

La modélisation des installations de stockage dans Ecoinvent

Ecoinvent se base sur la situation suisse quant à la gestion de la mise en décharge des déchets. Les modèles et les données utilisés dans la modélisation des décharges se trouvent dans le rapport Ecoinvent n°13 [Doka, 2009]. Pour modéliser la mise en décharge des déchets, l'utilisateur d'Ecoinvent dispose de trois modules principaux :

- Les « *inert material landfill* » ;
- Les « *residual material landfill* » ;
- Les « *sanitary landfill* ».

Ces trois décharges sont représentatives du système suisse. Les ICV de ces modules ont pour objectif d'être spécifiques à la nature des déchets, c'est-à-dire que les émissions sont dépendantes de la nature et de la quantité du déchet enfoui. Cependant, ce niveau de détail n'a pu être atteint pour l'ensemble des modules. Il est également important de préciser que chacun de ces modules est associé à un type de déchets : par exemple « *disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill* » permet de modéliser la mise en décharge de déchets d'aluminium dans une installation du type « *sanitary landfill* ».

À noter que l'unité fonctionnelle de tous ces modules est exprimée en kilogramme de déchet. Précisons maintenant la nature des déchets accueillis dans chacune de ces installations.

4.1.1 « *Inert material landfill* »

Les déchets déposés dans cette catégorie de décharges contiennent un faible taux de polluants et sont chimiquement inertes. On retrouve donc des déchets affiliés « roches » ainsi que des matériaux minéraux comme les silicates, les carbonates et les aluminates. Les matériaux de terrassement propres ou faiblement pollués, l'asphalte et les déchets du bâtiment comme le béton, les briques, le verre ou le plâtre sont également acceptés.

4.1.2 « *Residual material landfill* »

Ces sites d'enfouissement accueillent principalement les résidus des incinérateurs municipaux et les déchets dangereux des industries. Ils reçoivent des déchets qui ne sont pas biologiquement et chimiquement réactifs avec l'eau : des cendres issues d'incinérateurs municipaux et des déchets industriels qui respectent les critères d'entrée.

4.1.3 « *Sanitary material landfill* »

Ce type de décharge accueille la plus grande diversité et quantité de déchets dont les détails (nature des déchets et tonnage) sont donnés dans le tableau 41 [Doka, 2009] :

Tableau 41 : Nature et tonnage des déchets accueillis dans les "Sanitary landfill"	
Nature	Tonnage (en t chaque année)
Déchets municipaux	291 681
Déchets de construction combustible	51 567
Boues de traitement de l'eau	9 270
Matériaux d'excavation	271 243
Matériaux d'excavation pollués	69 281
Matériaux inertes	93 047
Déchets de construction inorganiques	14 957
Autres déchets de construction triés	125 395
Déchets de construction non triés	8 564
Résidus d'incinérateurs municipaux	624 582
Déchets dangereux	92 149
Matériau résiduel	63 040
Autres	276 216
Total	1 991 532

Ces sites accueillent autant des déchets inertes, que des résidus d'incinération ou des déchets ménagers. Seuls les déchets liquides, contaminés et radioactifs et les explosifs ne sont pas autorisés. Ces décharges sont donc les plus demandées étant donné leur potentiel d'accueillir un grand nombre de déchets différents.

Il est également possible de trouver un « *residual material landfill* » en tant que compartiment d'un « *sanitary landfill* ». De même, une quatrième catégorie de décharge est mentionnée : « *slag compartments* » qui en réalité ne se trouve pas seule mais est décrite comme un compartiment d'un « *sanitary landfill* » qui accueille des cendres de l'incinération des déchets municipaux.

Ces 3 installations sont-elles comparables au mode de gestion français ?

4.1.4 Lien avec les installations de stockage françaises

Un premier lien relativement évident peut être fait entre les « *inert material landfill* » suisse et les ISDI françaises. En effet, ces deux types de décharges accueillent exclusivement des déchets inertes. Un deuxième lien peut être également mis en avant entre les « *residual material landfill* » suisse et les ISDD qui reçoivent les déchets dangereux ainsi que les résidus d'incinération. Un tel rapprochement n'est cependant pas possible entre les « *sanitary landfill* » et les ISDND. Comme le montre le tableau 41, les « *sanitary landfill* » accueillent à la fois des déchets dangereux, des déchets ménagers et des déchets inertes, ce qui peut être considéré comme un mélange des ISDD, des ISDND et des ISDI.

Les chantiers de démolition génèrent l'ensemble des trois catégories de déchets (inertes, non dangereux et dangereux). Néanmoins, comme nous avons choisi de ne pas prendre en compte le désamiantage dans nos systèmes d'études présentés dans la partie 2.3.1.3 du chapitre 2, nous nous sommes focalisés sur les décharges du type « *sanitary landfill* » et « *inert material landfill* » qui correspondent le plus à nos besoins de modélisation.

