

Adaptation du module « *Inert material landfill* »

L'objectif est ici d'adapter un module du type « Inert material landfill » pour se rapprocher de la réalité d'une ISDI. Le nouveau module obtenu sera appelé « ISDI »

Dans un premier temps, une analyse d'un process du type « *disposal, to inert material landfill* » a été menée pour connaître les modules ayant la plus forte contribution dans les 13 catégories d'impact. Pour rappel, il suffit d'analyser aléatoirement un module car, comme le montre la figure 39 dans la partie 4.2.1, la mise en décharge en « *Inert material landfill* » est identique quelle que soit la nature du déchet considérée. Les résultats sont donnés dans le tableau 45 :

Tableau 45 : Flux les plus contributeurs dans chaque catégorie d'impact	
Déplétion des ressources	Bitume
Acidification	Transport des matériaux pour l'infrastructure, manutention des déchets
Eutrophisation	Transport des matériaux pour l'infrastructure, manutention des déchets
Réchauffement climatique	Transport des matériaux pour l'infrastructure, manutention des déchets
Destruction de la couche d'ozone	Bitume
Toxicité humaine	Manutention des déchets
Ecotoxicité aquatique	Transport des matériaux pour l'infrastructure
Ecotoxicité marine	Transport des matériaux pour l'infrastructure
Ecotoxicité terrestre	Transport des matériaux pour l'infrastructure, bitume
Oxydation photochimique	Transport des matériaux pour l'infrastructure, bitume
Energie renouvelable et non renouvelable	Bitume
Déchets	Manutention des déchets
Déchets radioactifs	Transport des matériaux pour l'infrastructure

Dans le cas des « *Inert landfill* », aucune émission dans l'air ou dans le sol n'est prise en compte, c'est-à-dire que l'on considère qu'il n'y a pas de lixiviation ou de dégagements gazeux. Cette approche peut sembler logique étant donné que par définition les déchets inertes ne subissent pas de modification physique et ne produisent aucune réaction chimique. Cependant, Ecoinvent a voulu intégrer les émissions dues à la construction et à la vie en œuvre de la décharge. Les impacts environnementaux se limitent donc à la construction de l'infrastructure et à la phase d'exploitation, i.e., la manutention des déchets.

L'analyse montre que les impacts proviennent principalement de 3 modules : la manutention des déchets, le transport des matériaux pour l'infrastructure et la production du bitume pour la construction de l'installation de stockage.

4.4.1 La manutention des déchets

L'étape de manutention des déchets se retrouve dans le module « *Process-specific burdens, inert material landfill/CH U* » qui détaille la phase opérative de l'exploitation d'une décharge. Trois flux énergétiques sont pris en compte par kg de déchet traité :

- Le diesel des engins chargé de disposer les déchets soit $2,7 \cdot 10^{-2}$ MJ ;
- L'électricité consommée par le bâtiment administratif : $1,33 \cdot 10^{-5}$ kWh ;
- Le fioul pour le chauffage du bâtiment administratif : $1,43 \cdot 10^{-3}$ MJ.

L'ensemble de ces données est issu d'une publication parue il y a près de 20 ans (Donnée non référencée dans [Zimmerman, 1996]).

Il serait intéressant d'avoir des chiffres plus actuels, ce qui est le cas dans le PREDEC. L'article 202 de la loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant sur l'engagement national pour l'environnement a créé l'article L 541-1 dans le Code de l'Environnement rend obligatoire l'élaboration de plans de gestion des déchets de chantier. Ces plans doivent être réalisés par les Conseils Généraux aujourd'hui appelés Conseils Départementaux à l'exception des départements d'Ile de France où ces plans de gestions doivent être établis par le Conseil Régional. Ainsi, en Ile de France, le plan de prévention et de gestion des déchets issus des chantiers de bâtiments et des travaux publics (PREDEC), vise à définir et à coordonner l'ensemble des actions à mener par tous les acteurs publics ou privés en vue d'assurer la réalisation des objectifs généraux en matière de gestion des déchets tels que définis par le Code de l'environnement (articles L.541-1, L.541-2, L.541-2-1).

Les objectifs et les enjeux du PREDEC sont notamment :

- Favoriser l'émergence de filières et d'une économie circulaire locale et régionale (prévention/éco-conception/réemploi/réutilisation/recyclage) ;
- Rééquilibrer le territoire francilien : par exemple, 2/3 des capacités des installations de stockage des déchets inertes se trouvent en Seine et Marne ;
- Développer le recyclage des matériaux : l'Ile de France souffre d'un déficit de production de matériaux naturels par rapport à ses besoins ;
- Optimiser le transport et favoriser le report modal : compte tenu des volumes générés, le transport des déchets du BTP, majoritairement routier, représente un fort enjeu environnemental ;
- Impliquer l'ensemble des acteurs pour réduire et trier les déchets de chantier ;
- Favoriser la traçabilité et le contrôle ;
- Améliorer la connaissance des déchets du BTP : contrairement aux déchets ménagers ou dangereux, peu d'informations sont disponibles concernant les flux de déchets issus de l'activité du BTP et leurs modes de gestion.

Dans le cadre du PREDEC, un rapport environnemental [PREDEC, 2014] a été rédigé dans lequel un ratio d'énergie est donné pour le traitement des déchets dans une ISDND : $1,032 \cdot 10^{-2}$ MJ/kg. Cette donnée plus récente remplace la valeur initiale fournie par Ecoinvent. Les valeurs des flux concernant l'électricité et le chauffage des locaux administratifs sont conservées.

4.4.2 Les infrastructures d'une ISDI

Les ISDI ont changé de statut à compter du 1er janvier 2015 par le décret du 12 décembre 2014 : elles deviennent des ICPE et relèvent maintenant du régime d'enregistrement. Ce décret est accompagné de 2 arrêtés. Le premier (Arrêté du 12 décembre 2014 (1)) abroge l'arrêté du 28 octobre 2010 et fixe les prescriptions globales sur l'ouverture et l'exploitation de ce type de décharges. Quant au deuxième (Arrêté du 12 décembre 2014 (2)), il détaille les conditions d'admission des déchets et précise les déchets qui sont interdits. Il n'existe pas, dans le cadre réglementaire, de prescriptions et d'obligations quant à la conception des ISDI.

Ces décharges semblent donc être de grands trous creusés en vue d'accueillir des déchets inertes sans disposition particulière, comme le montre la figure 43 :

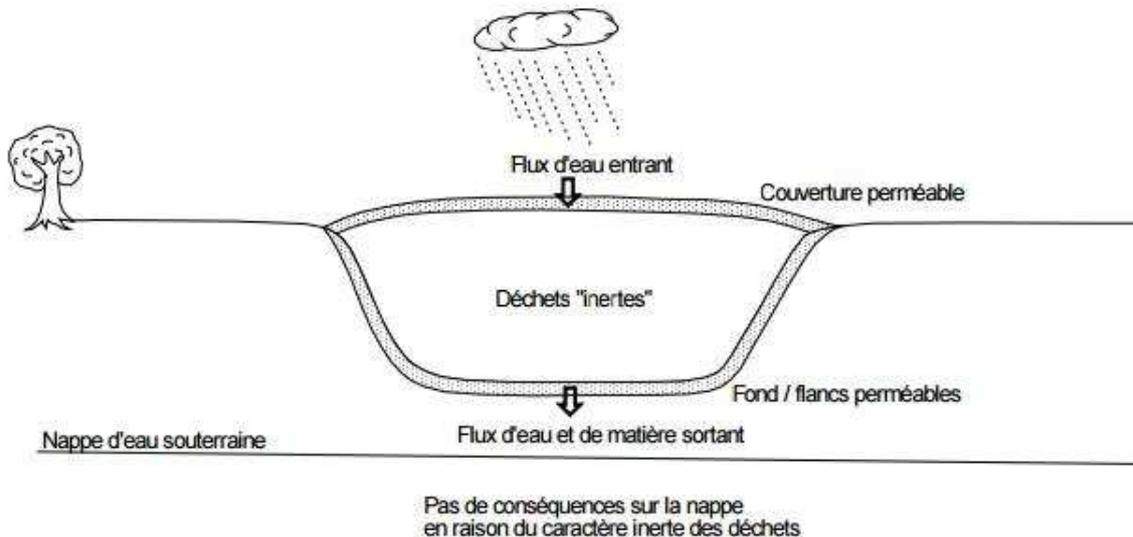


Figure 43 : Schéma d'une ISDI [CFG, 2011]

