



**HAL**  
open science

## Du matériau à l'ouvrage: quelques apports méthodologiques relatifs à l'Analyse de Cycle de Vie

Adélaïde Feraille Fresnet

### ► To cite this version:

Adélaïde Feraille Fresnet. Du matériau à l'ouvrage: quelques apports méthodologiques relatifs à l'Analyse de Cycle de Vie. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Paris Est - Marne-la-Vallée, 2016. tel-01591409

**HAL Id: tel-01591409**

**<https://hal.science/tel-01591409>**

Submitted on 21 Sep 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches

Présenté par Adélaïde Feraille Fresnet

Le 3 juin 2016

**Du matériau à l'ouvrage : quelques apports méthodologiques  
relatifs à l'Analyse de Cycle de Vie**

Laboratoire NAVIER

JURY

Rapporteurs	Dr.	Isabelle Blanc	Mines ParisTech
	Dr.	Daniel Froelich	ENSAM
	Pr.	Dominique Millet	Supmeca
Examineurs	Dr.	Anne Ventura	Université de Nantes
	Dr.	Bruno Peuportier	Mines ParisTech
	Dr.	Jean-Michel Torrenti	IFSTTAR
Directeur d'habilitation	Pr.	Alain Ehrlacher	Ecole des Ponts ParisTech

*A Yannick*

*Tu n'auras pas vu l'aboutissement de ce travail qui pourtant te doit tant*

## Remerciements

Rédiger un rapport d'HDR est tout compte fait assez plaisant. C'est un moment où l'on cherche à donner du sens à notre travail de chercheur et donc un moment où l'on se donne du temps pour prendre du recul. C'est précieux et peu courant dans notre travail quotidien.

En tout premier lieu je souhaite remercier celle et ceux qui ont accepté de rapporter sur ce mémoire. Merci à Isabelle Blanc, Dominique Millet et Daniel Froelich. J'ai particulièrement apprécié les échanges que nous avons eus avant, pendant et après ce jury. Ces échanges m'ont permis de progresser dans la compréhension des méthodes ACV et de leurs applications. J'espère avoir le plaisir de collaborer avec vous dans le futur pour continuer à progresser.

Merci à Anne Ventura d'avoir pris part à ce jury mais aussi pour nos fréquents échanges sur ce sujet de l'ACV dans le domaine de la construction ! J'espère bien qu'ils se poursuivront.

Merci à Bruno Peuportier pour ta participation à ce jury mais également de m'avoir associé à différents jurys de thèse de tes doctorants ainsi qu'à des travaux de recherche via la chaire Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures. Je souhaite que nous soyons encore amenés à collaborer.

Jean-Michel, cela fait de nombreuses années que l'on se connaît, puisque non seulement tu as participé à mon jury de thèse mais en plus tu as été mon directeur de l'enseignement ! Tu m'as toujours fait participer à tes différents cours, j'en suis flattée. Et c'est toujours un plaisir d'échanger avec toi sur des sujets de recherche mais aussi au-delà. Merci pour tout.

Alain je te dois tellement ! Merci de tout ce que tu m'as apporté, de ta confiance et de ton soutien. Je suis touchée et fière d'avoir un tel mentor dans ce domaine de la recherche. Je t'en suis très reconnaissante.

Je tiens à remercier le responsable de l'équipe à laquelle j'appartiens, Jean-François Caron et le directeur du laboratoire, Karam Sab de m'avoir laissée choisir un sujet de recherche qui m'intéressait particulièrement mais n'était pas forcément dans le scope direct du laboratoire Navier. J'ai réalisé lors de la soutenance à quel point ce pari était risqué, merci de votre soutien !

Merci à toutes les personnes qui ont contribué à ce travail et avec qui travailler a toujours été un plaisir, ce travail vous doit beaucoup. Par ordre chronologique : Tiffany, Lina, Fernanda, Greg, Raphael, Sarah et Anne. J'ai été particulièrement touchée de votre présence (physique ou virtuelle) lors de la soutenance et j'espère que nous continuerons à échanger !

Merci à tous les stagiaires qui m'ont apporté chacun beaucoup.

Merci aux collègues de l'équipe MSA, de Navier, mais aussi au-delà qui ont cru en ce projet, m'ont fait participer à des contrats et à des enseignements divers et variés et qui m'ont soutenue et encouragée au quotidien. Au-delà des collègues j'ai la chance de compter des amis parmi eux.

Enfin un merci très très particulier à mon premier lecteur, soutien de tous les jours : Yannick merci, travailler avec toi est un réel plaisir et une source d'apprentissage et d'inspiration. Ne plus travailler avec toi est donc particulièrement difficile, tu manques infiniment ...

Et maintenant hors contexte académique merci à tous les potes qui m'ont soutenu pendant cette année de préparation un peu compliquée ...

Merci à ma famille d'être toujours là.

Théodore, Augustin, Maximilien, François vous êtes ma raison de poursuivre et mon énergie.  
Ce mémoire vous doit tout.

## Sommaire

Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	7
1. Introduction.....	9
2. Les clinkers sulfoalumineux.....	11
2.1. Le process de fabrication du ciment Portland .....	11
2.2. Le clinker sulfo-alumineux.....	13
2.3. Exemples d'application .....	14
2.4. Conclusions et perspectives .....	16
3. Présentation de la méthode Analyse de Cycle de Vie.....	17
4. Application aux matériaux de construction .....	22
4.1. La base de données DIOGEN et méthodologie associée .....	22
4.2. Matériaux acier .....	29
4.3. Appareil d'appui .....	35
4.4. Matériaux composites.....	40
4.5. Conclusions.....	46
5. Application aux ouvrages .....	48
5.1. Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception (contrat de recherche RFF) .....	48
5.2. CIOGEN .....	57
6. Fin de vie, réutilisation .....	61
6.1. Définitions usuelles .....	62
6.2. Pratiques de réemploi dans le monde .....	66
6.3. La problématique du réemploi.....	73
6.4. Exemples de prise en compte du réemploi en ACV ? .....	76
6.5. Vers une économie circulaire.....	86
7. Conclusions et Perspectives .....	88
8. Références bibliographiques.....	94
9. Activités en lien avec l'industrie.....	98
10. Activités d'encadrement et d'enseignement.....	99
10.1. Activités d'encadrement .....	99
10.2. Enseignements .....	100
10.3. Participations à des jurys.....	101
11. Responsabilités administratives.....	101
12. Annexes .....	102
12.1. Fiche DIOGEN Appareil d'appui 4 feuillets.....	102
12.2. Fiche DIOGEN Appareil d'appui 8 feuillets.....	104
12.3. Fiche DIOGEN du profil SOFICAR carbone résine Epoxy/fibre de carbone.....	106
12.4. Fiche DIOGEN du profilé Exelcomposites résine vinylester/fibre de verre .....	108
12.5. Sortie du statut de déchet.....	110
12.6. CV détaillé.....	112
12.7. Liste des publications .....	115

## Liste des figures

Figure 1 : Les cinq étapes du cycle de vie d'un produit .....	17
Figure 2 : Cadre de l'étude de l'ACV [ISO 14040].....	18
Figure 3 : Périmètre de la base de données DIOGEN.....	23
Figure 4 : Matrice Pedigree Ecoinvent .....	25
Figure 5 : Relation entre le Standard Deviation et l'indice de confiance .....	27
Figure 6 : Domaine d'emploi des données.....	28
Figure 7 : Limites du système des produits armatures d'acier .....	29
Figure 8: Comparaison entre les données environnementales de type berceau à la porte de l'usine. Les intervalles représentés pour 500 A et 500 B, représentent la sensibilité à divers paramètres de production (voir Tableau 7 et Tableau 8 pour plus de détails) .....	34
Figure 9 : Schéma des appareils d'appui en élastomère fretté [9].....	36
Figure 10: Schéma-clé des processus pris en compte.....	37
Figure 11 : Tableau récapitulatif des processus.....	38
Figure 12 : Cas 1 – répartition suivant les phases de fabrication de l'appareil d'appui .....	39
Figure 13 : Schéma de principe de la pultrusion.....	41
Figure 14 : Schéma de principe de production de la fibre de carbone (dans le rectangle rouge les données disponibles dans Ecoinvent).....	43
Figure 15. Bilan de fabrication et de fin de vie des constituants sur tout le cycle de vie (durée d'exploitation>100ans) .....	50
Figure 16 : Différentes parties de l'infrastructure ferroviaire .....	52
Figure 17 : Répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée (durée d'exploitation > 100 ans) .....	55
Figure 18 : Répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée .....	56
Figure 19: Etapes et modules correspondants définis pas la norme NF EN 15804.....	58
Figure 20: Aperçu de CIOGEN partie calcul.....	59
Figure 21: Exemple de diagramme résultat .....	59
Figure 22: Hiérarchisation de la prévention et de gestion des déchets (Article 4.1 de la directive 2008/98/CE) .....	64
Figure 23: Villa Welpeloo, SuperUse Studios .....	68
Figure 24 : Exemple de luminaire obtenu avec des matériaux de réemploi .....	72
Figure 25: Prise de décisions [Addis, 2006].....	75
Figure 26: Schéma de l'étude de cas.....	77
Figure 27: Comparaison des trois scénarios sans les impacts évités [Brière, 2016].....	79
Figure 28: Comparaison des trois scénarios avec les impacts évités (Avec 1 : déplétion des ressources ; 2 : acidification ; 3 : eutrophisation ; 4 : réchauffement climatique ; 5 : destruction de la couche d'ozone stratosphérique ; 6 : toxicité humaine ; 7 : ecotoxicité aquatique ; 8 : ecotoxicité marine ; 9 : ecotoxicité terrestre ; 10 : oxydation photochimique ; 11 : énergie renouvelable et non renouvelable ; 12 : déchets en vrac ; 13 : déchets radioactifs.) [Brière, 2016] .....	80
Figure 29: Comparaison de la démolition sélective et de la démolition traditionnelle dans le cas de la résidence Henri Desbal, Toulouse [Brière, 2016].....	81
Figure 30: Découpage de dalle sur un étage, un escalier [Allouch, 2015].....	82
Figure 31: Impacts évités par le réemploi de matériaux [Allouch, 2015].....	84

Figure 32: Impact environnemental des différents procédés de construction [Allouch, 2015]	85
Figure 33: Part relative des impacts entre les procédés et les matériaux [Allouch, 2015]	85
Figure 34: Les trois piliers du développement durable.....	92

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre le clinker Portland et clinker sulfoalumineux.....	14
Tableau 2 : Composition chimique du Sulykal Bleu DH. ....	14
Tableau 3 : Comparaison des différents bétons (émissions de CO <sub>2</sub> et chaleur spécifique). ...	15
Tableau 4 : Comparaison des résistances en compression des différents bétons. ....	16
Tableau 5 : Indicateurs d'impacts environnementaux pris en compte dans la suite ; En rouge sont indiquées les catégories d'impact relatives à la norme NFP01010. On rappelle que nous ne calculons pas ces indicateurs suivant la norme mais suivant la méthode indiquée dans la colonne de droite. Nous avons choisi d'utiliser ces méthodes (CML, EDIP, CED) pour leur représentativité internationale. Concernant les déchets dans la norme NFP01-010, les déchets radioactifs sont inclus dans les déchets solides. ....	21
Tableau 6 : Matrice DIOGEN relative aux exigences pour la qualité des données.....	25
Tableau 7: Inventaire pour les aciers d'armature de type B500 A .....	31
Tableau 8 : Inventaire des aciers d'armature de B500 B .....	31
Tableau 9 : Hypothèses du mix électrique pour la production des aciers d'armature de type B500 A .....	31
Tableau 10 : Hypothèses du mix électrique pour la production des aciers d'armature de type B500 B.....	32
Tableau 11: Process associés au laminage à chaud .....	32
Tableau 12: Process impliqué pour le laminage à froid.....	32
Tableau 13: Distance de transport (km) entre la porte de l'usine et le lieu de construction..	33
Tableau 14: Indicateurs d'impacts environnementaux pour les aciers d'armature.....	33
Tableau 15: Données énergétiques concernant la production de polyacrylonitrile à partir de l'acrylonitrile [Das, 2011] .....	44
Tableau 16 : Données énergétiques concernant la production de la fibre de carbone à partir du polyacrylonitrile [Das, 2011] .....	44
Tableau 17: Process pris en compte dans la modélisation de la production de polyacrylonitrile.....	44
Tableau 18 : Process pris en compte dans la modélisation de la production de la fibre de carbone.....	44
Tableau 19 : Process pris en compte dans la modélisation de la production du profilé résine EPOXY/fibre de carbone produit par SOFICAR carbone .....	45
Tableau 20 : Process pris en compte dans la modélisation de la production du profilé fibre de verre/résine vinylester produit par Exelcomposites.....	46
Tableau 21 : Coût de la mise en décharge dans les installations de stockage [FFB 2010] .....	65
Tableau 22: Modules Ecoinvent et leur quantité associée dans le cas de la réutilisation de la poutre.....	77
Tableau 23: Modules Ecoinvent et leur quantité associée dans le cas du recyclage de la poutre.....	78



Tableau 24: Modules Ecoinvent et leur quantité associée dans le cas de la mise en décharge de la poutre .....	78
Tableau 25: Matériaux choisis dans la base de données Ecoinvent [Allouch, 2015] .....	83

## 1. Introduction

Mon travail de thèse, théorique, m'a permis de découvrir le matériau béton et son comportement de façon très approfondie. Mes quelques mois de post doctorat à Padoue (Italie) m'ont donné l'occasion de poursuivre dans cette voie de la modélisation thermo-hydro-mécanique et de la compréhension fine du matériau.

Au retour de cette expérience j'ai saisi l'opportunité de travailler à la direction de l'enseignement dans le département Génie Civil et Construction de l'Ecole des Ponts.

En parallèle le travail de recherche sur les matériaux se poursuivait avec une ouverture sur des liants alternatifs, leur comportement, leur durabilité, au travers notamment d'essais. Il m'a alors semblé important d'être en mesure de quantifier le caractère « alternatif » de ces matériaux d'un point de vue environnemental. Au début des années 2000, les émissions de CO<sub>2</sub> commencent à être comptabilisées et contrôlées de manière plus insistante et les industries émettrices de dioxyde de carbone communiquent sur leurs efforts. EN 2006, l'OTUA (Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier) déclare que l'industrie sidérurgique en Europe est responsable de 6 % des émissions de CO<sub>2</sub> mais qu'elle a abaissé ses émissions de GES de 18% en 15 ans. En France l'industrie cimentière est responsable de 2,6% des émissions de CO<sub>2</sub> ; au niveau international, cette industrie représente 5% des émissions de CO<sub>2</sub> [Gartner, 04]. Comme pour le matériau acier, les industries cimentières ont travaillé à la réduction de ces émissions. Ainsi Lafarge déclare en 2010 : « *nos émissions brutes de CO<sub>2</sub> par tonne de ciment produit ont baissé de 19 % par rapport à leur niveau de 1990* ».

En prenant conscience de l'importance du coût environnemental du matériau brut, j'ai eu l'occasion de réaliser des premières comparaisons de matériaux relativement à leurs émissions de dioxyde de carbone, paragraphe 2. Les pouvoirs publics s'intéressaient alors essentiellement aux émissions de CO<sub>2</sub> et à la consommation énergétique. Il faut dire que ces deux indicateurs sont souvent corrélés et que les réduire induit un gain économique direct pour l'industriel puisque l'énergie n'est pas réputée bon marché.

Puis, au fur et à mesure de rencontres, de lectures et de recherches, j'ai réalisé l'importance de s'intéresser au multicritère afin de ne pas occasionner de déplacements de pollution et j'ai alors travaillé sur la méthode Analyse de Cycle de Vie et son adaptation au secteur de la construction. Cette méthode ACV ou écobilan, présentée en détail au paragraphe 3, en s'appuyant sur le cycle de vie complet d'un objet ou produit (du berceau à la tombe) et en permettant l'évaluation de catégories d'impacts variées (en allant du changement climatique à la toxicité humaine en passant par les déchets) induit une comptabilisation des flux entrants et sortants dans le but d'une identification des procédés les plus impactants. Son objectif est donc d'aider à la décision en vue de réduire de manière effective les impacts environnementaux d'un objet ou produit ou procédé. Cette méthode est, à l'origine, destinée à des produits industriels (voitures, machines à café, ...). Le premier exemple d'ACV a, par exemple été réalisé à partir de 1969 sur les bouteilles de Coca-Cola<sup>1</sup>

L'adaptation de cette méthodologie au secteur de la construction requiert alors des ajustements dont quelques-uns font l'objet de travaux présentés dans cette HDR. Ainsi le domaine d'application sur lequel l'équipe de recherche à laquelle j'appartiens (Matières et Structures Architecturées) développe son expertise, ajoutée à mon appétence pour le secteur de la construction, ont fait que j'ai tout d'abord cherché à travailler sur les matériaux

---

<sup>1</sup> L'analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service, Académie des technologies

auxquels on a recourt sur le territoire national, paragraphe 4. Puis j'ai eu l'envie, et l'opportunité de réaliser un écobilan à une échelle plus importante soit celle d'un ouvrage en commençant par l'infrastructure ferroviaire linéaire puis l'ouvrage d'art (paragraphe 5). Dans ces cas d'ouvrages de génie civil, les questions liées à la maintenance et à la durée de vie ont été particulièrement étudiées afin de correspondre le plus à la réalité du terrain qui n'est malheureusement pas toujours parfaitement claire. Ainsi nombre d'hypothèses sont réalisées à dire d'expert et on réalise l'importance de ces hypothèses dans les résultats finaux dans lesquels la fiabilité couplée à la sensibilité restent d'importantes questions à travailler. Enfin une dernière partie de mon travail, présenté ici, est encore à l'état très prospectif mais découle des travaux précédents, paragraphe 6. En effet l'étape de fin de vie, étape à part entière dans l'analyse de cycle de vie, m'est apparue particulièrement importante dans ce secteur de la construction. Comme dit précédemment la durée de vie d'un ouvrage est une notion qui peut être ambiguë. On ne construit pas un pont en vue de sa déconstruction et encore moins une infrastructure linéaire. Et pourtant lors d'une ACV cette phase doit être prise en compte et est non négligeable dans le bilan global. Mais quel profit peut-on alors en tirer ? Les questions de déconstruction puis de recyclage voir réemploi qui en découlent peuvent-elles être quantifiées d'un point de vue environnemental ?

## 2. Les clinkers sulfoalumineux

Le béton, usuellement fabriqué avec le clinker Portland est le matériau le plus utilisé au monde. Il représente  $1,7 \times 10^9$  tonne/an [Gartner, 04]. Cependant fabriquer 1 tonne de ciment implique l'émission de 0,8 tonne de dioxyde de carbone. En France l'industrie cimentière est responsable de 2,6% des émissions de CO<sub>2</sub>. Au niveau international, cette industrie représente 5% des émissions de CO<sub>2</sub> [Gartner, 04]. Des recherches ont donc été entreprises en vue de réduire la consommation d'énergie ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette partie se propose de présenter le process détaillé de fabrication du ciment en faisant le lien avec la réduction de la consommation énergétique et des émissions de dioxyde de carbone, puis diverses solutions étudiées par les cimentiers sont présentées. Enfin le clinker sulfoalumineux est détaillé puisque c'est la solution sur laquelle nous avons le plus travaillé.

### 2.1. Le process de fabrication du ciment Portland

#### 2.1.1. Généralités

Le clinker Portland est fabriqué à partir d'un mélange de 80% de chaux (provenant de roche calcaire) et 20% de silice (provenant de l'argile). Ce mélange est mis dans un four à 1450°C, température rendant possible la clinkérisation du ciment Portland. D'un point de vue environnemental ce process de production n'est pas optimal. En effet, d'une part la clinkérisation (transformation chimique) émet du CO<sub>2</sub> uniquement parce que la chaux est l'une des matières premières et donc se décarbonate ; ainsi une part des émissions de CO<sub>2</sub> est due aux matières premières. D'autre part, la haute température (1450°C) à laquelle le process industriel a lieu induit une forte consommation d'énergie, notamment d'origine fossile, et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.