4.2 « Inert material landfill »

Dans ce premier type d'installation de stockage, plusieurs natures de déchets ont été modélisées (béton, peinture en émulsion, verre, gypse, plâtre, déchet inerte, résidus de calcaire, laine minérale, carton d'emballage, tuyau de gaz, peinture, enduit plastique, polyuréthane, résidus de production de silicone, acier, zéolithe). On remarque que certains de ses déchets comme le plâtre ou l'acier ne sont pas des déchets inertes. La figure 38 décrit, par exemple, le module de mise en décharge de déchets inertes dans cette catégorie d'installations :

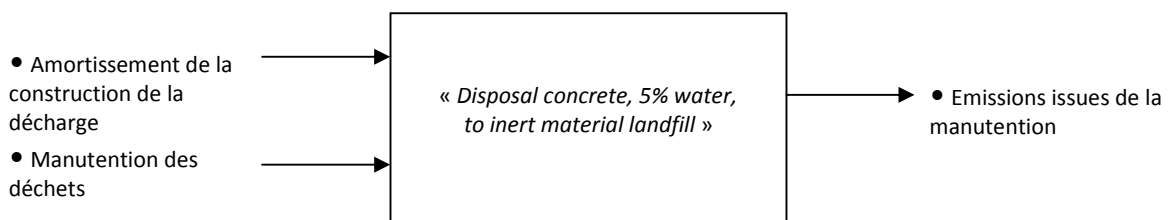


Figure 38 : Description du module "Disposal concrete, 5% water to inert material landfill"

4.2.1 Émissions

On remarque que seuls l'amortissement de l'infrastructure et la manutention des déchets sont intégrés. Cela signifie qu'indépendamment de la nature du déchet, les impacts seront identiques, comme le montre la figure 39 :

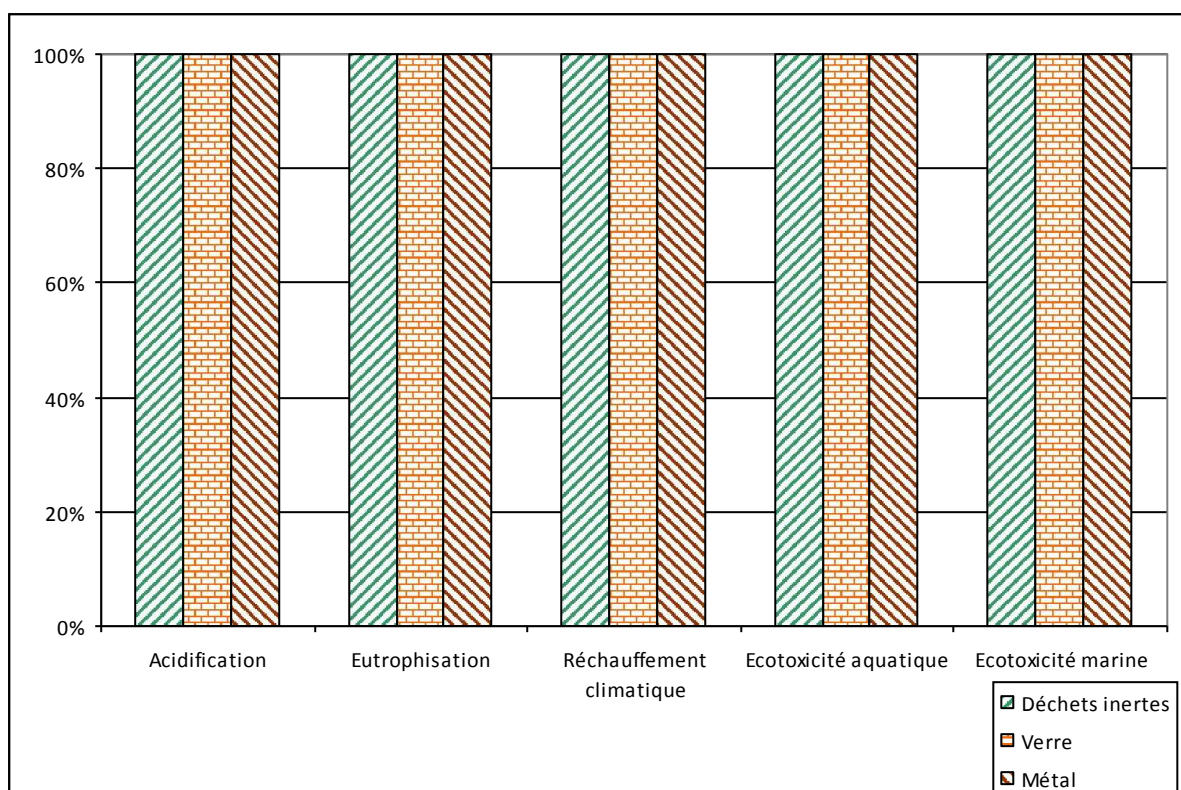


Figure 39: Impacts des déchets inertes, du verre et du métal dans une décharge du type "Inert material landfill"

En effet, nous avons comparé trois modules « *Disposal, inert waste, 5% waste, to inert material landfill* », « *Disposal, glass, 0% water, to inert material landfill* » et « *Disposal, steel, 0% water, to inert material landfill* » qui correspondent à la mise en décharge de déchets inertes, de verre et de métal. Nous avons choisi de ne représenter que 5 catégories d'impacts choisies de manière subjective car nous observons que les impacts sont identiques quel que soit l'indicateur considéré. La quantité de carburant nécessaire à la manutention d'un kg de déchet inerte est la même que celle nécessaire pour un kg de verre ou de métal. De plus, une capacité d'enfouissement de 675 000 t de déchets est considérée ; l'amortissement de l'infrastructure, indépendamment de la nature du déchet, est donc égal à :

$$\frac{1}{675\,000\,000} = 1,48 \cdot 10^{-09} \text{ unités}$$

Une nouvelle fois, quelle que soit la nature du déchet traité, l'amortissement de l'infrastructure sera identique.