Il semble donc nécessaire d'adapter les flux Ecoinvent afin de se rapprocher de la réalité d'une décharge française. Le tableau 46 rappelle les différents flux présents dans le module « *Inert material landfill facility/CH/I U* » :

Tableau 46 : Description des infrastructures d'un "Inert material landfill"		
Nom du module	Quantité	Unité
« <i>Excavation hydraulic digger/RER</i> »	$1,95.10^5$	m3
« <i>Excavation, skid-steer loader/RER</i> »	$1,95.10^5$	m3
« <i>Diesel burned in building machine/GLO</i> »	$4,04.10^5$	MJ
« <i>Gravel, round at mine/CH</i> »	$7,11.10^7$	kg
« <i>Bitumen, at refinery/CH</i> »	$1,21.10^6$	kg
« <i>Concrete, sole plate and foundation, at plant</i> »	5,4	m3
« <i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER</i> »	$6,29.10^4$	kg
« <i>Extrusion, plastic film/RER</i> »	$1,45.10^4$	kg
« <i>Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH</i> »	$9,14.10^6$	tkm
« <i>Transport, freight, rail/RER</i> »	$2,54.10^5$	tkm

L'objectif est donc d'enlever ou de modifier les flux liés à la production et à la mise en place des couches d'étanchéité et des systèmes de récupération de lixiviats tandis que nous conservons les flux résultant de l'excavation de la décharge, de la construction de la route

permettant d'accéder à l'ISDI et de l'aménagement paysager réalisé à la fin de la phase d'exploitation. La quantification de chacun des modules est donnée dans le tableau 47 :

Tableau 47 : Description des infrastructures d'une ISDI		
Nom du module	Quantité	Unité
« <i>Excavation hydraulic digger/RER</i> »	$1,95.10^5$	m ³
« <i>Excavation, skid-steer loader/RER</i> »	$1,95.10^5$	m ³
« <i>Diesel burned in building machine/GLO</i> »	$3,6.10^3$	MJ
« <i>Gravel, round at mine/CH</i> »	$4,22.10^7$	kg
« <i>Bitumen, at refinery/CH</i> »	$6,75.10^5$	kg
« <i>Concrete, sole plate and foundation, at plant</i> »	0	m ³
« <i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER</i> »	0	kg
« <i>Extrusion, plastic film/RER</i> »	0	kg
« <i>Transport, lorry 16-32t, EURO 4/RER</i> »	$8,78.10^5$	tkm
« <i>Transport, freight, rail/FR</i> »	$1,35.10^5$	tkm

L'excavation de la décharge et le réaménagement en fin de vie sont modélisés par « *Excavation hydraulic digger/RER* » et « *Excavation, skid-steer loader/RER* » : ces flux sont donc conservés par rapport au module initial.

La quantité d'enrobés (« *Bitumen at refinery* ») utilisés doit être recalculée. En effet, les enrobés bitumineux sont utilisés pour la construction de la route menant à la décharge mais contribuent également à l'étanchéité de la structure. La route est spécifiquement construite pour les besoins de l'installation [Doka, 2009] : elle fait 3 km de longueur et 6 m de largeur et elle est constituée d'un lit de graves de 50 cm d'une densité de 1600 kg/m³ et de 10 cm d'une couche d'enrobé bitumineux (85 % de graves et 15 % de bitume soit une densité de 2500 kg/m³) [Doka, 2009].

$$\text{Quantité de bitume} = 0,15 * (3.10^3 * 6 * 10.10^{-2}) * 2500 = 6,75.10^5 \text{ kg}$$

Pour calculer la nouvelle quantité de graves nécessaires à l'ISDI, il faut prendre en compte uniquement les quantités mises en œuvre pour la construction de la route et le réaménagement paysager à la fin de l'exploitation. En d'autres termes on n'intègre pas la quantité nécessaire à l'étanchéité. À la fin du site on recouvre les 30 000 m² de la décharge par 50 cm de graves d'une densité de 1 600 kg/m³.

$$\text{Quantité de graves} = 0,85 * (3.10^3 * 6 * 50.10^{-2}) * 1600 + 3.10^4 * 50.10^{-2} * 1600 = 4,22.10^7 \text{ kg}$$

De plus, le transport de ces matériaux doit être aussi modifié étant donné que la quantité de matériaux considérée est différente. En reprenant les données précédemment calculées et

celles sur les transports des matériaux [Doka, 2009] récapitulées dans le tableau 43, nous obtenons respectivement des transports en camion et en train de $8,78.10^5$ et de $1,35.10^5$ tkm. À noter que le module « *Transport, freight, rail/RER* » est remplacé par « *Transport, freight, rail/FR* » plus adapté à la situation française.

Quant à la quantité de carburant nécessaire (« *Diesel burned in building machine* »), seule sera prise en compte la quantité utilisée pour la construction et la rénovation (on exclut la quantité consommée pour la mise en place de l'étanchéité). Elle est estimée à $7,2$ MJ/m² de route en posant l'hypothèse que $0,2$ L est nécessaire [Doka, 2009].

$$\text{Quantité de carburant} = 7,2 * (3.10^3 * 6) = 1,29.10^5 \text{ MJ}$$

Enfin, les modules « *Concrete, sole plate and foundation, at plant* », « *Polyethylene, HDPE, granulate, at plant* » et « *Extrusion, plastic film/RER* » sont fixés à zéro puisqu'ils sont exclusivement liés à la mise en place de l'étanchéité et à la construction d'un système de collecte des lixiviats. Le tableau 48 permet de récapituler les modifications effectuées entre les modules « *Disposal to inert material landfill* » et « *ISDI* ».

Tableau 48 : Récapitulatif des modifications entre les modules « <i>Disposal to inert material landfill</i> » et « <i>ISDI</i> »			
Nom du module	« <i>Disposal to inert material landfill</i> »	« <i>ISDI</i> »	Unité
« <i>Excavation hydraulic digger/RER</i> »	$1,95.10^5$	$1,95.10^5$	m ³
« <i>Excavation, skid-steer loader/RER</i> »	$1,95.10^5$	$1,95.10^5$	m ³
« <i>Diesel burned in building machine/GLO</i> »	$4,04.10^5$	$3,6.10^3$	MJ
« <i>Gravel, round at mine/CH</i> »	$7,11.10^7$	$4,22.10^7$	kg
« <i>Bitumen, at refinery/CH</i> »	$1,21.10^6$	$6,75.10^5$	kg
« <i>Concrete, sole plate and foundation, at plant</i> »	5,4	0	m ³
« <i>Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER</i> »	$6,29.10^4$	0	kg
« <i>Extrusion, plastic film/RER</i> »	$1,45.10^4$	0	kg
« <i>Transport, lorry 16-32t, EURO 4/RER</i> »	$9,14.10^6$	$8,78.10^5$	tkm
« <i>Transport, freight, rail/FR</i> »	$2,54.10^5$	$1,35.10^5$	tkm

4.5 Modélisation d'une ISDND

Un travail similaire est réalisé sur les installations de stockage du type « *Sanitary landfill* » afin d'obtenir une modélisation plus proche d'une ISDND. Le module final obtenu est appelé « ISDND ».

Afin d'adapter, s'il y a besoin, les données des décharges suisses pour modéliser des installations de stockage françaises de déchets non dangereux, une analyse des différentes contributions a été menée. Dans le tableau 49, sont mentionnés les procédés qui ont le plus grand impact environnemental pour chacune des 13 catégories sélectionnées dans divers modules de décharge de type « *Sanitary landfill* ».