De nos jours, d'après Gartner [Gartner, 04] produire 1 tonne de ciment émet 815kg de CO<sub>2</sub> et consomme en Amérique du Nord 4,2 GJ. Cette consommation d'énergie liée au process varie énormément à cause du type d'énergie utilisée (hydraulique, nucléaire, charbon, ...) et de la qualité des fours. En 1994, les émissions de dioxyde de carbone dues au process de fabrication du ciment Portland proviennent des matières premières pour environ 52% et des combustibles pour environ 48% [Gartner, 04].

#### 2.1.2. Emissions de dioxyde de carbone issues des consommations d'énergie

En 1973, la consommation moyenne de carburant des fours dans les États-Unis était d'environ 7GJ/t [Gartner, 04]. La crise du pétrole et la préoccupation de développement durable ont impulsé une prise de conscience de l'importance de la réduction de la consommation d'énergie. Deux voies ont alors été explorées : l'amélioration du process industriel et le remplacement des combustibles fossiles par des combustibles de substitution.

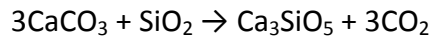
Dans le but d'améliorer le process, des précalcinateurs ont été développés et des nouveaux fours plus performants ont été installés. Des catalyseurs peuvent également avoir été installés dans le but de diminuer la température de clinkérisation. L'utilisation de déchets industriels comme des pneus, des farines animales ou des déchets de l'industrie chimique est maintenant habituelle. L'utilisation des énergies nucléaire ou solaire augmente également. Des expériences ont été réalisées en remplaçant une partie du chauffage par des

micro-ondes [Long et al, 02]. Toutes ces améliorations ont permis de gagner autour de 3GJ/t en une trentaine d'années.

### 2.1.3. Emissions de dioxyde de carbone issues des matières premières

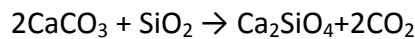
Les émissions de dioxyde de carbone issues des matières premières sont dues au « CO<sub>2</sub> potentiel » contenu dans le calcaire. Le clinker Portland est composé d'alite ((CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S), de belite ((CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S), d'aluminoferrite tetracalcium ((CaO)<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>AF) et d'aluminate tricalcium ((CaO)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>3</sub>A).

La réaction de clinkérisation de l'alite ((CaO)<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S) est la suivante; elle a lieu à 1450°C.



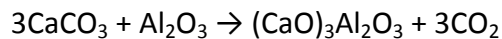
Pour chaque tonne d'alite produite, 579 kg de dioxyde de carbone sont émis.

La réaction de clinkérisation de la belite ((CaO)<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S) a lieu à 1250°C :



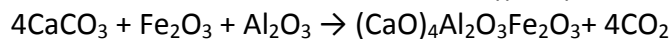
Pour chaque tonne de belite produite, 511 kg de dioxyde de carbone sont émis.

La réaction de clinkérisation de C<sub>3</sub>A ((CaO)<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est la suivante:



Pour chaque tonne de C<sub>3</sub>A produite, 489 kg de dioxyde de carbone sont émis.

La réaction de clinkérisation de C<sub>4</sub>AF ((CaO)<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) est la suivante:



Pour chaque tonne de C<sub>4</sub>AF produite, 362 kg de dioxyde de carbone sont émis.

Si on considère un clinker Portland composé de 20% de C<sub>2</sub>S, 60% de C<sub>3</sub>S, 10% de C<sub>3</sub>A et 10% de C<sub>4</sub>AF, alors nous obtenons que produire 1 tonne de ce clinker émet 535 kg de dioxyde de carbone.

Dans l'objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> induites par les matières premières, différentes solutions ont été explorées. Des travaux ont été menés sur le ciment bélitique sulfoalumineux [Quilin, 01] ; en effet d'une part la belite est produite à une température inférieure à l'alite et d'autre part la réaction de clinkérisation de la belite émet moins de CO<sub>2</sub> que celle de clinkérisation de l'alite. Des travaux intéressants utilisent des déchets industriels comme des phosphogypses et des cendres volantes bas calcium [Elkhadiri et al, 03] en substitution aux matières premières pour la fabrication de ciments bélitiques sulfoalumineux. Des bétons sont également développés avec des ciments à base de pouzzolane, comme des fumées de silice, déchet de l'industrie du métakaolin [Wong et al, 05], [Oliveira et al, 05]. Ces ciments alternatifs peuvent avoir un intérêt dans le cas d'applications particulières, au-delà de leur intérêt environnemental : c'est le cas des ciments aux laitiers de haut fourneau qui ont une bonne résistance aux réactions sulfatiques et sont donc utilisés particulièrement pour les fondations [Osborne, 99]. Recycler les déchets industriels dans les bétons est également une voie intéressante d'un point de vue environnemental, c'est par exemple le travail de Cyr et al [Cyr et al, 00].

Dans ce cadre, nous avons choisi, au laboratoire Navier, de travailler sur le clinker sulfoalumineux [Alaoui et al, 07] et c'est l'objet de ce travail que nous présentons dans la suite. Ce clinker est expérimental et n'est pas disponible en Europe ; il est pourtant, d'après [Gartner, 04] l'une de alternatives bas carbone les plus prometteuses au clinker Portland.

## 2.2. Le clinker sulfo-alumineux

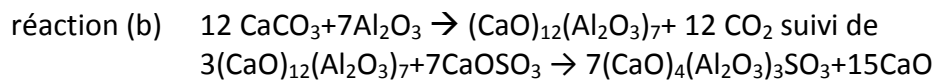
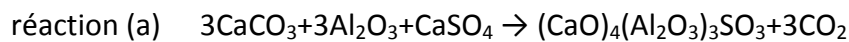
### 2.2.1. Généralités

Le clinker sulfoalumineux est fait à partir d'un mélange de chaux, bauxite et sulfate de calcium. La clinkerisation de ce mélange a lieu à une température inférieure (autour de 1250-1300°C) à celle de la clinkerisation du Portland. Il est composé de 60 à 70% de yeelimite ou kleinite ((CaO)<sub>4</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S), 10 à 20% de belite (C<sub>2</sub>S), 0 à 14% d'aluminoferrite tetracalcium (C<sub>4</sub>AF), 0 à 7% d'aluminate de calcium ((CaO)<sub>12</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>7</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>), [Alaoui, 07].

### 2.2.2. Réactions de clinkerisation

Les réactions de clinkerisation des différents composants du clinker sulfoalumineux sont données dans la suite, [Odler, 00].

Yeelimite:

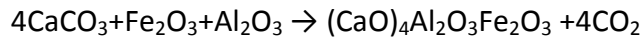


Ainsi fabriquer 1 tonne de C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S ((CaO)<sub>4</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>), en utilisant la réaction (a), produit 216 kg de dioxyde de carbone et avec la réaction (b) 371 kg.

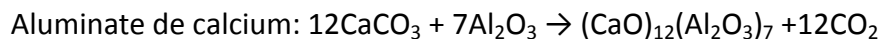


Fabriquer 1 tonne de C<sub>2</sub>S produit 511 kg de dioxyde de carbone.

Aluminoferrite tetracalcium :



Fabriquer 1 tonne de C<sub>4</sub>AF produit 362 kg de dioxyde de carbone.



Fabriquer 1 tonne de C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> ((CaO)<sub>12</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>7</sub>) produit 381 kg de dioxyde de carbone.

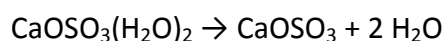
Deux voies de production de la yeelimite coexistent et c'est une combinaison de ces deux voies qui a lieu. Dans la suite nous considérerons que la yeelimite est produite en proportion égale par ces deux réactions.

### 2.2.3. Evaluation environnementale

Le clinker sulfoalumineux utilisé au laboratoire Navier est constitué [Alaoui et al, 07] :

- C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S : 53 %
- C<sub>2</sub>S : 18 %
- CS : 12 %
- C<sub>4</sub>AF : 15%
- résidus: autours 2%

Le sulfate de calcium (CaOSO<sub>3</sub>, CS) est obtenu à partir du gypse à partir de la réaction suivante :



Cette réaction a lieu entre 105°C et 300°C et n'émet pas de CO<sub>2</sub>.

A partir des pourcentages de composants donnés précédemment et en considérant que la yeelite est fabriquée à part égale par le process a et b, nous obtenons que produire 1 tonne de clinker sulfoalumineux émet 305 kg de dioxyde de carbone ce qui en fait un clinker moins émetteur de CO<sub>2</sub> que le clinker Portland. De plus la température de clinkerisation du sulfoalumineux est moins importante que celle du Portland, le coût énergétique de la clinkerisation est donc moindre également. Enfin le clinker sulfoalumineux est également plus friable et nécessite donc moins d'énergie au broyage. Le tableau suivant résume ces comparaisons.

**Tableau 1 :** Comparaison entre le clinker Portland et clinker sulfoalumineux.

	<b>Clinker Portland</b>	<b>Clinker sulfoalumineux</b>
<b>CO<sub>2</sub> émis pour 1 tonne de clinker produit</b>	535 kg/t	305 kg/t
<b>Consommation de chaleur spécifique pendant la clinkerisation [Popescu et al, 02]<sup>2</sup></b>	3.845 GJ/t	3.305 GJ/t
<b>Coût énergétique de broyage [Janotka et al, 99]</b>	45 à 50 kWh	20 à 30 kWh

### 2.3. Exemples d'application

Ce clinker semblant être intéressant d'un point de vue environnemental nous avons réalisé un programme expérimental avec des essais sur cylindres de bétons. Le ciment utilisé est un mélange de clinker sulfo alumineux et de gypse. La présence de gypse est essentielle puisqu'elle est nécessaire à l'hydratation de la yeelite, [Alaoui et al, 07]. La composition du gypse utilisé est donnée dans le Tableau 2.

**Tableau 2 :** Composition chimique du Sulykal Bleu DH.

Composition chimique	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>0.06%</b>
SO <sub>3</sub>	<b>46.87%</b>
CaO	<b>32.25%</b>
K <sub>2</sub> O	<b>0.01%</b>
Na <sub>2</sub> O	<b>0.15%</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.01%</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.02%</b>
SiO <sub>2</sub>	<b>0.36%</b>
F	<b>0.01%</b>

Les bétons sont fabriqués avec des granulats siliceux de Palvadeau, 3 types de sables (0/0.315mm, 0.315/1mm, 1/4mm) et 2 types de gravillons (4/8mm, 8/12mm).

<sup>2</sup> Ces données ne sont pas exactement celles correspondant au clinker sulfoalumineux que nous avons utilisé. Le clinker utilisé par [Popescu et al, 02] contient moins de C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S et plus de C<sub>2</sub>S. On peut supposer que la consommation de chaleur spécifique dans le cas du clinker que nous avons utilisé est moins importante. N'ayant pas de données plus appropriées nous prenons celle de [Popescu et al, 02].

Un programme expérimental complet est présenté dans [Desbois, ]. Je me suis plus particulièrement intéressée à une comparaison « environnementale » de bétons fabriqués avec des liants différents (sulfoalumineux et Portland). Dans le cas du liant sulfoalumineux, deux quantités de gypse sont évaluées.

La formulation des bétons est la suivante :

- Sable 0/0.315: 80 kg/m<sup>3</sup>
- Sable 0.315/1: 130 kg/m<sup>3</sup>
- Sable 1/4: 330 kg/m<sup>3</sup>
- Granulat 4/8: 300 kg/m<sup>3</sup>
- Granulat 8/12: 805 kg/m<sup>3</sup>

Les trois bétons ont la même masse de liant : 400 kg/m<sup>3</sup>.

Le premier béton, C1, est composé pour 1 m<sup>3</sup> de:

- CSA: 310 kg/m<sup>3</sup>
- gypse: 89 kg/m<sup>3</sup>
- eau: 246 kg/m<sup>3</sup>

Le ratio eau sur liant est de 0,6; le pourcentage de gypse ajouté à la masse de liant de 22%.

Le second béton, C2, est composé pour 1 m<sup>3</sup> de:

- CSA: 254 kg/m<sup>3</sup>
- gypse: 146 kg/m<sup>3</sup>
- eau: 246 kg/m<sup>3</sup>

Le ratio eau sur liant est de 0,6; le pourcentage de gypse ajouté à la masse de liant de 36%.

La durabilité de ce type de liant a été étudiée en détails dans la thèse de Tiffany Desbois [Desbois, 09]. Je ne me suis intéressée pour ma part qu'à la question environnementale. Ainsi une comparaison environnementale entre les bétons CSA C1 et C2 et un béton Portland formulé comme suit est présenté Tableau 3:

- Masse de ciment Portland pour 1 m<sup>3</sup> de béton: 400 kg/m<sup>3</sup>
- Masse d'eau: 200 kg/m<sup>3</sup>

Le squelette granulaire est le même que celui des bétons CSA.

**Tableau 3 :** Comparaison des différents bétons (émissions de CO<sub>2</sub> et chaleur spécifique).

	Béton Portland	Béton CSA type C1	Béton CSA type C2
Emissions de CO <sub>2</sub> pendant la réaction de clinkerisation	<b>214 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>94.6 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>77.5 kg/m<sup>3</sup></b>
Chaleur spécifique consommée pendant la clinkerisation	<b>1.54 GJ/ m<sup>3</sup></b>	<b>1.02 GJ/ m<sup>3</sup></b>	<b>0.84 GJ/ m<sup>3</sup></b>

Le Tableau 4 présente les résultats obtenus en termes de résistance de compression de ces trois types de bétons.



**Tableau 4** : Comparaison des résistances en compression des différents bétons.

Type de béton	Rc 1 jour	Rc 3 jours	Rc 7 jours	Rc 28 jours
C1	<b>19 MPa</b>	<b>26 MPa</b>	<b>40 MPa</b>	<b>40 MPa</b>
C2	<b>19 MPa</b>	<b>29 MPa</b>	<b>35 MPa</b>	<b>44 MPa</b>
standard	<b>9 MPa</b>	<b>23 MPa</b>	<b>31 MPa</b>	<b>38 MPa</b>

On peut conclure qu'à 28 jours les résultats obtenus sur les trois bétons sont équivalents. Il est intéressant de noter les résultats très intéressants obtenus pour les bétons de CSA à 7 jours ; des applications particulières impliquant des importantes résistances au jeune âge peuvent être envisagées.

#### **2.4. Conclusions et perspectives**

Ce travail s'est intéressé à la consommation énergétique et aux émissions de dioxyde de carbone liées à la fabrication de clinker sulfoalumineux en comparaison avec le clinker Portland. Du point de vue de ces deux indicateurs le clinker sulfoalumineux semble être intéressant, d'autant plus que ses caractéristiques mécaniques sont proches de celles d'un clinker Portland. Ce premier travail ayant un lien avec des aspects environnementaux m'a conforté dans l'envie d'approfondir ce sujet et notamment en m'intéressant à d'autres indicateurs d'impacts. C'est la raison pour laquelle je me suis intéressée à la méthode d'Analyse de Cycle de Vie et au fait de réaliser des bilans environnementaux tout d'abord à l'échelle des matériaux de construction.

### 3. Présentation de la méthode Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode normalisée dont le cadre général et les lignes directrices sont donnés par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044. Elle permet d'estimer les flux de matières et d'énergies, ainsi que les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service au cours de son cycle de vie et donc d'établir les interactions entre les procédés technologiques et leurs effets sur l'environnement, [Jolliet et al, 2005]. Les phases du cycle de vie comprennent :

- L'extraction et l'acquisition des matières premières,
- La production,
- L'utilisation,
- Le traitement en fin de vie, le recyclage et la mise au rebut.

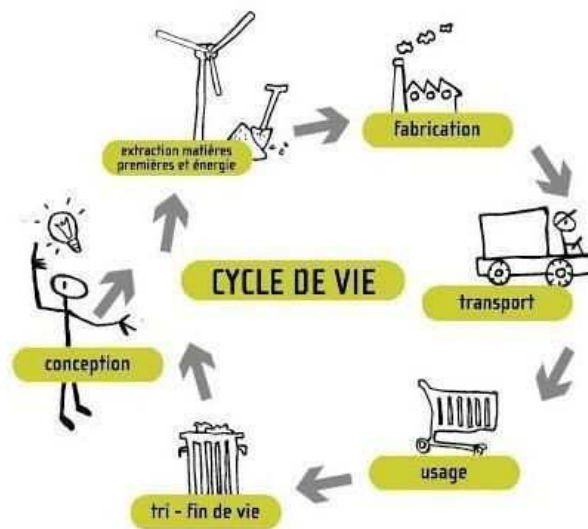
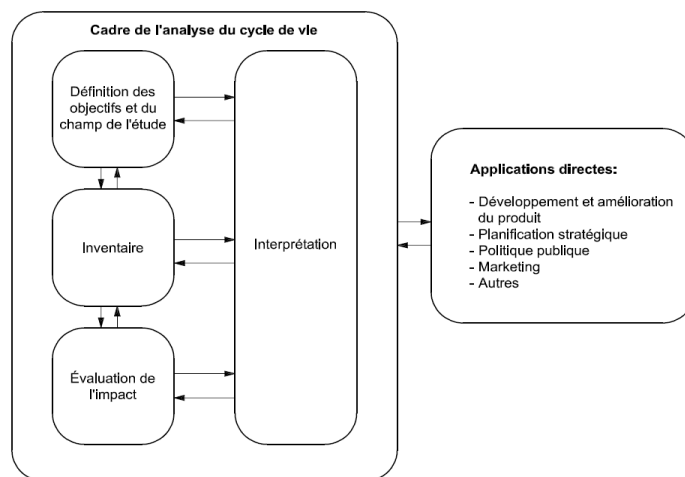


Figure 1 : Les cinq étapes du cycle de vie d'un produit <sup>3</sup>

L'ACV a été initialement développée et formalisée pour des produits pouvant inclure des biens (produits manufacturés, matières issues de procédés, logiciels, etc.) ou des services. Son application aux matériaux de construction et aux constructions, à des ouvrages de Génie Civil et des infrastructures est plus récente et donne lieu à un certain nombre d'études et de questionnements. Nous verrons dans la suite plusieurs travaux qui participent à la généralisation du recours à l'ACV dans le domaine de la construction.

<sup>3</sup> <http://www.eco-conception.fr/ressources/fonds-documentaire/outils-et-methodes/1-evaluation-environnementale-et-acv.html>



**Figure 2 : Cadre de l'étude de l'ACV [ISO 14040].**

L'ACV étant une analyse multicritères, elle permet d'éviter le transfert de pollution d'un milieu vers un autre, induit par exemple, par un changement de procédé. Par exemple passer d'une peinture à base solvant à une peinture à base eau induit un transfert de pollution de l'air vers l'eau. L'ACV permet de le prendre en compte. Le caractère multi-étape de l'ACV permet également d'éviter un transfert temporel de pollution. En effet, l'amélioration du bilan d'une des étapes du cycle de vie peut dégrader celui d'une autre étape. Les données spécifiques à chaque étape du cycle de vie étudié permettent le calcul de l'inventaire complet des ressources prélevées, des polluants émis et des déchets générés.

Enfin, les résultats sont exprimés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie, et rapportés à une unité fonctionnelle intégrant une durée de vie. L'unité fonctionnelle est donc l'unité de compte à laquelle va se référer l'ACV. Elle doit être définie avec précision et en cohérence avec les objectifs et le champ de l'étude car toutes les données d'entrée et de sortie du système ainsi que les flux, lui sont affectés. L'unité fonctionnelle se décompose donc en :

- Une unité de produit,
- Une unité de fonction,
- Une unité de temps (« durée de vie typique »).

Ainsi réaliser une analyse de cycle de vie complète, permet d'évaluer l'impact environnemental global de l'unité fonctionnelle préalablement définie et implique le suivi de la méthodologie décrite dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. C'est un processus itératif décrit ci-après qui se décompose en 4 étapes (cf. Figure 2).

La première étape de définition des objectifs et du champ de l'étude, permet de poser le problème. Cette phase implique la réponse à certain nombre de points cruciaux comme la définition de la fonction et des limites du système, ainsi que celle de l'unité fonctionnelle. Enfin le scénario de référence et les scénarii alternatifs sont également définis dans cette phase.