L'utilisateur d'Ecoinvent a donc à sa disposition une quinzaine de modules du type « Inert material landfill » identiques. Cette absence d'inventaire des émissions des lixiviats n'est pas cohérente avec les objectifs fixés par Ecoinvent. Un modèle prenant en compte le comportement du déchet selon sa nature aurait dû ou devrait être développé ce qui explique la présence de ces modules donnant des résultats similaires [Doka, 2009].

4.2.2 Infrastructure

Dans cette catégorie de décharges, deux variantes existent : les installations construites avec une membrane étanche et un système de récupération des lixiviats et les installations n'en disposant pas. Comme il n'existe pas de chiffres précis sur cette donnée, Ecoinvent suppose une répartition équitable entre ces deux possibilités, soit une infrastructure moyenne dont la moitié de la surface serait équipée d'une barrière contre la lixiviation.

La décharge est modélisée comme une boîte rectangulaire de profondeur 15 mètres, de surface 30 000 m², soit un volume total de 450 000 m³. En considérant une densité moyenne de 1 500 kg/m³, on obtient une capacité totale de stockage de 675 000 t.

Le système de collecte est constitué des éléments suivants :

- Les flancs et la base recouverts du système d'étanchéité soit 40 400 m² ;
- 2 réseaux de tubes de drainage d'une longueur d'1 km chacun ;
- 4 réservoirs de récupération des lixiviats.

Il est important de noter que dans l'inventaire de l'infrastructure, même si le système de collecte est modélisé, les émissions de lixiviats ne sont pas prises en compte.

Enfin, une route est également construite pour garantir l'accès à la décharge. Elle présente les mêmes caractéristiques que celle du « *sanitary landfill* ». Elle reste cependant en activité seulement 16 ans et ne demande donc pas de rénovation. Après ces 16 ans, la décharge est laissée en l'état et n'est plus surveillée.

Les déchets demandent peu ou pas de compactage, donc la manutention des déchets nécessitent moins de carburant que dans les « *sanitary landfill* ».

En conclusion, l'ensemble des natures de déchets listé en début de paragraphe envoyé en « *inert material landfill* » présentera des impacts identiques quelles que soient les catégories d'impacts étudiées pour une même quantité. Cela n'est pas le cas dans les « *sanitary landfill* » où les impacts varient selon la nature du déchet.

Ce module « *inert material landfill* » ne correspond à la réalité des installations de stockage françaises. Il semble en effet nécessaire d'actualiser les quantités de carburant mises en jeu lors de la manutention des déchets ainsi que la nature et la quantité des matériaux utilisées lors de la construction de l'infrastructure. L'ensemble des différences et des adaptations est décrit dans la partie 4.4.

4.3 Sanitary landfill

Dans cette deuxième catégorie de décharge, 28 types de déchets peuvent être déposés [Doka, 2009] référencés dans le tableau 42 :

Tableau 42 : Nature des déchets enfouis dans les " <i>Sanitary landfill</i> "	
Déchets industriels	Cendre de houille, cendre de lignite, boue de raffinerie, résidu de tour de refroidissement, boue de la production de papier
Emballage	Carton, papier
Plastiques	Mélange de plastiques, polyéthylène téréphtalate, polyéthylène, polypropylène, polystyrène, polyuréthane, PVC
Métaux	Aluminium, étain
Peinture	Peinture, peinture en émulsion
Bois	Bois non traité, mélange de cendres de bois
Revêtement de route	Asphalte, bitume
Plâtre	Plâtre, enduit de plâtre
Autres	Déchet inerte, déchet municipal, journal, papier

La figure 40 présente les principaux flux intégrés dans la modélisation d'une décharge de type « *sanitary landfill* » dans le cas de l'enfouissement de déchets municipaux :

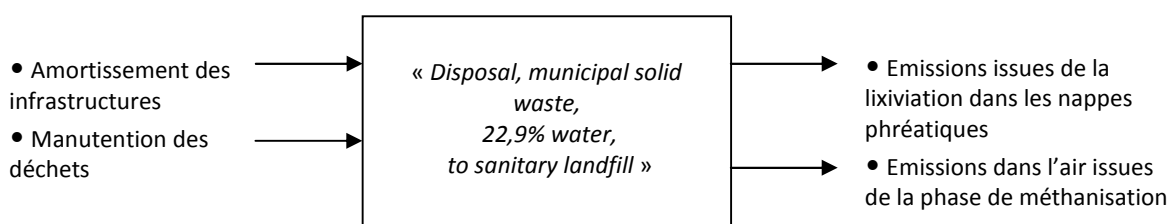


Figure 40 : Description du module "Disposal, municipal solid waste, 22,9% water , to sanitary landfill"

À l'instar des procédés d'« *inert material landfill* », l'amortissement de l'infrastructure et la manutention des déchets sont pris en compte.