Tableau 49 : Phases les plus contributrices aux 13 catégories d'impacts sélectionnées pour 5 natures de matériaux mis en décharge					
	« Municipal solid waste, 22,9 % water »	« Inert material, 0 % water »	« Wood untreated, 20 % water »	« Polyvinylchloride, 0,2 % water »	« Aluminium, 0 % water »
Déplétion des ressources	Bitume, manutention des déchets	Bitume	Bitume	Bitume	Bitume
Acidification	Manutention des déchets, Transport (infra)	Manutention des déchets, Transport (infra)	Manutention des déchets, Transport (infra)	Manutention des déchets, Transport (infra)	Manutention des déchets, Transport (infra)
Eutrophisation	Émissions	Manutention des déchets	Émissions	Émissions	Manutention des déchets
Réchauffement climatique	Émissions	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Émissions	Manutention des déchets, transport (infra)
Destruction de la couche d'ozone	Bitume	Bitume	Bitume	Bitume	Bitume
Toxicité humaine	Émissions	Émissions	Manutention des déchets	Émissions	Manutention des déchets
Ecotoxicité aquatique	Émissions	Émissions	Émissions	Émissions	Emissions
Ecotoxicité marine	Émissions	Émissions	Émissions	Émissions	Emissions
Ecotoxicité terrestre	Émissions	Émissions	Émissions	Émissions	Électricité issue du traitement des lixiviats
Oxydation photochimique	Émissions	Transport (infra), manutention des déchets	Émissions	Émissions	Transport (infra), manutention des déchets
Énergie primaire totale	Bitume, électricité issue du traitement des lixiviats	Bitume	Bitume, transport (infra)	Bitume	Bitume
Déchets	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Manutention des déchets
Déchets radioactifs	Électricité issue du traitement des lixiviats	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Manutention des déchets	Électricité issue du traitement des lixiviats

Cinq catégories de déchets ont été choisies : les déchets ménagers, les déchets inertes, le bois, le PVC et l'aluminium. Le module « *Municipal solid waste, 22,9 % water* » présente une composition variée de nature de déchets notamment du papier, des plastiques ou du verre. De plus, c'est le module qui a été utilisé dans le chapitre 2 dans la modélisation de la phase de mise en décharge dans le scénario de la démolition sélective. Les 3 modules suivants représentent les déchets que l'on retrouve le plus souvent sur les chantiers de démolition : les déchets inertes, le bois, le PVC. Enfin, l'aluminium a été sélectionné pour prendre un exemple métallique étant donné que la mise en décharge de l'acier dans un « *sanitary landfill* » n'existe pas dans la base Ecoinvent.

On remarque que 3 modules contribuent principalement aux impacts environnementaux des installations de stockage telles que modélisées sur Ecoinvent. Pour les catégories « Déplétion

des ressources », « Déplétion de la couche d'ozone » et « Énergie primaire totale » c'est la production des enrobés qui a la contribution la plus forte. Pour les catégories « Acidification », « Réchauffement climatique », « Déchets » et « Déchets radioactifs », c'est l'énergie dépensée pour la manutention des déchets qui est responsable des impacts. Enfin, les émissions que ce soit par la lixiviation ou les dégagements gazeux influent fortement sur les résultats des catégories comme « Toxicité humaine », « Oxydation photochimique », « Eutrophisation » et les « Ecotoxicité ».

Ces 3 modules sont donc maintenant étudiés de plus près afin d'être, au besoin, adaptés à la situation française.

4.5.1 La manutention des déchets

De manière similaire à un « *Inert material landfill* », la phase opérative d'une décharge est décrite dans le module « *Process-specific burdens, sanitary landfill/CH U* » exprimé par kg de déchet traité dans lequel 4 flux énergétiques sont distingués :

- Le diesel nécessaire au fonctionnement des engins chargés de placer et de compacter les déchets, soit $4,67 \cdot 10^{-2}$ MJ ;
- L'électricité pour le fonctionnement des pompes à gaz soit, $1,35 \cdot 10^{-3}$ kWh ;
- L'électricité consommée par le bâtiment administratif : $1,5 \cdot 10^{-5}$ kWh ;
- Le fioul pour le chauffage du bâtiment administratif : $1,61 \cdot 10^{-3}$ MJ.

L'ensemble de ces données est issu de la publication d' [Hunziker & Paterna, 1995].

Dans le cadre du PREDEC, le rapport environnemental [PREDEC, 2014] donne également un ratio d'énergie pour le traitement des déchets dans une ISDND : $1,77 \cdot 10^{-2}$ MJ/kg. Cette donnée plus récente remplace la valeur initiale fournie par Ecoinvent. Les valeurs des flux concernant l'électricité et le chauffage des locaux administratifs sont conservées.

4.5.2 Les infrastructures d'une ISDND

Les infrastructures d'une décharge de type « *Sanitary landfill* » ont été décrites dans la partie 4.3.1. L'analyse de différents modules d'installations de stockage dans Ecoinvent a montré que ce sont les enrobés qui ont la plus grande contribution sur les impacts finaux. Parmi les 4 300 t d'enrobés utilisées dans la construction d'un « *Sanitary landfill* », près de 85 % sont placés à la base, sur les flancs et au niveau des murs internes afin d'assurer l'étanchéité de la structure. Les 15 % restants sont issus de la construction de la route.

Contrairement aux ISDI, la conception des ISDND est encadrée par la législation française (arrêté du 9 septembre 1997). Ces décharges accueillent les déchets ménagers et assimilés dont la nature entraîne une lixiviation naturelle. L'installation doit être munie de différentes barrières permettant de limiter et de recueillir les lixiviats.

La première barrière qualifiée de passive est constituée du terrain naturel en l'état. Ce terrain, au niveau de la base de l'installation, doit présenter une perméabilité inférieure à $1 \cdot 10^{-9}$ m/s sur au moins 1 m et inférieure à $1 \cdot 10^{-6}$ m/s sur au moins 5 m. Quant aux flancs, ils

doivent être constitués d'une couche minérale d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-9} m/s. Lorsque la barrière géologique ne répond pas aux critères, elle doit être complétée artificiellement et renforcée par des moyens présentant une protection équivalente comme par exemple en rajoutant des argiles spécifiques du type bentonite ou des matériaux artificiels (géocomposite bentonitique).

Le système de protection est complété par une barrière dite active qui doit garantir l'étanchéité des casiers et éviter la sollicitation de la barrière passive. Elle est constituée, du bas vers le haut, par une géomembrane, surmontée d'une couche de drainage. Celle-ci est elle-même constituée, de bas en haut, d'un réseau de drains permettant l'évacuation des lixiviats vers un collecteur principal et d'une couche drainante d'épaisseur supérieure ou égale à 0,5 m ou tout dispositif équivalent. Le récapitulatif de ces différentes couches est montré sur la figure 44 suivante :

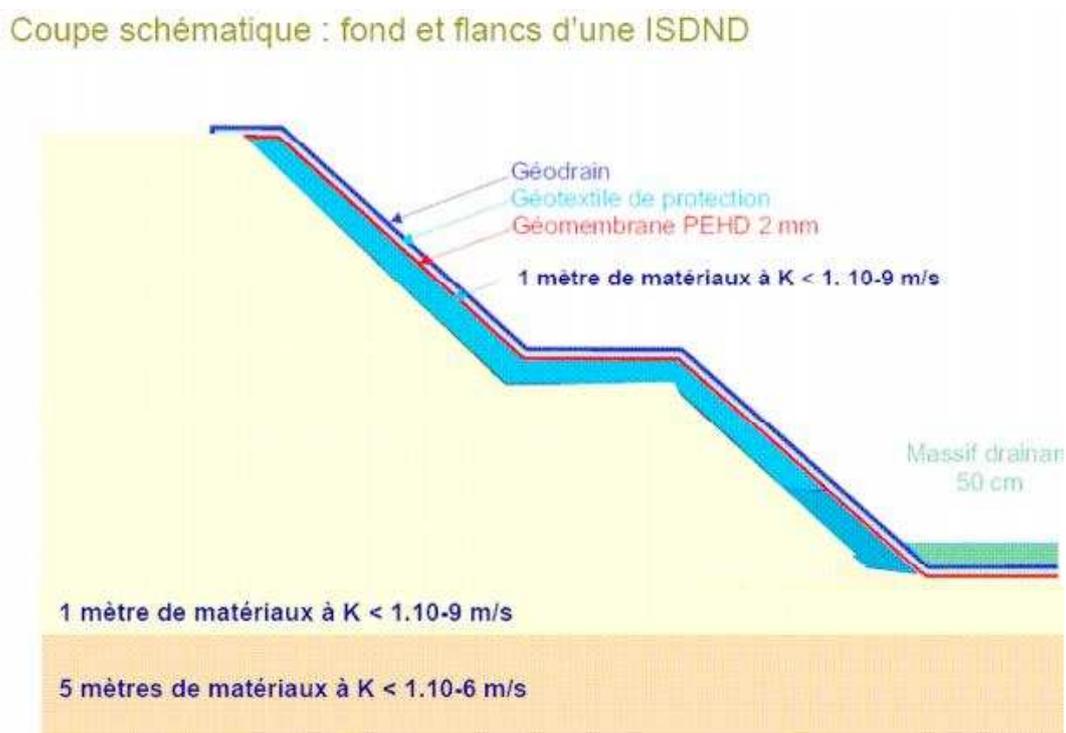


Figure 44: Schéma d'une coupe et d'un flanc d'une ISDND (DRIEE Ile de France, 2012)