La deuxième étape d'inventaire du cycle de vie correspond au bilan des entrants et des sortants. Il s'agit de la quantification des émissions dans l'eau, l'air, le sol ainsi que celles des consommations de matières premières renouvelables et non renouvelables. Lors de cette étape il est nécessaire de collecter un grand nombre de données, tâche qui peut s'avérer consommatrice en temps. Cette collecte est faite en lien avec des bases de données. La base de données EcoInvent développée par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et

l'ETH Zurich, contient des données industrielles internationales d'inventaire du cycle de vie sur l'approvisionnement énergétique, l'extraction des ressources, l'approvisionnement en matériel, les produits chimiques, les métaux, l'agriculture, les services de gestion des déchets, et les services de transport. C'est la base la plus complète à l'échelle européenne. On peut également citer la base de données ELCD (European reference Life Cycle Database) développée depuis 2006 par le Joint Research Center. Cette base de données européenne est en accès libre. Elle contient des inventaires de cycle de vie relatifs aux matériaux, à l'énergie, au transport et aux déchets. Cependant, le recours à des données environnementales plus spécifiques peut s'avérer nécessaire. En particulier, utiliser des données représentatives de la seule production française, lorsque les constructions ou ouvrages intègrent de tels produits, peut parfois apparaître plus pertinent. Cette partie est plus particulièrement développée dans le paragraphe 4 avec la base de données DIOGEN créée à l'initiative de l'AFGC, du SETRA et de l'IFSTTAR. Il est important de veiller à la cohérence des données entre elles afin, entre autres, d'éviter des doubles comptages.

La troisième étape d'évaluation des impacts s'appuie sur l'inventaire. Elle précise quelles émissions contribuent à quels impacts environnementaux (réchauffement climatique, toxicité humaine, écotoxicité, etc.). Le principe consiste à convertir les flux des substances susceptibles de contribuer à un impact donné en un flux d'une substance de référence propre à la catégorie d'impact (méthode dite « des équivalences ») afin de calculer un indicateur d'impact. Différentes méthodes de calcul ont été développées par plusieurs équipes de chercheurs et de praticiens (par exemple : CML, CED, ReCiPe, Ecoindicator, EDIP, etc.).

La quatrième étape de l'ACV consiste aussi bien à interpréter les résultats obtenus dans chacune des étapes précédentes qu'à évaluer les incertitudes qui leur sont associées. C'est l'étape qui permet de mettre évidence les points clés et les points d'amélioration.

Enfin une étape supplémentaire indiquée en Figure 2 et intitulée applications directes est une étape à caractère non obligatoire mais qui permet d'aller vers de l'éco-conception.

On sait que le choix des méthodes de calcul d'impacts environnementaux influe sur les résultats<sup>4</sup>. Cependant je ne suis qu'une simple utilisatrice de ces méthodes même s'il est important d'avoir un regard critique. Un rapide tour d'horizon de la bibliographie à ce sujet, notamment en lien avec les recommandations de l'ILCD Handbook<sup>5</sup> indique qu'en fonction des indicateurs choisis les méthodes recommandées diffèrent. On note que la méthode Recipe est recommandée pour les catégories d'impact eutrophisation aquatique ou formation d'ozone photochimique ; la méthode CML est elle recommandée pour la catégorie épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables par exemple. Certaines méthodes recommandées dans l'ILCD<sup>5</sup> ne sont pas implémentées dans les outils d'ACV et notamment dans celui que nous utilisons OpenLCA. Ainsi, compte tenu du domaine d'étude, nous ne nous sommes pas trop éloignés des préconisations normatives [NF EN 15 804 + A1]. Il ressort d'échanges et de réflexions avec différents collègues dans des divers cadres que nous sommes également assez proches de ce qui est fait à l'école des Mines, dans le cadre

---

<sup>4</sup> Mark Goedkoop, Reinout Heijungs, Mark Huijbregts, An De Schryver, Jaap Struijs, Rosalie van Zelm, ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level ([http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf))

<sup>5</sup> <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf>

des indicateurs évalués par le logiciel d'ACV Equer, développé par le Centre efficacité énergétique des systèmes (CES).

Ainsi le Tableau 5 détaille les catégories d'impacts environnementaux évaluées dans les différentes parties présentées dans ce mémoire.

La consommation des ressources énergétiques, est calculée suivant la méthode 'Cumulative Energy Demand (CED)' [Frischknecht, 2003 a], [Frischknecht, 2003 b].

Les déchets et les déchets radioactifs sont calculés par la méthode 'Environmental Design of Industrial Products (EDIP)' [Hauschild, 2003].

Les indicateurs suivants : changement climatique, indicateur épuisement des ressources naturelles, acidification atmosphérique, destruction de la couche d'ozone stratosphérique, formation d'ozone photochimique, eutrophisation, écotoxicité et toxicité humaine sont calculés avec la méthode des équivalences. Le principe consiste à convertir les flux des substances susceptibles de contribuer à ces impacts en un flux d'une substance de référence propre à chaque catégorie d'impact. La méthode est celle développée par le Centre of Environmental Science Université de Leiden CML (Pays-Bas) : Life cycle assessment and operational guide to the ISO standard — final report may 2001 — GEROEN B. GUINEE, final editor — part 2B : operational annex (<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2>).

**Tableau 5 :** Indicateurs d'impacts environnementaux pris en compte dans la suite ; En rouge sont indiquées les catégories d'impact relatives à la norme NFP01010. On rappelle que nous ne calculons pas ces indicateurs suivant la norme mais suivant la méthode indiquée dans la colonne de droite. Nous avons choisi d'utiliser ces méthodes (CML, EDIP, CED) pour leur représentativité internationale. Concernant les déchets dans la norme NFP01-010, les déchets radioactifs sont inclus dans les déchets solides.

<b>Indicateurs d'Impact environnemental</b>	<b>Unité</b>	<b>Méthode</b>
<b>Consommation de ressources énergétiques</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie primaire totale</li> <li>• Energie renouvelable</li> <li>• Energie non renouvelable</li> </ul>	MJ	Cumulative Energy Demand (CED)
<b>Epuisement des ressources</b>	kg équivalent antimoine	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Déchets	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Déchets radioactifs	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
<b>Changement climatique</b>	Kg équivalent CO <sub>2</sub>	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
<b>Acidification atmosphérique</b>	Kg équivalent SO <sub>2</sub>	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
<b>Destruction de la couche d'ozone stratosphérique</b>	Kg CFC équivalent	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
<b>Formation d'ozone photochimique</b>	Kg équivalent éthylène	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Eutrophisation	kg équivalent PO <sub>4</sub>	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
<b>Ecotoxicité</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecotoxicité aquatique</li> <li>• Ecotoxicité marine</li> <li>• Ecotoxicité terrestre</li> </ul>	kg 1,4-DCB-Eq	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Toxicité humaine	kg 1,4-DCB-Eq	Impact-oriented characterisation (CML 2001)

## 4. Application aux matériaux de construction

L'analyse de cycle de vie (ACV) d'un projet urbain nécessite de collecter des données sur des matériaux de construction, mis en œuvre dans les bâtiments et les infrastructures, mais aussi sur les composants et équipements, ainsi que sur de nombreux procédés concernant l'énergie, l'eau, les déchets, les transports etc. La base européenne Ecoinvent regroupe ces différentes données, élaborées selon une méthodologie harmonisée et disponibles sous un format unique. Il s'agit cependant pour la plupart de données génériques européennes, suisses ou allemandes, et plusieurs personnes travaillent à l'élaboration de données spécifiques. En effet, certains process industriels peuvent être spécifiques aux pays dans lesquels ils sont réalisés. En France il existe la base INIES qui donne des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction. Sur la base INIES on retrouve des fiches de déclaration environnementales et sanitaires de produits de la construction. Ces fiches sont réalisées suivant la norme française NFP01-010, leur actualisation au format NF EN 15804 est en cours. Cependant il peut être nécessaire lors de la réalisation d'une ACV d'ouvrage d'avoir des données environnementales non pas par produit mais par matériau. Ce point non traité dans la base INIES est l'objet des travaux traités dans ce chapitre.

Devant ce constat de manque de données environnementales relatives aux ouvrages de génie civil dans le contexte français, un groupe de travail DIOGEN (Bases de données d'impacts environnementaux des matériaux pour les ouvrages de génie civil), initié par l'Association Française de Génie Civil a vu le jour en 2010. L'objectif de ce groupe est de construire une base de données dans laquelle on mette à disposition des modules d'information environnementale des matériaux et éléments utilisés dans la réalisation des ouvrages de génie civil français. Ce groupe de travail est co-animé par l'ex SETRA, aujourd'hui CEREMA, (responsable : Yannick Tardivel) et l'IFSTTAR (responsable : Christian Tessier). Dans ce cadre, la chaire Vinci « Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures » a financé un travail de post doctorat pendant 18 mois, financement qui a concerné la personne de Fernanda Gomes Rivallain. Cette partie a pour objet de présenter certains résultats obtenus par ces travaux de post doctorat.

### 4.1. La base de données DIOGEN et méthodologie associée

La démarche pour la construction de la base de données DIOGEN ([www.diogen.fr](http://www.diogen.fr)), démarche utilisée pour tous les matériaux que l'on souhaite étudier, est détaillée ci-dessous.

- Identification des besoins de données environnementales pour la réalisation d'une ACV d'un ouvrage du génie civil ;
- Identification des données existantes dans les bases de données disponibles (Ecoinvent, ELCD, ...) ;
- Evaluation de ces données existantes en regard avec l'utilisation (ouvrage d'art) : frontières, complétude, représentativité, corrélations technologique, temporelle, géographique ;
- Lorsque la donnée existante n'est pas représentative ou mal adaptée au contexte français, il est nécessaire de construire une nouvelle donnée à partir des bases existantes et lorsque c'est possible on utilise des données spécifiques fournies par les entreprises, les associations, les syndicats, etc. Pour mieux comprendre les processus de fabrication des différents matériaux, on s'appuie sur les experts des différents domaines.

#### 4.1.1. Méthodologie

Cette base de données regroupe des données adaptées au domaine, en matière d'impacts environnementaux, de type "cradle-to-gate", en s'appuyant sur les données existantes par ailleurs, et en les combinant autant que nécessaire de façon à aboutir aux objets usuels du génie civil.

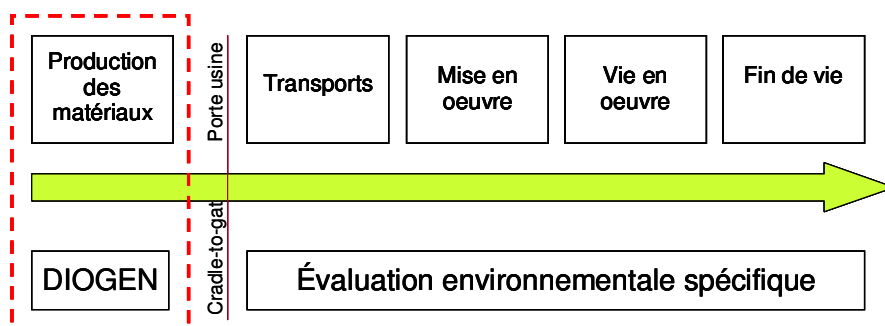


Figure 3 : Périmètre de la base de données DIOGEN

Ce groupe se compose de représentants de producteurs de matériaux, d'entreprises, de bureaux d'études et d'établissements institutionnels. Il est constitué de cinq sous-groupes de travail : un sur les matériaux cimentaires, un sur les aciers, un sur le bois, un sur les revêtements et matériaux composites et un sur la méthodologie.

Jusqu'ici la base de données DIOGEN s'appuyait sur la norme NF P 01010 et s'intéressait donc aux 10 impacts environnementaux recommandés par cette norme : Consommation de ressources énergétiques (MJ), Epuisement de ressources (ADP) (kg éq. Antimoine), Consommation d'eau (litre), Déchets solides (kg), Changement climatique (kg éq. CO<sub>2</sub>), Acidification atmosphérique (kg éq. SO<sub>2</sub>), Pollution de l'air (m<sup>3</sup>), Pollution de l'eau (m<sup>3</sup>), Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg CFC éq. R11), Formation d'ozone photochimique (kg éq. Ethylène).

La base est en cours d'adaptation pour être en phase avec la norme EN 15804. Pour ce faire certains indicateurs vont être amenés à évoluer, par ex l'indicateur épuisement des ressources va se dédoubler en épuisement des ressources abiotiques éléments et épuisement des ressources abiotiques combustibles fossiles.

#### 4.1.2. Fiabilité et représentativité des données

Dans le but de réaliser des ACV pertinentes dans le domaine du génie civil, il a semblé important, au sein du groupe DIOGEN d'être à même d'avoir des notions sur la fiabilité des données de la base.

En premier lieu, ces données doivent être représentatives du matériau étudié dans le but de :

- permettre un choix éclairé entre matériaux répondant au cahier des charges
- évaluer l'apport de matériaux innovants par rapport aux existants.

La pertinence technologique, géographique et temporelle est essentielle, car elle est liée aux approvisionnements en ressources naturelles, à l'utilisation d'énergies spécifiques, etc. De même, il est souhaitable que les mesures de flux de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) soient représentatives de la production moyenne des sites producteurs et non pas d'une période trop courte ou d'une sélection géographique trop restreinte. Pour délimiter l'enveloppe à



considérer, il est préférable de connaître la destination du matériau et les critères de certification autorisant son utilisation.

Les données doivent également présenter un caractère de fiabilité. Leur traçabilité doit être assurée et les sources utilisées mentionnées et si possible disponibles. Par ailleurs, les mesures permettant le calcul des impacts doivent être réalisées selon des procédures et un échantillonnage de la production adaptés.

La méthode envisagée dans le groupe de travail DIOGEN vise à caractériser dans un premier temps la donnée environnementale, puis à décider de son acceptabilité. Dans la mesure où les exigences de qualité d'une donnée utilisée dans un calcul d'ACV peuvent être liées au poids de cette donnée dans le résultat (appréhendé par l'analyse de gravité), cette démarche autorise l'emploi de données de qualité moindre pour des matériaux n'ayant que peu d'influence et de porter l'effort sur les postes déterminants.

Pour ce faire, il est proposé d'utiliser un indice de confiance qui permettra à l'utilisateur de déterminer si la donnée disponible est utilisable ou pas. Cet indice couvrira les différents critères de jugement évoqués ci-dessus. Cette méthode, détaillée dans [Habert et al, 2011] s'appuie sur la méthode de qualification des données utilisée par Ecoinvent.

Cette méthode considère que la loi de distribution des mesures et des données qui en sont issues est modélisable par une loi log normale. Ce type de loi est adapté à un contexte où les effets de plusieurs facteurs indépendants se multiplient entre eux, ce qui est le cas des processus naturels et industriels. C'est alors le logarithme de la variable qui suit une loi normale et non la variable elle-même.

La variation des résultats est caractérisée par une valeur de Standard Deviation (SD). La distribution en loi log normale permet de s'assurer que 95% des données seront incluses dans l'intervalle  $SD_{95}^2$  autour de la valeur de plus haute probabilité (souvent utilisée comme valeur estimée). Plus  $SD_{95}^2$  sera important, plus la dispersion des valeurs de la variable sera grande. Le Standard Deviation couvre donc l'ensemble des incertitudes issues des différents facteurs influents identifiés. On peut ainsi caractériser SD par la formule suivante, Figure 4:

$$SD_{95} = \sigma^2 = \exp \sqrt{[\ln(E1)]^2 + [\ln(E2)]^2 + [\ln(E3)]^2 + [\ln(E4)]^2 + [\ln(E5)]^2 + [\ln(E6)]^2}$$

Les différents  $E_i$  représentent les valeurs des exigences permettant de définir la qualité de la donnée. Les exigences retenues sont définies à partir de la matrice Ecoinvent (Pedigree) et de la norme NF EN ISO 14044. Dans le cas de la matrice DIOGEN nous avons également 5 exigences.

# Pedigree matrix: used to estimate uncertainty factors



Score:	1	2	3	4	5
U1 Reliability	Verified data based on measurements 1.00	Verified data partly based on assumptions OR non-verified data based on measurements 1.05	Non-verified data partly based on qualified estimates 1.10	Qualified estimate (e.g. by industrial expert); data derived from theoretical information (stoichiometry, enthalpy, etc.) 1.20	Non-qualified estimate 1.50
U2 Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations 1.00	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations 1.02	Representative data from only some sites (<<50%) relevant for the market considered OR >50% of sites but from shorter periods 1.05	Representative data from only one site relevant for the market considered OR some sites but from shorter periods 1.10	Representativeness unknown or data from a small number of sites AND from shorter periods 1.20
U3 Temporal correlation	Less than 3 years of difference to our reference year (2000) 1.00	Less than 6 years of difference to our reference year (2000) 1.03	Less than 10 years of difference to our reference year (2000) 1.10	Less than 15 years of difference to our reference year (2000) 1.20	Age of data unknown or more than 15 years of difference to our reference year (2000) 1.50
U4 Geographical correlation	Data from area under study 1.00	Average data from larger area in which the area under study is included 1.01	Data from smaller area than area under study, or from similar area 1.02		Data from unknown OR distinctly different area (north america instead of middle east, OECD-Europe instead of Russia) 1.10
U5 Further technological	Data from enterprises, processes and materials under study (i.e. identical technology) 1.00		Data on related processes or materials but same technology, OR Data from processes and materials under study but from different technology 1.20	Data on related processes or materials but different technology, OR data on laboratory scale processes and same technology 1.50	Data on related processes or materials but on laboratory scale of different technology 2.00
U6 Sample size	>100, continuous measurement, balance of purchased products 1.00	>20 1.02	> 10, aggregated figure in env. report 1.05	>=3 1.10	unknown 1.20
					89

Figure 4 : Matrice Pedigree Ecoinvent

Chacune des exigences fait l'objet d'une cotation individuelle selon des critères précis, qui reflète l'adéquation de la réponse apportée par la donnée avec l'exigence que l'on peut en attendre. Cinq niveaux de cotation sont envisagés afin de permettre la prise en compte de différents niveaux de réponses possibles. Le Tableau 7 présente les exigences de la matrice de cotation de la base DIOGEN. Il est à noter que les niveaux d'exigence ont été ajustés au vu des cas traités dans la base DIOGEN (les matériaux de construction). Ces niveaux d'exigence ne sont donc pas complètement figés et si l'on réalise que l'un des critères d'exigence prend trop d'importance on peut être amené à le modifier. Certaines de ces exigences sont considérées comme particulièrement importantes. C'est le cas des frontières du système et de la corrélation technologique.

Tableau 6 : Matrice DIOGEN relative aux exigences pour la qualité des données.

Exigences	1	2	3	4	5
E0 Frontières du système	1.00	-	1.30	-	1.60
E1 Fiabilité	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
E2 Représentativité	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
E3 Corrélation temporelle	1.00	1.05	1.10	1.20	1.35
E4 Corrélation géographique	1.00	1.02	1.10	-	1.20
E5 Corrélation technologique	1.00	1.10	1.20	1.50	1.60

Regardons un peu plus en détail chacune de ces exigences.

En ce qui concerne la fiabilité, le score obtenu par la donnée est le plus haut si la donnée a été vérifiée et est établie à partir de mesures ; ce score diminue si la donnée est appuyée sur des hypothèses ou non vérifiée ou encore établie à partir d'estimations.

Les principales exigences de la matrice sont les frontières du système (E0) et la corrélation technologique (E5). Ces deux exigences ont en effet des valeurs entre 1.00 et 1.60. Ceci pour s'assurer que si l'une de ces exigences n'atteint pas les niveaux 1 ou 2, le score final ne pourra être maximum pour la donnée.

En ce qui concerne l'exigence E0 relative aux frontières du système, les limites spatiales mais aussi temporelles sont ici prises en compte

L'exigence E5 reflète la fidélité des procédés et des matériaux considérés dans l'étude par rapport à la réalité des procédés et des matériaux utilisés par les entreprises productrices et donc particulièrement cette exigence est le reflet de la technologie utilisée. Il s'agit d'une exigence difficile à évaluer, particulièrement dans le cas de sites de production couvrant une zone géographique pour laquelle la collecte d'informations est difficile, ou une production globale utilisant des technologies différentes, avec une hétérogénéité de ces sites de production, y compris de la performance des équipements. Bien évidemment, le type d'énergie, la composition du mix électrique sont des éléments clés importants à connaître pour noter cette exigence.