4.3.1 Infrastructure

La décharge est modélisée comme une boîte rectangulaire de 20 m de profondeur et de 90 000 m² de surface, soit un volume de 1,8 millions de m³. En considérant une masse volumique de déchets de 1 000 kg/m³, on obtient une capacité totale de 1,8 millions de t [Doka, 2009].

Pour construire une installation, il faut, dans un premier temps, enlever la végétation et dans un deuxième temps dégager le volume nécessaire pour la mise en place des déchets. On estime donc la quantité totale de terre excavée à 990 000 m³ :

- 90 000 m³ issus de la première phase où pour chaque m² on enlève 1 m³ de végétation ;

- 900 000 m³ issus de la deuxième phase. On considère que la moitié de la décharge sera enfouie tandis que l'autre moitié formera une « colline ». L'excavation ne concernera que la moitié du volume de la décharge soit 900 000 m³ (pour un volume total de 1,8 millions de m³).

Ces matériaux excavés, ayant une masse volumique estimée à 1 500 kg/m³ seront alors transportés sur 20 kilomètres par camion [Doka, 2009]. Le recyclage de ces matériaux est en dehors des frontières du système (méthode cut-off).

La base et le flanc, soit 40 400 m², sont ensuite recouverts de la barrière active de protection qui est composée des couches suivantes :

- 80 cm de gravier d'une densité de 1 600 kg/m³
- 7 cm de béton bitumineux (15 % d'enrobés, 85 % gravier) d'une densité de 2 500 kg/m³
- Une membrane de polyéthylène de 0,25 mm d'épaisseur d'une densité de 960 kg/m³

De plus, un besoin en diesel de 0,5 L par m² a été estimé pour la mise en œuvre de ces différentes couches de protection.

Le système de collecte des lixiviats est composé d'un réseau de tuyaux en polyéthylène disposé à intervalles réguliers (tous les 5 m en profondeur) pour récupérer les lixiviats. Ceux-ci sont protégés par un lit de graviers d'une taille 30x30 cm. Le système est complété par 8 réservoirs de collecte aux dimensions rectangulaires de 1x2x3 m ayant une épaisseur de 15 cm. Ce système est relié au réseau de traitement des eaux usées par un tuyau de 3 kilomètres en béton d'un rayon de 25 cm et d'une épaisseur de 5 cm.

La disposition des différents matériaux de protection constituant la barrière active est représentée sur la figure 41 :

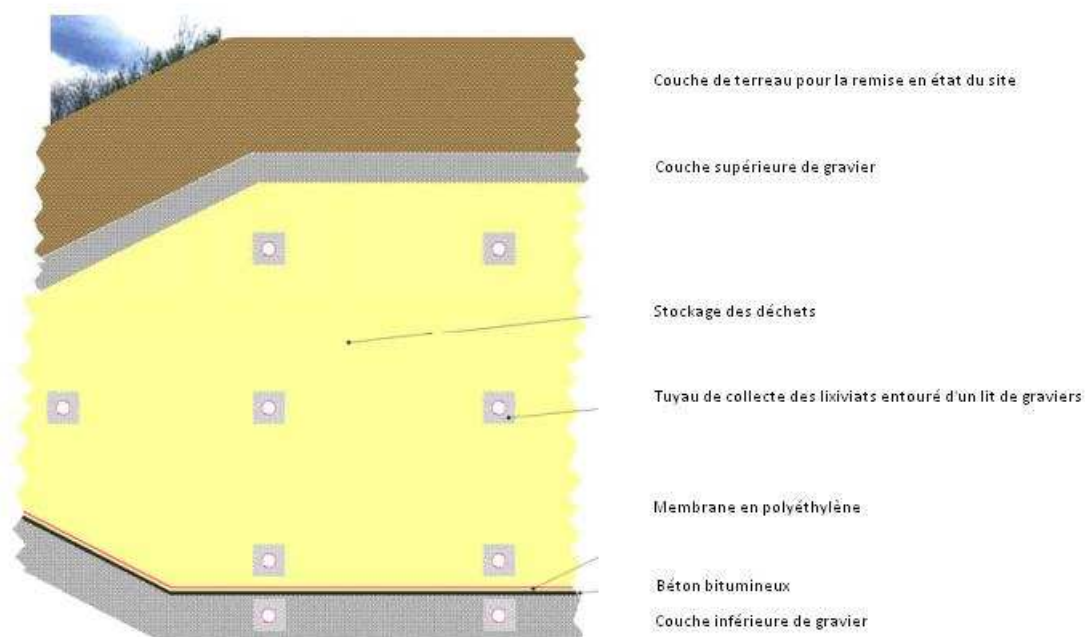


Figure 41 : Schéma d'une coupe (échelle non respectée) d'un "Sanitary landfill" [Doka, 2009]

En réalité, les décharges ne sont pas constituées d'un seul bloc mais sont divisées en alvéoles. 4 murs intérieurs d'une surface totale de 24 000 m² constitués des mêmes éléments que la barrière active permettent de partager l'installation en 8 alvéoles.