Cependant, l'arrêté ne donne pas plus de détails sur la nature des matériaux composant ces différents éléments, notamment sur la nature et l'épaisseur des dispositifs équivalents dans la barrière passive. Des groupes de travail ont alors travaillé sur cette problématique pour aboutir à une méthodologie permettant de calculer l'équivalence des différentes couches protectrices entre elles.

Pour spécifier la quantité et la nature de chacune de ces couches, nous nous sommes basés sur différentes sources [Communications Naldeo ; Doka, 2009 ; Grisey, 2013 ; Sydevom, 2012, <http://www.comcomfiumorbucastellu.fr/>] aboutissant à la proposition suivante :

- Une barrière passive composée de 3 éléments : le sol à l'état naturel surmonté d'1 m d'argile du type bentonite et d'un GSB (géosynthétique bentonitique) ;

- Une barrière active constituée d'une géomembrane, d'un géotextile de protection, d'une couche drainante et d'un système de collecte des lixiviats.

La nature, le rôle et les calculs permettant la modélisation de ces différents éléments de l'infrastructure d'une ISDND sont maintenant précisés.

4.5.2.1 La barrière passive

La qualité des sols dépend de la localisation de la décharge. Ainsi, en amont d'un projet d'installation d'une ISDND, une étude relative à la topographie et au contexte géologique est réalisée [Sydevom, 2012]. La nature de la barrière active peut donc varier entre les différents sites selon les propriétés du sol. Nous nous plaçons dans un cas où le sol à l'état permet de répondre au cadre réglementaire, c'est-à-dire 5 m avec une perméabilité de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Ces 5 mètres de matériaux initialement présents sont recouverts d'1 m d'argile traitée à la bentonite. Pour estimer les ordres de grandeurs en termes de distance de transport, nous nous sommes basés sur la construction de l'étanchéité passive du centre de stockage des déchets non fermentescibles d'Hardivilliers pour laquelle de l'argile venant du gisement de Lihons a été utilisée. La distance entre ces 2 locations est d'environ 50 km. Cette valeur représentera la distance de transport de l'argile mais également celle de la bentonite. Les modules Ecoinvent décrivant ces deux matériaux sont respectivement « *Clay, at mine* » et « *Bentonite, at mine* » et ont une masse volumique de 1,5 et 1 t/m³.

La barrière passive est mise en œuvre en couches successives allant de 0,25 m à 0,35 m où l'argile et la bentonite sont mélangées avant d'être compactées. Cette procédure, en prenant le cas où chaque couche mesure 0,25 m, doit donc être répétée 4 fois pour couvrir les 114 000 m² de la décharge avec un dosage en poudre de bentonite de 5 kg/m². Nous obtenons des quantités de 171 000 t d'argile et de 4 560 t de bentonite. Nous ne connaissons pas la quantité d'énergie nécessaire à la mise en œuvre de la barrière passive : nous conservons la valeur de 0,5 L de diesel par m² de décharge.

Nous optons pour un cas où le terrain est renforcé par une couche de 1m d'argile bentonitique placée sur le fond de forme de l'installation, c'est-à-dire sur les flancs et le fond. Les dimensions de l'ISDND sont supposées similaires au « *Sanitary landfill* » suisse, soit un fond de forme de 114 000 m². Pour déterminer la quantité de bentonite, nous avons besoin de sa masse volumique. Une revue bibliographique d'articles et de fiches techniques donne une échelle de valeurs allant de 0,8 à 2,5 kg/L [Dutta, 2015 ; www.dpmf.fr; www.mostfrance.com]). De plus, la perméabilité des bentonites varie entre 10^{-11} et 10^{-14} pour une densité sèche variant de 0,5 à 2,2 [Dixon, 1996] ce qui est en cohérence avec la première échelle de valeur. La densité sèche des bentonites incorporées dans les GSB varient entre 0,8 et 1 [CFG, 2011]. La valeur maximum de 1 000 kg/m³ est reprise pour les calculs de quantité de bentonite nécessaire à la mise en étanchéité du site.

Un géosynthétique bentonitique est placé au dessus de l'argile. Le GSB est un produit manufacturé en forme de nappe constitué d'un assemblage de matériaux comprenant au moins un textile et de la bentonite assurant un rôle d'étanchéité [CFG, 2011]. Il existe plusieurs types de géosynthétiques dont les GSB collés, aiguilletés, cousus ou thermoliés. Un

GSB aiguilleté a été utilisé dans le cadre d'une opération sur une ISDND (Informations données par Noël Delaroche de la société Naldeo).

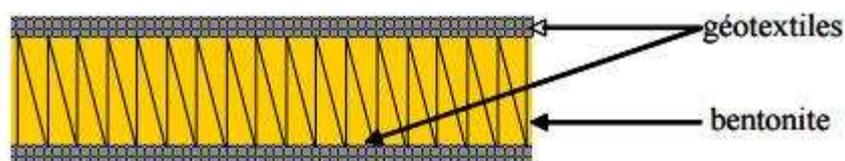


Figure 45 : Schéma d'un géotextile bentonitique aiguilleté [CFG, 2011]

Toutefois, dans le cadre de notre étude, aucune modélisation spécifique pour l'aiguilletage ne sera réalisée. Le GSB est constituée de 2 couches de géotextiles en PEHD de 2 mm chacune contenant de la bentonite à hauteur de 5 kg/m^2 (Communication Naldeo) répartie sur les $114\ 000 \text{ m}^2$ du fond de forme.

4.5.2.2 La barrière active

La barrière active se retrouve au-dessus de la barrière passive et assure le drainage et l'étanchéité active.

La première couche est une géomembrane en PEHD de 2 mm d'épaisseur que l'on retrouve également dans les « *Sanitary landfill* » suisse avec une masse volumique de 960 kg/m^3 . Cette nappe est installée sur le fond de forme ainsi que dans le fond des casiers, soit une surface totale de $138\ 000 \text{ m}^2$ avec $264\ 960 \text{ kg}$ de polyéthylène.

La deuxième couche est un géotextile de protection utilisé pour éviter le poinçonnement de la géomembrane dû aux contraintes mécaniques de la couche drainante. Les caractéristiques de ce film plastique ne sont pas spécifiquement connues. Nous choisissons un géotextile de 2 mm d'épaisseur en EPDM d'une masse volumique de 860 kg/m^3 , soit une quantité de $237\ 360 \text{ kg}$.

La troisième couche est constituée par 50 cm de matériaux drainants de graviers, comme dans les installations de stockage suisses, de masse volumique $1\ 600 \text{ kg/m}^3$, soit une quantité totale de $91\ 200 \text{ t}$.

Enfin, un réseau de drains permet de collecter les lixiviats. Il est composé de tuyaux en PE d'une longueur totale de 12 km. Cette longueur de 12 km est directement reprise du rapport Ecoinvent pour une quantité totale de PE de $194\ 564 \text{ kg}$.

La nature des couches des barrières actives et passives est la principale différence entre les infrastructures françaises et suisses. À partir des nouvelles quantités de matières calculées précédemment, les flux sont modifiés ainsi que le transport associé. Les hypothèses relatives au transport ont été conservées tandis que pour la bentonite qui n'est pas utilisée dans la construction des installations de stockage suisses une distance de 50 km est considérée. Pour le reste, les flux liés à la consommation énergétique issue de la construction de la décharge, à la production et l'acheminement des collecteurs en béton, à la construction de la route et à la fermeture du site sont conservés.

