
Sable du site	t / t DIS	0,117	76%
Paille	kg / t DIS	0,024	76%
Gravier du site	kg / t DIS	6,30	76%
Bentonite	kg / t DIS	0,046	76%
Géomembrane PEHD	kg / t DIS	0,550	76%
Géotextile PP	kg / t DIS	0,083	76%
Géotextile PVC	kg / t DIS	0,004	76%
Carburant engins (diesel)	litre / t DIS	0,877	41%

Tableau 17 - bilan matière de la fermeture des alvéoles de stockage par tonne de DIS entrant

7.5 - MODULE 4 : STOCKAGE X POST-EXPLOITATION

Bloc 14 : émissions de lixiviats

Les émissions de lixiviat retenues pour la phase d'exploitation (7 m³/ha/an) ont été considérées comme valables au cours des 100 premières années de stockage. Au-delà, le débit de fuite considéré a été de **31,5 m³/ha/an**, afin de tenir compte du vieillissement potentiel des géomembranes en fond et en couverture du stockage (source : comité de suivi technique – cf.

hypothèses prises par ANTEA/Ecole des Mines de Paris dans le programme SITINERT pour traduire la défaillance des systèmes d'étanchéité par géosynthétique).

La concentration en polluants du lixiviat émis en phase de post-exploitation n'est pas une donnée facile à caractériser (absence de mesures sur l'horizon de temps étudié). La méthode utilisée pour décrire la composition massique du lixiviat produit est détaillée ci-après à la section 7.10.

7.6 - MODULE 5 : TRANSPORT DECHETS SUR SITE X EXPLOITATION

Bloc 15 : fabrication des véhicules

Bloc 16 : consommables

Bloc 17 : carburant

Données FNADE :

Transport des déchets sur le site

Tous les sites confondus (données cumulées, base 2000)			représentativité
Nombre de véhicules	Nb	29	100%
Km parcourus	km / an	271 390	100%
Durée de vie moyenne du véhicule	an	10	65%
Changement de pneus	Fois / 10000 km	0,75 (moy)	33%
Nb pneus par changement	Nb	4	34%
Poids d'un pneu	kg	60 (45 à 80))	21%
Fréquence nettoyage	Fois / 1000 km	30 (0,5 à 72)	80%
Eau par lavage	Litre / lavage	285 (100 à 100)	57%
Produit nettoyage	kg / lavage	0,5 (0 à 3)	27%
Carburant (diesel)	l / 100 km	86,6 (10 à 250)	90%
Huile lubrifiante	Nb vidanges / 10 000 km	1 (0,64 à 8,8)	45%
	l / vidange	20 (11 à 28)	33%
Huile hydraulique	Nb vidanges / 10 000 km	1 (0,3 à 1,3)	28%
	l / vidange	95 (50 à 125)	28%

Tableau 18 - données sur le transport des déchets sur le site de stockage

Données ACV :

Les données ci-dessus ont été affectées à l'unité fonctionnelle (t DIS entrant) en tenant compte de la durée moyenne d'exploitation du site (28 ans) et au tonnage annuel moyen entrant sur le site (91 890t DIS).

7.7 - MODULE 6 : STABILISATION X CONSTRUCTION

Thème : construction de l'installation.

Bloc 18 : bâtiments

Bloc 19 : machines

Données FNADE :

- Surface bâtie : 2345 m² (100%)
- Poids des machines : 157 tonnes (47%)

Données ACV :

Mêmes hypothèses utilisées que pour le traitement des données du bloc 1. Les données FNADE ont été ramenées à 1 t de DIS à stabiliser, en tenant compte de la durée d'exploitation et du tonnage totale de DIS à stabiliser traiter par an.

7.8 - MODULE 7 : STABILISATION X EXPLOITATION

Bloc 20 : matériaux

(Bloc 21 : transport des matériaux, voir fin du chapitre)

Bloc 22 : énergie du procédé

Données FNADE :

Exploitation de l'unité de stabilisation

Tous les sites confondus (données cumulées, base 2000)			représentativité
DIS traités	t / an	483 461	100%
eau du lixiviat	m ³ / an	196 683	100%
eau totale (lixiviat + eau de ruissellement +eau du réseau)	m ³ / an	270 856	100%
Electricité	kWh / an	5 390 298	91%
Gaz naturel	m ³ / an	0	100%
Fioul lourd	t / an	128	100%
Lubrifiant	kg/ an	7 305	88%
Réactifs (confidentiels)	t / an	168 647	100%

Tableau 19 - consommation annuelle de matières et d'énergies des unités de stabilisation

Données ACV :

Les données du tableau ci-dessus se rapportent à la stabilisation de 483 461 t de DIS à stabiliser sur les 918 890 tonnes de DIS entrant sur les sites en 2000. Elles ont été directement ramenées à 1 t de DIS entrant.

7.9 – DISTANCES DE TRANSPORT

Les données ci-dessous ont été utilisées pour calculer (en t.km) les données relatives au transport des marchandises approvisionnées sur le site de stockage : cf **blocs 4, 8, 12 et 21**.

Matériaux	km
Argile	10
Bentonite	120
Terre végétale	15
Gravier, sable, paille	35
Déchets K III	1
Géomembrane PEHD	1 000
Géotextile PP (polypropylène)	200
Géotextile PVC, bâches PELD	300
Goudron	50
Plastiques du laboratoire	250
Béton	20
Fioul, diesel	20
Réactifs stabilisation	120
Défaut (autres matériaux)	50

Tableau 20 - distances de transport pour l'approvisionnement des matériaux

7.10 – EMISSIONS DE POLLUANTS CONTENUS DANS LE LIXIVIAT

Données quantitatives

<u>Données de base</u>			
A	déchets stockés par unité de surface d'alvéole	40,8 t stockée / m2 alvéole (fond + flanc)	moyenne sites FNADE
B	surface de fond d'alvéole	40% m2 fond / m2 fond+flanc	hypothèse comité de suivi
C	durée exploitation	28 ans	moyenne sites FNADE
D	émission de lixiviat (0 -100 ans) par an	0,70 l / m2 fond alvéole /an	hypothèse comité de suivi
E	fuite lixiviat post-100 ans, par an	3,15 l / m2 fond alvéole /an	hypothèse comité de suivi
<u>Composition d'1 t de DIS stockés</u>			
F	déchets stables	0,319 t DIS stables entrant / t stockée	moyenne sites FNADE
G	déchets à stabiliser	0,355 t DIS à stabiliser entrant / t stockée	moyenne sites FNADE
H	eau et réactifs	0,326 t eau+réactifs / t stockée	moyenne sites FNADE
N	stables	0,473 t DIS stables entrant / t DIS entrant	=F / (F + G)
O	stabilisés	0,527 t DIS à stabiliser entrant / t DIS entrant	=G / (F + G)
	déchets stockés	1,484 t stockée / t DIS entrant	=N + O * ((G + H) / G)
	Coefficient dilution	1,9183 t déchets stabilisés stockés / t à stabiliser	=(G + H) / G
<u>Emissions par t de déchets et par an</u>			
I	déchets stockés par m2 de fond d'alvéole	102,0 t / m2 fond	=A / B
J	émission de lixiviat (0 -100 ans) par an et par t stockée	0,0069 litre / t stockée / an	=D / I
K	fuite lixiviat post-100 ans, par an et par t stockée	0,031 litre / t stockée / an	=E / I
L	émission de lixiviat (0 -100 ans) par an et par t entrant	0,010 litre / t DIS entrant / an	=J / (F + G)
M	fuite lixiviat post-100 ans, par an et par t entrant	0,046 litre / t DIS entrant / an	=K / (F + G)
<u>Emissions par t de déchets stockés</u>			
	exploitation (0 -28 ans)	0,192 litre / t stockée	=J * C
	post-exploite 28-100 ans	0,49 litre / t stockée	=J * (100 -C)
	post_exploite 100-1000 ans	27,81 litre / t stockée	=K * (1000 -100)
	post_exploite 1000-10 000 ans	278,06 litre / t stockée	=K * (10000 -1000)
<u>Emissions par t de déchets entrant</u>			
	exploitation (0 -28 ans)	0,284 litre / t DIS entrant	=L * C
	post-exploite 28-100 ans	0,73 litre / t DIS entrant	=L * (100 -C)
	post_exploite 100-1000 ans	41,26 litre / t DIS entrant	=M * (1000 -100)
	post_exploite 1000-10 000 ans	412,56 litre / t DIS entrant	=M * (10000 -1000)

Tableau 21 - Emissions de lixiviat par tonne de DIS entrant

Données qualitatives

a) Données de base

Les données disponibles sont issues de tests menés au laboratoire permettant d'estimer la Fraction Maximale Mobilisable en polluants (FMM)⁶. Le cadre dans lequel se sont inscrits ces tests ainsi que le protocole expérimental sont précisés en note de fin de page. Ce programme ne couvre que les déchets à stabiliser, avant et après traitement de stabilisation. Aucune mesure n'est donc disponible pour les déchets stables en l'état : c'est pourquoi les données considérées reposent sur les valeurs correspondant aux seuils réglementaires pour l'acceptation des déchets en centre de stockage.

Tableau 22 - Fractions maximales mobilisables dans l'eau des déchets broyés

	C	FMM1	FMM2	REG
	concentration dans le lixiviat	FMM moy. dans le déchet stocké		
		déchet à stabiliser	déchet stabilisé	déchet stable (seuils réglementaires)
	en mg / l	en g / kg de déchet		
Chlorures	29809	73	45	
Sulfates		23	14	
Nitrates	166,1	33	1,05	
Fluorures	1,12	0,207	0,058	
Cyanures libres	0,049	0,00015	0,00015	0,005
Calcium		34	16	
Magnésium		0,12	0,0042	
Sodium		11	19	
Potassium		18	9	
Mercure	0,036	0,0014	0,0000032	0,005
Cadmium	0,064	0,047	0,00051	0,025
Arsenic	0,31	0,0032	0,00071	0,01
Zinc	0,33	0,041	0,013	0,25
Fer		0,0024	0,0011	
Chrome	0,055	0,19	0,0043	0,05
Cr6+	0,028	0,0010	0,0048	0,005
Cuivre	0,12	0,0014	0,0011	
Etain		0,0035	0,0043	
Plomb	0,42	0,030	0,028	0,05
Cobalt		0,0015	0,00030	
Aluminium		0,37	0,49	
Nickel	0,32	0,0023	0,00070	0,05
Manganèse		0,0021	0,00030	
Vanadium		0,00030	0,00030	
Selenium		0,00083	0,00030	
autres métaux	0,88			
Hydrocarbures totaux	34			
phénols	573			
MES	57			
COT	418	9,4	0,34	
DCO	1419			

⁶ Une Procédure d'Évaluation Approfondie (PEA) des procédés de stabilisation a été développée par l'ADEME afin d'évaluer les performances des procédés de stabilisation des DIS ; elle visait notamment à prendre en compte le comportement à long terme de la matrice fabriquée au cours de la stabilisation. Cette procédure a été appliquée à partir de 1996 à 14 déchets d'origines diverses (déchet issu de différents procédés de traitement des fumées d'incinération des ordures ménagères, poussières métalliques, boues issues de traitement d'effluents industriels, ...) réceptionnés sur les entités de traitement de France Déchets, EMTA et Séché Eco-Industrie. Parmi la multitude de tests appliqués, un test visait la définition de la fraction maximum mobilisable par l'eau :

-du déchet avant traitement,

-du déchet traité, plus ou moins mûré (T+28jours, T+6 mois/1an).

Afin de s'affranchir de la barrière physique que constitue la matrice de ciment, les essais ont été menés sur le déchet broyé à 300µm. Le protocole de lixiviation appliqué correspond à une mise en contact pendant 16h de 100g de broyat avec un litre d'eau (soit un ratio L/S massique de 10). Cette opération a été réalisée 3 fois. Les résultats présentés correspondent à la somme des quantités extraites à l'issue des 3 lixiviations. L'ensemble des résultats exprimés en mg extrait/kg de déchet brut ou mg extrait/kg de déchet solidifié a été communiqué par l'ADEME et sont présentés dans le tableau.

NB : la valeur pour le COT (Carbone Organique Total) a été communiquée par Sita (résultats issus de l'analyse des charges totales en COT de 33 déchets). En l'absence de donnée sur la fraction mobilisable, l'hypothèse que la totalité de la charge organique était mobilisée a été prise. Cette hypothèse est majorante car l'expérience révèle une très grande variabilité dans la capacité des liants organiques à « piéger » les polluants organiques.

Au vu des résultats, on constate différentes familles de composés se différenciant par leur comportement :

- 1) des métaux (Hg, As, Cr, Cd,...) pour lesquels le traitement conduit à une forte rétention,
- 2) des métaux pour lesquels le traitement induit une augmentation de la fraction mobilisable. C'est le cas de l'aluminium. Etant un constituant du ciment⁷, il est apporté par le traitement et rendu mobile de par l'étape de broyage préalable à 300µm. Les études ultérieures de sensibilité mettront en évidence qu'une grande partie de l'impact « Métaux dans l'eau » pour les déchets stabilisés est associée à l'aluminium.
- 3) des sels dont le degré de rétention est faible. La stabilisation joue essentiellement un rôle de régulateur du flux en réduisant la porosité et les surfaces d'échange eau-déchet. Le broyage des échantillons préalable à leur lixiviation annule les effets favorables de cette barrière physique.

(cases colorées en jaune : seuil de détection)

⁷ Cement Chemistry, H.F.W Taylor, Academic press, 1990

b) caractérisation de la concentration du lixiviat, selon le type de déchet

Les concentrations relevées pour le lixiviat (colonne C du tableau 22) sont une résultante de l'apport des alvéoles « déchets stables en l'état » et « déchets stabilisés ». Nous proposons ci-après d'estimer la composition du lixiviat associée à chacun des types de déchet à partir des données analytiques disponibles.