Une route permettant d'accéder au site est également construite : elle est longue de 3 km avec une largeur de 6 m. Elle se compose d'un lit de 50 cm de gravier et de 10 cm d'asphalte (15 % de bitume, 85 % de graviers et une masse volumique de 2 500 kg/m³). La construction et les rénovations successives de la route tous les 50 ans demandent une consommation en carburant de 0,2 L par m². Au total, la route aura une durée de vie de 185 ans : 5 ans pour la construction de la décharge, 30 ans d'exploitation et enfin une période de 150 ans où cette route est entretenue pour permettre la surveillance du site. La durée de vie considérée est largement inférieure dans le cas de l'« *Inert material landfill* » où seules 16 années sont comptabilisées, le site n'étant suivi que 5 ans une fois son exploitation terminée.

À la fin de la période d'exploitation, la zone est recouverte de 50 cm de graviers et d'une couche de 4 m de terres excavées dont la production et le transport ne sont pas intégrés dans le système d'études.

Les détails du transport des matériaux nécessaires à la construction des différentes infrastructures sont donnés dans le tableau 43 suivant :

Tableau 43 : Détail du transport des matériaux		
Matériau	Distance (en km)	Moyen de transport
Gravier, béton	20	Camion
Plastiques, bitume, caoutchouc	50	Camion
	200	Train
Métaux	50	Camion
	600	Train
Terres excavées	20	Camion

L'exploitation de l'installation demande l'utilisation d'engins de distribution et de compactage des déchets dont l'utilisation nécessite 1,3 L de diesel par tonne de déchet traité.

L'ICV ne s'arrête toutefois pas là puisque les émissions à court et long terme sont modélisées, c'est-à-dire les émissions gazeuses dues à la décomposition des déchets ainsi que les émissions dans les nappes phréatiques sous forme de lixiviats. Le détail des calculs de ces émissions est maintenant donné.

4.3.2 Les émissions des installations « sanitary landfill »

Ces émissions se présentent sous deux formes : les gaz et la lixiviation. Les premières peuvent durer plusieurs dizaines d'années tandis que les deuxièmes se produisent continuellement se terminant lorsque l'ensemble des éléments chimiques contenu dans le déchet a été évacué. En effet, même si les installations disposent de couches de protection et d'une membrane d'étanchéité, les lixiviats finissent par atteindre le sol situé en dessous de la décharge en prenant en compte un temps suffisamment long dû à la dégradation des dispositifs de protection.

Dans la méthodologie Ecoinvent, la modélisation des émissions repose sur le calcul de coefficients de transfert qui permettent d'évaluer quel pourcentage de chaque élément chimique est relâché dans l'environnement. Ce coefficient de transfert sera dépendant à la fois de la nature de l'élément chimique et de la nature du déchet dans lequel il est contenu. Le calcul des coefficients de transfert a d'abord été effectué pour un mélange de déchets « *disposal, municipal solid waste, 22,9% water, to sanitary landfill* » puis adapté pour des natures spécifiques de déchets (journaux, plastiques...). Il convient maintenant d'explicitier les calculs de ces coefficients de transfert pour une composition moyenne de déchets en distinguant deux temporalités : les émissions à court terme (les 100 premières années) et à long terme (jusqu'à 60 000 ans après la mise en décharge des déchets). Les coefficients de transfert à long terme sont dits cumulés puisqu'ils intègrent également les coefficients à court terme.

Les émissions à court terme

Sont considérées à court terme, les émissions survenant au long des 100 premières années après le dépôt du déchet. Durant ce laps de temps, les différents éléments chimiques sont libérés soit sous forme de dégagements gazeux ou de lixiviats. Les deux formules suivantes permettent d'évaluer les quantités libérées :

$$E_{\text{gas},e} = m_e * D_e * r_e * \text{gas}\%_e \quad (1.a)$$

$$E_{\text{leach},e} = m_e * D_e * r_e * (1 - \text{gas}\%_e) \quad (1.b)$$

Avec :

$E_{\text{gas},e}$: l'émission à court terme d'un élément e dans les gaz (en pourcentage)

$E_{\text{leach},e}$: l'émission à court terme d'un élément e dans les lixiviats (en pourcentage)

m_e : la concentration d'un élément e dans le déchet considéré, exprimé en ppm dans les modules

D_e : le taux de dégradation de l'élément chimique (en pourcentage)

r_e : le facteur de relâchement (en pourcentage)

$\% \text{ gas}_e$: fraction de l'élément relâché sous forme gazeuse (en pourcentage)

Le facteur D_e représente la quantité d'un élément qui sera libérée à l'intérieur de la décharge au bout de 100 ans. Cependant, une fois l'élément libéré dans le milieu, il n'est pas obligatoirement émis. En effet, les ions peuvent reprécipiter retardant ainsi leurs émissions. Le produit $D_e * r_e$ permet donc d'estimer la fraction d'un élément, que ce soit sous forme liquide ou gazeuse, qui sera effectivement émis hors de l'infrastructure. En d'autres termes il s'agit du coefficient de transfert à court terme. Le paramètre $\% \text{ gas}_e$ donné dans le tableau A.5 du rapport Ecoinvent [Doka, 2009] est utilisé pour évaluer le pourcentage d'élément libéré en tant que dégagement gazeux.