4.5.2.3 Récapitulatif

Le tableau 50 suivant récapitule les différents flux permettant de modéliser les infrastructures d'une ISDND ainsi que les procédés Ecoinvent utilisés :

Tableau 50 : Flux issus de la construction d'une ISDND		
Flux	Quantité	Unité
<i>Bentonite, at mine/CH</i>	$2,85.10^6$	kg
<i>Clay, at mine / CH</i>	$1,71.10^5$	kg
<i>PEHD, granulate at plant/RER</i>	$8,97.10^5$	kg
<i>Synthetic rubber/RER</i>	$2,37.10^5$	kg
<i>Gravel, round at mine/CH</i>	$1,09.10^8$	kg
<i>Excavation, hydraulic digger/RER</i>	$6,98.10^5$	m ³
<i>Excavation, skid steer digger/RER</i>	$6,98.10^5$	m ³
<i>Diesel burned building machine/GLO</i>	$2,97.10^6$	MJ
<i>Bitumen, at refinery/CH</i>	$6,75.10^5$	kg
<i>Concrete, sole plate and foundation, at plant/CH</i>	$2,57.10^2$	m ³
<i>Extrusion, plastic film/RER</i>	$7,28.10^5$	kg
<i>Extrusion plastic pipes/RER</i>	$1,95.10^5$	kg
<i>Chromium steel/RER</i>	$5,47.10^3$	kg
<i>Reinforcing steel/RER</i>	$1,57.10^4$	kg
<i>Cast iron/RER</i>	$2,65.10^3$	kg
<i>Tap water, at user/RER</i>	$3,34.10^6$	kg
<i>Transport lorry20-28t, fleet average/CH</i>	$4,15E10^7$	tkm
<i>Transport freight rail/FR</i>	$3,78E10^5$	tkm

Les principales différences entre une décharge française et une décharge suisse se situent au niveau des matériaux utilisés pour assurer l'étanchéité vis-à-vis des lixiviats. En Suisse, l'utilisation d'enrobés et de graves est privilégiée tandis qu'en France on choisit de l'argile bentonitique et des géosynthétiques. Il est important de noter que par rapport aux modèles proposés par Ecoinvent, les techniques suisses ont pu évoluer notamment pour protéger les ressources minérales telles que les graves. Il est possible que l'étanchéité des dernières installations de stockage suisses ait été réalisée avec plus de géomembranes qu'auparavant.

De plus, une différence dans la modélisation de l'extrusion des différents éléments en polyéthylène (PE) est à souligner. Dans le module original, un procédé « *Extrusion, plastic film* » était répertorié afin de modéliser l'extrusion des drains en PE. Quant à la géomembrane en PE, son extrusion n'est pas prise en compte. Pour notre modélisation d'ISDND, les procédés « *Extrusion, plastic pipes* » et « *Extrusion, plastic film* » permettent de modéliser les extrusions des drains et des géomembranes respectivement. Enfin, pour quantifier ces deux procédés, nous avons pris en compte que pour un 1 kg de ces procédés on obtenait respectivement 0,996 kg de tuyaux extrudés et 0,976 kg de films extrudés. Ces

deux dernières données étant fournies dans la description de ces deux procédés (www.ecoinvent.org).

4.5.3 Lixiviation et dégagements gazeux

Pour évaluer les impacts des émissions des ISDND, il faut estimer les quantités émises, que ce soit sous forme de lixiviation ou de dégagements gazeux. Le modèle Ecoinvent présenté dans la partie 4.3.2., se base notamment sur la composition initiale d'un kg de déchets et le calcul d'un coefficient de transfert. Une première amélioration pourrait se situer au niveau du modèle. Cependant, notre niveau de connaissances n'est pas suffisant pour proposer un nouveau modèle en supposant qu'il y en ait besoin d'un. Pour adapter la quantification de ces flux à un système, il serait possible de réaliser une analyse chimique afin de définir de manière plus récente les compositions en éléments chimiques des différentes natures de déchets.

De plus, le coefficient de transfert à long terme s'arrête à 60 000 ans après le dépôt du déchet ce qui correspond à l'apparition de la prochaine ère glaciaire. Cette ère glaciaire modifierait les conditions actuelles et dans l'approche Ecoinvent le but est d'estimer les émissions qui ont lieu dans les conditions environnementales actuelles. Pour certains éléments chimiques comme les métaux qui prennent plusieurs millénaires avant de se retrouver dans les nappes phréatiques, les impacts peuvent donc être sous-estimés. Pour pallier cela, on pourrait considérer que l'ensemble des éléments présents initialement se retrouvent émis dans l'environnement. Il s'agirait alors d'estimer la quantité de lixiviats récupérée durant les 100 premières années. Cette date des 100 ans après le dépôt des déchets correspond à la période où les différentes couches et barrières de protection agissent encore notamment la géomembrane. Les lixiviats qui ne sont pas récupérés au bout de 100 ans sont alors considérés comme émis définitivement dans l'environnement quel que soit l'horizon temporel envisagé.

4.6 Application aux chantiers de démolition

A l'instar du chapitre 3 consacré au transport, nous appliquons ces modules adaptés au cas français aux chantiers de démolitions présentés au chapitre 2.

4.6.1 Cas de la démolition traditionnelle

Nous rappelons que dans l'étude de cas de la démolition traditionnelle, l'entreprise avait enfoui l'ensemble des déchets à l'exception de l'amiante dans une gravière lui appartenant. Les déchets étant principalement de nature inerte, nous avons opté pour le module Ecoinvent « *Disposal concrete, 5% water, to inert material landfill* ». Dans un premier temps, comparons celui-ci au module adapté issu de la partie 4.4. Les résultats de cette comparaison sont montrés sur la figure 46 :

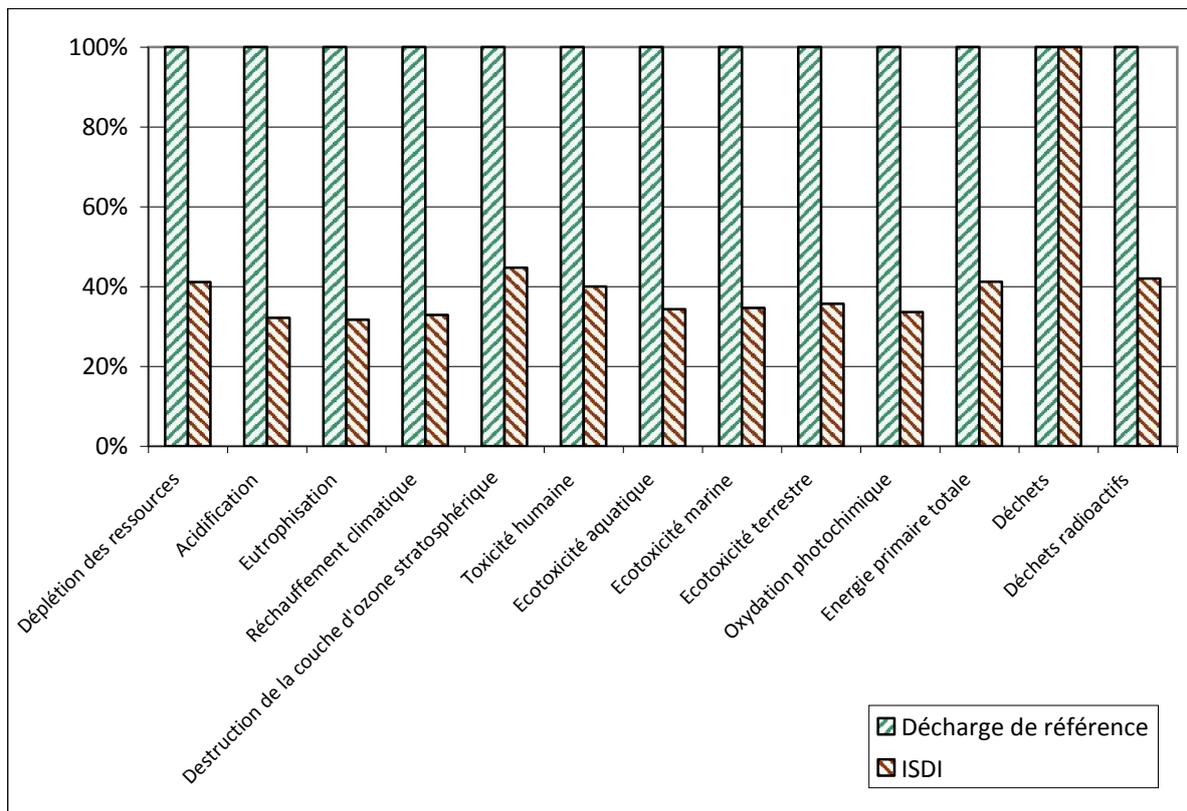


Figure 46 : Comparaison entre une décharge suisse et une décharge française de déchets inertes