Soient pour chaque substance (i) :

C_i : concentration moyenne dans le lixiviat

C_{1i} : concentration dans le lixiviat généré par le déchet stabilisé (DSS)

C_{2i} : concentration dans le lixiviat généré par le déchet stable en l'état (DB)

Il peut être défini pour chaque substance (i) du lixiviat **un taux d'abattement spécifique** (K_i) induit par la stabilisation, comme suit :

$$K_i = (FMM1_i / FMM2_i) / C_{dil}$$

où :

FMM1_i : fraction maximale mobilisable de substance i dans le déchet à stabiliser,

FMM2_i : fraction maximale mobilisable de substance i dans le déchet stabilisé,

C_{dil} : coefficient de dilution du DSS qui est égal au ratio (D+R)/D. Il permet de tenir compte, sur le ratio massique L/S appliqué lors du test de lixiviation, de l'effet de dilution induit par l'ajout au déchet brut, d'eau et de réactifs. C_{dil} = 1,92

avec :

S : t de déchet entrant stable en l'état par t de déchet entrant total

D : t de déchet entrant à stabiliser par t de déchet entrant total

R : t de réactifs+eau par t de déchet entrant total

Le tableau 21 montre qu'une tonne de déchet entrant est constituée de 0,473 tonne de déchets stables en l'état (Tds) et de 0,527 tonne de déchets à stabiliser (Tdss). Le couplage de ces données avec les données du tableau 19 conduit à définir qu'1 t de déchet stocké est composée de :

S = 0,319 tonne de déchets stables (amiante + terre + déchets stables)

D = 0,355 tonne de déchets à stabiliser

R = 0,326 tonne d'eau et de réactifs

Pour un polluant donné, sa concentration dans le lixiviat généré par les déchets stabilisés par comparaison à celle issue des déchets stables en l'état sera d'autant plus faible que le coefficient d'abattement pour ce polluant est élevé ce qui se traduit par :

$$C_{1i} = C_{2i} / K_i$$

Par ailleurs, la concentration du lixiviat en fond de stockage étant la résultante des lixiviats formés par chacun des types de déchet :

$$C_i = Tdss * C_{1i} + Tds * C_{2i} \text{ soit } C_i = Tdss * C_{2i} / K_i + Tds * C_{2i}$$

$$\text{Soit } C_{2i} = C_i / (Tdss + Tds/K_i)$$

Sur ces bases, on obtient les valeurs suivantes pour les paramètres K, C1 et C2 :

	C	K	C1	C2
	concentration dans le lixiviat	coefficient d'abattement	concentration dans le lixiviat (DSS)	concentration dans le lixiviat (Dstable en l'état)
	en mg / l		en mg / l	en mg / l
Chlorures	29809	0,84	32 204,65	27 142,84
Sulfates		0,82	-	-
Nitrates	166,1	16,40	20,04	328,60
Fluorures	1,12	1,87	0,79	1,48
Cyanures libres	0,049	1,00	0,049	0,049
Calcium		1,12	-	-
Magnésium		14,86	-	-
Sodium		0,30	-	-
Potassium		0,98	-	-
Mercuré	0,036	231,40	0,00032	0,075
Cadmium	0,064	48,15	0,0027	0,13
Arsenic	0,31	2,31	0,19	0,44
Zinc	0,33	1,65	0,25	0,41
Fer		1,13	-	-
Chrome	0,055	23,63	0,0047	0,11
Cr6+	0,028	0,11	0,049	0,0056
Cuivre	0,12	0,66	0,15	0,10
Etain		0,43	-	-
Plomb	0,42	0,55	0,53	0,29
Cobalt		2,59	-	-
Aluminium		0,40	-	-
Nickel	0,32	1,70	0,24	0,41
Manganèse		3,56	-	-
Vanadium		1,00	-	-
Selenium		1,43	-	-
autres métaux	0,88	14,36	0,12	1,73
Hydrocarbures totaux	34	14,36	4,58	65,78
phénols	573	14,36	78,21	1 122,82
MES	57	14,36	7,84	112,52
COT	418	14,36	57,13	820,19
DCO	1419	14,36	193,75	2 781,60

Tableau 23 - concentration en polluants du lixiviat, selon le type de déchet stocké

Les cases vides correspondent à des substances pour lesquelles aucune valeur C n'est disponible (concentration dans le lixiviat moyen global).

Les cases sont colorées en grises lorsque les valeurs FMM1 et FMM2 ne sont pas disponibles. Nous avons alors associé aux substances correspondantes (hydrocarbures, phénols, ...) un coefficient d'abattement moyen (moyenne de tous les coefficients d'abattement calculés pour les autres substances).

c) calcul des émissions de polluants

Hypothèses générales

- la concentration du lixiviat est supposée constante dans le temps, pour chaque type de déchet.
Remarque : Cette hypothèse est majorante dans la mesure où l'épuisement de la charge en polluants mobilisables au cours du temps entraînera une décroissance des concentrations (cf. programme Sinitert).
- au cours des 100 premières années de stockage, la qualité des barrières actives en fond comme en couverture ne sera pas remise en cause. De même, au regard des études de

modélisation menées (cf. programme Sitinert), seuls les sels sont susceptibles de passer la barrière argileuse (5 mètres avec une perméabilité de 10^{-9} m/s) avant l'échéance des 100 ans. Les métaux ne traverseront que bien au-delà de cette période.

- au-delà de 100 ans, on considère un scénario pessimiste où l'étanchéité des membranes n'est plus assurée. Seule la barrière argileuse passive influencera les flux et toutes les substances présentes dans le lixiviat sont émises dans le milieu extérieur.

cas des DIS stabilisés

La quantité massique de polluants émis dans le milieu extérieur a été calculée en tenant compte du débit de fuite de lixiviat (cf section correspondante) :

	FMM2		C1		exploitation	post-exploitation				hors frontière
	FMM moy.	déchet stabilisé	concentration dans le lixiviat (DSS)	en mg / l	0-28 ans	28-100 ans	100-1 000 ans	1 000-10 000 ans	> 10 000 ans	
					émissions de lixiviat en litre par t de DIS entrant					
	en g / kg de déchet stocké				0,28	0,73	41,26	412,56		
					émissions (sous argile) en g par t de DIS à stabiliser entrant					
					g / t DIS entrant					
Chlorures	45		32 204,65		17,58	45,36	2 548,73	25 487,27	58882,72	
Sulfates	14		-		5,60	14,46	812,46	8 124,61	18770,12	
Nitrates	1,05		20,04		0,011	0,028	1,59	15,86	1992,91	
Fluorures	0,058		0,79		0,00043	0,0011	0,063	0,63	109,91	
Cyanures libres	0,00015		0,049		0,000027	0,000069	0,0039	0,039	0,24	
Calcium	16		-		6,21	16,03	901,04	9 010,41	20816,56	
Magnésium	0,0042		-		0,0016	0,0042	0,23	2,35	5,42	
Sodium	19		-		7,39	19,06	1 071,18	10 711,79	24747,22	
Potassium	9		-		3,65	9,41	528,80	5 287,99	12216,74	
Mercure	0,0000032		0,00032		0	0	0,000026	0,00026	0,0059	
Cadmium	0,00051		0,0027		0	0	0,00022	0,0022	0,97	
Arsenic	0,00071		0,19		0	0	0,015	0,15	1,21	
Zinc	0,013		0,25		0	0	0,020	0,20	24,67	
Fer	0,0011		-		0	0	0,010	0,10	1,99	
Chrome	0,0043		0,0047		0	0	0,00037	0,0037	8,21	
Cr6+	0,0048		0,049		0	0	0,0039	0,039	9,09	
Cuivre	0,0011		0,15		0	0	0,012	0,12	2,04	
Etain	0,0043		-		0	0	0,037	0,37	7,76	
Plomb	0,028		0,53		0	0	0,042	0,42	53,44	
Cobalt	0,00030		-		0	0	0,0026	0,026	0,55	
Aluminium	0,49		-		0	0	4,24	42,35	887,62	
Nickel	0,00070		0,24		0	0	0,019	0,19	1,14	
Manganèse	0,00030		-		0	0	0,0026	0,026	0,55	
Vanadium	0,00030		-		0	0	0,0026	0,026	0,55	
Selenium	0,00030		-		0	0	0,0026	0,026	0,55	
autres métaux			0,12		0	0	0,010	0,10	0,00	
Hydrocarbures totaux			4,58		0	0	0,36	3,63	0,00	
phénols			78,21		0	0	6,19	61,90	0,00	
MES			7,84		0	0	0,62	6,20	0,00	
COT	0,34		57,13		0	0	4,52	45,21	605,02	
DCO			193,75		0	0	15,33	153,34	0,00	

Tableau 24 - émissions en polluants du lixiviat associé au stockage des DIS stabilisés

Pour chaque substance (i) du tableau ci-dessus, les émissions E_i du polluant « i » dans le milieu extérieur ont été calculées pour chaque période P de la manière suivante (en g par t de DIS entrant) :

$$E_i (P) = Lix_P (\text{litre} / \text{t DIS entrant}) \times C1_i \times Cdil$$

$Cdil$: coefficient de dilution du DSS (valeur : 1,92).

Lix_P : quantité de lixiviat émis sur la période P (ex. : 0,28 l en phase d'exploitation, ...)

$C1_i$: concentration de la substance i dans le lixiviat du déchet stabilisé.

La colonne de droite du tableau indique la quantité de polluant i émis pour la période de temps supérieure à 10 000 ans (hors périmètre de l'étude). La valeur a été calculée de la manière suivante (en g par t de DIS entrant) :

$$E_i (> 10\ 000\ \text{ans}) = \text{FMM}2_i - \sum_{P=0\ \text{à}\ 10\ 000} E_i (P)$$

Traitement des données manquantes (émissions de polluants mobilisables – lignes colorées en bleu dans le tableau ci-dessus) :

Lorsque la concentration du lixiviat en substance i ($C1_i$) n'est pas connue (par exemple pour les sulfates, le calcium, le fer, etc.), nous avons estimé les émissions de i dans le lixiviat à partir de :

- la valeur connue pour la fraction maximale mobilisable de i ($\text{FMM}2_i$),
- la valeur du « **coefficient de relargage** » (en % FMM par période de temps) que l'on peut calculer pour les substances de même nature chimique (c'est-à-dire dont on suppose un comportement proche dans la matrice du déchet).

Ainsi, pour les anions et cations non métalliques par exemple on utilise le coefficient de relargage des chlorures calculé comme suit :

Emissions		Période				
		0-28	28-100	100-1000	1000- 10000	Post 10000
Chlorures	g	17,58	45,36	2548,73	25487,27	58882,72
	% FMM	0,020%	0,052%	2,930%	29,302 %	67,696%

Pour chaque période de temps P , le coefficient de relargage (%FMM) pour la substance de référence (ref, en l'occurrence les chlorures) est calculée en appliquant la formule suivante :

$$\% \text{FMM}_{\text{ref}} (P) = E_{\text{ref}} (P) / (\text{FMM}2_{\text{ref}} \times 1000 \times \text{Cdil})$$

On peut ensuite calculer les émissions de chaque substance « i » (E_i en g par t de DIS entrant) dans le lixiviat pour chaque période de temps P comme suit :

$$E_i (P) = \% \text{FMM}_{\text{ref}} (P) \times \text{FMM}2_i \times 1000 \times \text{Cdil}$$

La méthode ci-dessus a été appliquée :

- aux anions et cations non métalliques, en utilisant le coefficient de relargage des chlorures ;
- aux métaux non renseignés (fer, étain, cobalt, aluminium, manganèse, vanadium et sélénium), en utilisant le coefficient de relargage moyen des métaux renseignés (mercure, cadmium, arsenic, zinc, chrome, CrVI, cuivre plomb, nickel).

cas des DIS stables en l'état

Pour les déchets stables en l'état, aucune mesure de FMM n'a été réalisée. Les seules valeurs disponibles concernent les seuils réglementaires d'admission des déchets stables en entrée de site de stockage (REG dans le tableau ci-dessous).

Lorsqu'il n'existe pas de seuil réglementaire pour un polluant donné potentiellement contenu dans le déchet stable, nous avons affecté à ce polluant la valeur de FMM du déchet brut à stabiliser (FMM1).

Lorsqu'un seuil réglementaire est défini pour un polluant donné, il est toutefois possible que ce seuil soit nettement supérieur à la valeur de FMM mesurée dans le cas du déchet brut avant stabilisation (ex. : cyanures libres). Dans ce cas, pour ne pas pénaliser le déchet stable en l'état par rapport au déchet à stabiliser, nous avons affecté au polluant considéré la plus petite des deux valeurs entre la FMM du déchet brut à stabiliser et le seuil réglementaire.

Pour compléter les données manquantes, nous avons ainsi adopté les conventions suivantes :

- si REG_i est défini alors $FMM3_i = \text{MIN}(FMM1_i ; REG_i)$;
- si REG_i non défini, alors $FMM3_i = FMM1_i$

	FMM1	REG	FMM3
FMM moy. dans le déchet stocké			
	déchet à stabiliser	déchet stable (seuils réglementaires)	déchet stable (corrige)
en g / kg de déchet			
Chlorures	73		73
Sulfates	23		23
Nitrates	33		33
Fluorures	0,207		0,207
Cyanures libres	0,00015	0,005	0,00015
Calcium	34		34
Magnésium	0,12		0,12
Sodium	11		11
Potassium	18		18
Mercuré	0,0014	0,005	0,0014
Cadmium	0,047	0,025	0,025
Arsenic	0,0032	0,01	0,0032
Zinc	0,041	0,25	0,041
Fer	0,0024		0,0024
Chrome	0,19	0,05	0,050
Cr6+	0,0010	0,005	0,0010
Cuivre	0,0014		0,0014
Etain	0,0035		0,0035
Plomb	0,030	0,05	0,030
Cobalt	0,0015		0,0015
Aluminium	0,37		0,37
Nickel	0,0023	0,05	0,0023
Manganèse	0,0021		0,0021
Vanadium	0,00030		0,00030
Selenium	0,00083		0,00083
autres métaux			0
Hydrocarbures totaux			0
phénols			0
MES			0
COT	9,4		9,4
DCO			0

Tableau 25 – Fractions maximales mobilisables pour le déchet stable

Sur ces bases, le calcul de la masse de polluants contenu dans le lixiviat des déchets stables et émis dans le milieu extérieur a été réalisé dans les mêmes conditions que celles décrites ci-

dessus pour les déchets stabilisés (après calcul des coefficients de relargage associés aux déchets stables, selon la méthode susmentionnée).

Note : à la différence des déchets stabilisés, le coefficient de dilution C_{dil} est égal à 1 pour les déchets stables en l'état.

On obtient alors le tableau d'inventaire ci-dessous.