Intéressons-nous maintenant à la fiabilité (exigence E1) avec des valeurs pouvant varier entre 1.00 et 1.50. Another important factor in assessing the reliability (E1) is bounded by the values 1.00 and 1.50. Cette exigence couvre la fidélité, la reproductibilité, la traçabilité et la cohérence des mesures. Cette exigence peut être évaluée par la production d'une revue critique ou d'une vérification. La collecte de données, y compris les mesures de flux effectuées sur le site, est également un facteur permettant de juger de la fiabilité des données produites. Des valeurs estimées ne conduisent pas au meilleur score.

La corrélation temporelle (E3) s'assure que la donnée est encore valable et pas obsolète ou trop Vieille en regard des modes de production actuels. Ainsi de vieilles données encore valables ne sont pas pénalisantes

La corrélation géographique (E4) s'attache à vérifier que la zone pour laquelle les données environnementales sont produites correspond bien aux produits sur le marché français du génie civil. Ainsi la situation idéale est celle où sont fournies des données pour tous les sites de production du matériel produit ou importé. Mais dans la plupart des cas, la zone géographique est plus large et englobe des pays ou des sites de production de matériaux ou matériels qui ne sont pas pour le marché du génie civil français. C'est ce qui se passe par exemple dans le cas de l'acier, détaillé paragraphe 4.2.

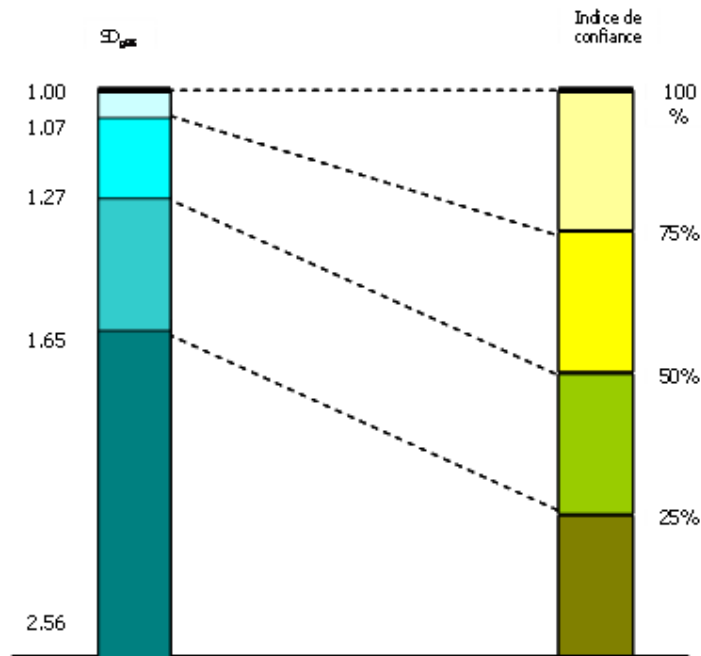
Enfin l'exigence liée à la représentativité (E2) caractérise le fait que la donnée provient de tous les sites de production ou de sites pertinents relativement au contexte. Une donnée peu représentative est issue de peu de sites pertinents ; une bonne représentativité doit donner la priorité aux mesures en continu ou au moins, sur une période appropriée afin de « lisser » les fluctuations de production.

Les échelles de valeur proposées pour ces six exigences sont différentes. L'objectif est de donner la priorité aux paramètres clés. Dans notre cas il est important de souligner l'importance de la technologie de production des matériaux.

A partir d'une valeur de SD qui traduit la qualité de la donnée, on peut déduire un indice de confiance qui répondra ou pas au niveau d'exigence requis:  $I_c = f(SD95)$ , Figure 5.

Les seuils SD95 dans le graphique ci-dessous (Figure 5) correspondent à des niveaux de notation homogènes pour les différentes exigences. Tous les intervalles de confiance sont de 25%, tandis que les intervalles SD95 sont plus importants pour les valeurs moins fiables, ce qui augmente l'effet sélectif de la méthode.

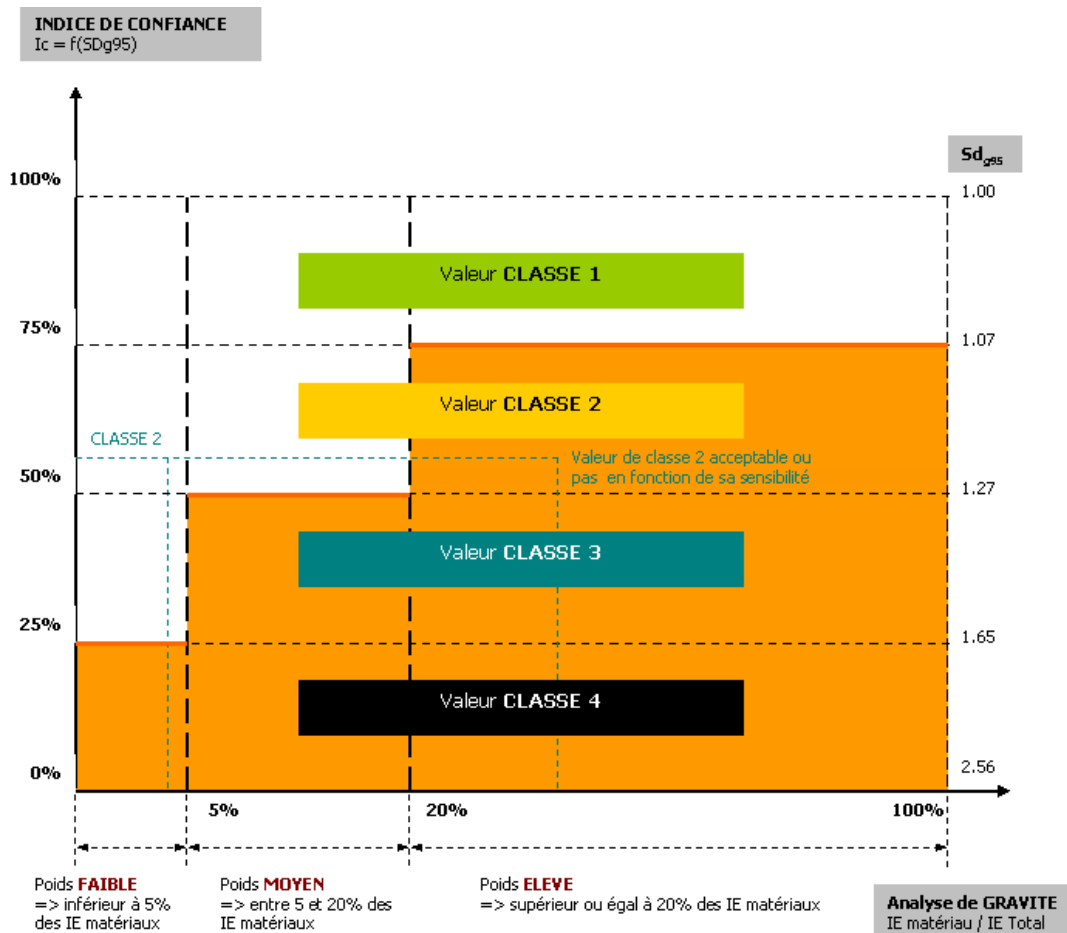
L'indice d'indice de confiance détermine alors si la valeur est acceptable ou non, selon l'importance des impacts du matériau considéré dans l'étude particulière.



**Figure 5 : Relation entre le Standard Deviation et l'indice de confiance**

Enfin on relie l'indice de confiance avec la classe des données, Figure 6, qui traduit l'acceptabilité de la donnée dans un contexte précis. La Figure 6 illustre l'approche proposée pour l'utilisation d'une donnée avec son indice de confiance. Les seuils indiqués sur l'axe horizontal, qui donnent le poids relatif du matériau concerné, sont indicatifs: ils doivent respecter la cohérence de l'étude, en fonction des objectifs définis. La classe de données permet ainsi de voir dans quel cas une donnée est acceptable.

Ainsi, l'utilisation de données situées dans les zones en orange n'est pas recommandée et devrait au moins conduire à des réserves. Les données de classe 4 peuvent être utilisées uniquement en l'absence de meilleures données. Dans tous les cas, l'utilisation de données inappropriées doit être accompagnée d'un commentaire justifiant ce choix et détaillant les réserves nécessaires, ainsi que des résultats d'analyse de sensibilité.



**Figure 6 : Domaine d'emploi des données**

Les données environnementales produites dans cette base de données sont destinées à être utilisées dans des évaluations environnementales à l'échelle des ouvrages en vue de promouvoir l'utilisation de matériaux plus respectueux de l'environnement tout en offrant des performances suffisantes pour un coût approprié. Ces données peuvent être utilisées dans la sélection des variantes et il est donc nécessaire de savoir si ces données sont fiables et représentatives. Cependant, tout système de mesures génère de l'incertitude: la variabilité, l'incertitude dans la mesure elle-même, les limites scientifiques ou technologiques, etc. De nombreuses incertitudes s'accumulent ainsi le long de la chaîne de production et de fourniture de matériaux. Un travail sérieux est à réaliser sur cette question des incertitudes qui n'est pas traitée dans ce rapport. L'indice de confiance n'est qu'une première étape permettant de juger de la pertinence de l'emploi d'une donnée environnementale dans un contexte précis.

Cette démarche et la méthodologie associée ayant été présentées en détail, voyons maintenant son applicabilité. En effet comme dit précédemment l'objectif de la base de données DIOGEN est la mise à disposition de données environnementales représentatives des matériaux et éléments de structure utilisés dans le domaine de la construction en France. Une importance particulière au recueil de données spécifiques à ce domaine est apportée ; un lien fort avec les industriels est nécessaire. Ainsi nous illustrerons la méthode en présentant les principaux résultats sur un matériau (acier) et un élément de structure (appareil d'appui), cette même démarche pouvant alors être appliquée à d'autres matériaux

et d'autres éléments de structure. Une étude relative au bilan environnemental des matériaux composites est également présentée en paragraphe 4.4. Cette étude a également été menée dans le cadre de la base de données DIOGEN mais contrairement aux deux autres études (présentées en 4.2 et 4.3), nous n'avons pas eu accès à des données industrielles aussi fines. Ainsi la démarche est appliquée en utilisant des données industrielles et des données de la littérature.

## 4.2. Matériaux acier

Cette première illustration s'intéresse aux aciers passifs d'armature, employés très fréquemment dans le domaine de la construction, dans le béton armé notamment. Cette étude a fait l'objet d'une communication [Gomes et al, 2012] et d'une publication [Gomes et al, 2013]. L'objectif est d'obtenir les données environnementales de ces aciers vendus sur le marché français en 2011 puis de comparer les résultats avec les données Ecoinvent et Wordsteel, données génériques et donc pas contextualisées. Une distinction est faite entre deux types d'armatures, car ils sont associés aux différents processus de d'érouissage influençant la ductilité des aciers: B500 A et B500 B [NF A35-080-1, 2010].

### 4.2.1. Méthodologie

Le système étudié est un kilogramme d'acier d'armature du B500 A et B500 B. Les limites de l'étude sont présentées dans la Figure 7. Il est limité à la production et la livraison sur site d'un kilogramme de barres d'acier. Le cycle de vie considéré est donc du berceau au chantier de construction. La principale différence entre les deux produits étudiés (B500A et B500B) réside dans le fait que la production des aciers B500 A comprend un laminage à froid qui peut être réalisé dans une usine indépendante de celle réalisant le laminage à chaud. Une phase de transport supplémentaire doit être incluse.

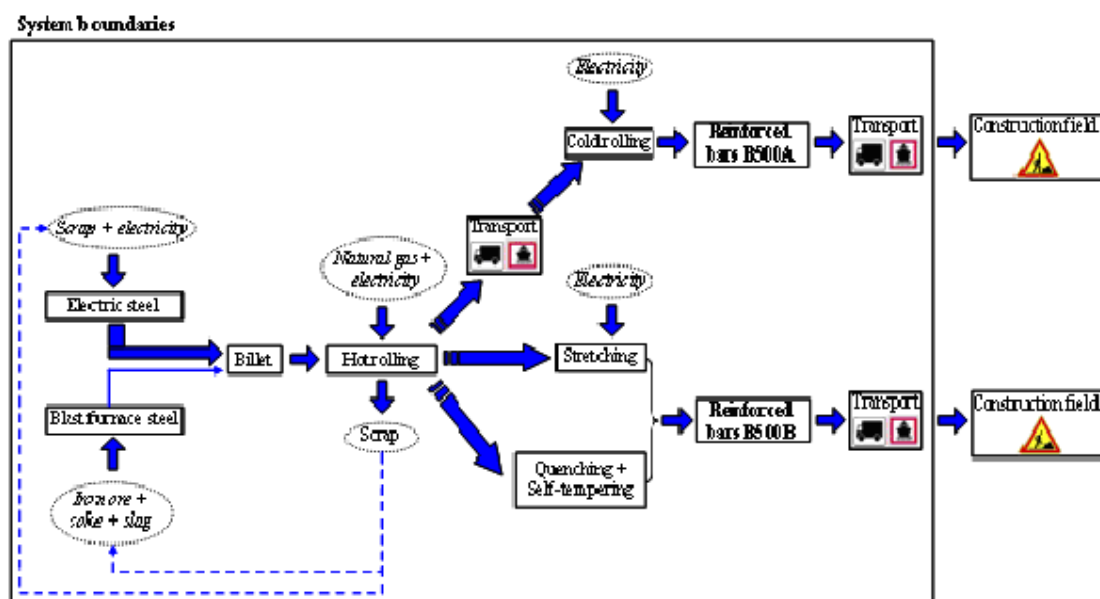


Figure 7 : Limites du système des produits armatures d'acier

Les aciers d'armature du type 500B peuvent également être produits par du laminage à froid. Dans ce travail nous comparons uniquement les aciers 500 A et 500 B produits par laminage à chaud parce que nous considérons que cette hypothèse représente les cas de productions extrêmes.

Pour construire l'inventaire précis de l'acier d'armature vendu en France, la base de donnéesecoinvent a été adaptée au contexte français. Cela a été fait avec l'aide d'experts de l'acier en ajoutant ou supprimant certains processus et en modifiant la contribution des autres processus. Ces experts sont au fait de la qualité et donc du processus impliqué dans la production d'acier car ils sont responsables de la certification de l'acier d'armature vendue en France [AFCAB].

Enfin, pour évaluer la robustesse des hypothèses, les valeurs où nous pourrions ne pas être certains de la valeur exacte ont été modélisées avec une variable ayant une moyenne, une valeur maximale et une valeur minimale. Avec ces intervalles, il est possible d'effectuer une analyse de Monte Carlo pour avoir une valeur moyenne de la charge environnementale du produit armature d'acier et un écart-type autour de cette valeur.

Nous avons choisi d'appliquer la méthode d'analyse d'impact CML 2011 [Guinée et al, 2002] en s'intéressant plus précisément aux indicateurs suivants : consommation des ressources abiotiques (kg eq antimoine), acidification atmosphérique (kg eq SO<sub>2</sub>), eutrophisation (kg eq PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>), changement climatique (GWP100) (kg eq CO<sub>2</sub>), destruction de la couche d'ozone (ODP) (kg eq CFC-11), toxicité humaine (kg eq 1,4-DCB (1,4-Dichlorobenzène)), écotoxicité aquatique (kg eq 1,4-DCB), écotoxicité marine (kg eq 1,4-DCB), écotoxicité terrestre (kg eq 1,4-DCB) et oxydation photochimique (kg eq C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). Les simulations sont réalisées avec le logiciel SimaPro.

#### 4.2.2. Données utilisées

Les hypothèses utilisées pour construire les inventaires des aciers d'armature B500 A et B500 B sont présentées dans le Tableau 7 et le Tableau 8.

Il existe deux procédés de production d'acier : hauts fourneaux (BF) et électrique (EAF). Près de 100% des aciers d'armatures consommés en France sont faits avec le procédé électrique [AFCAB, communication personnelle]. Il est important de noter que le procédé EAF représente l'acier recyclé puisque la principale matière première est la ferraille alors que le procédé BF est celui qui utilise du minerai de fer comme matière première (Figure 7).

L'acier d'armature est produit à partir de billettes d'acier non allié [NF EN 10 020].

L'acier n'étant pas toujours produit dans le même pays, un mix énergétique de référence a été modélisé en fonction de la provenance des différents aciers utilisés sur le territoire français (relativement à leur masse). Le Tableau 9 et le Tableau 10 présentent les hypothèses considérées.

**Tableau 7: Inventaire pour les aciers d'armature de type B500 A**

Reinforced bars type B500 A				
Parameters	Origin of data	Mean	Minimum	Maximum
Steel process nature				
electric steel (%)	Ecoinvent process : " <i>steel, electric, un-and low-alloyed, at plant/RER</i> "	98	95	100
	Ecoinvent process : " <i>steel, converter, unalloyed, at plant/RER</i> "	2	5	0
Electricity mix (%)	Ecoinvent process : " <i>electricity, medium voltage, at grid</i> "	Reference mix (table 5)	French electricity	German electricity
Treatment type				
hot rolling (1kg)	Ecoinvent process changed (table 3) : " <i>hot rolling, steel, RER</i> "	---	---	---
	Industry data (table 4)	---	---	---
Transport distance (km)				
to the cold rolling plant	Ecoinvent process - " <i>transport, lorry &gt; 32t, EURO 4 / RER</i> "	300	0	1000
	Ecoinvent process - " <i>transport, lorry &gt; 32t, EURO 4 / RER</i> " (table 7)	686	0	1445

**Tableau 8 : Inventaire des aciers d'armature de B500 B**

Reinforced bars type B500 B				
Parameters	Origin of data	Mean	Minimum	Maximum
Steel process nature				
electric steel (%)	Ecoinvent process : " <i>steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER</i> "	98	95	100
	Ecoinvent process : " <i>steel, converter, unalloyed, at plant/RER</i> "	2	5	0
Electricity mix (%)	Ecoinvent process : " <i>electricity, medium voltage, at grid</i> "	Reference mix (table 6)	French electricity	German electricity
Treatment type				
hot rolling (1kg)	Ecoinvent process changed (table 3): " <i>hot rolling, steel, RER</i> "	---	---	---
	Industry data : (1/2) of " <i>cold rolling, steel, RER</i> " energy	50	0	100
	Industry data	50	100	0
Transport distance (km)				
to the construction field (table 7)	Ecoinvent process - " <i>transport, lorry &gt; 32t, EURO 4 / RER</i> "	686	0	1445

**Tableau 9 : Hypothèses du mix électrique pour la production des aciers d'armature de type B500 A**

France	Germany	Belgium	Other countries
3/4	1/10	1/8	1/100



**Tableau 10 : Hypothèses du mix électrique pour la production des aciers d'armature de type B500 B**

France	Germany	Spain	Italy	Other countries
2/3	1/8	1/10	1/16	1/20

Concernant le "traitement" de l'acier, l'inventaire pour le laminage à chaud a été construit en utilisant uniquement, parmi les process Ecoinvent [Ecoinvent Report part XV, 2009] de laminage à chaud, les sub-process qui étaient pertinents pour la production des aciers d'armatures B500 A et B500B. Ceux-ci sont détaillés dans le Tableau 11. De la même façon, la modélisation Ecoinvent du process de laminage – à partir du laminage à froid – a été étudiée en vue d'identifier les sub-process pertinents pour les aciers d'armature. Le laminage à froid a alors été modélisé par une consommation d'énergie, comme détaillé dans le Tableau 12 avec le mix énergétique présenté dans le Tableau 9. Les valeurs d'énergie utilisées proviennent de données industrielles spécifiques.