Le module « ISDI » que nous avons créé a des impacts logiquement inférieurs au module de décharge de référence quelle que soit la catégorie d'impact considéré. En effet, nous avons considéré qu'il fallait moins de matériaux et de ressources pour construire une ISDI que pour construire une décharge du type « *Disposal, to inert material landfill* ». On s'exempt notamment de la production d'enrobés bitumineux et de graves qui assurent l'étanchéité des structures en Suisse. Quelles sont alors les conséquences sur les résultats finaux présentés dans le chapitre 2 ?

Nous comparons donc les résultats de la modélisation de la démolition traditionnelle selon le module de décharge utilisé. Cette comparaison est réalisée sur la figure 47 :

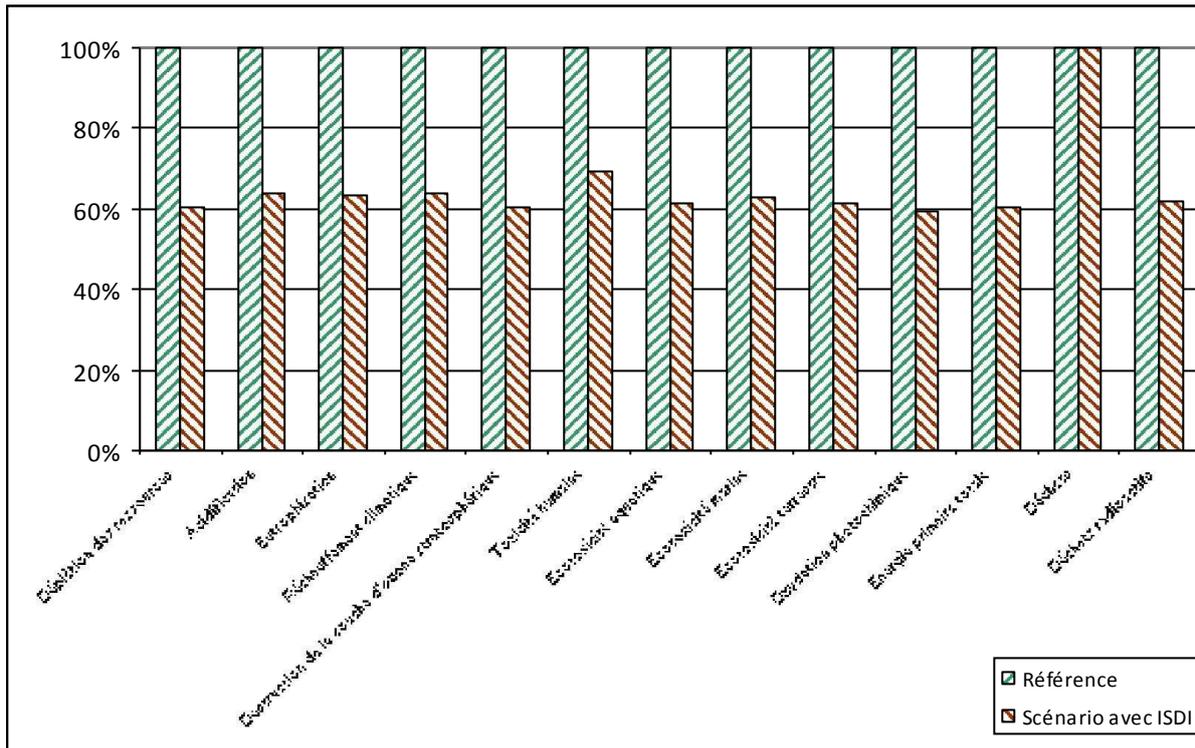


Figure 47 : Comparaison de l'influence du module de décharge choisi pour le scénario de démolition traditionnelle

Dans le chapitre 2, les résultats issus de la modélisation de la démolition traditionnelle avaient souligné la forte contribution de la phase de mise en décharge : une ISDI présentant a priori des impacts plus faibles qu'une installation de stockage suisse dûs à l'absence de barrière active de protection, il est logique de trouver des impacts inférieurs. À l'exception de la catégorie « Déchets », on constate une diminution de 40 % des impacts quelle que soit la catégorie d'impact considérée.

4.6.2 Cas de la démolition sélective

Dans le cas du scénario de démolition sélective, 28 t de déchets ont été envoyés dans une ISDND. Ces 28 t correspondaient à 7 t de DIB qui n'avaient pas trouvé de filières de valorisation (laine de verre ou feutrine par exemple) et 21 t de déchets récupérés après le nettoyage préalable réalisé avant le démarrage des travaux de démolition. Nous comparons donc dans la figure 48 le module adapté dans la partie 4.5 avec le module utilisé dans le scénario de référence « *Disposal, municipal solid waste, 22,9% water to sanitary landfill* » :

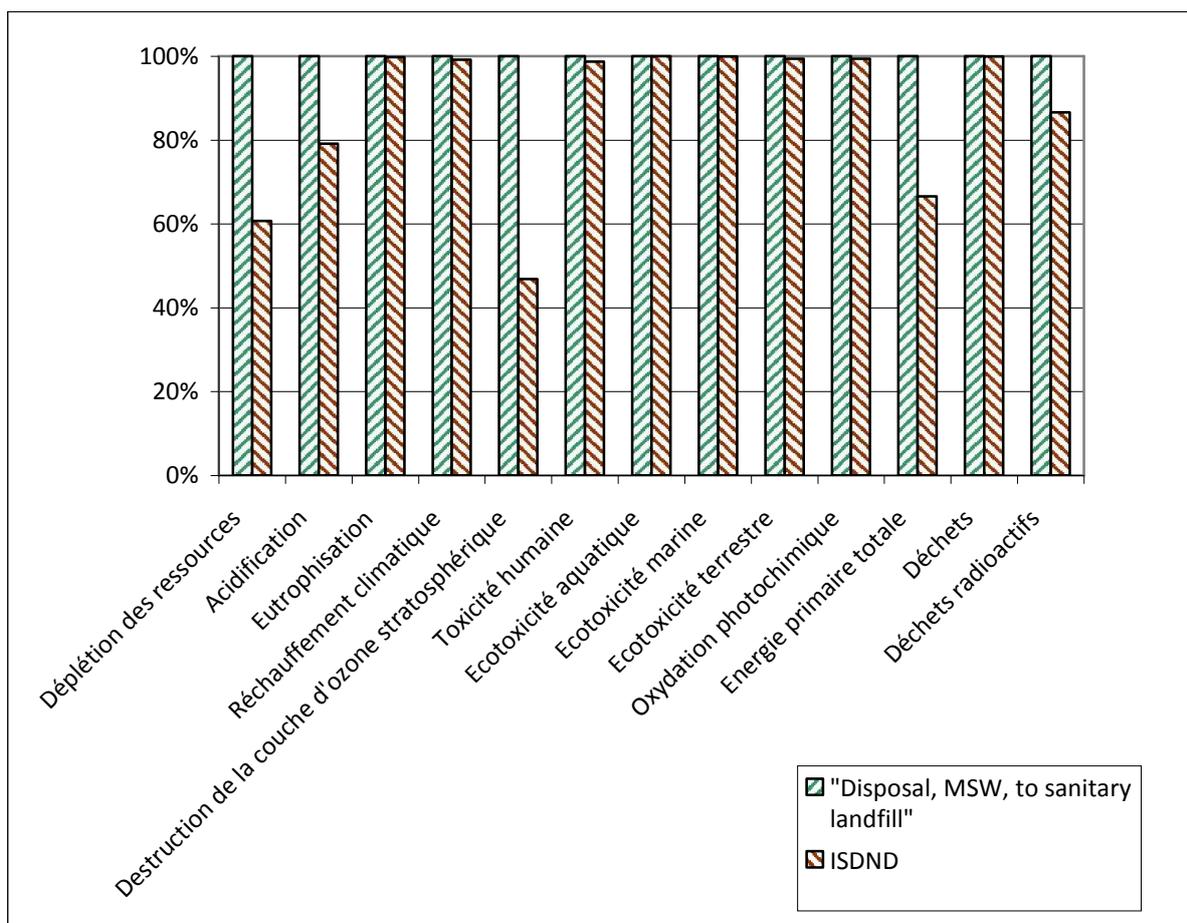


Figure 48 : Comparaison entre un "Sanitary landfill" suisse et une ISDND française