	FMM3		C2		exploitation				
	FMM (hyp) déchet stable (corrigé)	concentration dans le lixiviat (Dstable en l'état)		post-exploitation				hors frontières	
		en g / kg de déchet stocké		en mg / l		0-28 ans	28-100 ans	100-1 000 ans	1 000-10 000 ans
Chlorures	73	27 142,84		7,72	19,93	1 119,80	11 198,02	60964,73	
Sulfates	23	-		2,40	6,19	347,78	3 477,75	18933,72	
Nitrates	33	328,60		0,093	0,24	13,56	135,57	32822,88	
Fluorures	0,21	1,48		0,00042	0,0011	0,061	0,61	206,34	
Cyanures libres	0,00015	0,049		0,000014	0,000036	0,0020	0,020	0,13	
Calcium	34	-		3,62	9,35	525,56	5 255,61	28612,80	
Magnésium	0,12	-		0,013	0,032	1,82	18,18	98,97	
Sodium	11	-		1,17	3,01	169,04	1 690,43	9203,09	
Potassium	18	-		1,86	4,79	269,07	2 690,75	14649,08	
Mercure	0,0014	0,075		0	0	0,0031	0,031	1,40	
Cadmium	0,025	0,13		0	0	0,0054	0,054	24,94	
Arsenic	0,0032	0,44		0	0	0,018	0,18	2,97	
Zinc	0,041	0,41		0	0	0,017	0,17	40,78	
Fer	0,0024	-		0	0	0,0056	0,056	2,30	
Chrome	0,050	0,11		0	0	0,0045	0,045	49,95	
Cr6+	0,0010	0,0056		0	0	0,00023	0,0023	1,04	
Cuivre	0,0014	0,10		0	0	0,0040	0,040	1,39	
Etain	0,0035	-		0	0	0,0084	0,084	3,43	
Plomb	0,030	0,29		0	0	0,012	0,12	29,71	
Cobalt	0,0015	-		0	0	0,0036	0,036	1,45	
Aluminium	0,37	-		0	0	0,89	8,94	365,13	
Nickel	0,0023	0,41		0	0	0,017	0,17	2,12	
Manganèse	0,0021	-		0	0	0,0049	0,049	2,00	
Vanadium	0,00030	-		0	0	0,00072	0,0072	0,29	
Selenium	0,00083	-		0	0	0,0020	0,020	0,80	
autres métaux	0	1,73		0	0	0,071	0,71	0,00	
Hydrocarbures totaux	0	65,78		0	0	2,71	27,14	0,00	
phénols	0	1 122,82		0	0	46,32	463,23	0,00	
MES	0	112,52		0	0	4,64	46,42	0,00	
COT	9,4	820,19		0	0	33,84	338,38	9027,79	
DCO	0	2 781,60		0	0	114,76	1 147,58	0,00	

Tableau 26 - émissions en polluants du lixiviat associé au stockage des DIS stables en l'état

7.11 – UTILISATION DE LA SURFACE AU SOL

Afin d'évaluer la surface au sol utilisée par la stockage des DIS, deux méthodes de calcul sont envisagées ci-dessous.

méthode 1		unité	valeur	variable	formule	
Dimensions zone de stockage	volume d'une zone de stockage	m3 DIS stocké / zone de stockage	388 917	A		
	surface de la zone de stockage	m2 fond + flanc / zone de stockage	12 989	B		
	surface de fond de la zone de stockage	m2 fond / m2 fond+flanc	40%	C		
Tonnage DIS entrants	volume DIS stockés par an	m3 DIS stockés / an	67 465	D		
Volume DIS stockés	tonnage DIS entrants par an	t DIS entrants /an	91 890	E		
Flux de référence	déchets entrants par m2 zone de stockage	t DIS entrants / m2 fond + flanc	40,8	F		$A / (B * D / E)$
	DIS entrants par m2 de fond de zone de stockage	t entrant / m2 fond zone de stockage	102,0	G		F / C
Utilisation surface au sol pour le stockage des DIS		m2 fond zone de stockage / t DIS entrant	0,010			$1 / G$
méthode 2		unité	valeur			
Dimensions	hauteur de stockage des DIS	m	31	H		
	volume de stockage des DIS par m2	m3 / m2 fond zone de stockage	31	I	$1m2 * H$	
Tonnage DIS entrants	volume DIS stockés par an	m3 DIS stockés / an	67 465	D		
Volume DIS stockés	tonnage DIS entrants par an	t DIS entrants /an	91 890	E		
Flux de référence	volume DIS stocké par t DIS entrant	m3 stocké / t DIS entrant	0,73		D / E	
	quantité DIS entrants par m3 occupé	t DIS entrant / m3 occupé en stockage	1,36		E / D	
	DIS entrants par m2 de fond de zone de stockage	t DIS entrant / m2 occupé en stockage	42		$(E / D) * I$	
Utilisation surface au sol pour le stockage des DIS		m2 occupé en stockage / t DIS entrant	0,024		$1 / ((E / D) * I)$	

Note : nous ne tenons pas compte de la surface totale du site de stockage (aire de stockage, voiries, bâtiments) mais seulement de la surface de stockage.

Les deux méthodes aboutissent à des résultats différents mais du même ordre de grandeur. Dans la suite de l'étude, nous utiliserons les résultats obtenus par la première méthode.

8 - RESULTATS

8.1 – BILAN ENVIRONNEMENTAL DU STOCKAGE DES DIS EN CSDU CLASSE 1

Le tableau ci-dessous récapitule les principaux résultats de l'analyse du cycle de vie du stockage des DIS en France (les inventaires sont détaillés en annexe). Le bilan pour l'année 2000 correspond au stockage de **918 890 tonnes de DIS pour les 10 principaux sites en France**.

			Bilan environnemental du stockage des DIS en K1		
			Bilan pour 1 tonne de DIS	Bilan du stockage en K1 en France (2000)	Bilan par habitant et par an
Ressources	Energie primaire	MJ	750	6,89E+08	11
	Matériaux de carrière	kg	164	1,51E+08	2,5
	Epuisement ressources	an-1	0,8	7,77E+05	0,01
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	1,59E+07	0,3
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	1,23E+08	2,1
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	1,18E+08	2,0
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	1,15E+08	1,9
	COVNM dans l'air	g	83	7,66E+07	1,3
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23	2,11E+07	0,4
	Matières organiques dans l'eau	g	501	4,60E+08	8
Sol	Utilisation de la surface au sol	m ²	0,010	9,01E+03	0,0002
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe I	kg	1 479	1,36E+09	23
	Déchets municipaux et industriels (cl II)	kg	11	1,03E+07	0,2
	Déchets inertes (cl .III)	kg	- 27	-2,48E+07	- 0,4
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	5,43E+09	90
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	9	8,20E+06	0,1
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	2,37E+09	40
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	1,80E+05	0,003

Tableau 27 - bilan environnemental du stockage d'1 t de DIS

Note :

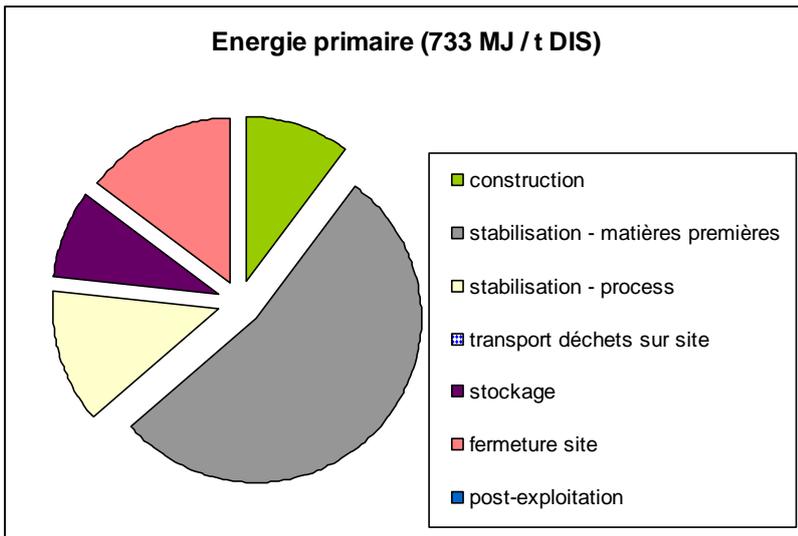
La production de déchets inertes (classe III) est négative (- 27 kg). Cette valeur négative traduit le fait que le stockage des DIS permet d'éviter le stockage de déchets inertes en CET de classe III dans la mesure où ces déchets sont utilisés pour la couverture intermédiaire des casiers de stockage.

8.2 – LES SOURCES D'IMPACTS DE LA FILIERE DE STOCKAGE DES DIS

		Bilan pour 1 tonne de DIS à stocker en K1	construction	stabilisation matières premières	stabilisation process	transport déchets sur site	stockage	fermeture site	post-exploitation
Energie primaire	MJ	750	10%	52%	13%	1%	8%	15%	0%
Matériaux de carrière	kg	164	17%	79%	0%	0%	0%	4%	0%
Epuisement ressources	an-1	0,8	13%	48%	8%	2%	7%	18%	0%
Acidification de l'air	g éq. H+	17	8%	76%	4%	1%	2%	9%	0%
Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	5%	87%	3%	1%	1%	4%	0%
Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	5%	87%	3%	1%	1%	4%	0%
Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	4%	87%	3%	1%	1%	4%	0%
COVNM dans l'air	g	83	20%	28%	10%	3%	7%	32%	0%
Eutrophisation	g éq. PO4	23	0%	1%	0%	0%	0%	0%	98%
Matières organiques dans l'eau	g	501	0%	0%	0%	0%	0%	0%	99%
Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
Déchets ultimes stockés en classe I	kg	1 479	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
Déchets municipaux et industriels (cl II)	kg	11	1%	98%	0%	0%	0%	0%	0%
Déchets inertes (cl .III)	kg	27	0%	-19%	0%	0%	120%	0%	0%
Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	7%	49%	5%	1%	0%	5%	32%
Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	9	4%	71%	3%	1%	0%	3%	18%
Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	8%	51%	5%	1%	0%	5%	29%
Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	2%	86%	1%	0%	0%	1%	8%

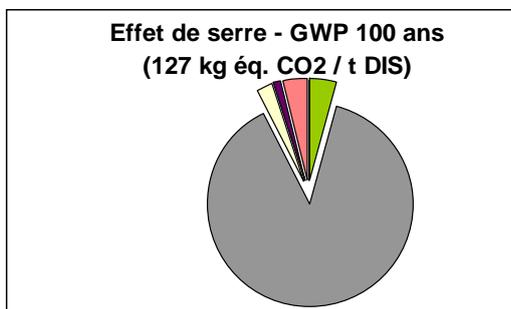
Tableau 28 - sources d'impact environnemental du stockage des DIS

- ▶ **L'étape de fabrication des matières premières utilisées pour la stabilisation** est l'étape prépondérante pour la consommation d'énergie, les rejets dans l'air et les sols, la production de déchets classe II, et le risque toxique.
- ▶ **L'étape de post-exploitation** correspond à la prise en compte des fuites de lixiviat à travers les barrières sur une période de 10 000 ans. L'étape de post-exploitation est l'étape **prépondérante pour les rejets liquides**. Cette étape **contribue de manière significative aux rejets de substances toxiques** ; mais ces rejets sont moindres que ceux associés à l'étape de fabrication des matières premières utilisées pour la stabilisation.
- ▶ **Les étapes de construction (bâtiments, alvéoles ou casiers de stockage) et de fermeture du site (couverture finale) contribuent dans une moindre mesure à certaines catégories d'impact seulement** : consommation de ressources et rejets de composés organiques volatils dans l'air. Ces impacts sont essentiellement dus à la consommation de carburant par les engins du site.
- ▶ **Le procédé de stabilisation** des déchets représente environ 10% de la consommation d'énergie primaire et des rejets de composés organiques volatils dans l'air.
- ▶ L'étape de stockage n'est pas déterminante par rapport aux autres étapes du système, excepté bien sûr pour l'utilisation de la surface au sol et la quantité de déchets stockés.
- ▶ **L'étape de transport des déchets à l'intérieur du site est totalement négligeable** par rapport aux autres étapes.

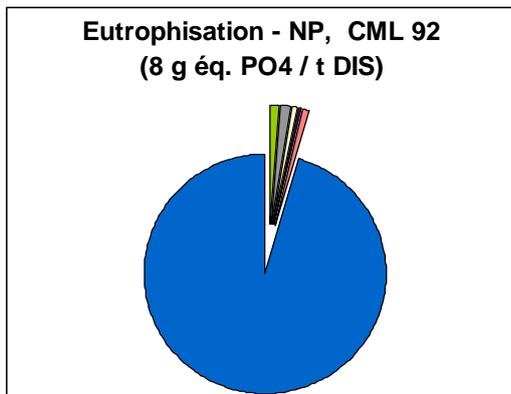


52% de la consommation d'énergie est due à la fabrication des matières premières utilisées lors de la stabilisation des DIS, notamment le ciment.

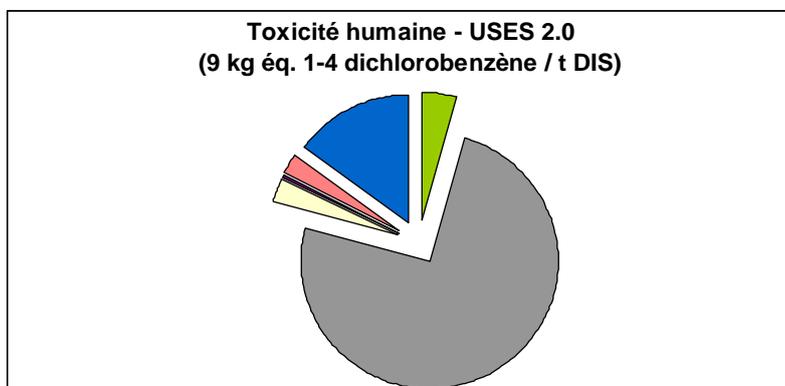
NB : la légende est identique pour chacun des graphiques ci-dessous.



87% de l'impact potentiel sur l'effet de serre est imputable à l'étape de fabrication des matières premières utilisées pour la stabilisation des DIS. La contribution des autres étapes du cycle de vie n'est pas proportionnelle à leur contribution en terme de consommation d'énergie primaire.

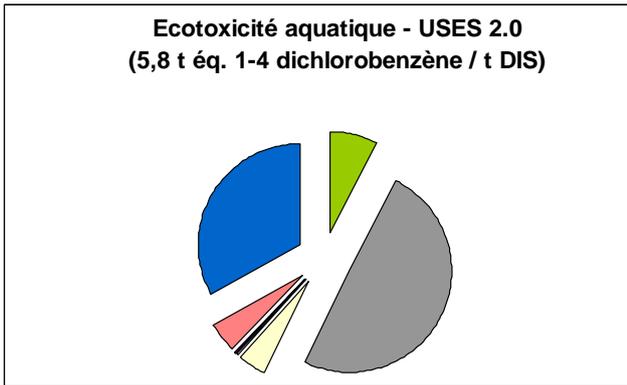


98% du potentiel d'eutrophisation des eaux est imputable à l'étape de post-exploitation (rejets de composés azotés).