Les émissions à long terme

Dans les émissions à long terme, seule la lixiviation se poursuit, les dégagements gazeux devenant presque nuls sont dorénavant négligés. Pour estimer la quantité de lixiviats libérée, un coefficient de transfert à long terme est calculé : il définit le pourcentage d'un élément émis sur une période de 60 000 ans après le placement du déchet. Pourquoi cette période de 60 000 ans ? Cet horizon temporel correspond approximativement au début de la prochaine ère glaciaire en Suisse. Les glaciers qui se formeront modifieront les conditions environnementales de manière importante. Or, Ecoinvent part du principe qu'il faut estimer les impacts potentiels ayant des conséquences sur l'environnement tel que nous le connaissons aujourd'hui. Les impacts ayant lieu au-delà de 60 000 ne sont donc pas comptabilisés.

Pour prendre les différentes évolutions et cinétiques à l'intérieur de la décharge, deux périodes sont distinguées :

- Une période comprise de 100 à 4 500 ans après le dépôt du déchet, soit 4 400 ans (période 1) ;
- Une période comprise entre 4 500 et 60 000 ans après le dépôt du déchet, soit 55 500 ans (période 2).

Période 1

Au bout de 100 ans, on considère une diminution en concentration des lixiviats. Cette diminution est exprimée par un facteur X_s qui est dérivé de la concentration initiale d'un élément dans une installation de stockage du type « *slag compartment* » comparée à la concentration initiale dans un « *sanitary landfill* ». La décharge entre alors dans un état quasi-stationnaire où deux modèles sont proposés pour quantifier l'évolution de la concentration des éléments chimiques dans les lixiviats.

Un premier modèle exponentiel, donné par les équations 6.9 et 6.10 du rapport Ecoinvent [Doka, 2009] et correspondant respectivement dans ce manuscrit aux formules 2.a et 2.b, décrit le comportement des éléments facilement solubles comme les ions monovalents (Na^+ , Cl^- ...), les oxanions ou l'ion nitrate :

$$TK(t_e) = STTK + (TK_\infty - STTK) \cdot (1 - e^{-k \cdot x_s \cdot (t_e - 100a)}) \quad (2.a)$$

$$-k = \ln\left(1 - \frac{STTK}{TK_\infty}\right) / 100a \quad (2.b)$$

Avec :

$TK(t_e)$: le coefficient de transfert à la fin de la période t_e (en pourcentage) ;

$STTK$: le coefficient à court terme (en pourcentage) ;

TK_∞ : coefficient de transfert maximal à long terme (en pourcentage) ;

x_s : ratio de la concentration initiale d'un élément dans les lixiviats d'une installation du type « *sanitary landfill* » sur celle issue d'une décharge « *slag compartment* » ;

t_e : la période 1 durant 4 500 ans.

Un deuxième modèle a été construit, linéaire cette fois, pour estimer le comportement linéaire des cations métalliques. Ce calcul est réalisé à partir de la formule 3 :

$$TK(t_e) = STTK + \left(\frac{STTK}{100a}\right) \cdot x_s \cdot (t_e - 100a) \quad (3)$$

Avec :

$TK(t_e)$: le coefficient de transfert à la fin de la période t_e (en pourcentage) ;

$STTK$: le coefficient à court terme (en pourcentage) ;

x_s : ratio de la concentration initiale d'un élément dans les lixiviats d'une installation du type « *sanitary landfill* » sur celle issue d'une décharge « *slag compartment* » ;

t_e : la période 1 durant 4 500 ans

Période 2

Après 4 500 ans, on estime que le pH diminue entraînant une modification des concentrations en lixiviats. Les concentrations des cations métalliques et des oxanions respectivement augmentent et diminuent tandis que celle des ions monovalents reste

inchangée. Cette augmentation de la concentration en cations métalliques se traduit par l'introduction d'un paramètre x_e .

Les modèles exponentiels et linéaires sont repris et adaptés à cette deuxième période.

Modèle exponentiel :

$$TK(t_g) = TK(t_e) + (TK_\infty - TK(t_e)) \cdot \left(1 - e^{-k \cdot x_s \cdot x_e \cdot (t_g - t_e)}\right) \quad (4.a)$$

$$-k = \ln\left(1 - \frac{STTK}{TK_\infty}\right) / 100a \quad (4.b)$$

Modèle linéaire :

$$TK(t_g) = TK(t_e) + \left(\frac{TK(t_e)}{t_e}\right) \cdot x_s \cdot x_e \cdot (t_g - t_e) \quad (5)$$

Avec :

$TK(t_g)$: le coefficient de transfert à la fin de la période t_g (en pourcentage);

$TK(t_e)$: le coefficient de transfert à la fin de la période t_e (en pourcentage) ;

x_s : ratio de la concentration initiale d'un élément dans les lixiviats d'une installation du type « sanitary landfill » sur celle issue d'une décharge « slag compartment » (sans unité) ;

x_e : facteur d'augmentation de la concentration (sans unité) ;

$STTK$: le coefficient à court terme (en pourcentage) ;

t_e : la période 1 durant 4 500 ans ;

t_g : la période 2 durant 60 000 ans.