Les impacts d'une ISDND pour un kg de déchet traité sont inférieurs quelle que soit la catégorie d'impact considérée. Cependant, cette différence est anecdotique excepté pour les indicateurs de « Déplétion des ressources », « Acidification », « Destruction de la couche d'ozone stratosphérique » et « Énergie primaire totale ». Les principaux contributeurs dans ces 4 catégories sont la production des enrobés utilisés pour l'étanchéité de l'infrastructure et le transport des matériaux. De plus, la construction d'une ISDND nécessite globalement moins de matériaux : les enrobés et une partie des graves sont remplacés par des géotextiles. Cette variation quant à la quantité de matériaux utilisés est précisée dans le tableau 51 :

	« Sanitary landfill » (en kg)	ISDND (kg)
« Polyethylene, granulate »	$5,12 \cdot 10^5$	$8,97 \cdot 10^5$
« Synthetic rubber »	161	$2,37 \cdot 10^5$
« Gravel »	$1,09 \cdot 10^8$	$2,89 \cdot 10^8$
« Bitumen »	$4,3 \cdot 10^6$	$6,75 \cdot 10^5$

Cette quantité totale de matériaux a une influence sur le nombre de kilomètres à parcourir pour les acheminer : la phase de transport de l'ISDND est plus faible que celle de la décharge suisse.

Quelle est l'influence de cette adaptation de modules sur les résultats finaux ?

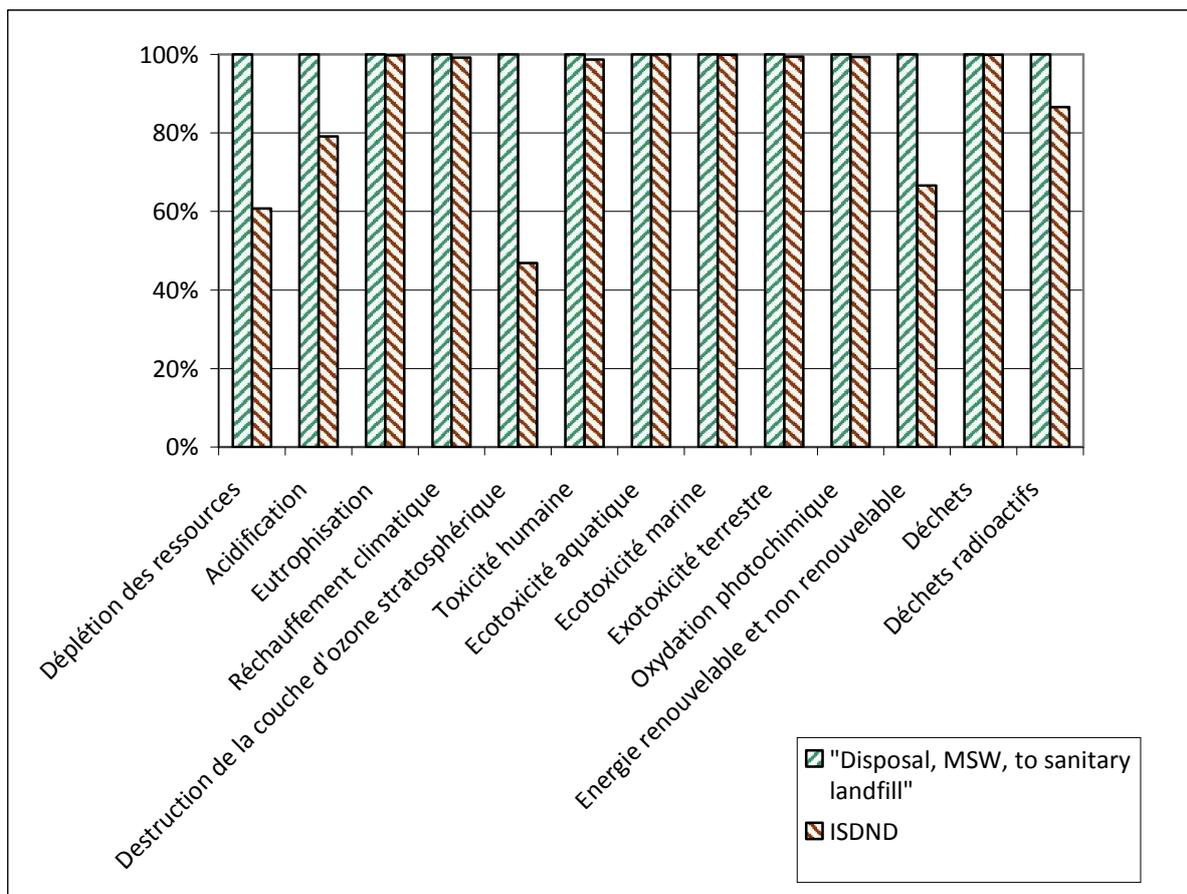


Figure 49: Comparaison de l'influence du module de décharge choisi pour le scénario de démolition sélective

On remarque que le fait d'adapter le module suisse à la situation française n'a que peu d'influence sur l'ensemble des catégories d'impact considéré. Ce résultat s'explique par la faible contribution du module de décharge dans les 4 catégories d'impacts soulignés précédemment. Dans notre scénario de référence, la contribution du module « *Disposal, municipal solid waste, 22,9 % water to sanitary landfill* » pour les catégories « Déplétion des ressources », « Acidification », « Destruction de la couche d'ozone stratosphérique » et « Énergie primaire totale » est respectivement de 3, 3, 4 et 3%. Les différences de conception des installations de stockage, dans notre cas d'étude, n'ont pas d'influence sur les résultats finaux.

Conclusion

Ce quatrième chapitre s'est intéressé aux modules de décharge à cause de leur contribution relative non négligeable dans nos scénarios de démolition traditionnelle et sélective. Notre attention s'est portée sur deux types d'installations de stockage : les « *Inert material landfill* » et les « *Sanitary landfill* » dont les descriptions précises ont été présentées. Ces modules ont en commun de prendre en compte la manutention des déchets ainsi que l'amortissement des infrastructures. De plus, dans le cas des « *Sanitary landfill* », les

émissions gazeuses et liquides émises jusqu'à 60 000 ans après le dépôt des déchets sont comptabilisées. Ces deux modules ont été adaptés à la situation française.

Pour adapter un « *Inert material landfill* » en ISDI, la quantité d'énergie nécessaire à la manutention des déchets a été modifiée à l'aide d'une donnée fournie par le PREDEC ainsi que les quantités de matériaux pour la construction de l'installation de stockage. Ces modifications ont eu une influence sur les résultats finaux de la démolition traditionnelle puisqu'en remplaçant le module initial de décharge par une ISDI adaptée à la situation française, une diminution de 40 % des impacts quelle que soit la catégorie considérée a été observée.