**Tableau 11: Process associés au laminage à chaud**

Process involved
Ecoinvent process steps
<i>Hot rolling, steel, furnace</i>
<i>Hot rolling, steel, descaling</i>
<i>Hot rolling, steel, hot rolling</i>
<i>Hot rolling, steel, waste water treatment plant</i>
<i>Hot rolling, steel, overall</i>
<i>Hot rolling, steel, packaging</i>

**Tableau 12: Process impliqué pour le laminage à froid**

Process involved	Amount (kWh)
Ecoinvent process	
<i>Electricity, medium voltage, at grid</i>	0,035

Le parcours de production spécifique pour l'acier de type B500 B comprend soit un process d'étirement soit un process de «trempe + auto-revenu». Les données industrielles ne sont pas très précises concernant la proportion relative de chacun de ces process. Cette proportion a donc été introduite comme un paramètre dans le modèle ACV. Le procédé d'étirage est modélisé par une consommation d'électricité qui représente la moitié de la consommation d'énergie du procédé de laminage à froid. Le processus de «trempe + auto-revenu» n'implique pas d'effets significatifs.

Les distances de transport vers les chantiers ont été estimées en fonction des distances séparant les capitales des pays producteurs d'acier de Paris. La distance considérée pour la production française est de 500 km. Cette approche surestime les distances de transport étant donné que les principaux producteurs étrangers (Allemagne, Espagne, Italie) sont très proches de la frontière avec la France. Tous les transports sont considérés comme étant effectués par camion à l'exception de la Turquie, où une partie de la distance a été

considérée comme étant effectuée par bateau (Tableau 13). La distance peut varier entre une valeur minimum de 0 km et une valeur maximum de 1445 km. Elle correspond à la distance séparant Paris de Rome, c'est la distance maximale considérée pour le transport camion.

La distance de transport supplémentaire, qui doit être incluse pour B 500 A en raison du fait que l'usine où est réalisé le laminage à froid et celle où est réalisé le laminage à chaud ne sont pas toujours les mêmes, a été modélisée par un transport en camion sur une distance allant de 0 à 1000 km et avec une valeur moyenne de 300 km.

**Tableau 13: Distance de transport (km) entre la porte de l'usine et le lieu de construction**

France	Germany	Spain	Italy	Luxembourg
500	1053	1272	1445	400
Switzerland	Belgium	United Kingdom	Turkey	Netherlands
585	309	451	3870*	517

\* 2800 km by boat and 1070 km by truck

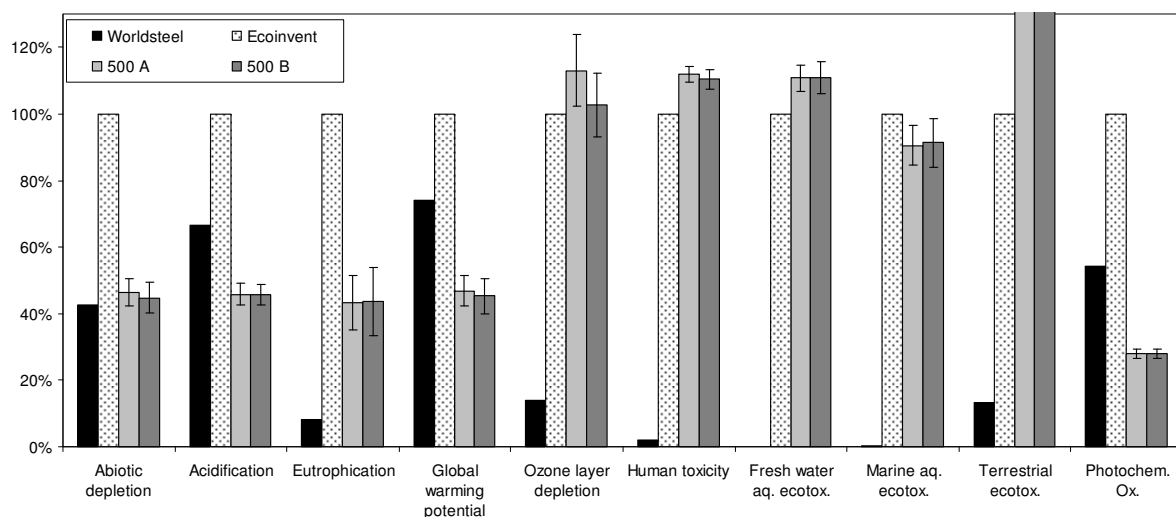
#### 4.2.3. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 14. Ils peuvent être comparés aux valeurs obtenues par WorldSteel Association et aux valeurs de l'inventaire d'acier renforcé disponible dans Ecoinvent. Pour rendre cette comparaison possible, les transports entre la porte de l'usine et le lieu de chantier ne sont pas pris en compte. Enfin comme la distinction B500A et B500B n'existe pas dans ces bases de données, une seule valeur de référence est calculée pour les bases existantes.

Les valeurs d'impacts sont présentées Figure 8.

**Tableau 14: Indicateurs d'impacts environnementaux pour les aciers d'armature.**

Impacts	Unit	Worldsteel	Ecoinvent	B500 A	B500 B
Abiotic depletion	kg Sb eq.	0,00540	0,01264	0,00586	0,00567
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq.	0,00336	0,00504	0,00231	0,00230
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq.	0,00025	0,00309	0,00134	0,00135
Global warming (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,10199	1,48607	0,69700	0,67200
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq.	8,4E-09	6,1E-08	6,9E-08	6,2E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq.	0,01603	0,78167	0,87500	0,86300
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq.	0,00110	0,95638	1,06000	1,06000
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	3,13019	1292,80	1170,00	1180,00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq.	0,00348	0,02631	0,06440	0,06430
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq.	0,00044	0,00080	0,00022	0,00023



**Figure 8: Comparaison entre les données environnementales de type berceau à la porte de l'usine. Les intervalles représentés pour 500 A et 500 B, représentent la sensibilité à divers paramètres de production (voir Tableau 8 et Tableau 9 pour plus de détails)**

Les résultats obtenus par la modélisation développée dans ce travail sont nettement inférieurs ou égaux aux valeurs Ecoinvent, sur tous les indicateurs sauf l'écotoxicité terrestre. L'exception sur cet indicateur est liée à la forte proportion d'acier électrique (EAF) pris en compte dans cette étude. Actuellement l'acier d'armature dans Ecoinvent est modélisé avec un ratio entre acier électrique (EAF) et acier de haut fourneau (BF) respectivement de 37% et 63%. Or on sait que la production d'acier électrique implique de grandes émissions de mercure [Pirrone and Mahaffey, 2005], ce qui conduit à des impacts plus importants sur l'écotoxicité terrestre.

Pour toutes les autres catégories d'impact, et spécialement pour l'acidification et le potentiel de réchauffement climatique, l'acier de haut fourneau (BF) a des impacts beaucoup plus importants que l'acier électrique (EAF). C'est la raison pour laquelle les valeurs d'impacts pour les aciers d'armatures français, provenant principalement de la filière électrique, ont des valeurs inférieures à celles d'Ecoinvent d'environ 50%.

La comparaison avec les données WorldSteel Association montrent la même tendance. Même si la répartition entre filière électrique et filière haut fourneau n'est pas précisée dans ELCD, il est probable qu'elle est inférieure à celle des aciers d'armature français.

En outre, le fait d'avoir des valeurs inférieures de un à deux ordres de grandeur même pour l'eutrophisation qui est connu pour être un indicateur plus robuste que les indicateurs de toxicité peut être due à un inventaire incomplet (notamment pour les émissions indirectes ou des considérations d'infrastructure).

Par conséquent, à partir de cette comparaison, il semble clair que les valeurs d'impacts proposées dans cette étude sont inférieures à celles d'Ecoinvent et de Wordsteel, à l'exception de l'écotoxicité terrestre qui tend à être le principal problème causé par l'utilisation intensive d'acier recyclé en filière électrique. Le problème des déchets radioactifs n'a cependant pas été évalué.

Enfin, il n'existe pas de différence significative entre les types B 500A et B 500B, même avec une distance variant de 0 à 1445 km.

#### 4.2.4. Conclusions

En conclusion, cette étude montre que la plupart des impacts spécifiques pour l'acier d'armature vendu en France sont inférieurs aux données des bases génériques et ceci probablement parce que le contexte français est différent du contexte des autres pays européens. Les aspects de toxicité humaine et d'éco-toxicité semblent équivalents, il serait intéressant d'examiner les indicateurs orientés dommages (dommage à la santé humaine, dommage à la qualité des écosystèmes). Une procédure de normalisation pourrait alors aider à une comparaison plus globale sur l'ensemble des indicateurs : la contribution de la filière acier peut être plus importante sur certains indicateurs que sur d'autres.

D'autre part, il n'y a aucune différence entre 500 A et 500B et aucune grande variation avec la modification de transport. Par conséquent, il est possible d'utiliser les données qui sont proposés dans cette étude pour chaque structure de génie civil construite en France quelle que soit la catégorie de l'acier et la distance de l'usine.

Cette étude permet donc de simplifier considérablement l'évaluation environnementale de l'acier d'armature utilisé en France.

Un travail de ce type est en cours sur les aciers de câbles de précontrainte.

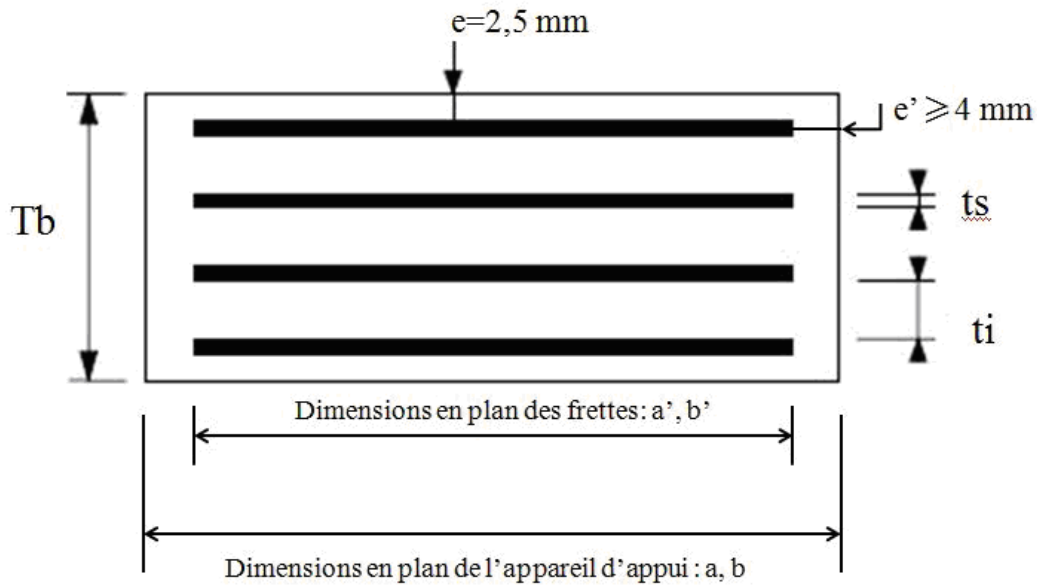
Au-delà de la comparaison entre les données Worldsteel, Ecoinvent et les données construites, il serait intéressant de prendre en compte des indicateurs supplémentaires. Les indicateurs sur les ressources, les déchets (y compris radioactifs) et les indicateurs orientés dommages (santé, biodiversité) seront, en effet, étudiés prochainement, afin d'intégrer ces données dans la base de données DIOGEN.

### 4.3. Appareil d'appui

Le paragraphe précédent présente le résultat d'un travail sur un matériau spécifique donnant lieu à une fiche DIOGEN. Dans le cadre d'analyses de cycles de vie à l'échelle de l'ouvrage, il est nécessaire d'avoir des informations sur différents autres types de matériaux ou objets constitutifs ou équipements de l'ouvrage. A ce titre un travail sur les appareils d'appui de pont a été réalisé ; l'appareil d'appui étant un élément structurel d'un ouvrage. Ce travail a fait l'objet de fiches DIOGEN mais le travail d'investigation continue sur plusieurs autres matériaux ou objets. On citera, sans être exhaustifs, les revêtements, les produits d'étanchéité, les joints de dilatation.

Ce travail a été réalisé par Hélène Hillion encadrée par Fernanda Gomes ; il a donné lieu à une communication lors des rencontres GC en mars 2013 [Hillion et al, 2013].

Sur conseils d'experts, le choix, dans le cadre de la base de données de l'AFGC, s'est porté sur un appareil d'appui en élastomère fretté de type B de dimension en plan 400\*500 mm<sup>2</sup> qui est une dimension en plan couramment utilisée. L'étude a été menée sur deux cas particuliers : l'un à 4 feuillets internes d'élastomère, l'autre à 8 feuillets internes.



**Figure 9 : Schéma des appareils d'appui en élastomère fretté [9]**

L'épaisseur des feuillets externe ( $e$ , Figure 9) correspond à l'épaisseur minimale imposée par la norme NF EN 1337-3 : 2.5mm. L'épaisseur des feuillets internes ( $t_i$ , Figure 9) vaut 12mm. L'épaisseur des frettes en acier ( $t_s$ , Figure 9) est de 4mm. L'épaisseur de l'enrobage ( $e'$ , Figure 9) correspond à l'épaisseur minimale imposée par la norme NF EN 1337-3 : 4mm. Ainsi, l'étude s'est portée sur des appareils d'appui de hauteur totale ( $T_b$ , Figure 9) de 73mm et de 137mm respectivement.

L'unité fonctionnelle choisie pour ce module d'information environnementale est l'appareil d'appui en élastomère fretté de type B de dimension en plan  $400 \times 500 \text{ mm}^2$  ayant pour but de transmettre des charges verticales (poids propre et poids du trafic) sans contrainte excessive sur le support d'appui et de permettre les mouvements horizontaux dans toutes les directions.

Les entreprises fabriquant des appareils d'appuis maintiennent la confidentialité de leurs données. Des données de fabrication ont tout de même pu être récupérées à l'aide du manuel qualité d'une entreprise datant de la même période que la présente étude. Certaines données sont restées inconnues et sont signalées par la suite. La Figure 10 présente le processus de fabrication d'un appareil d'appui en élastomère fretté ; les différentes étapes de fabrication y sont détaillées.

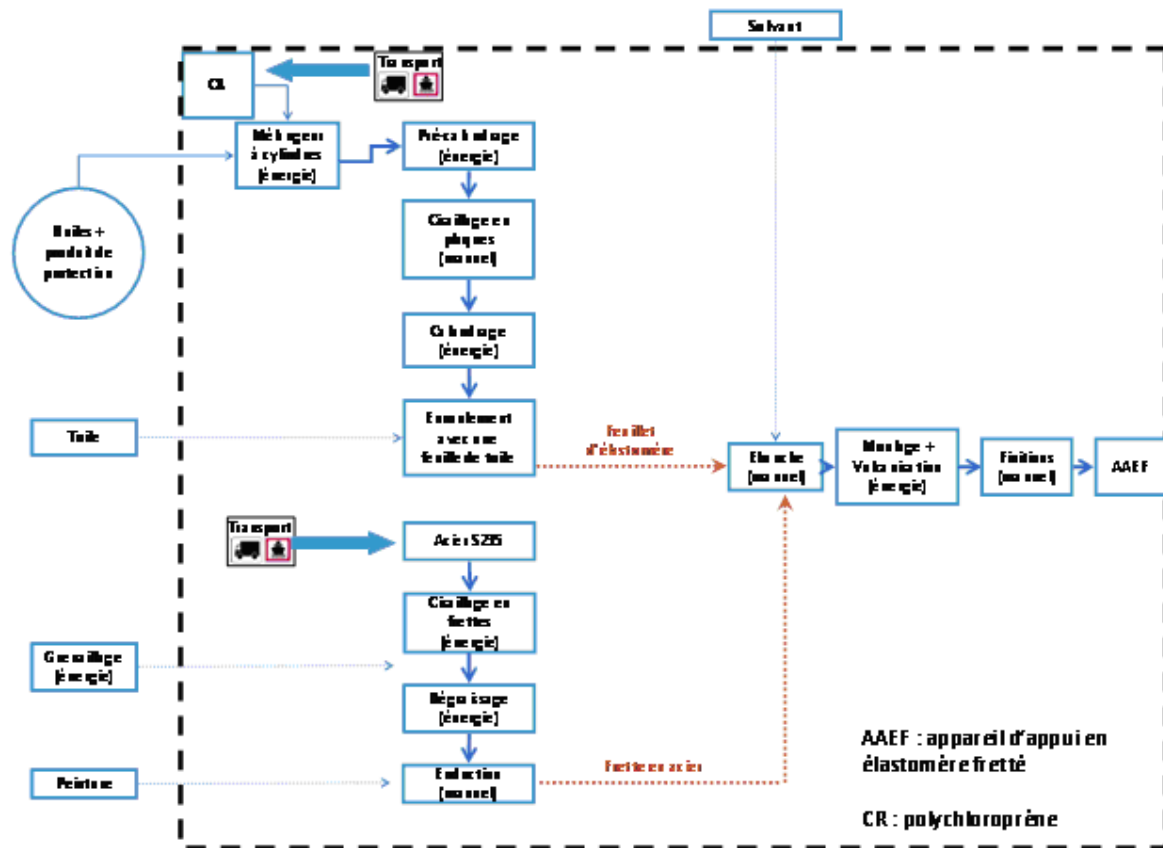


Figure 10: Schéma-clé des processus pris en compte

Les étapes détaillées précédemment sont résumées dans la Figure 11.

Process	Fabrication d'un appareil d'appui de pont de type B de dimension 400*500				
Produit sortant	Appareil d'appui de pont de type B de dimension 400*500				
Flux de rang 1			Quantité	Unité	Commentaires
	Flux de rang 2				
		Flux de rang 3			
<b>Appareil d'appui de pont type B de dimension 400*500</b>				m <sup>3</sup>	
<b>Préparation des feuilles d'élastomère calandrées (pour 1 kg)</b>					
		synthetic rubber, at plant	1	kg	Le processus prend en compte l'énergie du mélangeur ouvert à cylindre et l'énergie de la presse (précalandrage et calandrage)
<b>Préparation des frettes (pour 1 kg)</b>					
		steel, converter, unalloyed, at plant	0,98	kg	Acier pour fabriquer les frettes
		steel, electric, un- and low-alloyed, at plant	0,02	kg	Acier pour fabriquer les frettes
		hot rolling	1	kg	Process de fabrication des plaques d'acier
		sheet rolling (prise en compte uniquement du sous processus annealing)	1	kg	Process de fabrication des plaques d'acier
		electricity, medium voltage, at grid	7,86E-3	kWh	Cisaillage en plaques avant transport
		electricity, medium voltage, at grid	7,86E-3	kWh	Cisaillage en frettes des plaques en acier
<b>Transport</b>					
		transport, lorry 16-32t, EURO 4	0,893	t*km	Transport de 1 kg d'élastomère
		transport, lorry >32t, EURO 4	0,378	t*km	Transport de 1 kg d'acier
<b>Moulage-vulcanisation</b>					
		electricity, medium voltage, at grid	3,582	MJ	Energie de la presse à vulcaniser

Figure 11 : Tableau récapitulatif des processus

Nous étudions deux différents cas selon le nombre de feuillets d'élastomère n. Dans tous les cas, l'appareil d'appui considéré sera en élastomère fretté de dimension en plan 400\*500 mm<sup>2</sup> : 4 feuillets internes ; 8 feuillets internes.

La Figure 12 montre pour le cas (4 feuillets) la répartition des étapes de fabrication pour les 13 catégories d'impact.