Toxicité humaine : 71% de l'impact potentiel est associé à l'étape de fabrication des matières premières utilisées en stabilisation, et 18% à l'étape de post-exploitation. Le risque toxique induit par les matières premières consommées par la stabilisation est généré essentiellement par les rejets atmosphériques d'arsenic, nickel et vanadium (respectivement 41%,

24% et 10% de l'impact potentiel associé à l'étape). En post-exploitation, le potentiel de toxicité humaine est généré majoritairement par les rejets liquides de sélénium et d'arsenic (respectivement 83% et 8% de l'impact potentiel associé à la post-exploitation).



Ecotoxicité aquatique : 49% de l'impact potentiel est associé à l'étape de fabrication des matières premières utilisées en stabilisation, et 32% à l'étape de post-exploitation. Le risque écotoxique induit par les matières premières consommées par la stabilisation est généré essentiellement par les rejets atmosphériques de vanadium et de béryllium (respectivement 60% , et 10% de l'impact potentiel associé à l'étape), et par les rejets liquides de baryum (resp. 10%). En

post-exploitation, le potentiel d'écotoxicité aquatique est généré majoritairement par les rejets liquides de sélénium, nickel, vanadium et cobalt (respectivement 45%, 29%, 15% et 8% de l'impact potentiel associé à la post-exploitation).

Remarque :

Compte tenu de la place importante qu'occupe la fabrication du ciment dans les impacts associés à la filière, une recherche sur la production totale de ciment en France a été menée de façon à relativiser la part utilisée pour l'application du procédé de traitement. La production est estimée par l'Association des cimentiers entre 25 à 30 10^6 tonnes /an. La part totale utilisée pour traiter les déchets est égale 73,5 10^3 tonnes (soit 0,3% de la production).

8.3 – LA DISPERSION DES RESULTATS SELON LES SITES DE STOCKAGE

Les résultats ci-dessous ont été obtenus après avoir calculé l'ACV propre à chacun des 10 sites de stockage. Chaque cercle représente un site donné : la surface est représentative du tonnage stocké en 2000 sur chaque site, en considérant trois classes de sites (petit, moyen, grand). Les graphes couvrent 8 sites (un site n'a pas reçu de DIS en 2000, et les données partielles fournies pour un autre site ne permettent pas son intégration dans l'analyse). **La représentativité des 8 sites analysés est de 76% du tonnage total de DIS stockés en France en 2000.**

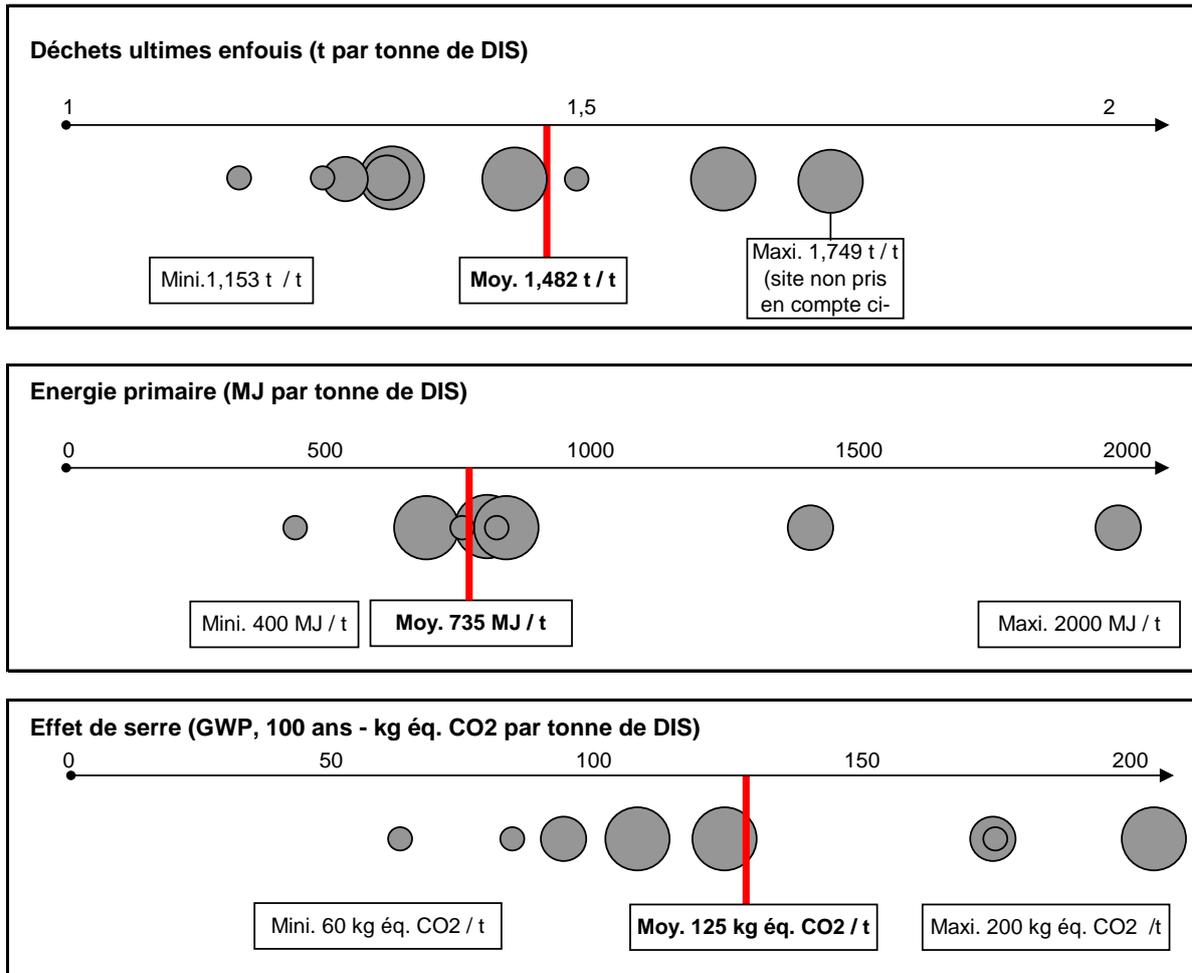


Figure 2 - dispersion des résultats selon les sites de stockage

8.4 – SUR L'AMPLEUR DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

L'objectif de ce chapitre est d'aider le lecteur à juger de l'ampleur des impacts environnementaux associés au stockage des DIS en CSDU classe 1. Pour cela, le bilan environnemental du stockage en CSDU classe 1 est chiffré à l'échelle nationale (i.e. en considérant le tonnage total de DIS stockés en 2000). Ce chiffrage est ensuite confronté aux inventaires de consommations et d'émissions disponibles à l'échelle nationale.

			Bilan comparé à l'ensemble des activités nationales			
		Valeurs de référence pour la France (1998)*	Bilan du stockage des DIS en K1 en France (2000)		en % des impacts nationaux	
Ressources	Energie primaire	MJ / hab. / an	173 511	éq. habitant.an	3 971	0,01%
	Matériaux de carrière	kg / hab. / an				
	Epuisement ressources	an-1 / hab. / an				
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+ / hab. / an	1 726	éq. habitant.an	9 201	0,02%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2 / hab. / an	12 860	éq. habitant.an	9 602	0,02%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2 / hab. / an	10 991	éq. habitant.an	10 704	0,02%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2 / hab. / an	9 418	éq. habitant.an	12 205	0,02%
	COV NM dans l'air	g / hab. / an	37 443	éq. habitant.an	2 045	0,003%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4 / hab. / an	3 359	éq. habitant.an	6 283	0,01%
	Matières organiques dans l'eau	g / hab. / an				
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2 / hab. / an				
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe I	kg / hab. / an				
	Déchets municipaux et industriels (cl II)	kg / hab. / an	1 716	éq. habitant.an	6 027	0,01%
	Déchets inertes (cl .III)	kg / hab. / an				
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene / hab. / an	29 500	éq. habitant.an	184 024	0,31%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene / hab. / an	351	éq. habitant.an	23 408	0,04%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene / hab. / an	14 240	éq. habitant.an	166 545	0,28%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene / hab. / an	8	éq. habitant.an	21 388	0,04%

Tableau 29 - bilan environnemental comparé du stockage des DIS et de l'ensemble des activités nationales en France

Dans le tableau 29, les valeurs de référence pour la France sont issues des inventaires de pollution nationaux (pour le risque toxique, les valeurs sont basées sur des données européennes). En divisant les valeurs du tableau 27 par les valeurs ci-dessus, on obtient les impacts potentiels du stockage des DIS en France exprimés en équivalents habitants nationaux, c'est à dire en nombre d'habitants qui génèrent un impact équivalent sur une période d'un an, du fait de l'ensemble des activités nationales qui leur sont rapportées.

Par exemple, la ligne 1 se lit de la manière suivante : « la consommation d'énergie primaire associée au stockage des DIS en 2000 est équivalente à la consommation d'énergie de 3971 habitants en un an en France » (sachant qu'en moyenne la consommation énergétique nationale totale ramenée à un habitant est de 173 511 MJ par an).

Les résultats ainsi présentés suggèrent que **les impacts potentiels sur l'environnement de la filière de stockage des DIS sont de second ordre** par rapport aux inventaires nationaux : pour tous les indicateurs chiffrés, **la filière de stockage des DIS est responsable de moins de 0,3% de la pollution générée à l'échelle nationale** (moins de 0,02% pour la plupart des indicateurs).

Avertissement important : Dans cette section, le chiffrage du bilan environnemental du stockage en CSDU classe 1 à l'échelle nationale est confronté au bilan environnemental d'autres secteurs d'activité à l'échelle nationale. En l'état actuel des connaissances, les données d'ACV disponibles pour un tel exercice concernent d'une part la production d'électricité, et d'autre part le transport des marchandises par route. Ces confrontations permettent seulement de positionner le stockage en CSDU classe 1 par rapport à ces secteurs d'activité, en termes d'impacts sur l'environnement. Elles ne permettent en aucun cas d'exprimer un jugement sur l'ampleur des impacts, en terme de gravité.

Le tableau ci-dessous permet de confronter le bilan environnemental du stockage des DIS en CSDU classe 1 à celui associé au cycle de vie de l'électricité consommée en France (325 milliards de kWh par an).

			Bilan environnemental du stockage des DIS en K1			Bilan environnemental de la production d'électricité			Stockage DIS / prod. d'électricité
			Bilan pour 1 tonne de DIS	Bilan du stockage en K1 en France (2000)	Bilan par habitant et par an	1 kWh	Bilan consommation d'électricité en France (1 an)	Bilan par habitant et par an	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	6,89E+08	11	11	3,56E+12	62 879	0,02%
	Matériaux de carrière	kg	164	1,51E+08	2,5	0,003	9,83E+08	17	15%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	7,77E+05	0,01	0,004	1,37E+09	24	0,1%
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	1,59E+07	0,3	0,02	6,50E+09	115	0,2%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	1,23E+08	2,1	0,1	4,77E+10	842	0,3%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	1,18E+08	2,0	0,1	4,41E+10	778	0,3%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	1,15E+08	1,9	0,1	4,23E+10	748	0,3%
	COVNM dans l'air	g	83	7,66E+07	1,3	0,07	2,33E+10	411	0,3%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23	2,11E+07	0,4	0,001	3,60E+08	6	6%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	4,60E+08	8	0,005	1,64E+09	29	28%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	9,01E+03	0,0002				
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe I	kg	1 479	1,36E+09	23	0,000009	3,02E+06	0,05	44941%
	Déchets municipaux et industriels (cl II)	kg	11	1,03E+07	0,2	0,002	7,87E+08	14	1,3%
	Déchets inertes (cl III)	kg	- 27	-2,48E+07	- 0,4	0,016	5,08E+09	90	-0,5%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	5,43E+09	90	6	1,84E+12	32 428	0,3%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	9	8,20E+06	0,1	0,01	3,90E+09	69	0,2%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	2,37E+09	40	2	7,24E+11	12 790	0,3%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	1,80E+05	0,003	0,0001	3,99E+07	0,7	0,5%

Tableau 30 - bilan environnemental comparé du stockage des DIS et de la production d'électricité en France

Enjeux environnementaux pour lesquels le stockage des DIS en centre de classe 1 à l'échelle nationale a un impact peu significatif par rapport à la production d'électricité en France :

- consommation d'énergie,
- épuisement des ressources naturelles non renouvelables
- effet de serre,
- pollution de l'air,
- eutrophisation des eaux,
- rejets liquides de métaux,
- dispersion de métaux dans les sols,
- production de déchets classe 2 et classe 3,
- risque toxique et écotoxique.

Enjeux environnementaux pour lesquels le stockage des DIS en centre de classe 1 à l'échelle nationale a un impact significatif (même ordre de grandeur) par rapport à la production d'électricité en France :

- consommation de matériaux de carrière** (la filière française de stockage des DIS en CSDU K1 utilise, sur l'ensemble de son cycle de vie, 2,5 kg de matériaux de carrière par habitant et par an, soit 15% de la consommation associée à la filière française de production d'électricité).
- rejets liquides de matières organiques** (la filière française de stockage des DIS en CSDU K1 génère 28% des rejets associés à la filière de production d'électricité, soit un rejet équivalent à 8 g de matières organiques par habitant et par an).

Enjeux environnementaux pour lesquels le stockage des DIS en centre de classe 1 à l'échelle nationale a un impact supérieur (plus d'un ordre de grandeur) à celui de la production d'électricité en France :

- Aucun.

Le tableau ci-dessous utilise un autre référentiel pour lequel des données d'inventaire de cycle de vie sont disponibles : le bilan environnemental associé au transport des marchandises par route en France (115 milliards de t-km parcourus par an). Le système relatif au transport prend en compte la production de carburant (diesel) et les émissions des camions.