Quant à l'adaptation des « *Sanitary landfill* » en ISDND, deux modifications similaires ont été réalisées : la première portant sur la manutention des déchets et la deuxième sur l'amortissement de l'infrastructure. Par contre, aucune modification n'a été faite sur la quantité de gaz et de lixiviats émise même si le modèle utilisé dans Ecoinvent a été expliqué de manière précise. Il se base notamment sur deux approches permettant d'évaluer la quantité d'émissions selon la nature chimique de l'élément. Nos connaissances ne sont pas suffisantes pour connaître la pertinence de ce modèle ou savoir si des données plus actuelles seraient indispensables pour le renforcer. Une étude approfondie mériterait d'être menée en ce sens. Toutefois, une remarque peut être faite sur la durée de 60 000 ans pendant laquelle sont comptabilisés les lixiviats. Cette durée a été choisie car dans 60 000 ans, le début d'une nouvelle ère glaciaire devrait avoir lieu modifiant de manière profonde les conditions environnementales actuelles. L'objectif étant de calculer les impacts potentiels subis par notre environnement actuel, les émissions au-delà de 60 000 ans ne sont pas intégrées ce qui semble contradictoire avec le mode de pensée ACV. On pourrait donc simplifier le modèle en considérant que tout ce qui n'a pas été récupéré au bout de 100 ans sera émis dans la nature dans un temps suffisamment long.

Ces deux modules adaptés ont alors été comparés aux modules initialement choisis puis intégrés dans un scénario alternatif afin d'évaluer l'influence de l'adaptation sur les résultats finaux. Leur influence est dépendante de la contribution initiale du module de décharge. Dans le scénario de démolition traditionnelle, la contribution du module de décharge était importante (plus de 50 %) sur l'ensemble des catégories d'impacts. L'adaptation a donc logiquement diminué les impacts globaux de la démolition traditionnelle ainsi que la contribution relative de la phase de mise en décharge. Au contraire, dans le cas de la démolition traditionnelle, l'adaptation s'est révélée peu déterminante étant donné que le module adapté présentait des impacts plus faibles sur des catégories d'impacts où l'enfouissement des déchets avait une contribution relative faible.

Chapitre 5

Étude prospective sur le réemploi et la réutilisation dans le bâtiment

Sommaire

LISTES DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	17
LISTE DES ILLUSTRATIONS	19
INTRODUCTION	21
5.1 LE REEMPLOI ET LA REUTILISATION APPLIQUES AU BTP	188
5.1.1 CONTEXTE ET VOCABULAIRE	189
5.1.2 DES EXEMPLES DE REEMPLOI ET DE REUTILISATION	190
5.2 LES CARACTERISTIQUES DU REEMPLOI ET DE LA REUTILISATION	194
5.2.1 LES LEVIERS	194
5.2.1.1 <i>L'augmentation des coûts de la mise en décharge</i>	194
5.2.1.2 <i>Préservation des ressources naturelles</i>	195
5.2.1.3 <i>Bénéfices environnementaux, économiques et sociaux</i>	196
5.2.2 LES FREINS AU REEMPLOI	196
5.2.2.1 <i>La certification des matériaux de réemploi</i>	196
5.2.2.2 <i>Le stockage des éléments récupérés</i>	199
5.2.2.3 <i>la caractérisation du stock</i>	199
5.2.2.4 <i>La localisation du stock</i>	201
5.3 LES BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX DE LA REUTILISATION ?	202
5.3.1 IDENTIFICATION DES PARAMETRES.....	202
5.3.2 NIVEAU DE REUTILISATION	204
5.3.3 LA GESTION D'UNE POUTRE EN BETON ARME ISSUE DE LA DEMOLITION D'UN BATIMENT	204
5.3.3.1 <i>Présentation de l'étude de cas</i>	204
5.3.3.2 <i>Dimensionnement des aciers longitudinaux</i>	206
5.3.3.3 <i>Dimensionnement des aciers transversaux</i>	208
5.3.3.4 <i>Réutilisation de la poutre</i>	209
5.3.3.5 <i>Recyclage de la poutre</i>	214
5.3.3.6 <i>Mise en décharge</i>	217
5.3.4 COMPARAISON DES 3 SCENARIOS	218

L'ère moderne s'est accompagnée d'une profusion de biens et de produits dans les pays développés et d'un sentiment de disposer de ressources illimitées permettant une croissance économique rapide. Ce sentiment s'est estompé ces dernières années pour laisser place au constat que les ressources naturelles dont nous disposions étaient limitées. Au fil des années, des filières de recyclage se sont mises en place afin de préserver les ressources nécessaires au fonctionnement de notre société. Le recyclage permet d'obtenir des flux secondaires de matières économisant ainsi des ressources vierges. Il évite donc les impacts environnementaux liés à leur extraction et à leur transformation tout en émettant une pollution liée au procédé de recyclage lui-même. Le développement des filières de recyclage en lieu et place de l'enfouissement et de l'incinération a fait évoluer une économie dite linéaire où les déchets sont jetés et inutilisés vers une économie dite circulaire où ces mêmes déchets deviennent des ressources.

Cependant, le recyclage ne peut rester à lui seul une solution durable du moins à long terme. En effet, la tentation est grande de considérer le recyclage comme une solution idéale autorisant une consommation abusive des ressources sous le prétexte qu'elles seront recyclées. Une boucle de recyclage est rarement complètement fermée. En premier lieu, il faut considérer le taux de collecte : un élément peut être recyclable mais il a besoin d'être collecté et amené dans une filière spécifique pour être traité. Ce taux de collecte n'est jamais de 100 % et de la matière est d'ores et déjà perdue. Puis, il faut prendre en compte le fait que certains matériaux ne peuvent être recyclés indéfiniment. Dans le cas du recyclage du papier, la qualité des fibres obtenues raccourcissent à chaque traitement demandant l'apport de fibres vierges. Ainsi, le papier ne peut être recyclé que de 2 à 6 fois. En revanche, les métaux peuvent eux être recyclés presque indéfiniment à condition d'être collectés en fin de vie : la nécessité d'extraire des matériaux vierges s'expliquant par des besoins toujours plus importants et des conceptions fondées sur le principe de ressources infinies.

L'industrie du BTP consomme chaque année une grande quantité de matériaux, comme le montre le tableau 52 [ASURET, 2010] :

Tableau 52 : Besoin en matériaux du BTP	
Matériau	Quantité (en million de tonnes)
Gypse	5,6
Granulats	447
Ciment	21,4
Béton	30 millions de tonnes de produits en béton auxquels s'ajoutent 44 Mm3 de béton prêt à l'emploi
Mortier	2,8
Chaux	3,2
Plastique	1,2

Il n'existe pas de données concernant la production de métal dédiée au bâtiment. On estime le stock de métal entre 10 et 15 t par habitant dans les pays développés [ASURET, 2010]. Dans la construction, on retrouve de l'acier (fondation, armatures...), de l'aluminium (menuiserie), du cuivre (tuyau d'alimentation) et du zinc (couverture).

Pour répondre à ses besoins, dans une démarche éco-conceptive, les déchets issus des chantiers de démolition pourraient devenir les ressources des futurs chantiers de construction. Plus particulièrement, les déchets inertes qui constituent près de 70 % des déchets de démolition. Or, aujourd'hui, aucune technique ne permet de recycler le béton afin de récupérer les principaux matériaux le constituant : sable, granulats, ciment. Les pratiques actuelles consistent à concasser les déchets inertes afin d'obtenir des granulats recyclés utilisés en techniques routières. Or, cette voie de valorisation implique une certaine dégradation de la matière ainsi qu'un certain taux de construction et de rénovation des infrastructures routières.

Le recyclage, bien que constituant un rouage essentiel d'une société plus respectueuse de l'environnement, a fait oublier que d'autres solutions alternatives et durables existent : la réutilisation et le réemploi qui, elles également, permettent de préserver des ressources. Ces alternatives peuvent s'appliquer au domaine du BTP.

Il est important de rappeler que des exemples de réemploi et de réutilisation peuvent se retrouver dans l'Histoire de la construction. Par exemple, le réemploi de colonnes et de chapiteaux lors de la construction de la mosquée de Cordoue montré sur la figure 50 ou la réutilisation des pierres issues de la démolition de la Bastille par un entrepreneur privé. Ces pierres ont notamment été utilisées dans la fabrication du pont de la Concorde [Historia, 2009].



Figure 50 : Chapiteaux et colonnes réemployés dans la mosquée de Cordoue (Mosquée de Cordoue par Jialiang Gao)

L'époque moderne est plus avare en exemple de réemploi. On peut cependant citer la reconstruction de la chapelle de Notre-Dame-du-Haut à Ronchamp par Le Corbusier en