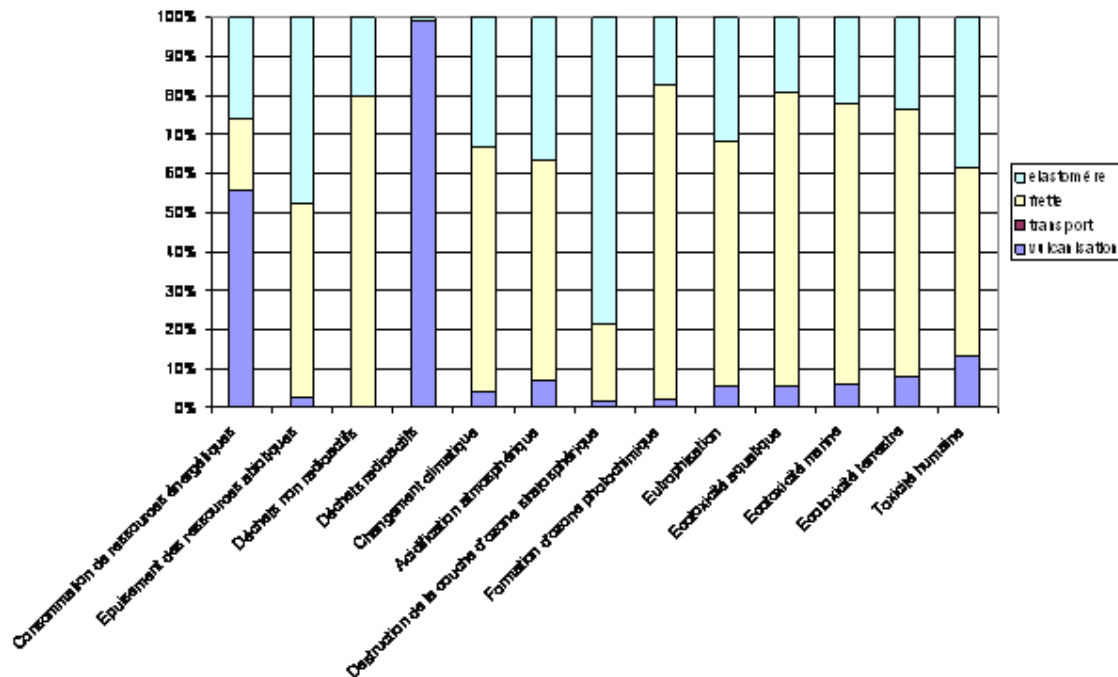


Figure 12 : Cas 1 – répartition suivant les phases de fabrication de l'appareil d'appui

On remarque sur cette figure que pour la plupart des catégories d'impact, c'est la phase de fabrication des frettes qui est la plus impactante. Pour les déchets radioactifs c'est l'étape vulcanisation qui impacte le plus. Pour la catégorie destruction de la couche d'ozone stratosphérique, c'est la fabrication de l'élastomère qui impacte le plus.

Le transport des matières premières jusqu'à l'usine de fabrication génère un impact négligeable face à ceux des processus de transformation de celles-ci en produit fini.

Les deux travaux présentés précédemment représentent un travail dont la majeure partie a été réalisée par l'équipe du laboratoire Navier dans le cadre du groupe de travail de l'AFGC. L'équipe de Navier a également fait un important travail sur la galvanisation [Gomes et al, 2012a] et les aciers sous forme de tôles ou de plaques [Gomes et al, 2012b] en appliquant toujours cette même démarche scientifique décrite dans le paragraphe 4.1.

Cependant la contribution de cette équipe dont une partie a été directement financée par la chaire ParisTech « Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures » va au-delà. Elle a bien évidemment participé à l'élaboration de la méthodologie présentée en première partie mais a également participé à d'autres sous-groupes de travail et donc à l'élaboration d'un certain nombre de fiches DIOGEN sur les ciments en appui à l'ATILH et le bois en collaboration avec le FCBA.



#### 4.4. Matériaux composites

Le travail présenté ci-après a fait l'objet du travail de post doctorat de Grégory Herfray dans le cadre de la chaire Bouygues « Bâtir durable et innover ».

Les composites constituent des matériaux spécifiques sur de nombreux aspects. Ils sont en effet en général constitués de deux matériaux distincts, non miscibles et aux propriétés spécifiques, assemblés afin d'obtenir de nouvelles caractéristiques globales, mécaniques notamment. Cette démarche conditionne un nombre important d'aspects concernant ces matériaux (choix des composants, procédés de production, gestion de fin de vie...) qui influent notablement sur un bilan environnemental. Il convient donc d'étudier en détail ces matériaux afin d'évaluer les impacts liés à leur cycle de vie, pour permettre leur prise en compte dans des démarches d'éco-conception. Ces matériaux étant très largement utilisés dans l'équipe matériaux et structures architecturés du laboratoire Navier il nous semblait important d'en faire un bilan environnemental.

Les composites peuvent être regroupés au sein de trois grandes catégories. Citons tout d'abord celle des composites à matrice organique, qui représente le plus gros volume de production à ce jour. Elle est constituée des matériaux où la résine est d'origine vivante (biocomposites, ou composites naturels, comme par exemple le bois) ou pétrolière. Dans ce dernier cas, on distingue deux types de résine : les résines thermodurcissables (qui polymérisent de façon irréversible sous l'effet de la chaleur), comme par exemple les résines epoxy, polyesters insaturés ou vinylester, et les résines thermoplastiques (qui peuvent se ramollir et durcir de façon réversible sous l'effet de variations de température), comme le polyester ou le polyamide. Les composites peuvent aussi être à matrice céramique, dans le cadre notamment d'usages soumis à de très hautes températures, où la matrice est généralement constituée de carbone ou de carbure de silicium. La dernière catégorie est celle correspondant aux matrices métalliques.

Dans le cadre qui nous intéresse ici, nous nous focaliserons sur les matériaux à matrice organique, qui sont ceux utilisés dans le bâtiment et le génie civil, et plus particulièrement les profils pultrudés, dont le process est précisé ci-après.

##### 4.4.1. La pultrusion

Il existe plusieurs procédés pour la production de matériaux composites. Des procédés manuels (projection, moulage, drapage...) ou mécanisés. Dans le cadre des matériaux qui nous intéressent, nous nous focaliserons sur les profils pultrudés. La pultrusion est un mode de production de profils continus de composites, qui permet d'obtenir de grandes quantités de matériaux, à section constante, pour un faible coût économique et énergétique. Le principe de cette technique passe par une imprégnation des fibres avec une résine thermodurcissable. Les fibres imprégnées sont alors tirées en continu à travers une matrice de chauffage afin de faire polymériser la résine. Le profilé est enfin coupé à la longueur souhaitée.

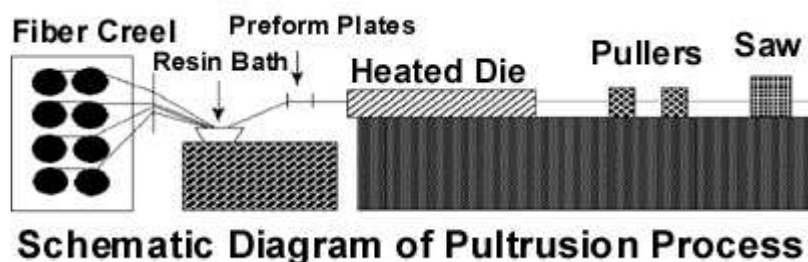


Figure 13 : Schéma de principe de la pultrusion<sup>6</sup>.

Cette technique, développée dans les années 50, a été baptisée selon une combinaison de l'anglais « pull », pour « tirer » et du mot extrusion. Le procédé permet de produire de façon économique un grand volume de composites de type FRP (Fiber Reinforced Polymer) à section constante, de haute qualité, notamment grâce à l'uniformité du profilé, aux qualités de dispersion de la résine et à celles d'alignement et de distribution des fibres.

De façon plus précise, le procédé peut être décrit selon 5 phases distinctes (Figure 13) :

1- L'alimentation en matériaux. Les fibres de renforcement sont stockées de telle sorte que la chaîne de pultrusion soit alimentée en continu. A la sortie de la solution de stockage retenue dans chacun des cas, un dispositif permet de contrôler l'alignement des fibres, afin de prévenir des torsions, de la création de nœuds ou de l'endommagement des fibres.

2- L'imprégnation en résine et le formage du matériau. C'est le principe de base du procédé de pultrusion. Les fibres sont généralement entraînées dans un bain d'immersion, organisées en faisceaux permettant l'humidification de ces dernières par la résine et le « mélange » des deux constituants du matériau composite. Après cette imprégnation, le matériau est préformé, en retirant les excédents de résine et en approchant le profilé final. Cette étape permet de limiter les contraintes mécaniques exercées sur le matériau non fini exercées entre la sortie du bain et l'entrée du four.

3- Le chauffage. Cette phase est d'une grande importance dans le procédé de fabrication, puisqu'elle détermine la qualité du composite. Les paramètres de chauffage vont en effet influencer sur la cinétique de la réaction de polymérisation, sur la répartition spatiale de celle-ci dans le four. Une mauvaise mise en œuvre de ce dispositif pourra dégrader les caractéristiques physiques et mécaniques du produit, par exemple avec l'apparition de fissures, ou influencer sur la résistance électrique ou la corrosion du matériau.

4- En sortie du four, on trouvera les dispositifs assurant la traction du matériau et donc l'entraînement à travers la chaîne de production, séparée du dispositif de chauffage par une distance permettant au matériau composite de refroidir (à l'air libre ou grâce à un dispositif de soufflerie ou de refroidissement). Ces dispositifs de traction peuvent fonctionner sur une base intermittente ou continue, en fonction des spécificités de la chaîne de production.

5- On trouve enfin un dispositif de coupe, permettant de gérer la longueur du profilé en sortie de chaîne.

L'évaluation environnementale des matériaux composites menée ici repose donc sur la prise en compte des aspects techniques décrits ici et des données disponibles concernant ce procédé.

#### 4.4.2. Evaluation environnementale

Afin de compléter les données nécessaires pour mener un bilan environnemental des matériaux composites dans une démarche d'ACV, une collecte des données a été menée

<sup>6</sup> [http://www.tifac.org.in/index.php?option=com\\_content&view=article&id=555&Itemid=205](http://www.tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=555&Itemid=205)

auprès de plusieurs acteurs du secteur (soficar carbon, owen scorning, exel composite, Compositec, Goyer, nuvia-ts, solutions composites (topglass), pole-emc2, icco, BiinC, Structil, epsilon composite, Etandex).

Cette démarche a pour but de déterminer les caractéristiques techniques des procédés de production des matériaux étudiés et de déterminer les éventuelles influences annexes au procédé proprement dit sur le bilan environnemental. Un questionnaire a été envoyé aux industriels ayant répondu positivement à la demande, permettant de déterminer les données d'entrée de l'inventaire. Elles concernent : les matériaux utilisés, leur provenance et leur mode de transport, les éventuels émissions directes de polluants sur site, les consommations d'énergie liées à l'activité. Le questionnaire vise aussi, lorsque nécessaire, à obtenir les données permettant d'appliquer les règles d'allocation choisies pour l'étude (cas de production multiples sur un site, par exemple). Toutes ces données servent alors de base à l'élaboration d'un inventaire permettant la caractérisation environnementale en sortie d'usine de matériaux composites pultrudés, représentatifs du contexte français d'utilisation de ce type de produit, en accord avec les principes de la base de données DIOGEN .

Les échanges menés avec les industriels cités précédemment, ainsi que les collaborations dans la cadre du projet COFAHE2 [COFAHE2, 2012] ont permis de collecter les informations nécessaires pour deux types de profilés (les composites renfort fibre de carbone et ceux renforts fibres de verre). Pour ces deux types de profilés on dispose donc de données fournies par les industriels et des données de la base Ecoinvent. Une modélisation des procédés impliqués permet ensuite l'évaluation des impacts environnementaux de ces systèmes en vue de faire des fiches DIOGEN de ces deux types de profilés (fiches disponibles en annexe). Les détails de ces modèles sont disponibles dans le rapport [Herfray, 2013] ; la suite présente un résumé des travaux menés.

### **a) Renfort fibre de carbone**

Le premier système étudié est un composite dont le renfort est constitué de fibres de carbone à laquelle vient s'ajouter une résine de type EPOXY, produit par SOFICAR carbon.

#### **1- Données fournies par l'industriel**

Le composite étudié ici est donc un profilé fibre de carbone/résine EPOXY. Ses caractéristiques sont listées dans la fiche technique fournie en annexe 1. L'usine concernée a pour seule activité la production de ces profilés, pour un total annuel de 60 tonnes.

Les matériaux et matières premières intervenant dans le procédé de production sont :

- Résine EPOXY type DGEBA/Anhydride, représentant 20 % de la masse finale. Cette résine est apportée jusqu'au site de production par camion, pour une distance de 1800 km.
- Fibre de carbone, représentant 80 % de la masse finale. Cette fibre provient d'un site de production voisin, situé à 200 m, et est transportée par chariot électrique.
- Une palette bois pour 300 kg de profilé.
- 0,5 l d'acétone pour 150 kg de profilé.

Les consommations d'énergie fournies sont issues de relevés sur site.

#### **2- Données disponibles dans les bases**

Nous allons donc nous appuyer à la fois sur les données présentées précédemment et sur la base de données Ecoinvent. Les données énergétiques sont facilement disponibles dans cette base, de même que les données concernant les modes de transport. De la même façon, nous y retrouvons la résine EPOXY, l'acétone, la palette bois :

*Epoxy resin, liquid, at plant, catégorie plastics/monomers, données européennes*

*Acetone, liquid, at plant, catégorie chemicals/organics, données européennes*  
*EUR-flat pallet, catégorie wooden materials/processing, données européennes*

Les consommations d'énergie liées au transport par chariot électrique ainsi que celles liées aux consommations de bureaux doivent être calculées à partir d'hypothèses. Sont ainsi retenues :

- La consommation liée au transport par chariot électrique sera négligée, en l'absence de données et vu l'ordre de grandeur de cette consommation, en comparaison avec celle liées à la production et au transport par route (200 m par chariot électrique, à comparer à 1800 km par camion de 38 tonnes)
- Une consommation d'énergie liée aux bureaux de 1876 kWh sur un an, soit 31,3 kWh/t, correspondant à des consommations d'électricité (chauffage et consommations annexes) pour 7 m<sup>2</sup> de bureau (source : chiffres clés 2011 de l'ADEME).

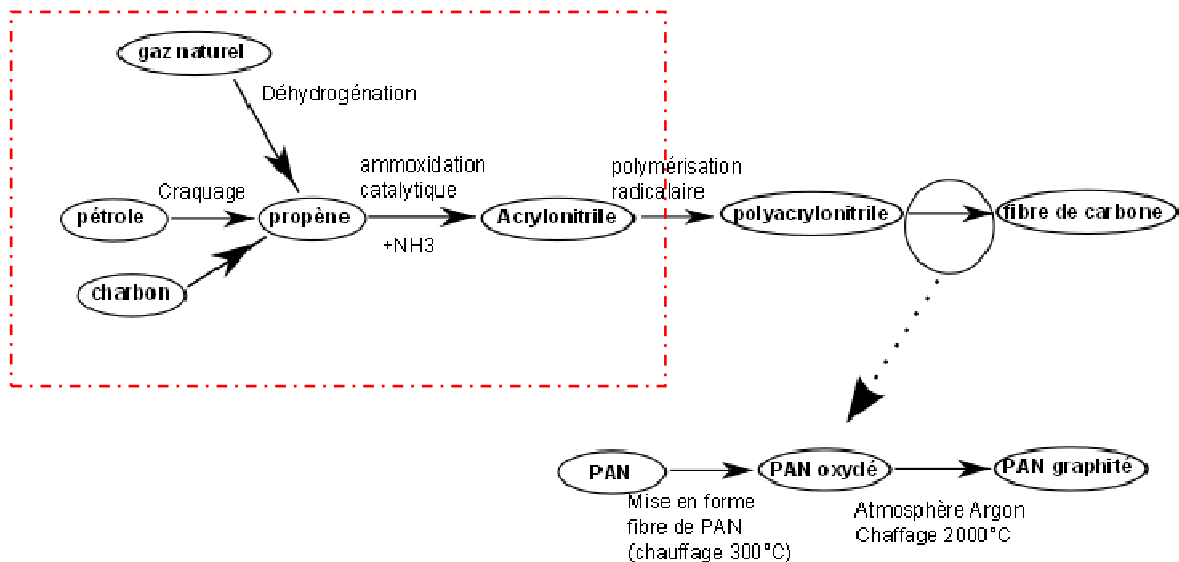
La base de données Ecoinvent ne fournit pas de données spécifiques sur la fibre de carbone. De la même façon il n'existe que peu de données environnementales exhaustives et précises concernant ce type de matériau, les producteurs ne souhaitant pas ou peu communiquer sur ces aspects. Il existe néanmoins une fiche Ecoinvent pour l'acrylonitrile, substance chimique servant de base à la production du PolyAcrylonitrile (PAN), précurseur le plus utilisé dans la production de fibre de carbone [Morgan, 2005] :

*Acrylonitrile, at plant, catégorie chemical/organics, données européennes*

Nous nous proposons donc de créer un modèle permettant de déterminer un inventaire pour la fibre de carbone, à partir de ces données et d'éléments trouvés dans la littérature.

### 3- Données à déterminer et modéliser

Le procédé de production de la fibre de carbone, en remontant jusqu'aux matières premières fossiles servant de base à sa production, est schématisé Figure 14:



**Figure 14** : Schéma de principe de production de la fibre de carbone (dans le rectangle rouge les données disponibles dans Ecoinvent)

Les caractéristiques techniques de la phase de production du PAN (polymérisation) et de celle de production de la fibre de carbone à partir du précurseur peuvent sensiblement être

modifiées par la qualité de fibre recherchée. Dans notre étude, nous tirons nos informations d'une ACV dans le domaine de l'automobile, impliquant des composites à renfort fibre de carbone [Das, 2011]. La fibre considérée dans ce cas est de type fibre textile, dont la production répond à des contraintes chimico-physiques moins restrictives que dans le cas de la fibre de carbone utilisée dans le cas général. Faute de données plus représentatives, les grandeurs fournies par cette analyse seront retenues dans notre cas, bien qu'elles constituent ici une approximation.

La première étape, celle de la polymérisation de l'acrylonitrile, implique les consommations d'énergie suivante, pour 1 kg de PAN :

**Tableau 15: Données énergétiques concernant la production de polyacrylonitrile à partir de l'acrylonitrile [Das, 2011]**

Gaz naturel	0,22 mmbtu soit 105,5 MJ
Electricité	0,77 kWh soit 2,77 MJ

Cette transformation se fait à un rendement de 95 %. Elle implique l'utilisation d'un mélange solvant, recyclé à plus de 95 %, que nous négligerons donc dans notre étude (en l'absence de données et compte tenu de l'efficacité du processus de recyclage).

La deuxième étape, concernant le passage du précurseur à la fibre de carbone en tant que tel, met en jeu les quantités d'énergie suivante, pour 1 kg de fibre :

**Tableau 16 : Données énergétiques concernant la production de la fibre de carbone à partir du polyacrylonitrile [Das, 2011]**

Gaz naturel	0,0924 mmbtu soit 97,49 MJ
Electricité	20,02 kWh soit 72,07 MJ

Le rendement de cette réaction est de 48 %, et implique la production de co-produits (vapeur d'eau, ammoniac, cyanure d'hydrogène), incinérés avant d'être évacués dans l'atmosphère. Leur influence sur le bilan environnemental sera ici négligée, faute de données chiffrées concernant ces gaz.

#### 4- Modélisation du composite

La modélisation du composite s'articule donc ici en trois temps. Tout d'abord, la modélisation de la production de la fibre de carbone. La première étape, celle de la polymérisation de l'acrylonitrile, est modélisée avec les process suivants :

**Tableau 17: Process pris en compte dans la modélisation de la production de polyacrylonitrile**

Flow	Category	Flow type	Flow property	Unit	Resulting amount
acrylonitrile from Sohio process, at plant	chemicals/organics	Product flow	Mass	kg	1.053
electricity mix	electricity/supply mix	Product flow	Energy	MJ	3.04
heat, natural gas, at industrial furnace >100kW	natural gas/heating systems	Product flow	Energy	MJ	10.5

La deuxième phase, celle de la production de fibre de carbone à partir du PAN :

**Tableau 18 : Process pris en compte dans la modélisation de la production de la fibre de carbone**

Flow	Category	Flow type	Flow property	Unit	Resulting amount
electricity mix	electricity/supply mix	Product flow	Energy	MJ	79.2
heat, natural gas, at industrial furnace >100kW	natural gas/heating systems	Product flow	Energy	MJ	97.49
Poly Acrylonitrile		Product flow	Aluminium content	kg	2.08

Enfin le composite en tant que telle est modélisé ainsi, à partir des deux descriptions établies ci-dessus et des autres éléments disponibles pour l'établissement de l'analyse environnementale du matériau.