			Bilan environnemental du stockage des DIS en K1			Bilan environnemental du transport des marchandises par route			Stockage DIS / transp. Marchandises
			Bilan pour 1 tonne de DIS	Bilan du stockage en K1 en France (2000)	Bilan par habitant et par an	1 tkm	Bilan du transport des marchandises en France (1 an)	Bilan par habitant et par an	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	6,89E+08	11	1,4	1,56E+11	2 752	0,4%
	Matériaux de carrière	kg	164	1,51E+08	2,5	0,00005	5,17E+06	0,09	2914%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	7,77E+05	0,01	0,002	2,16E+08	4	0,4%
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	1,59E+07	0,3	0,03	3,21E+09	57	0,5%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	1,23E+08	2,1	0,1	1,35E+10	239	0,9%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	1,18E+08	2,0	0,1	1,28E+10	227	0,9%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	1,15E+08	1,9	0,1	1,23E+10	217	0,9%
	COVNM dans l'air	g	83	7,66E+07	1,3	0,4	4,14E+10	731	0,2%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23	2,11E+07	0,4	0,002	2,27E+08	4	9%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	4,60E+08	8	0,05	5,51E+09	97	8%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	9,01E+03	0,0002				
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe I	kg	1 479	1,36E+09	23	0,00003	3,56E+06	0,06	38139%
	Déchets municipaux et industriels (cl II)	kg	11	1,03E+07	0,2	0,00003	3,18E+06	0,06	325%
	Déchets inertes (cl III)	kg	- 27	-2,48E+07	- 0,4	0,000	7,83E+06	0,1	-317%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq. 1-4-dichlorobenzene	5 908	5,43E+09	90	11	1,22E+12	21 623	0,4%
	Toxicité humaine	kg eq. 1-4-dichlorobenzene	9	8,20E+06	0,1	0,008	9,61E+08	17	0,9%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq. 1-4-dichlorobenzene	2 581	2,37E+09	40	5	5,78E+11	10 211	0,4%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq. 1-4-dichlorobenzene	0,20	1,80E+05	0,003	0,00009	1,02E+07	0,2	2%

Tableau 31 - bilan environnemental comparé du stockage des DIS et du transport de marchandises par route en France

- ▶ A l'échelle nationale, les émissions dans l'eau associées au cycle de vie du stockage des DIS sont 10 fois plus faibles que celles associées au cycle de vie du transport de marchandises par route en France (dans ce cas, les rejets liquides sont dus à l'étape de production du carburant).
- ▶ Le risque toxique associé à la filière de stockage des DIS apparaît 50 à 250 plus faible que celui généré par le transport par route des marchandises, en considérant l'ensemble des rejets (air, eau, sol).

9 – ANALYSES DE SENSIBILITE ET RECHERCHE DES PARAMETRES INFLUENTS

9.1 – STABILISATION DES DIS

a) Sur le bilan environnemental de la stabilisation des déchets bruts

Dans le scénario de référence, 1 tonne de DIS entrant est composée comme suit :

- déchets stables en l'état : 474 kg (47%)
- déchets à stabiliser : 526 kg (53%)

Les simulations suivantes ont été conçues pour étudier l'incidence environnementale de la stabilisation:

- SIM1 : 1 t entrante de DIS stables en l'état c'est à dire respectant les seuils d'entrée pour le stockage en classe I ; l'étape de stabilisation par liants hydraulique n'est pas requise.
- SIM2 : 1 t entrante de DIS à stabiliser c'est à dire ne respectant pas les seuils d'entrée au stockage en classe I mais stockage en l'état sans traitement (aucun déchet stable en l'état, aucun déchets stabilisés) – il s'agit d'un scénario théorique contraire à la réglementation ;
- SIM3 : 1 t de DIS entrant à stabiliser après stabilisation. La totalité des déchets stockés sont stabilisés par liants hydrauliques, aucun déchet stable en l'état).

Les valeurs obtenues pour le scénario de référence peuvent être retrouvées à partir des résultats rapportés pour les deux simulations susmentionnées :

$$\text{REF} = 0,474 * \text{SIM1} + 0,526 * \text{SIM3}.$$

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			SIM 1			SIM2		SIM 3	
			Référence (moy. nationale, 2000)	Déchets stables en l'état		Déchets bruts sans stabilisation		Déchets stabilisés	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	262	-65%	247	-67%	1 187	58%
	Matériaux de carrière	kg	164	35	-79%	34	-79%	280	71%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,4	-57%	0,3	-63%	1,3	51%
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	3	-81%	3	-82%	30	73%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	13	-90%	12	-91%	243	81%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	13	-90%	12	-91%	232	81%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	12	-90%	11	-91%	226	81%
	COVNM dans l'air	g	83	52	-38%	48	-42%	112	34%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23,0	42	83%	14	-37%	5,8	-75%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	915	83%	915	83%	131	-74%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,010	0%	-	-100%	0,01	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 000	-32%	1 000	-32%	1 911	29%
	Déchets municipaux et industriels (d)	kg	11	0,2	-98%	0,2	-98%	21	88%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	- 27	- 32	19%	- 32	19%	- 22	-17%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	2 494	-58%	2 448	-59%	8 980	52%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	8,9	2,1	-76%	2,1	-77%	15	69%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	1 056	-59%	1 026	-60%	3 953	53%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	0,04	-79%	0,04	-80%	0,34	71%

Tableau 32 - influence de la stabilisation des déchets sur le bilan environnemental du stockage des DIS

- ▶ Déchets stables en l'état versus déchets bruts sans stabilisation : les impacts ne sont pas significativement différents. Ce résultat découle essentiellement des hypothèses majorantes considérées pour caractériser les émissions de lixiviat.
- ▶ **Le bilan environnemental de la stabilisation est contrasté (comparaison SIM3 vs SIM 2), certains impacts potentiels étant améliorés et d'autres dégradés :**
 - Bénéfices environnementaux de la stabilisation : eutrophisation des eaux (rejets de nitrates) et rejets liquides de matières organiques.
 - Préjudices environnementaux de la stabilisation : consommation d'énergie, rejets dans l'air et potentiel toxique.

A propos du potentiel toxique des déchets stabilisés :

En analysant les impacts associés aux émissions de lixiviat dans le milieu extérieur (sans tenir compte des autres sources d'impact), il en ressort que l'effet de la stabilisation dépend de l'horizon temporel retenu pour l'étape de post-exploitation. Ainsi, lorsque cette étape n'est pas limitée dans le temps, le potentiel toxique du lixiviat associé au déchet stabilisé est moindre que celui du déchet brut non stabilisé excepté pour l'indicateur d'écotoxicité terrestre.

Par ailleurs, au regard d'une analyse plus détaillée sur la part de chacun des polluants présents dans le lixiviat, il est constaté que l'aluminium participe pour beaucoup à la charge en métaux rejetée. La surestimation de la charge en aluminium libérée par le déchet stabilisé (FMM2) liée aux conditions expérimentales d'obtention de cette valeur contribue de façon significative sur les rejets de métaux dans l'eau des déchets stabilisés.

Qualité des données et incertitudes :

Les résultats ci-dessus sont à interpréter avec beaucoup de précautions notamment en ce qui concerne le risque toxique car :

a) pour caractériser la composition du lixiviat selon le type de déchets, nous nous sommes fondés sur les données de FMM. Or ces données résultent de mesures sur déchet broyé (300 µm) et non de mesures sur le déchet en place. Autrement dit, le **potentiel polluant du déchet stabilisé est fortement surévalué** du fait que l'on ne tient pas compte de la cinétique réelle de libération des polluants.

b) **les indicateurs de toxicité et d'écotoxicité ne sont pas encore fiabilisés** et font l'objet de nombreux travaux de recherche au niveau international. Nous les avons néanmoins présentés ici afin de disposer de l'état actuel des connaissances, même si cet état reste entaché d'un niveau élevé d'incertitudes.

En dépit des incertitudes susmentionnées, il faut néanmoins noter l'effet bénéfique de la stabilisation sur les rejets liquides de matières organiques et de nitrates.

Remarque importante

Les impacts associés à l'absence de stabilisation (SIM2) nécessiterait d'intégrer à l'analyse les impacts associés :

- au traitement des lixiviats pendant la phase exploitation,
- aux rejets dans le milieu naturel d'effluents traités.

b) Sur l'influence des réactifs utilisés pour la stabilisation

La stabilisation des DIS consomme des matières premières (eau, réactifs) et de l'énergie. Le réactif le plus utilisé est le ciment (80 kg pour les 526 kg de DIS à stabiliser par t de DIS entrant sur le site). Quatre autres types de réactifs sont utilisés à hauteur de 105 kg ; les professionnels du secteur ne souhaitent pas dévoiler leur désignation. Il s'agit :

- de réactifs spécifiques au déchet à traiter utilisés en très petites quantités,
- de sous-produits d'autres secteurs industriels à plus de 90%;

Par convention, nous avons considéré que les impacts associés à ces sous-produits sont nuls. En ce qui concerne les réactifs utilisés en très petites quantités, aucune donnée d'inventaire n'est aujourd'hui disponible dans les bases de données (Boustead, Simapro, Wisard).

Les professionnels envisagent la possibilité d'utiliser comme liant hydraulique un autre produit que le ciment, qui soit un sous-produit des cimenteries. Pour étudier l'influence environnementale d'une telle évolution technique, nous avons effectué une simulation en supprimant les impacts associés à la fabrication du ciment dans le scénario de référence.

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Le ciment utilisé comme réactif est un sous-produit (impact nul)	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	430	-43%
	Matériaux de carrière	kg	164	45	-73%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,6	-32%
Emissions air	Acidification de l'air	g eq. H+	17	4	-76%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	23	-83%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	23	-82%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	22	-83%
	COVNM dans l'air	g	83	61	-26%
Emissions eau	Eutrophisation	g eq. PO4	23,0	22,8	-1%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	499	0%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,010	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (cl.II)	kg	11	1,2	-89%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	27	32	19%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	3 026	-49%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	8,9	2,6	-71%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	1 267	-51%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	0,027	-86%

Tableau 33 - influence des réactifs utilisés pour la stabilisation des DIS, sur le bilan environnemental du stockage des DIS

La fabrication du ciment utilisé comme réactif du procédé de stabilisation est responsable de :

- 44% de la consommation d'énergie dans le scénario de référence
- 77% de l'acidification de l'air dans le scénario de référence,
- 83% du potentiel d'effet de serre et 89% des rejets atmosphériques de métaux dans le scénario de référence,
- 89% des déchets classe II généré dans le scénario de référence,
- 72% du risque toxique pour l'homme dans le scénario de référence.

- ▶ La fabrication du ciment est une source importante d'impact du stockage des DIS en centre de classe 1. **Le remplacement du ciment par des sous-produits industriels constitue une source non négligeable de réduction de l'impact environnemental de la filière dès lors qu'il ne constitue pas une simple dilution qui serait contraire à la réglementation des déchets.**

9.2 – MEMBRANE SYNTHETIQUE ET DEBIT DE FUITE DU LIXIVIAT

Une donnée essentielle pour la conduite de l'ACV et l'évaluation de l'impact des émissions potentielles de lixiviats dans le milieu extérieur au site (interface entre l'argile et la géomembrane) est le débit de fuite au travers de la géomembrane. Aucune donnée sur site n'existe à l'heure actuelle.

Les sites français utilisent des barrières actives ou géomembranes (en PEHD ou PP) pour couvrir le fond et les flancs des alvéoles de stockage, et pour la couverture finale des alvéoles, dans le but de garantir leur étanchéité et d'éviter ainsi les relargage de lixiviat dans l'argile du terrain (barrière géologique de 5m avec une perméabilité de 10^{-9} m/s) puis dans le milieu naturel. Ces géomembranes sont conçues pour diminuer la perméabilité du fond de l'alvéole d'un facteur compris entre 10 et 100. Avec de telles géomembranes, le débit percolant à travers le fond de l'alvéole de stockage (taux de fuite) est estimé entre 0 et 0,7 litres/m²/an pendant la phase d'exploitation.

Pour étudier l'influence des barrières passive et active, les simulations suivantes ont été effectuées :

Scénario	Débit fuite lixiviat en phase d'exploitation	Débit fuite lixiviat en phase de post-exploitation
Référence (avec géomembrane et argile)	0,7 l / m ² / an	3,15 l / m ² / an
Sans géomembrane, argile seule	3,15 l / m ² / an (hypothèse de travail du programme Sitinert)	3,15 l / m ² / an (hypothèse de travail du programme Sitinert)
Sans géomembrane ni argile (scénario théorique)	31,5 l / m ² / an (valeur mini.)	31,5 l / m ² / an (valeur mini.)
Aucune fuite au cours des 100 premières années de stockage	0 l / m ² / an	0 l / m ² / an jusqu'à l'année 100 3,15 l / m ² / an après 100 ans
Scénario théorique (aucune fuite)	0 l / m ² / an	0 l / m ² / an

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Sans géomembrane (fond et couverture) ; argile seule		Sans géomembrane (fond et couverture) ; sans argile		Débit de fuite du lixiviat durant les 100 premières années = 0		Débit de fuite du lixiviat en exploitation et post-exploitation = 0	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	750	0%	750	0%	750	0%	750	0%
	Matériaux de carrière	kg	164	164	0%	164	0%	164	0%	164	0%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,8	0%	0,8	0%	0,8	0%	0,8	0%
Emissions air	Acidification de l'air	g eq. H+	17	17	0%	17	0%	17	0%	17	0%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	134	0%	134	0%	134	0%	134	0%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	128	0%	128	0%	128	0%	128	0%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	125	0%	125	0%	125	0%	125	0%
	COVNM dans l'air	g	83	83	0%	83	0%	83	0%	83	0%
Emissions eau	Eutrophisation	g eq. PO4	23,0	23,0	0%	227	889%	22,9	0%	0,4	-98%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	501	0%	4 945	887%	501	0%	7	-99%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m ²	0,010	0,010	0%	0,010	0%	0,010	0%	0,010	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%	1 479	0%	1 479	0%	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (d)	kg	11	11	0%	11	0%	11	0%	11	0%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	- 27	- 27	0%	- 27	0%	- 27	0%	- 27	0%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzène	5 908	5 908	0%	19 913	237%	5 908	0%	3 990	-32%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzène	8,9	8,9	0%	21	134%	8,9	0%	7,3	-18%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzène	2 581	2 581	0%	7 992	210%	2 581	0%	1 833	-29%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzène	0,20	0,20	0%	0,33	70%	0,20	0%	0,18	-8%

Tableau 34 - influence du débit de fuite du lixiviat sur le bilan environnemental du stockage des DIS

- Les rejets liquides sont fortement influencés par le type de barrière : sans argile, les rejets liquides totaux sont multipliés par un facteur 10 environ.