L'adaptation pour des natures de déchets spécifiques se base sur les coefficients de transfert calculés par les formules précédentes.

4.3.3 Adaptation pour des déchets spécifiques

La méthodologie proposée par Ecoinvent pour la modélisation de la mise en décharge des déchets a pour objectif d'être spécifique à la nature de ces déchets. Ainsi, les émissions seront dépendantes de la nature des déchets considérés que ce soit en termes de composition ou de dégradabilité et du coefficient de transfert de l'élément chimique qui variera selon la matrice dans laquelle il est contenu (journal ,plastique, métal...). L'adaptation est réalisée à partir des deux formules suivantes :

$$LTK_e = STTK_e + (TK_\infty - STTK_e) \cdot \left(\frac{\phi LTK_e - \phi STTK_e}{TK_\infty - \phi STTK_e}\right) \quad (6.a)$$

$$(\phi)STTK_e = (\phi)STTK_{gas,e} + (\phi)STTK_{leach,e} \quad (6.b)$$

Avec :

$LTTK_e$: le coefficient de transfert à long terme d'un élément e dans un déchet spécifique (en kg/kg)

$STTK_e$: le coefficient de transfert à court terme d'un élément e dans un déchet spécifique (en kg/kg)

TK_{∞} : coefficient de transfert maximal à long terme d'un élément e

$\emptyset LTTK_e$: coefficient de transfert à long terme d'un élément e dans un déchet moyen

$\emptyset STTK_e$: coefficient de transfert à court terme d'un élément e dans un déchet moyen

$\emptyset STTK_e$ est la somme des fractions d'un élément chimique qui seront émises sous forme de gaz ($\emptyset STTK_{gas,e}$) ou sous forme de lixiviats ($\emptyset STTK_{leach,e}$) durant les 100 premières années dans un déchet moyen.

$LTTK_e$ se décompose d'un premier membre ($STTK_e$) représentant la fraction d'un élément e émise durant les 100 premières années. Le deuxième membre quant à lui permet d'estimer la fraction d'un élément qui sera émis entre 100 et 60 000 ans après le dépôt du déchet. La différence ($TK_{\infty} - STTK_e$) quantifie la fraction restante d'un élément après les 100 premières années tandis que le ratio $(\emptyset LTTK_e - \emptyset STTK_e) / (TK_{\infty} - \emptyset STTK_e)$ explicite l'hypothèse faite que ces émissions entre 100 et 60 000 ans seront proportionnelles à la fraction non émise après 100 ans à partir des déchets municipaux moyens.

Un exemple de calcul est maintenant proposé. Nous avons choisi de traiter le cas d'un élément qui n'est pas totalement dégradé au bout de 60 000 ans : le zinc. Le choix du journal est quand à lui subjectif.

4.3.3.1 Cas concret du zinc.

La première étape est de calculer les coefficients de transfert du zinc dans un déchet moyen, c'est-à-dire dans le module Ecoinvent « *Disposal, municipal solid waste, 22,9 % water, to sanitary landfill* » qui par souci de concision, sera appelé module « MSW ».

4.3.3.2 Calcul des coefficients de transfert du zinc dans un déchet moyen

Dans un premier temps, il s'agit de calculer les émissions à court terme qui sont dérivées des formules 1.a et 1.b. Il nous faut :

- La dégradation du zinc dans le module MSW : cette donnée est disponible dans le fichier Excel 13_MSWhv2.xls fourni par Ecoinvent. Elle est obtenue à partir de la composition initiale des MSW et des estimations terrain ou laboratoire. Nous lisons 3,69 % ;
- Le facteur de relâchement r_e : ce paramètre est également donné dans le fichier Excel ou dans le tableau A.6 du rapport Ecoinvent [Doka, 2009] soit 4,74 %.

Le coefficient de transfert $\emptyset STTK_{Zn}$ est donc égal à :

$$\emptyset\text{STTK}_{\text{Zn}} = D_e * r_e = (3,69 / 100) * (4,74 / 100) = 1,75.10^{-03}$$

Si l'on souhaite distinguer les émissions gazeuses des lixiviats, il suffit de prendre en compte les paramètres % gas_{zn} et 1 - % gas_{zn}. Ces paramètres sont fournis dans le fichier Excel ou dans les annexes du rapport dans le tableau A.5.