**Tableau 19 : Process pris en compte dans la modélisation de la production du profilé résine EPOXY/fibre de carbone produit par SOFICAR carbone**

Flow	Category	Flow type	Flow property	Unit	Resulting amount
acetone, liquid, at plant	chemicals/organics	Product flow	Mass	kg	0.4095
disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill	waste management...	Product flow	Mass	kg	0.076
electricity mix	electricity/supply mix	Product flow	Energy	MJ	47.6
epoxy resin, liquid, at plant	plastics/monomers	Product flow	Mass	kg	0.404
EUR-flat pallet	wooden materials/p...	Product flow	Number of items	Item(s)	0.003
Fibre de carbone		Product flow	Aluminium content	kg	0.872
transport, lorry >32t, EURO4	transport systems/r...	Product flow	Goods transport (mass*distance)	t*km	1.51
transport, municipal waste collection, lorry 21t	waste management...	Product flow	Goods transport (mass*distance)	t*km	0.047

## b) Renfort fibre de verre

Le deuxième système étudié est fait de fibres de verre et d'une résine vinylester, profilé produit par la société exelcomposites, utilisé dans le cadre du projet COFAHE2 pour la production d'une menuiserie [COFAHE 2, 2012]. Le projet de recherche impliquant une ACV, des données ont été collectées et intégrées à l'analyse plus large de l'élément de façade au cœur de l'initiative [Grannec & Ravel, 2011]. Les données concernant le composite ont été utilisées ici comme base de l'inventaire pour ce profilé.

### 1- Données fournies par l'industriel

Les données collectées ici l'ont été sur le format nécessaire à l'élaboration d'une FDES (voir la norme NF P01 010, et le site [www.inies.fr](http://www.inies.fr)). Pour une unité fonctionnelle de 1 kg de profilé, ces données concernent les entrants énergétiques, les entrants non énergétiques, leurs transports, les émissions dans l'air, les déchets liés à la production, et leur mode de traitement.

### 2- Données disponibles dans les bases

Ici encore, les données énergétiques, liées aux modes de transport sont facilement disponibles. Les données liées à la gestion des déchets sont elles aussi généralement disponibles, soit de façon précise, en fonction de la nature du déchet à traiter, soit de façon générique, selon le type et la dangerosité de l'élément considéré.

En ce qui concerne les matières premières et les matériaux utilisés, sont disponibles, pour cette étude dans la base Ecoinvent, la fibre de verre, le peroxide, le film plastique, le polystyrène, ainsi que comme dans le cas précédent la palette bois :

*Glass fibre, at plant, catégorie glass/construction, données européennes*

*Hydrogen peroxide, 50% in h2O, at plant, catégorie chemicals/inorganics, données européennes*

*Packaging film, LDPE, at plant, catégorie plastics/processing, données européennes*

*Polysyrene expandable, at plant, catégorie plastics/polymers, données européennes*

Il n'existe en revanche pas ici de correspondance pour la résine vinylester. A défaut, nous considèrerons donc la résine polyester, qui est la correspondance la plus pertinente disponible à ce jour.

*Polyester resin, unsaturated, at plant, catégorie paintings/production, données européennes*

### 3- Modélisation du composite

Les éléments pris en compte dans la modélisation sont dans le tableau suivant :

**Tableau 20** : Process pris en compte dans la modélisation de la production du profilé fibre de verre/résine vinylester produit par Exelcomposites

Flow	Category	Flow type	Flow property	Unit	Resulting amount
disposal, fluorescent lamps	waste management/recycling	Product flow	Mass	kg	1.0E-4
disposal, glass, 0% water, to inert material landfill	waste management/inert materi...	Product flow	Mass	kg	3.19E-2
disposal, hazardous waste, 0% water, to underground deposit	waste management/undergroun...	Product flow	Mass	kg	6.0E-2
disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	waste management/inert materi...	Product flow	Mass	kg	3.19E-2
disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill	waste management/sanitary lan...	Product flow	Mass	kg	2.19E-2
electricity mix	electricity/supply mix	Product flow	Energy	MJ	2.664
EUR-flat pallet	wooden materials/processing	Product flow	Number ...	Item(s)	4.0E-4
glass fibre, at plant	glass/construction	Product flow	Mass	kg	0.614
hydrogen peroxide, 50% in H2O, at plant	chemicals/inorganics	Product flow	Mass	kg	6.85E-2
natural gas, at consumer	natural gas/fuels	Product flow	Energy	MJ	2.052
packaging film, LDPE, at plant	plastics/processing	Product flow	Mass	kg	4.0E-4
polyester resin, unsaturated, at plant	paintings/production	Product flow	Mass	kg	0.311
polystyrene, expandable, at plant	plastics/polymers	Product flow	Mass	kg	1.0E-4
transport, lorry 20-28t, fleet average	transport systems/road	Product flow	Goods tr...	t*km	1.923
transport, municipal waste collection, lorry 21t	waste management/others	Product flow	Goods tr...	t*km	6.54E-3

### c) Conclusions

Nous avons donc pu obtenir un modèle permettant l'évaluation environnementale de la production d'un composite fibre de carbone/résine EPOXY ainsi que celle d'un profil pultrudé de base résine vinylester/fibre de verre. Ces évaluations présentent néanmoins certaines limitations, liées notamment au manque de données concernant la production de la fibre de carbone, ainsi que la résine vinylester. De même, de plus amples informations doivent être obtenues en ce qui concerne les impacts annexes de production (gestion des déchets d'emballages, recyclage sur site...), qui s'ils peuvent être ici considérés comme négligeables, peuvent aussi s'inscrire dans une démarche d'éco-conception. Néanmoins ce travail a donné lieu à l'établissement deux fiches DIOGEN (en annexe) disponibles sur le site.

### 4.5. Conclusions

Ces différents travaux basés sur la méthodologie de la base de données DIOGEN ont permis de réaliser différentes fiches environnementales de matériaux et éléments de structure du plus au moins représentatifs du contexte territorial (acier d'armature, appareil d'appui, matériaux composites). Mon cheminement de recherche m'a conduit à débiter par les matériaux. Cependant cette échelle d'étude n'est pas la plus pertinente, notamment quand on s'intéresse à l'analyse de cycle de vie des ouvrages. En effet une ACV est réalisée sur relativement à une unité fonctionnelle. Le lien à la fonction de l'objet étudié est donc très important et lorsque l'on parle juste de matériaux, cette fonction n'existe pas ; d'où l'importance de passer à une échelle différente, l'échelle de l'ouvrage avec une fonction définie. Il est cependant clair par contre que pour avoir les évaluations les plus représentatives il est important d'avoir en amont les données les plus représentatives également. C'est bien à cette question que cette partie 4 de ce rapport tente d'apporter des éléments de réponse.

Mais il faut pouvoir capitaliser ces données et les rendre adaptables aux différents changements à venir. Il peut en effet y avoir des évolutions de norme, des évolutions de technologies, des évolutions de méthodes de calcul ACV par exemple. On touche alors à la limite de ce travail autour de cette base de données. Comment faire en sorte que ce travail « artisanal » reste vivant et soit actualisé ? On est en train de réaliser avec le passage des

différentes fiches DIOGEN du format de la norme NFP 01-010 au format NF EN 15804 que ce n'est pas une chose aisée et la question de la pérennisation de la base de données reste ouverte.



## **5. Application aux ouvrages**

### **5.1. Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception (contrat de recherche RFF)**

#### *5.1.1. Contexte de l'étude*

Le travail présenté dans ce paragraphe s'inscrivait dans un projet de recherche intitulé « Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception » mis en place par le réseau ferré de France (RFF) en Octobre 2010. L'unité fonctionnelle choisie se rapporte à l'infrastructure supportant le passage d'un train à la vitesse de 300 km/h. C'est le cadre de l'étude que nous nous sommes fixé. Dans ce cadre, certaines hypothèses, notamment celles relatives au renouvellement de voie, sont basées sur des passages de train à 320km/h. Nous avons choisi, en accord avec RFF, de nous placer dans le cas des futures lignes à construire, mais bien évidemment les phases de vie en œuvre, et particulièrement la maintenance, sont appuyées sur ce que l'on sait faire actuellement.

Ce travail a débuté en octobre 2010 et a permis d'une part de faire une large étude bibliographique des analyses de cycle de vie existantes dans le domaine du ferroviaire [Bouhaya, 2011] ; d'autre part, suite à la rencontre de différents experts RFF, de poser les bases de ce à quoi pourrait ressembler une analyse de cycle de vie complète d'une infrastructure ferroviaire. Suite à l'étude bibliographique et en accord avec le comité de revue technique de ce travail, nous avons choisi de décomposer l'analyse de cycle de vie de l'infrastructure ferroviaire de la façon suivante, figure 1 :

- La voie comprenant le rail, les traverses, le ballast, les attaches
- La plateforme ferroviaire : les sous-couches, le terrassement...
- La signalisation : les blocks, les câbles, poste d'aiguillage, armoire...
- L'alimentation électrique: les caténaires, les sous-stations...
- Les ouvrages d'art : les ponts, les tunnels et les murs de soutènement.

#### *5.1.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude*

Les objectifs de ce projet de recherche sont les suivants :

- identifier l'ensemble des matériaux et constituants d'une infrastructure ferroviaire et analyser leur cycle de vie considérant les entrants et les sortants ;
- avoir une réflexion plus approfondie en éco-conception pour une meilleure intégration environnementale des projets.

L'idée de RFF est de profiter de cette étude pour être en mesure de proposer de nouvelles solutions plus environnementales pour les lignes à construire et ce en s'appuyant donc sur une expertise de recherche.

Cette étude a été réalisée conformément aux normes de la série ISO 14040 [IOS14040 - ISO 14044].

Le public cible de cette analyse de cycle de vie est multiple. C'est en premier lieu le personnel de RFF dans l'optique d'intégrer ces critères et résultats d'analyse dans la conception des projets ferroviaires pour tendre résolument vers l'éco-conception. RFF

s'appuie sur de nombreux prestataires externes : il s'agit donc aussi de disposer des éléments pour convaincre les prestataires à intégrer l'éco-conception dans leurs pratiques et réflexions. Enfin, cette étude est également destinée à présenter des arguments environnementaux lors des réunions de concertation qui jalonnent la démarche de conception/réalisation d'un ouvrage ferroviaire.

Aussi, compte tenu de la diffusion assez large envisagée, de l'utilisation de l'outil ACV dans les futurs projets et innovations, le commanditaire a souhaité s'entourer d'experts indépendants reconnus dans le domaine et donc s'appuyer sur le processus encadré que constitue une revue critique pour asseoir l'objectivité et la crédibilité de cette démarche.

L'unité fonctionnelle proposée dans le cadre de ce projet est :

« Permettre la circulation de matériel roulant de type TGV à 300 km/h jusqu'à 17 tonnes à l'essieu pendant une durée d'observation de 100 ans. »

Le flux de référence associé est alors :

« 1km linéaire de voie ferrée simple en plaine, c'est à dire hors ouvrages d'art. »

On considère que la durée de vie d'une infrastructure ferroviaire dépasse les 100 ans ; au-delà des 100 ans, on continue l'exploitation de l'infrastructure. C'est en effet ce qui a été jugé judicieux par les différents experts, à la fois de l'infrastructure ferroviaire, mais aussi par le groupe de revue critique. On parle alors, quand la durée de vie de l'infrastructure ferroviaire dépasse les 100 ans, de durée d'observation de 100 ans. Une analyse de sensibilité a été réalisée en considérant le cas où l'on suppose un arrêt d'exploitation de la voie à 100 ans. Ainsi on présentera à la fois les résultats pour une durée d'exploitation supérieure à 100 ans et pour une durée d'exploitation de 100 ans. La Figure 15 présente le bilan de fabrication et de fin de vie des différents constituants de l'infrastructure ferroviaire pour une durée d'observation de 100 ans. On note que sur la durée d'observation considérée, la maintenance de la voie ferrée implique la fabrication de 3,33 unités de rail, semelle et attache et de 1,66 unités de traverse.

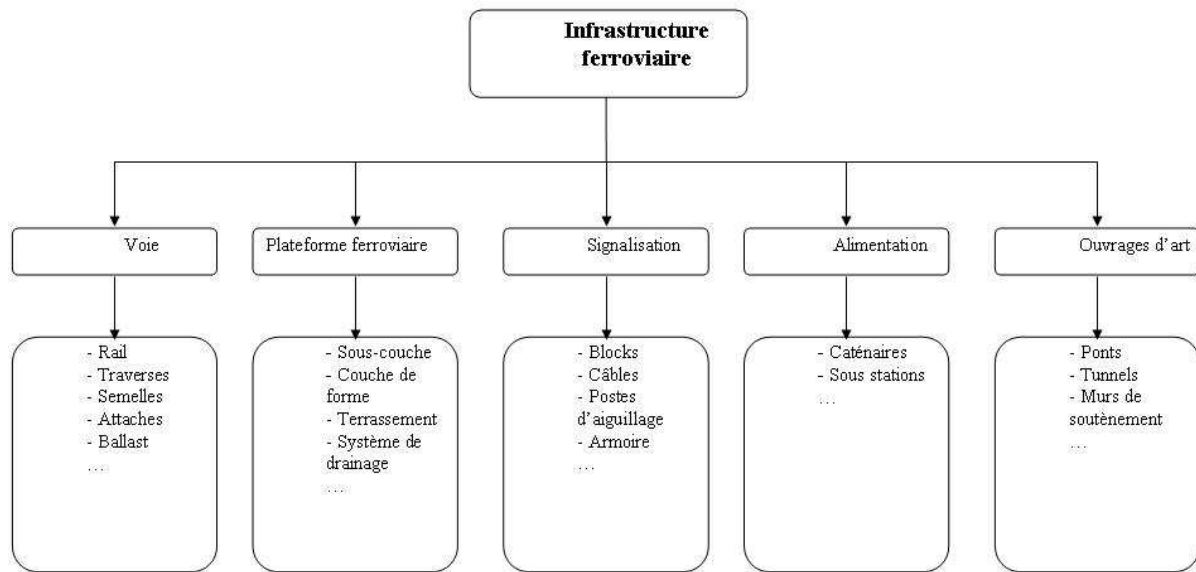


Une ligne LGV est quasi-exclusivement une voie double. Aussi dans cette étude, les calculs sont faits sur la voie double pour tout ce qui est relatif aux matériaux considérés, mais l'analyse environnementale est effectuée par la suite uniquement sur la moitié de voie. En effet le calcul de la quantité déblai, remblai, mouvement de terre etc., ne peut se faire que sur la double voie, c'est la raison pour laquelle les calculs sont effectués sur la double voie puis ramenés sur la voie simple et donc à l'unité fonctionnelle considérée.

Cette unité fonctionnelle est valable pour le modèle global de l'infrastructure ferroviaire qui est composé de 5 sous-ensembles, Figure 16:

- Un modèle de voie
- Un modèle de plateforme ferroviaire
- Un modèle de signalisation
- Un modèle d'alimentation électrique
- Différents modèles d'ouvrage d'art
  - o Pont
  - o Tunnel
  - o Mur de soutènement

Le travail réalisé présente une analyse menée sur les différents modèles suscités. Il est à noter qu'il est nécessaire de différencier le travail réalisé sur les modèles de voie et de plateforme ferroviaire des autres modèles réalisés, [Bouhaya, 2011], [Bouhaya, 2013]. En effet le travail réalisé sur ces modèles de voie et de plateforme a été très complet. La collecte de données a été particulièrement poussée et a donné lieu à de nombreuses interactions avec des experts RFF qui ont permis de les consolider. Pour les autres modèles (signalisation, alimentation électrique) l'accès aux informations nécessaires n'a pas pu être réalisé de façon aussi fine que pour les modèles précédents. Ceux-ci se basent, pour une grande partie, sur les données du bilan carbone réalisé sur la ligne LGV Rhin Rhone branche Est par Olivier Carles (que nous remercions de nous avoir permis d'avoir accès à ses données). Le modèle de pont courant se base sur une étude réalisée en 2010 par Cimbéton [ACV Pont en béton] et pour le modèle de tunnel nous avons eu recours aux experts du CETU.



**Figure 16 :** Différentes parties de l'infrastructure ferroviaire

Nous avons choisi de travailler sur un logiciel open source OpenLCA et de s'appuyer sur la base de données Ecoinvent. OpenLCA est un logiciel modulaire open source pour l'analyse de cycle de vie sorti en 2007 par GreenDeltaTC, Berlin [OpenLCA]. Ce logiciel permet d'intégrer une base de données, type Ecoinvent que l'on a choisi d'utiliser [Ecoinvent]. Il permet aussi d'utiliser des flux existants dans Ecoinvent ou même d'adapter et de modifier des flux.

La base de données choisie dans cette étude est Ecoinvent. Cette base de données est une des bases les plus utilisées en Europe. Cette base contient des données industrielles internationales d'inventaire du cycle de vie sur l'approvisionnement énergétique, l'extraction des ressources, l'approvisionnement en matériel, les produits chimiques, les métaux, l'agriculture, les services de gestion des déchets, et les services de transport.

Quand nous utilisons par la suite un processus Ecoinvent nous le citons sous le nom utilisé dans la base de données, et donc en anglais, ce afin d'éviter les confusions. Dans l'étude, il n'a pas été réalisé d'étude de sensibilité par rapport au choix des données environnementales.

Les catégories d'impacts environnementaux évaluées dans cette étude sont celles présentées dans le Tableau 5. Rappelons qu'en terme d'impacts environnementaux évalués, notre choix est proche de celui du CES de l'école des Mines. Cette étude d'infrastructure ferroviaire peut ainsi être mise en parallèle de l'étude réalisée sur les structures routières en 2005 sous l'égide de Cimbéton [ACV structures routières], réalisée avec le logiciel Equer.

Les exigences relatives à la qualité des données portent sur des facteurs temporel, géographique et technologique.

Facteur temporel :

Nous avons choisi, en accord avec RFF, de nous placer dans le cas des futures lignes à construire de type LGV, mais bien évidemment les phases de vie en œuvre, et particulièrement la maintenance, sont appuyées sur ce que l'on sait faire actuellement.

Géographie :

Afin de pouvoir préciser les hypothèses sur les distances de transport, nous avons considéré un emplacement fictif, mais représentatif d'un tronçon de voie ferré « moyen » en France, de la nouvelle voie à construire en Bourgogne, France. Les sites de productions choisis correspondent aux pratiques RFF.

Technologie :

Les technologies considérées dans le cadre de cette étude correspondent aux technologies actuelles. Ceci est valable pour la fabrication des matières premières, la fabrication des constituants de la voie ainsi que pour les appareils de pose de voie et de maintenance.

#### *5.1.3. Résultats obtenus lors de l'assemblage des modèles voie, plateforme ferroviaire, ouvrages d'art, murs de soutènement et signalisation*

#### **Modèle de la voie ferrée**

Ce modèle est détaillé dans le rapport [Bouhaya, 2011]. Les résultats obtenus montrent que la phase fabrication des constituants est celle qui est la plus impactante d'un point de vue environnemental, notamment sur la consommation d'énergie primaire totale, l'épuisement des ressources naturelles, le changement climatique et l'acidification atmosphérique. Il est à noter que pour la phase de fabrication l'impact dominant est celui du rail. Or dans cette phase de fabrication des rails on compte la fabrication des blooms en Angleterre, leur transport jusqu'en France, le laminage, le transport jusqu'à l'usine de soudure et la soudure. Si l'on cherche à réfléchir en termes d'éco-conception c'est sur la fabrication du rail qu'il faut agir.

#### **Modèle de la plateforme ferroviaire**

Ce modèle est détaillé dans le rapport [Bouhaya, 2013]. La phase de fabrication, celle de transport et celle de la fin de vie n'incluent pas de processus et ainsi leur impact est nul.

La phase de mise en œuvre inclut : la préparation du terrain (déboisement et prospection archéologique), l'extraction des matériaux du déblai, le mouvement de terre entre déblai, emprunt et remblai, dépôt, la mise en place de matériau en remblai.

Le traitement à la chaux et les géotextiles ont été considérés comme des variables à l'étude. Ils ont été inclus dans la phase de mise en œuvre. La phase de vie en œuvre compte la maîtrise de la végétation.