- **Au cours des 100 premières années de stockage, les fuites de lixiviat au travers des géomembranes n'ont pas d'influence sur le bilan environnemental global (cf colonne 3). En revanche, les rejets liquides du stockage des DIS sont fortement affectés par l'altération probable de l'étanchéité des barrières actives au-delà des 100 premières années de stockage (cf colonne 5).**

La barrière passive constituée par les 5 m d'argile à 10^{-9} m/s joue dans tous les cas un rôle prépondérant dans la réduction des impacts associés aux rejets liquides.

9.3 – FABRICATION DES MATERIAUX SYNTHETIQUES UTILISES POUR LA CONSTRUCTION, L'EXPLOITATION ET LA FERMETURE DES CASIERS DE STOCKAGE

Dans les simulations suivantes, seul l'impact environnemental de la fabrication et du transport des matériaux synthétiques (PEHD, PP, PVC, polyester) est pris en compte. L'influence sur le relargage du flux polluant dans le milieu naturel a été étudiée dans un chapitre précédent (cf membrane synthétique et débit de fuite du lixiviat).

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Pas de matériaux synthétiques (PEHD, PP, PVC, polyester)		Matériaux synthétiques = réf. x 2 (masse)	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	638	-15%	861	15%
	Matériaux de carrière	kg	164	164	0%	164	0%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,7	-19%	1,0	19%
Emissions air	Acidification de l'air	g eq. H+	17	16	-6%	18	6%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	131	-2%	138	2%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	125	-3%	131	3%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	122	-3%	128	3%
	COV NM dans l'air	g	83	59	-29%	107	29%
Emissions eau	Eutrophisation	g eq. PO4	23,0	22,9	0%	23,0	0%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	501	0%	501	0%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,010	0%	0,010	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (cl.II)	kg	11	11	-1%	11	1%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	27	27	0%	27	0%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	5 900	0%	5 916	0%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	8,9	8,9	0%	8,9	0%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	2 577	0%	2 585	0%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	0,20	0%	0,20	0%

Tableau 35 - influence de la production des géomembranes sur le bilan environnemental du stockage des DIS

- Les matériaux synthétiques utilisés pour la couverture des alvéoles de stockage contribuent à 15% de la consommation d'énergie associée au stockage des DIS, et à 29% des émissions atmosphériques de composés organiques volatils non méthaniques (COV NM). Les autres catégories d'impact sur l'environnement ne sont pas significativement influencées par la fabrication et le transport de ces matériaux.

9.4 – DUREE DE LA PHASE D’EXPLOITATION DU SITE DE STOCKAGE

La durée d’exploitation du site de stockage moyen français est de 28 ans (mini. 15 ans, maxi : 35 ans). Ce paramètre peut exercer une influence sur les résultats de l’ACV à deux niveaux essentiellement :

- a) les impacts associés à la construction du site (bâtiments, labo ...) sont d’autant plus faibles que la durée d’exploitation est longue (principe d’amortissement des impacts sur la durée de vie des équipements et installations) ;
- b) en phase d’exploitation, les émissions vers le milieu extérieur sont d’autant plus importantes que la durée d’exploitation est grande.

L’influence de ce paramètre a été évaluée en effectuant les deux simulations suivantes :

- durée d’exploitation du site : 35 ans (vs 28 ans dans le scénario de référence)
- durée d’exploitation du site : 60 ans (vs 28 ans).

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Durée d'exploitation : 35 ans (vs 28)		Durée d'exploitation : 60 ans (vs 28)	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	748	0%	744	-1%
	Matériaux de carrière	kg	164	164	0%	163	0%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,8	0%	0,8	-1%
Emissions air	Acidification de l'air	g eq. H+	17	17	0%	17	0%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	134	0%	134	0%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	128	0%	128	0%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	125	0%	125	0%
	COVNM dans l'air	g	83	83	0%	83	0%
Emissions eau	Eutrophisation	g eq. PO4	23,0	23,0	0%	23,0	0%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	501	0%	501	0%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,010	0%	0,010	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (cl.II)	kg	11	11	0%	11	0%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	- 27	- 27	0%	- 27	0%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzène	5 908	5 902	0%	5 892	0%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzène	8,9	8,9	0%	8,9	0%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzène	2 581	2 578	0%	2 573	0%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzène	0,20	0,20	0%	0,20	0%

Tableau 36 - influence de la durée de la phase d'exploitation sur le bilan environnemental du stockage des DIS

- **La durée d’exploitation du site n’a aucune influence significative sur le bilan environnemental du stockage des DIS.**

9.5 – TRANSPORT DES DECHETS SUR LE SITE

Afin d'évaluer l'importance des impacts générés par le transport des déchets sur le site de stockage, les simulations suivantes ont été effectuées en considérant une augmentation de la distance de transport des déchets sur site d'1 ordre de grandeur par rapport à la situation moyenne actuelle en France.

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Transport déchets sur site = distance x 10	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	837	12%
	Matériaux de carrière	kg	164	164	0%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	1,0	14%
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	19	10%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	142	6%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	135	6%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	132	6%
	COVNM dans l'air	g	83	107	28%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23,0	23,1	1%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	504	1%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,010	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (cl.II)	kg	11	11	0%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	- 27	- 27	0%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq.1-4-dichlorobenzene	5 908	6 596	12%
	Toxicité humaine	kg eq.1-4-dichlorobenzene	8,9	9,5	6%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq.1-4-dichlorobenzene	2 581	2 906	13%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq.1-4-dichlorobenzene	0,20	0,20	3%

Tableau 37 - influence du transport des déchets sur le site de stockage

Une augmentation d'un facteur 10 des distances de transport sur le site de stockage s'accompagne d'un accroissement de 12% de la consommation énergétique et de 6% du potentiel d'effet de serre associé au stockage des DIS.

- **Le transport des déchets sur le site n'est pas un enjeu environnemental important par rapport aux impacts générés sur l'ensemble du cycle de vie du stockage des DIS.**

9.6 – TOPOGRAPHIE DU SITE DE STOCKAGE

La topographie de chaque site de stockage est spécifique et on peut distinguer deux cas de figure :

- le cas d'un site de type « fosse » où les alvéoles sont conçues après excavation d'une grande quantité de matériaux (argile, terre, matériaux de carrière) ;
- le cas d'un site type « dôme » où la typologie du terrain permet d'exploiter directement les reliefs naturels sans avoir à creuser profondément dans le sol.

Les simulations suivantes ont été effectuées en ajustant les valeurs du module « construction des alvéoles de stockage » (cf tableau page 9). Pour cela, nous avons considéré dans chaque cas les valeurs propres d'un site typique donné (type dôme : site n°6 ayant stocké 39 760 t de DIS en 2000 ; type fosse : site n°5 ayant stocké 170 000 t de DIS en 2000). Il n'est pas possible de reconstituer le scénario de référence à partir des deux simulations effectuées.

Bilan pour 1 tonne de DIS entrant			Référence (moy. nationale, 2000)	Site type dôme		Site type fosse	
Ressources	Energie primaire	MJ	750	707	-6%	761	1%
	Matériaux de carrière	kg	164	224	37%	139	-15%
	Epuisement ressources	an-1	0,8	0,8	-7%	0,9	2%
Emissions air	Acidification de l'air	g éq. H+	17	16	-5%	17	1%
	Effet de serre (direct, 20 ans)	kg eq. CO2	134	131	-2%	135	0%
	Effet de serre (direct, 100 ans)	kg eq. CO2	128	125	-2%	128	0%
	Effet de serre (direct, 500 ans)	kg eq. CO2	125	122	-2%	125	0%
	COVNM dans l'air	g	83	73	-13%	86	3%
Emissions eau	Eutrophisation	g éq. PO4	23,0	22,9	0%	23,0	0%
	Matières organiques dans l'eau	g	501	500	0%	501	0%
Sol	Utilisation de la surface au sol	m2	0,010	0,01	0%	0,01	0%
Déchets	Déchets ultimes stockés en classe	kg	1 479	1 479	0%	1 479	0%
	Déchets municipaux et industriels (cl.I)	kg	11	11	0%	11	-1%
	Déchets inertes (cl.III)	kg	- 27	- 27	0%	- 27	0%
Risque toxique	Ecotoxicité aquatique	kg eq. 1-4-dichlorobenzène	5 908	5 610	-5%	5 953	1%
	Toxicité humaine	kg eq. 1-4-dichlorobenzène	8,9	8,7	-3%	8,9	0%
	Ecotoxicité sédimentaire	kg eq. 1-4-dichlorobenzène	2 581	2 440	-5%	2 602	1%
	Ecotoxicité terrestre	kg eq. 1-4-dichlorobenzène	0,20	0,19	-1%	0,20	0%

Tableau 38 - influence de la topographie du site sur le bilan environnemental du stockage des DIS

- La topographie du site n'exerce pas une influence significative sur le bilan environnemental du stockage des DIS.

10 – CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement associés au stockage des DIS ultimes dans des sites conformes à la réglementation en vigueur en France. Les dix principaux sites recevant la majeure partie du tonnage ont participé à cette étude.

L'étude est fondée sur la méthodologie de **l'analyse de cycle de vie** qui a été appliquée conformément aux normes internationales (ISO 14040 à 14043), et validée par un expert indépendant dans le cadre d'un processus de revue critique. Il découle de ce choix méthodologique que les aspects non liés aux flux de matières et d'énergies (bruit, gênes de voisinage, atteinte à l'esthétique du paysage, odeurs, animaux, ...) n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

Principaux résultats

Les résultats de cette étude suggèrent que **les impacts potentiels sur l'environnement de la filière de stockage des DIS sont de second ordre** : pour tous les indicateurs chiffrés, la filière de stockage des DIS est responsable de moins de 0,3% de la pollution générée à l'échelle nationale (moins de 0,02% pour la plupart des indicateurs).

Ces résultats sont représentatifs de la situation moyenne actuelle en France.

Hypothèses clés et limites de l'étude

Les résultats obtenus sont basés sur un certain nombre d'hypothèses clés qui définissent les principales limites de l'étude :

- a) Les émissions dans le milieu extérieur sont comptabilisées à partir du moment où elles quittent la technosphère, c'est-à-dire lorsqu'elles apparaissent **en dessous des 5 mètres d'argile du système de stockage**.
- b) Les émissions dans l'environnement notamment de lixiviat ont été modélisées sur une période allant jusqu'à **10 000 ans après ouverture du site** de stockage.
- c) **Taux d'émission de lixiviat** : nous avons considéré la valeur de débit de fuite de 7 m³/ha/an pour estimer la charge maximale en polluants libérés en sortie de formation argileuse au cours des 100 premières années de stockage. Au-delà, le débit de fuite considéré a été de 31,5 m³/ha/an, afin de tenir compte du vieillissement potentiel des géomembranes en fond et en couverture du stockage.
- d) **Composition des rejets liquides et modélisation des émissions à long terme** : la concentration en polluants du lixiviat émis en phase de post-exploitation n'est pas une donnée facile à caractériser (absence de mesures sur l'horizon de temps étudié). Une méthode a été mise au point dans le cadre de cette étude pour décrire la composition massique du lixiviat produit. Cette méthode est encore très imparfaite et des pistes d'amélioration ont été proposées au cours du processus de revue critique.
- e) **Allocation des émissions de lixiviat selon le type de déchet entrant** (stable en l'état versus stabilisé) : un modèle a été mis au point dans le cadre de cette étude, en utilisant des données issues de tests menés au laboratoire permettant d'estimer la Fraction Maximale Mobilisable en polluants selon différents types de déchets. Ce programme ne couvre que les déchets à stabiliser, avant et après traitement de stabilisation. Aucune mesure n'est donc disponible pour les déchets stables en l'état.

Ces hypothèses sont susceptibles de varier **selon l'évolution de l'état des connaissances**.

Analyse de l'influence de paramètres importants

Cette étude a aussi cherché à évaluer l'**influence de la stabilisation** des déchets sur le bilan environnemental du stockage des DIS. En se basant sur des hypothèses théoriques entachées d'un niveau élevé d'incertitudes, il en ressort que le bilan environnemental de la stabilisation (par rapport au stockage des déchets bruts sans stabilisation) est contrasté : certains impacts potentiels étant améliorés (eutrophisation des eaux, rejets liquides de matières organiques) et d'autres dégradés (consommation d'énergie, effet de serre, pollution de l'air). Toutefois, il n'a pas été possible, dans le cadre de ce travail, de tenir compte du procédé de traitement des lixiviats qu'il aurait fallu mettre en œuvre pour réduire le potentiel polluant des émissions liquides dans le milieu extérieur (ce qui conduit à surévaluer les impacts de la stabilisation). D'autre part, les incertitudes liées à la méthode de modélisation des émissions à long terme restent difficiles à chiffrer.

L'influence d'autres paramètres a été étudiée. Les principaux enseignements qui en découlent sont les suivants :

- La situation moyenne recouvre en réalité de **fortes disparités selon les sites** de stockage : le bilan environnemental des différents sites est généralement compris entre -50% et +100% de la valeur représentative de la moyenne nationale ;
- L'étape de **fabrication des matières premières utilisées pour la stabilisation** est l'étape prépondérante pour toutes les catégories d'impact sauf les rejets liquides : le remplacement du ciment par des sous-produits industriels constitue une source de progrès à explorer.
- L'étape de post-exploitation est prépondérante pour les rejets liquides. Ces rejets sont fortement influencés par le type de barrière utilisée au niveau de la zone de stockage. **La barrière passive constituée par les 5 m d'argile à 10^{-9} m/s joue dans tous les cas un rôle prépondérant dans la réduction des impacts associés aux rejets liquides.**
- La durée d'exploitation du site, le transport des déchets sur le site, le transport des déchets jusqu'au site de stockage, ainsi que la topographie du site : aucun de ces paramètres n'influence significativement le bilan environnemental de la filière.

Perspectives et pistes de réflexion

Compte tenu des limites de l'étude indiquées plus haut, les pistes de travail suivantes ont été proposées à la suite de la revue critique.

a) amélioration de la modélisation des émissions à long terme :

Il pourrait être envisagé de faire une modélisation plus fine en matière de cinétique des émissions. Par exemple, il paraît possible de chercher à caractériser la vitesse de lixiviation des polluants, en partant des données séparées des 3 essais de lixiviation (note 6 page 27).