Dans un deuxième temps, à partir de $\emptyset\text{STTK}_{\text{Zn}}$ nous calculons le coefficient de transfert à long terme $\emptyset\text{LTTK}_{\text{Zn}}$. Le zinc étant émis sous forme de cations métalliques, suit l'approche linéaire, soit les formules 3 et 5. Pour les appliquer, nous avons besoin des paramètres x_s et x_e :

- x_s est le ratio de la concentration initiale d'un élément dans les lixiviats d'une installation du type « sanitary landfill » sur celle issue d'une décharge « slag compartiment ». Ces deux valeurs sont respectivement données dans les tableaux A.3 et A.1 des annexes du rapport Ecoinvent [Doka, 2009]. Pour le zinc, nous obtenons un facteur de réduction de 0,0633 ;
- x_e est également indiqué dans le rapport Ecoinvent à la page 51 [Doka, 2009]. Pour le zinc, il est égal à 158.

Nous obtenons par l'intermédiaire de la formule 3 :

$$\begin{aligned} \text{TK}(t_e) &= \emptyset\text{STTK}_{\text{Zn}} + (\emptyset\text{STTK}_{\text{Zn}} / 100) * x_s * (t_e - 100) \\ &= 1,75.10^{-03} + (1,75.10^{-03} / 100) * 0,0633 * (4\,500 - 100) \\ &= 6,6.10^{-03} \end{aligned}$$

Cela signifie qu'au bout de 4 500 ans, 0,66 % de la quantité initiale de zinc aura été émis dans l'environnement, que ce soit dans l'air ou dans l'eau.

Et par l'intermédiaire de la formule 5 :

$$\begin{aligned} \text{TK}(t_g) &= \text{TK}(t_e) + (\text{TK}(t_e) / t_e) * x_s * x_e * (t_g - t_e) \\ &= 6,6.10^{-03} + (6,6.10^{-03} / 4500) * 0,0633 * 158 * (60\,000 - 4500) \\ &= 0,82 \end{aligned}$$

Au bout de 60 000 ans, 82 % de la quantité initialement présente de zinc a été émise ce qui correspond, pour respecter les notations, au $\emptyset\text{LTTK}_{\text{Zn}}$.

La deuxième étape consiste à calculer le STTK_{Zn} , c'est-à-dire la quantité de zinc émise au bout de 100 ans issue du déchet spécifique (dans notre cas le journal).

4.3.3.3 Coefficient de transfert du zinc dans le journal

Ce calcul se base sur les formules 1.a et 1.b où le paramètre D_e est remplacé, dans le cas d'un déchet spécifique, par le taux de dégradation D du déchet étudié. Ce paramètre est donné pour différentes natures de déchets dans le tableau 6.1 de la page 45 [Doka, 2009] retranscrit dans le tableau 44:

Tableau 44 : Taux de dégradation pour différents éléments	
Matériau	Taux de dégradation à 100 ans
Papier de bureau, mouchoir, serviette	39,34 %
Boîtes en carton	32,44 %
Papier moyen	26,99 %
Papier enduit	18,02 %
Journal	16,17 %
Bois	0 à 3,30 %
Plastiques, peintures	1 %
Matériaux de compost	27 %
Textiles	12 %
Matériaux en vrac	50 %
Plâtre	100 %
Cendre de bois	5 %
Boues	60 %

Nous avons donc :

$STTK_{Zn} = D * r_{Zn} = (16,17 / 100) * (4,74 / 100) = 7,6.10^{-03}$, soit la quantité de zinc émise à court terme à partir d'un journal.

Finalement, il ne reste plus qu'à appliquer la formule 6.a pour obtenir le coefficient de transfert à long terme du zinc issu de la dégradation d'un déchet de journal :

$$\begin{aligned}
 LTTK_{Zn} &= STTK_{Zn} + (TK^{\infty} - STTK_{Zn}) * ((\emptyset LTTK_{Zn} - \emptyset STTK_{Zn}) / (TK^{\infty} - \emptyset STTK_{Zn})) \\
 &= 7,6.10^{-03} + (1 - 7,6.10^{-03}) * ((0,84 - 1,75.10^{-03}) / (1 - 1,75.10^{-03})) \\
 &= 82,3 \%
 \end{aligned}$$

La quantité de zinc émise dans l'environnement au bout de 60 000 ans à partir d'un journal sera 82,3 % de la quantité initiale. Pour confirmer ce résultat, nous allons calculer le pourcentage de zinc émis quelque soit le compartiment environnemental considéré (eau, air ou sol) par rapport à la composition initiale du déchet de journal. Ainsi, dans le module « *Disposal, newspaper, 14,7 % water, to sanitary landfill* » la description de la composition est donnée en ppm : 55,563 ppm soit $5,56.10^{-05}$ kg dans un kg de déchet de journaux. En comptabilisant les flux de zinc émis, on trouve une quantité de $4,57.10^{-05}$ kg soit une fraction totale émise au bout de 60 000 ans de 82,3%. Cette valeur est identique au calcul réalisé de $LTTK_{Zn}$ égal à 82,3 %.

Pendant les 100 premières années, les membranes de protections sont considérées imperméables et permettent de collecter l'ensemble des lixiviats produits. Ces lixiviats récupérés sont ensuite traités.

4.3.4 Le traitement des lixiviats

Les différentes étapes de la gestion des déchets enfouis dans les installations de type « *sanitary landfill* » sont présentées sur la figure 42 :