- Si la principale fraction d'un polluant est dans le premier lixiviat, qu'il y en a peu dans le deuxième et pas du tout dans le troisième, le polluant est très mobilisable et sera émis relativement rapidement et vraisemblablement entièrement.
- Si le polluant se retrouve à concentration constante dans les 3 essais, c'est qu'il n'est libéré que très lentement. Dans ce cas, il est probable qu'il n'y aura pas d'impact en raison de l'effet de dilution.

b) prise en compte des caractéristiques spécifiques de chaque polluant du lixiviat

Sur une échelle infinie, la décharge a un effet de rétention/dilution des polluants, pas de stockage définitif. L'évaluation devrait tenir compte de l'existence ou non d'un niveau background ("naturel") et d'un « no-effect level ». Autrement dit, l'évaluation doit être spécifique à chaque polluant :

- Si, malgré les émissions de la décharge, les concentrations restent en dessous du seuil sans effet ou si ce n'est pas le cas mais que le flux est négligeable par rapport au background level, il n'y a aucun intérêt à stabiliser de façon définitive certains polluants et l'effet de dilution de la décharge est suffisant pour considérer qu'il n'y a aucun effet notable.
- Si ce n'est pas le cas (les concentrations sont au-dessus du no-effect level ET l'apport est non négligeable par rapport à la concentration naturelle), il y a un effet non désirable lié aux émissions de la décharge.

c) prise en compte de la notion d'émissions « éco-compatibles »

Le choix d'une durée de référence de 10 000 ans est arbitraire. Il y a des émissions sur une durée infinie et c'est donc logiquement un temps infini qui devrait être pris prioritairement comme référence.

Mais ceci implique évidemment que tout polluant contenu dans le déchet stocké sera émis. Or il arrivera un moment où cette émission sera si faible qu'elle n'aura aucun effet. Il faut évidemment en tenir compte, soit au niveau de l'inventaire, soit au niveau de l'interprétation. C'est pourquoi il pourrait être intéressant de modéliser sur un temps infini mais où seules les émissions non éco-compatibles seraient prises en compte dans l'inventaire⁸. Il reste à définir ce qu'est une émission non éco-compatible.

Ceci pourrait se faire sur base d'une modélisation conservatrice des écoulements hydrogéologiques et des seuils de potabilité. Une modélisation simple pourrait être de :

- calculer la concentration du polluant à la sortie de la décharge (sur base des essais cités page 27),
- déterminer un coefficient de dilution conservateur (qui pourrait plus tard être affiné en fonction de la distance entre le point d'émission et le point de captage le plus proche et éventuellement du type de sol) ; il faut se procurer ce coefficient de dilution auprès de spécialistes en hydrogéologie (sur base d'une distance minimum entre le point d'émission et le point de captage le plus proche),
- appliquer ce coefficient de dilution (qui pourrait plus tard être affiné et être spécifique à chaque décharge) pour calculer la concentration en polluant au point de captage,
- de comparer cette concentration aux normes de potabilité.

Cette méthode imparfaite permettrait de justifier une durée de référence spécifique à chaque polluant. Elle permettrait au moins de tirer quelques ordres de grandeur.

⁸ les émissions éco-compatibles pourraient également être citées dans l'inventaire en tant que telles.

Annexe :
Indicateurs d'impact sur l'environnement

1. L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES NON RENOUVELABLES

L'homme épuise une ressource lorsque les réserves accessibles sont limitées. Plusieurs types de réserves existent : réserves géologique, économique, marginale, ultime. La quantité de ressources économiquement exploitable maintenant et dans le futur est égale aux réserves économique et marginale rassemblées. Les valeurs de ces réserves proviennent du Bureau des Mines américain pour les ressources minérales et du Conseil Mondial de l'Énergie (WEC) pour les combustibles fossiles.

Dans l'inventaire de cycle de vie, sont comptabilisées les masses des éléments (Uranium, Fer, ...) pour les minerais extraits et les masses totales pour les combustibles fossiles.

L'indice d'épuisement des ressources non renouvelables est égal à la somme des masses des ressources extraites pondérées par un coefficient qui traduit leur plus ou moins grande rareté. Il n'existe pas une méthode unique pour calculer ces coefficients mais plusieurs traduisant plus ou moins bien les différentes dimensions du concept de « rareté ».

Le premier type de coefficient est égal à **l'inverse de la réserve (1/r)**. Inconvénient : La consommation de 100 kg d'une ressource dont la réserve est de 1000 kg et dont la consommation mondiale est de 100 kg par an aura la même contribution à l'épuisement des ressources que la consommation d'une ressource dont la réserve est aussi de 1000 kg mais dont la consommation mondiale est de 1 kg par an.

Le deuxième type de coefficient est égal à **l'inverse du nombre d'années de réserve (1/y)**. Inconvénient : La consommation de 1 kg d'une ressource dont le nombre d'années de réserve est de 100 ans et dont la réserve est de 1000 kg an aura la même contribution à l'épuisement des ressources que la consommation d'une ressource dont le nombre d'années de réserve est aussi de 100 ans et dont la réserve est de 10kg.

Le troisième et dernier type de coefficient est égal à **l'inverse de la multiplication du nombre d'années de réserve par la réserve (1/r*y)**. Il pallie les inconvénients des deux modes de calcul précédents. C'est ce mode de calcul qui a été utilisé dans cette étude.

Ressources	Coefficient de rareté (* 10 ¹⁵) EB(R*Y) Depletion of non renewable resources (yr-1)
(r) Oil (in ground)	0,0557
(r) Natural Gas (in ground)	0,117
(r) Coal (in ground)	0,0005037
(r) Bauxite (Al ₂ O ₃ , ore)	0,108
(r) Copper (Cu, ore)	28,16
(r) Iron (Fe, ore)	0,04
(r) Lead (Pb, ore)	157
(r) Manganese (Mn, ore)	0,296
(r) Nickel (Ni, ore)	59,7
(r) Phosphate Rock (in ground)	0,115
(r) Potassium Chloride (KCl, as K ₂ O, in ground)	0,086
(r) Uranium (U, ore)	181
(r) Zinc (Zn, ore)	40,29
(r) Lignite (in ground)	0,0005037
(r) Barium Sulphate (BaSO ₄ , in ground)	26,91
(r) Chromium (Cr, ore)	0,319
(r) Ilmenite (FeO.TiO ₂ , ore)	5,74
(r) Sulphur (S, in ground)	4,408
(r) Silver (Ag, ore)	92837

Coefficients d'équivalence d'épuisement des ressources non renouvelables en 1/an par kg de ressource consommée

Exemple : pour le cuivre, les réserves mondiales sont estimées à 591,9 Mt, ce qui correspond à 60 années de réserves (à consommation constante). On en tire donc un coefficient de rareté égal à :

$$10^{15} / (\text{réserve en kg} * \text{années de réserve}) = 28,16 \text{ (kg*an)}^{-1}$$

On considère l'argile, la dolomie, le feldspath, le gypse, le kaolin, le calcaire, le sable et de chlorure de sodium comme disponibles en quantité suffisante ; le problème de pénurie ne se pose donc pas pour ces matériaux.

2. SUIVI DES FLUX ENERGETIQUES

Les indicateurs énergétiques ne sont pas à proprement dit des indicateurs d'impact sur l'environnement. Cinq indicateurs énergétiques ont été calculés: énergie totale primaire (énergie consommée), énergie non renouvelable, énergie renouvelable, énergie combustible et énergie matière. (Ces indicateurs sont définis ci-après).

Energie primaire totale : elle représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium et l'énergie hydraulique.

L'énergie primaire est calculée à partir des paramètres suivants :

- le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) pour les carburants fossiles,
- l'énergie gravitationnelle pour l'énergie hydraulique (1,11 MJ d'énergie gravitationnelle équivaut à 1 MJ d'électricité),
- le taux d'irradiation pour le minerai d'uranium (0,72 mg d'uranium enrichi équivaut à 1MJ d'électricité, source Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage).

Les autres sources naturelles d'énergie (vent, soleil, etc...) sont négligeables dans le cadre du projet.

L'énergie primaire totale est divisée en énergie non renouvelable et énergie renouvelable d'une part ; et en énergie combustible et énergie matière d'autre part. L'équation suivante illustre cette définition :

Energie primaire totale	= Energie non renouvelable + Energie renouvelable
	= Energie combustible + Energie matière

Energie non renouvelable : elle inclut toutes les sources d'énergies primaires fossiles et minérales, comme par exemple, le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'énergie nucléaire.

Energie renouvelable : elle inclut toutes les autres sources d'énergies primaires, majoritairement l'énergie hydraulique et la biomasse.

Energie combustible : elle correspond à la part de l'énergie primaire entrant dans le système qui est consommée par les procédés dans le système étudié (par exemple la combustion de gaz naturel).

Energie matière : elle correspond à la part de l'énergie primaire contenue dans les matériaux entrant dans le système non utilisés comme combustibles (par exemple la consommation de gaz naturel entrant dans la composition du produit fabriqué).

3. L'EFFET DE SERRE

On appelle «effet de serre» l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances d'origine anthropique.

3.1. Le phénomène direct

Le rayonnement solaire est réémis par la surface de la terre sous forme de rayonnement infrarouge, qui est lui-même partiellement absorbé par diverses espèces chimiques présentes dans l'atmosphère. Le bilan radiatif détermine la température moyenne de la planète. La présence de substances « à effet de serre » donne une température telle qu'elle permet la vie sur terre (sans cet effet, la température serait de l'ordre de -15°C). Le déséquilibre écologique provient donc non pas de l'existence de cet effet, indispensable à la survie de toute espèce, mais de l'augmentation de celui-ci.

L'unité retenue pour la contribution d'une substance à l'effet de serre est l'équivalent CO_2 en masse. Le GWP (*Global Warming Potential*) d'une substance gazeuse est le potentiel d'effet de serre de l'émission instantanée d'un gramme ou d'un kilogramme de la substance par rapport au CO_2 .

3.2. Les composantes indirectes

A l'effet direct d'absorption des radiations peut s'ajouter un effet indirect.

Le «potentiel d'effet de serre» synthétise en effet d'une part l'action directe d'un gaz décrite ci-dessus, d'autre part son effet indirect à travers la production ou la destruction d'autres gaz à effet de serre, en fonction de son interaction avec les gaz présents dans l'atmosphère.

Les CFC, par exemple, sont des gaz à effet de serre et ont donc un impact direct. D'autre part, ils contribuent à la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, qui est également un gaz à effet de serre. Le bilan de l'action complète des CFC sur le réchauffement de la planète a donc un terme positif (effet direct) et un terme négatif (effet indirect).

De même, d'après l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), l'action indirecte des oxydes d'azote (NO_x) serait double : augmentation de la teneur en ozone de l'atmosphère par création photochimique, d'une part, et donc augmentation de la concentration d'un gaz à effet de serre (composante indirecte positive), d'autre part, augmentation de la teneur en radical libre hydroxyle (OH) très réactif, qui diminue la durée de vie, et donc la concentration, du méthane, des HCFC et HFC qui sont des gaz à effet de serre (composante indirecte négative).

Le méthane qui est un gaz à effet de serre direct a également, selon l'IPCC, un effet indirect sur le réchauffement de la planète. L'effet indirect n'est en revanche pas encore évalué précisément.

Le tableau ci-dessous donne la liste des coefficients d'équivalence pour les gaz à effet de serre direct, selon différents horizons temporels.

De façon plus générale, dans l'état actuel des connaissances, l'IPCC préconise de s'en tenir aux effets directs.

EFFET DIRECT (IPCC 1995, WMO 1998)			
Substance	Equivalent CO_2 20 ans	Equivalent CO_2 100 ans	Equivalent CO_2 500 ans
(a) Carbon Dioxide (CO_2 , fossil)	1	1	1
(a) Methane (CH_4)	64	24	7,5
(a) Nitrous Oxide (N_2O)	330	360	190
(a) CFC 11 (CFCl_3)	6300	4600	1600
(a) CFC 12 (CCl_2F_2)	10200	10600	5200
(a) CFC 13 (CF_3Cl)	10000	14000	16300
(a) CFC 114 ($\text{CF}_2\text{ClCF}_2\text{Cl}$)	7500	9800	8700
(a) HCFC 22 (CHF_2Cl)	5200	1900	590
(a) Halon 1301 (CF_3Br)	7900	6900	2700
(a) Carbon Tetrafluoride (CF_4)	3900	5700	8900

Coefficients d'équivalence d'effet de serre direct en g équivalent CO_2 par g de substance

$$\text{Indicateur} = \sum \text{GWPI} * \text{Mi}$$

Où pour un rejet i , Mi est la masse de gaz relargué (en kg) et GWPI est le potentiel de réchauffement climatique associé à ce rejet.

4. ACIDIFICATION ATMOSPHERIQUE

Il s'agit de l'augmentation de la teneur en substances acides dans la basse atmosphère, à l'origine des «pluies acides» et notamment du dépérissement de certaines forêts. L'unité retenue pour la contribution d'une substance à l'acidification est le *potentiel de libération de H⁺*⁹.

Substance	Potentiel de libération de H ⁺
SO ₂	1/32
NO	1/30
NO ₂	1/46
NH ₃	1/17
HCl	1/36,5
HF	1/20

Coefficients d'équivalence d'acidification en g équivalent H⁺ par g de substance rejetée dans l'atmosphère

HCN et HBr contribuent également à cet effet (coefficients égaux respectivement à 1/27 et 1/81).

Comme cet impact est un phénomène régional, le résultat du calcul global de l'impact d'une filière en termes d'acidification doit être nuancé par la distribution spatiale des émissions de gaz contribuant à cet effet.

$$\text{Indicateur} = \sum \text{APi} * \text{Mi}$$

Où pour un rejet i, Mi est la masse de gaz relargué (en kg) et APi est le potentiel d'acidification (ou potentiel de libération de proton H⁺) associé à ce rejet.

5. REJETS DE METAUX DANS L'AIR

Cet indicateur ne décrit pas un impact direct sur l'environnement, mais il donne une indication sur la quantité de substances métalliques dispersées dans l'environnement : l'exposition des organismes vivants à ces substances peut induire des effets délétères sur la santé.

Ces rejets sont pris en compte dans les indicateurs de risque toxique.

6. REJETS ATMOSPHERIQUES DE COMPOSES ORGANIQUES VOLATILS (COV)

Sous certaines conditions climatiques, les émissions dans l'air de l'industrie et des transports peuvent rester piégées au niveau du sol, où elles réagissent avec les rayons lumineux pour former un brouillard photochimique. Un des composants du brouillard est l'ozone, qui n'est pas émis directement mais qui est produit au cours des interactions entre les composés organiques volatils (C.O.V) et les oxydes d'azote (NO_x). Le mécanisme de production de l'ozone repose au départ sur la photolyse du dioxyde d'azote dans le brouillard.

Globalement ce procédé est contrôlé par le taux de réaction du NO₂ et le ratio NO₂/NO. Plus la réactivité du NO₂ est forte et plus la concentration en NO₂ augmente, plus la concentration en ozone est importante. Cependant, si le NO₂ évolue peu, ces réactions restent à un état stationnaire et peu d'ozone est produit.

Un indicateur de création d'ozone troposphérique POCP a été défini par la commission économique pour l'Europe des Nations Unies en 1991 dans le protocole à la convention de la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance concernant le contrôle des composés organiques volatils pour mesurer l'ozone troposphérique.

Toutefois, l'indicateur POCP est une approximation grossière du phénomène de pollution photochimique.

Actuellement, des travaux sont en cours au niveau national (dans le contexte des travaux ACV de l'Association RECORD, auxquels participe l'ADEME) pour définir des facteurs de caractérisation adéquats permettant de calculer l'indicateur POCP.

⁹ Source : CML, Université de Leiden,

En l'état actuel des connaissances, nous avons préféré calculer la quantité totale de COV rejetés dans l'atmosphère au cours du cycle de vie. Pour cela, les masses de COV non méthane (COV NM) issues de l'inventaire ont tout simplement été sommées en tenant compte des rejets suivants :

COV NM dans l'air (g)	
(a) Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	(a) Halogenated Matter (unspecified)
(a) Acetic Acid (CH ₃ COOH)	(a) Halon 1301 (CF ₃ Br)
(a) Acetone (CH ₃ COCH ₃)	(a) HCFC 22 (CHF ₂ Cl)
(a) Acetylene (C ₂ H ₂)	(a) Heptane (C ₇ H ₁₆)
(a) Alcohol (unspecified)	(a) Hexane (C ₆ H ₁₄)
(a) Aldehyde (unspecified)	(a) Hydrocarbons (except methane)
(a) Alkane (unspecified)	(a) Hydrocarbons (unspecified)
(a) Alkene (unspecified)	(a) Kerosene
(a) Alkyne (unspecified)	(a) Methanol (CH ₃ OH)
(a) AOX (Adsorbable Organic Halogens)	(a) Organic Matter (unspecified)
(a) Aromatic Hydrocarbons (unspecified)	(a) Pentane (C ₅ H ₁₂)
(a) Benzaldehyde (C ₆ H ₅ CHO)	(a) Phenol (C ₆ H ₅ OH)
(a) Benzene (C ₆ H ₆)	(a) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH, unspecified)
(a) Benzo(a)pyrene (C ₂₀ H ₁₂)	(a) Propane (C ₃ H ₈)
(a) Butane (n-C ₄ H ₁₀)	(a) Propionaldehyde (CH ₃ CH ₂ CHO)
(a) Butene (1-CH ₃ CH ₂ CHCH ₂)	(a) Propionic Acid (CH ₃ CH ₂ COOH)
(a) Ethane (C ₂ H ₆)	(a) Propylene (CH ₂ CHCH ₃)
(a) Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	(a) Tars (unspecified)
(a) Ethyl Benzene (C ₆ H ₅ C ₂ H ₅)	(a) Toluene (C ₆ H ₅ CH ₃)
(a) Ethylene (C ₂ H ₄)	(a) VOC (Volatile Organic Compounds)
(a) Halogenated Hydrocarbons (unspecified)	(a) Xylene (C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂)

7. EUTROPHISATION DES EAUX

L'eutrophisation d'un milieu aqueux se caractérise par l'introduction de nutriments, sous la forme de composés azotés et phosphatés par exemple, qui conduit à la prolifération d'algues et par suite dans un premier temps à une forte consommation de CO₂ dissous en présence de lumière (par photosynthèse) et donc à une alcalinisation des eaux, puis dans un second temps à une décomposition bactérienne qui entraîne une diminution de la teneur en oxygène dissous dans l'eau ; ceci peut conduire à la mort de la faune et de la flore du milieu aquatique considéré.

La contribution des rejets au phénomène d'eutrophisation est d'une part déduite de la composition élémentaire moyenne des algues, étant entendu que chaque rejet contribue à la formation d'algues et en supposant que les autres constituants atomiques élémentaires nécessaires à cette formation sont fournis par le milieu naturel, d'autre part de la demande biologique en oxygène d'autres substances, qui induisent également par leur décomposition une réduction du taux d'oxygène dissous (la DBO n'étant pas systématiquement mesurée, on se fonde alors sur la DCO dont la relation moyenne avec la DBO est connue pour certaines substances).

L'unité retenue pour la contribution d'une substance à l'eutrophisation est *l'équivalent phosphate*¹⁰.

Il faut cependant dire que cet effet est abordé de manière nettement moins pertinente par le biais d'un indice global que les autres effets. Il dépend des conditions locales, telles que le débit du cours d'eau dans lequel sont déversées les substances contribuant à l'eutrophisation, la proximité d'autres sources de ces substances, etc...

Substance	Equivalent phosphate
N	0.42
NO	0.20
NO ₂ , NO _x	0.13
NO ₃ ⁻	0.10
NH ₄ ⁺	0.33
P	3.06
DCO	0.022
PO ₄ ³⁻	1

Coefficients d'équivalence d'eutrophisation en g équivalent phosphate (PO₄) par g de substance rejetée dans les eaux

8. AUTRES REJETS LIQUIDES

L'impact potentiel sur l'environnement des rejets liquides quantifiés dans l'inventaire n'est pas bien connu. Un indicateur provenant de l'inventaire du cycle de vie est donc proposé : les rejets totaux de matières organiques.

Quant aux rejets liquides de métaux, ils sont pris en compte dans les indicateurs de risque toxique.

9. INDICATEURS D'IMPACT PROVENANT DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

Ces indicateurs viennent en complément des indicateurs d'impact décrits ci-dessus. Il sont utilisés lorsque l'évaluation des impacts correspondants est actuellement trop peu fiable.

- **Dispersion de métaux dans les sols.** Cet indicateur global groupe toutes les émissions de métaux dans les sols, indépendamment de leur origine et de leur qualité.
- **Production de déchets de classe I.** Cet indicateur prend en compte les quantités de déchets dangereux stockés en décharge de classe I. Il faut noter lors de son utilisation que cet indicateur

¹⁰ Source : CML, Université de Leiden, NL, 1992

traduit non seulement une occupation d'espace en centre de stockage mais aussi un confinement de substances toxiques.

- **Production de déchets de classe II.** Cet indicateur prend en compte les quantités de déchets ménagers et assimilés envoyés en centre de stockage.
- **Production de déchets de classe III.** Cet indicateur prend en compte les quantités de déchets inertes envoyés en centre de stockage.

10. INDICATEURS DE TOXICITE ET D'ECOTOXICITE

Ces indicateurs évaluent l'impact sur l'homme (Human, toxicity) et sur différents écosystèmes (terrestre, sédimentaire, aquatique) dû à des toxiques chimiques.

L'évaluation des catégories d'impact "toxicité et écotoxicité" dans les ACV est aujourd'hui un sujet de débat en Europe.

L'approche utilisée¹¹ est basée sur la méthode USES 2.0 (**European Union System for the Evaluation of Substances**) qui est aujourd'hui considérée comme l'approche la plus aboutie et la plus reconnue au niveau international pour quantifier ce type d'impacts à partir des données d'inventaire de cycle de vie. USES a été développé comme outil d'aide à la décision en matière de politique publique pour la Commission européenne. C'est à la fois une méthode et un outil informatique de quantification du risque toxique et écotoxique.

USES est une méthode de caractérisation du risque toxique des émissions atmosphériques, des rejets liquides et des substances dispersées dans les sols, associés aux activités industrielles. Ce n'est pas une méthode de caractérisation d'un danger précis. USES ne cherche pas à quantifier l'ampleur du dommage subi par une cible donnée, du fait de l'exposition transitoire à un ensemble diversifié de polluants diffus. Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de prédire la réponse des individus à l'exposition répétée tout au long de leur vie, de faibles doses de toxiques.

USES permet de calculer pour chaque émission dans l'environnement, **un indicateur sans dimension** donné par le rapport de deux concentrations : **la concentration prédite dans l'environnement (PEC) sur la concentration prédite sans effet (PNEC)**. Pour une quantité donnée d'émissions, ce rapport donne une indication sur les chances que la modification transitoire de l'état l'environnement ne produise aucun effet sur l'homme et sur les écosystèmes. Lorsque ce rapport est plus petit que 1, plus il tend vers 0 et plus les chances sont grandes que les émissions ne produisent aucun effet. Lorsque le rapport est supérieur à 1, plus il augmente et plus les risques sont grands que les quantités émises provoquent un effet sur les individus, les populations ou les écosystèmes. **La nature réelle et l'ampleur du dommage subi ne sont pas quantifiés. En définitive, le résultat obtenu avec USES exprime le risque "toxique" causé par les émissions.** Ce risque est évalué sur une échelle normalisée en ayant pris comme substance de référence le 1,4 dichlorobenzène. Les résultats expriment donc un risque équivalent à l'émission d'un gramme de cette substance choisie comme référence. Les coefficients affectés à chaque substance de l'inventaire sont présentés dans le tableau ci-dessous :

(a) : rejets dans l'air ; (w) : rejets dans l'eau ; (s) : rejets dans les sols.

Par exemple, pour l'indicateur de toxicité humaine, l'émission dans l'air de 1g d'arsenic conduit à un impact équivalent à celui causé par l'émission de 370 000 g d'1,4 dichlorobenzène. Après avoir converti de la sorte les quantités listées dans l'inventaire de cycle de vie, l'indicateur d'impact est calculé en additionnant les valeurs obtenues pour chaque substance.

¹¹ Cf rapport de l'étude « analyse critique des indicateurs de catégories d'impact sur l'environnement dans les ACV : Toxicité humaine – écotoxicité – pollution photochimique », 31 juillet 2000, contrat RECORD n°99-1004/1A.

Substances	Terrestrial Ecotoxicity	Sediment Ecotoxicity	Aquatic Ecotoxicity	Human Toxicity
(a) Antimony (Sb)	0,61	22000	44000	6200
(a) Arsenic (As)	130	160000	290000	370000
(a) Barium (Ba)	4,9	480000	1000000	710
(a) Beryllium (Be)	1800	150000000	620000000	240000
(a) Cadmium (Cd)	110	810000	1500000	160000
(a) Cobalt (Co)	110	2500000	7200000	19000
(a) Copper (Cu)	29	640000	1200000	4700
(a) Lead (Pb)	9,1	5000	9000	360
(a) Mercury (Hg)	28000	880000	1600000	1200
(a) Molybdenum (Mo)	18	1200000	2600000	4900
(a) Nickel (Ni)	40	2700000	5000000	38000
(a) Selenium (Se)	54	6500000	28000000	43000
(a) Thallium (Tl)	170	17000000	34000000	310000
(a) Tin (Sn)	26	1100	9600	1,2
(a) Vanadium (V)	670	8100000	16000000	6000
(a) Zinc (Zn)	5,8	49000	89000	110
(a) Ammonia (NH3)				1
(a) Hydrogen Sulphide (H2S)				0,77
(a) Hydrogen Chloride (HCl)				2,4
(a) Ethylene (C2H4)	1,3E-12	3,4E-11	1,1E-10	0,69
(a) Formaldehyde (CH2O)	0,94	4,5	2,4	0,91
(a) Benzene (C6H6)	0,000016	0,00054	0,0037	2000
(a) Toluene (C6H5CH3)	0,000016	0,00025	0,00093	0,36
(a) Phenol (C6H5OH)	0,0033	0,63	0,77	0,57
(a) Ethyl Benzene (C6H5C2H5)	0,000014	0,0003	0,0011	1,1
(a) Benzo(a)pyrene (C20H12)	0,24	3400	1800	
(w) Arsenic (As3+, As5+)	8,20E-19	86000	160000	880
(w) Barium (Ba++)	5,10E-19	510000	1100000	570
(w) Cadmium (Cd++)	1,90E-20	170000	290000	23
(w) Chromium (Cr III)	5,80E-21	670	1100	2,1
(w) Chromium (Cr VI)	5,80E-21	2700	1100	3,4
(w) Chromium (Cr III, Cr VI)	5,80E-21	670	4600	2,1
(w) Cobalt (Co I, Co II, Co III)	2,70E-18	2100000	5800000	99
(w) Copper (Cu+, Cu++)	1,80E-20	170000	310000	1,3
(w) Lead (Pb++, Pb4+)	2,90E-22	870	1500	12
(w) Mercury (Hg+, Hg++)	940	170000	280000	250
(w) Molybdenum (Mo II, Mo III, Mo IV, Mo VI)	2,50E-18	1300000	2800000	5000
(w) Nickel (Ni++, Ni3+)	3,60E-19	1600000	3000000	310
(w) Selenium (Se II, Se IV, Se VI)	1,60E-17	7800000	34000000	51000
(w) Tin (Sn++, Sn4+)	1,50E-21	190	1600	0,017
(w) Vanadium (V3+, V5+)	1,10E-17	5700000	11000000	2900
(w) Zinc (Zn++)	1,20E-21	11000	18000	0,57
(w) Formaldehyde (CH2O)	0,0016	140	7,5	0,04
(w) Benzene (C6H6)	0,000014	0,063	0,0059	1900
(w) Toluene (C6H5CH3)	0,000014	0,19	0,0092	0,33
(w) Phenol (C6H5OH)	0,0000025	78	6,2	0,054
(w) Ethyl Benzene (C6H5C2H5)	0,0000012	0,33	0,016	0,9
(w) Methylene Chloride (CH2Cl2, HC-130)	0,0000039	0,0084	0,005	1,8
(w) Chloroform (CHCl3, HC-20)	0,000039	0,025	0,078	12
(w) Trichloroethane (1,1,1-CH3CCl3)	0,00018	0,12	0,44	16
(w) Trichloroethylene (CCl2CHCl)	0,0000046	0,074	0,0069	36
(w) Tetrachloroethylene (C2Cl4)	0,0079	0,64	0,47	5,5
(s) Arsenic (As)	270	44000	81000	490
(s) Cadmium (Cd)	220	86000	150000	90
(s) Cobalt (Co)	220	1000000	2900000	61
(s) Copper (Cu)	60	95000	170000	3,2
(s) Lead (Pb)	18	520	880	180
(s) Mercury (Hg)	56000	130000	220000	200
(s) Nickel (Ni)	82	820000	1500000	160
(s) Zinc (Zn)	12	5400	9400	0,35