Les résultats obtenus montrent que la phase de mise en œuvre est celle qui est la plus impactante d'un point de vue environnemental et cela sur tous les indicateurs d'impact considérés. L'impact de la phase de la vie en œuvre quant à lui est quasiment négligeable

par rapport à celui de la phase de mise en œuvre. Les autres phases du cycle de vie ont un impact nul.

Dans la phase de mise en œuvre, pour l'indicateur changement climatique, le processus les puits de carbone résultant du déboisement de la forêt représente 47% de l'impact, suivi des mouvements de terre (33%), de la mise en place des matériaux de déblai (11%), de l'extraction des matériaux de remblai (8%) et enfin de la préparation du terrain (1%).

### **Modèle complet**

Le modèle complet est constitué de l'assemblage des modèles de voie, de plateforme ferroviaire, de signalisation et alimentation et d'ouvrages d'art proratisé au km d'infrastructure ferroviaire double [Feraille, 2014]. Il est important de noter que le niveau de détail des différents modèles n'est pas identique. Les modèles voie et plateforme ferroviaire ont fait l'objet de recherches de données très approfondies et appuyées sur des experts RFF alors que pour les autres modèles, des analyses simplifiées ont été mises en œuvre.

Par ailleurs notons également que l'assemblage réalisé l'est sur la base d'une voie ferrée existante. En effet afin de calculer le nombre de tunnels et de ponts courants relativement à l'unité fonctionnelle considérée et donc ramenée à 1 km de voie ferrée, il a été nécessaire de se placer dans un cas réel. C'est celui de la branche Est de la ligne LGV Rhin Rhone. Ainsi, si la répartition d'ouvrages d'art était différente, les résultats le seraient en conséquence.

La Figure 17 présente la répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée pour une durée d'exploitation supérieure à 100 ans.

La part la plus importante du bilan environnemental est attribuée à la voie.

On remarque la part très importante des murs de soutènements dans le bilan environnemental global.

La Figure 18 présente la répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée pour une durée d'exploitation égale à 100 ans.

Le résultat est peu différent du résultat précédent puisque la durée d'exploitation ne modifie que le modèle voie.

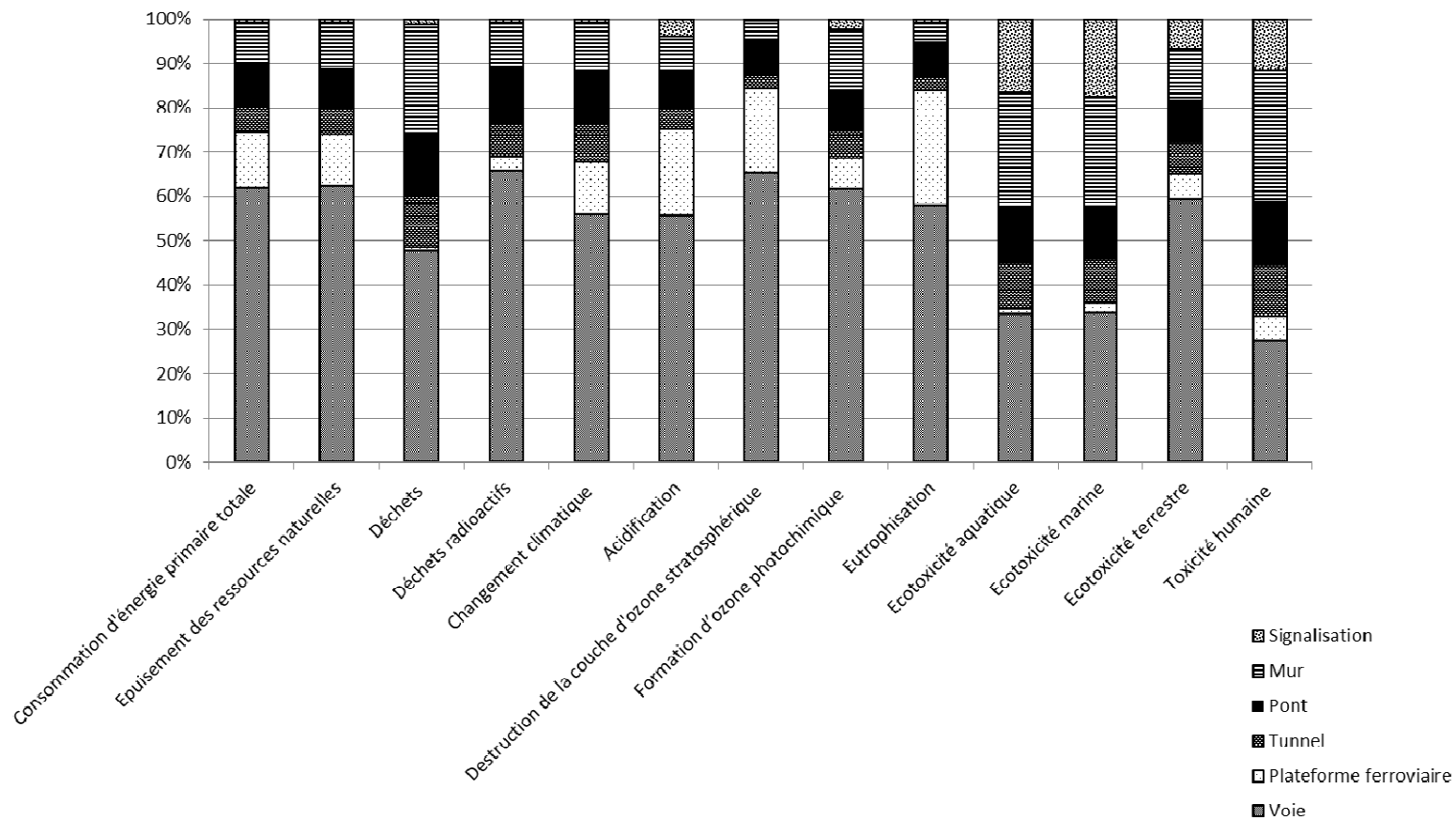
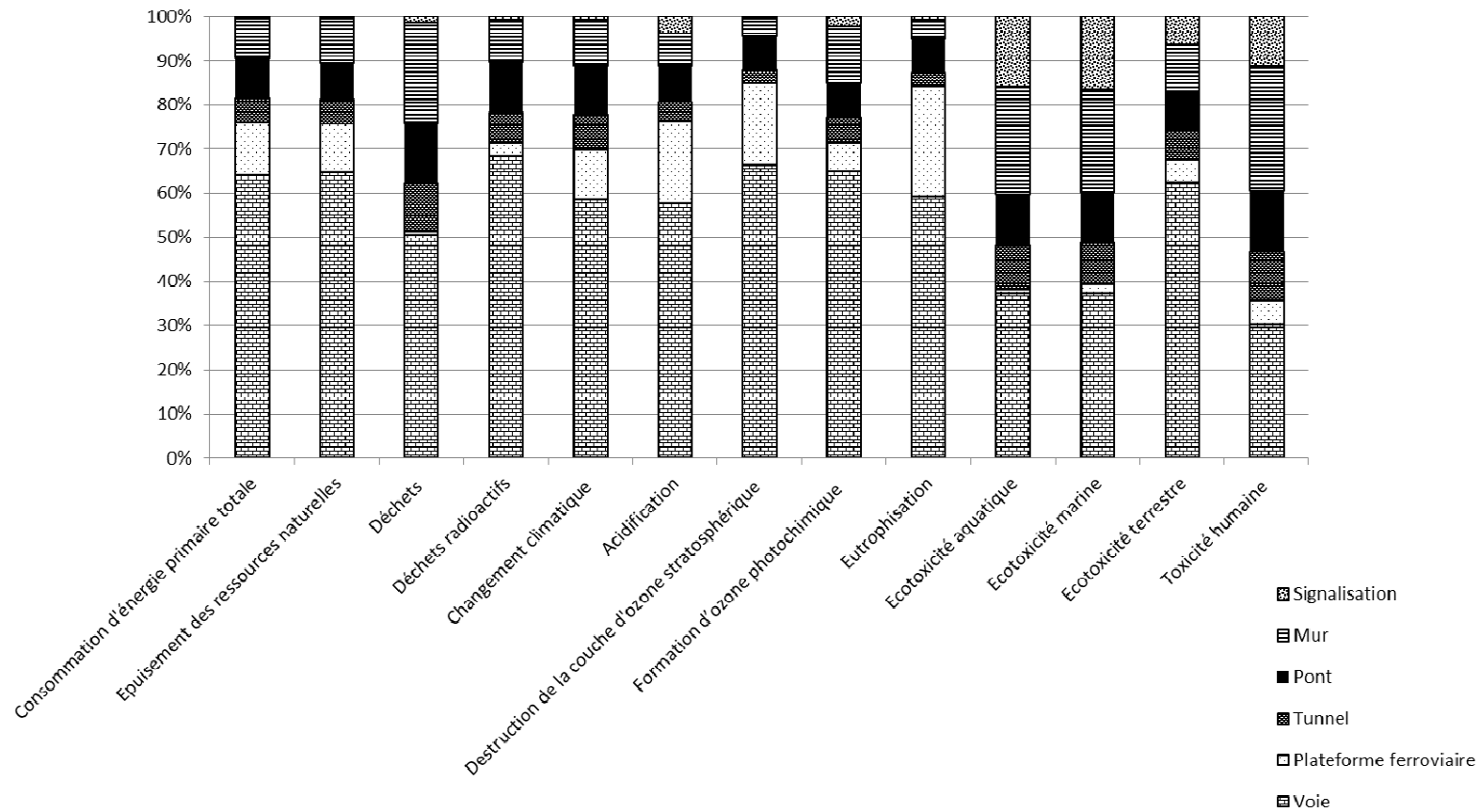


Figure 17 : Répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée (durée d'exploitation > 100 ans)





**Figure 18 : Répartition des indicateurs d'impacts entre les différents modèles constituant la voie ferrée (durée d'exploitation = 100 ans)**

Si l'on cherche à conclure sur le modèle global, résultat de l'assemblage des différents sous-modèles présentés dans ce rapport, et moyennant les réserves faites précédemment, la voie représente la part prépondérante du bilan environnemental global. Cependant les ouvrages de génie civil ont une part non négligeable. Or les modèles utilisés pour les ouvrages d'art sont très simplifiés. Une amélioration de ces modèles pourrait être intéressante. Pour le modèle relatif aux ponts notamment nous nous sommes basés sur le travail réalisé par Cimbéton, or celui-ci était relatif à un pont très usuel dans le domaine routier. Or on sait que les ponts dans le domaine ferroviaire sont relativement différents dans leur conception. Enfin nous allons situer les résultats obtenus relativement à d'autres travaux sur le sujet. Lina Bouhaya [Bouhaya, 2011] avait réalisé en 2011 une revue des travaux existants sur le sujet. Souvent les études réalisées comportaient également le matériel roulant, ce qui a été exclu de cette étude. Le travail de Rozycki et al. [Rozycki et al. 2003] présente une analyse de cycle de vie du système de train à grande vitesse allemande, ICE, en évaluant la consommation des ressources, la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> pour les phases de fabrication d'exploitation et de maintenance des trains ICE, ainsi que pour les phases de construction et du fonctionnement de l'infrastructure. Ce travail a montré que parmi les constituants de l'infrastructure, la construction des tunnels et le chauffage des aiguillages pendant l'hiver sont les éléments qui consomment le plus d'énergie. Dans notre étude l'impact environnemental du modèle tunnel est également relativement important. Un autre travail sur l'analyse de cycle de vie de l'infrastructure ainsi que du trafic de la voie ferrée de la ligne de la Botnie a été réalisé par l'institut suédois de la recherche sur l'environnement et publié en septembre 2010 [Stripple, 2010]. La ligne de la Botnie ('Bothnia line', en suédois: Botniabanen) est une ligne ferroviaire à grande vitesse dans le nord de la Suède. Elle comporte une seule voie et elle est à usage mixte (passagers et marchandises). Elle a été mise en service en Août 2010 et permet le parcours des trains à des vitesses atteignant 250km/h. C'est une ligne nouvelle électrifiée. L'électricité en 2008 en Suède était produite à 99,2% par l'hydroélectricité et à 0,8% sur la base de combustible biomasse. Les impacts étudiés sont : les émissions dans l'air, dans le sol et dans l'eau, les ressources d'énergie renouvelable et non renouvelable, les ressources renouvelables et non renouvelables, les déchets liquides et solides. Ce travail souligne le rôle important joué par la production du rail tout comme dans le travail réalisé ici. D'autre part, les résultats de l'évaluation du cycle de vie ont montré que la phase d'acquisition des matières premières et la production de matériaux est dominante tant pour le matériel roulant que pour l'infrastructure. Cette conclusion est également en accord avec le travail présenté.

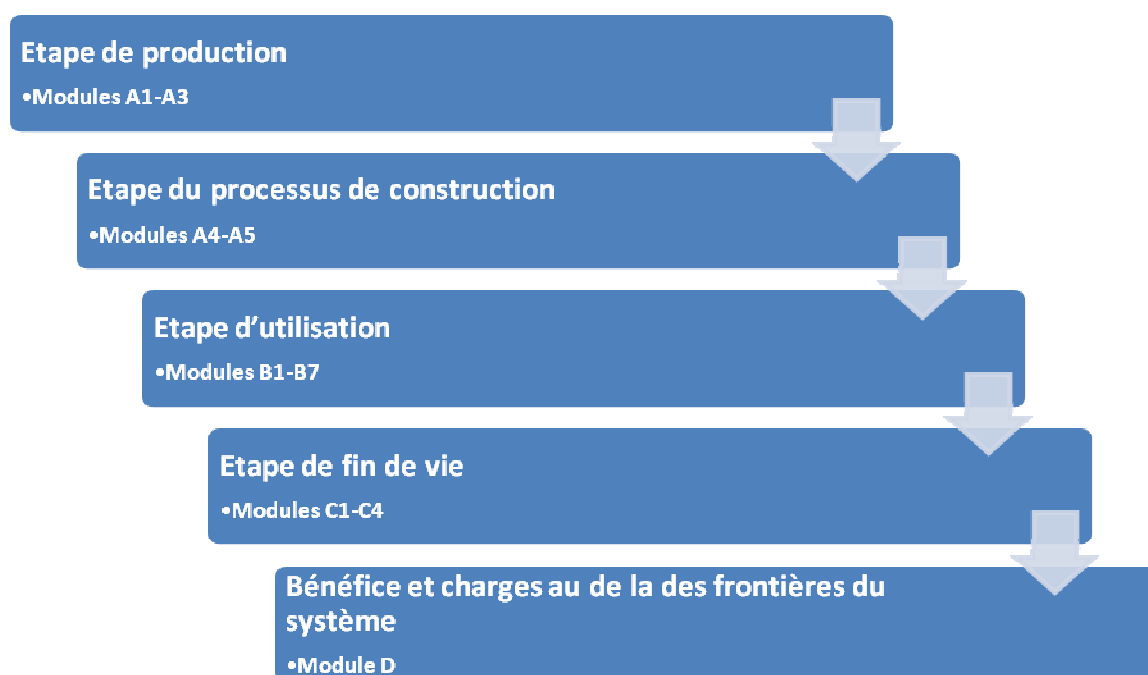
## 5.2. CIOGEN

CIOGEN (Calcul d'Impact des Ouvrages de Génie Civil) est développé par un groupe de travail issu de l'AFGC, en lien très étroit avec le développement de la base de données DIOGEN. Il est conçu pour répondre aux besoins de différents acteurs du génie civil en intégrant des données et un fonctionnement propres au génie civil. Il doit pouvoir constamment s'adapter à ses utilisateurs qui peuvent contribuer à l'évolution des données et des techniques d'évaluation.

En amont d'un projet on a le choix entre différentes variantes de conception, entre plusieurs offres d'entreprise, l'outil CIOGEN devra permettre de les évaluer et d'aider au choix.

En aval, il devra permettre de vérifier la conformité avec l'offre des travaux réalisés.

Un choix important de conception de l'outil a été réalisé : les entrées nécessaires à l'utilisation de CIOGEN sont celles d'un détail estimatif de marché de travaux, c'est-à-dire les désignations précises et quantitatives des matériaux utilisés pour réaliser l'ouvrage projeté. Les phases de transports vers le site de construction et de mise en œuvre sur chantier sont calculées forfaitairement par l'outil à partir de mesures réelles. Dans sa version actuelle, l'outil est donc clairement destiné à une évaluation ex ante, notamment utilisable dans le cadre d'une adjudication de marché travaux. La version 2, qui devrait suivre prochainement, devra permettre à l'utilisateur de prendre en compte les mesures réalisées pendant les phases travaux et donc de permettre également une évaluation ex post. Les étapes ultérieures à la réception de l'ouvrage seront donc prises en compte dans cette version 2. CIOGEN a été développé, dans un premier temps, sur Excell et présente différents onglets qui permettent de visualiser les différentes étapes de l'ACV. L'onglet notice permet à l'utilisateur d'avoir une première approche du logiciel, Figure 19.



**Figure 19: Etapes et modules correspondants définis par la norme NF EN 15804**

On a ensuite un onglet définition de l'ouvrage et des onglets détaillant les différentes étapes de l'ACV, onglets dans lesquels l'utilisateur doit entrer des informations telles que le type de matériaux.

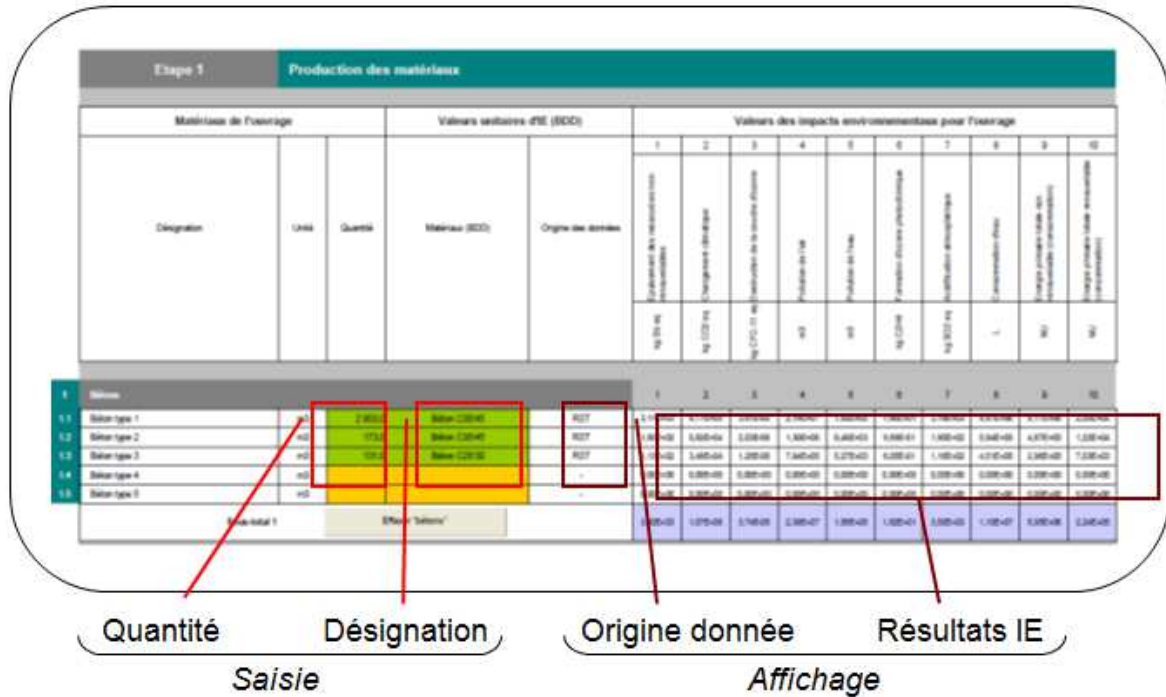


Figure 20: Aperçu de CIOGEN partie calcul

Un onglet « Résultats » permet la visualisation des résultats de calcul. Un diagramme résume l'impact des différents modules sur le cycle de vie (partiel dans la version 1.0) de l'ouvrage : production des matériaux A1-A3, transport A4, construction A5.

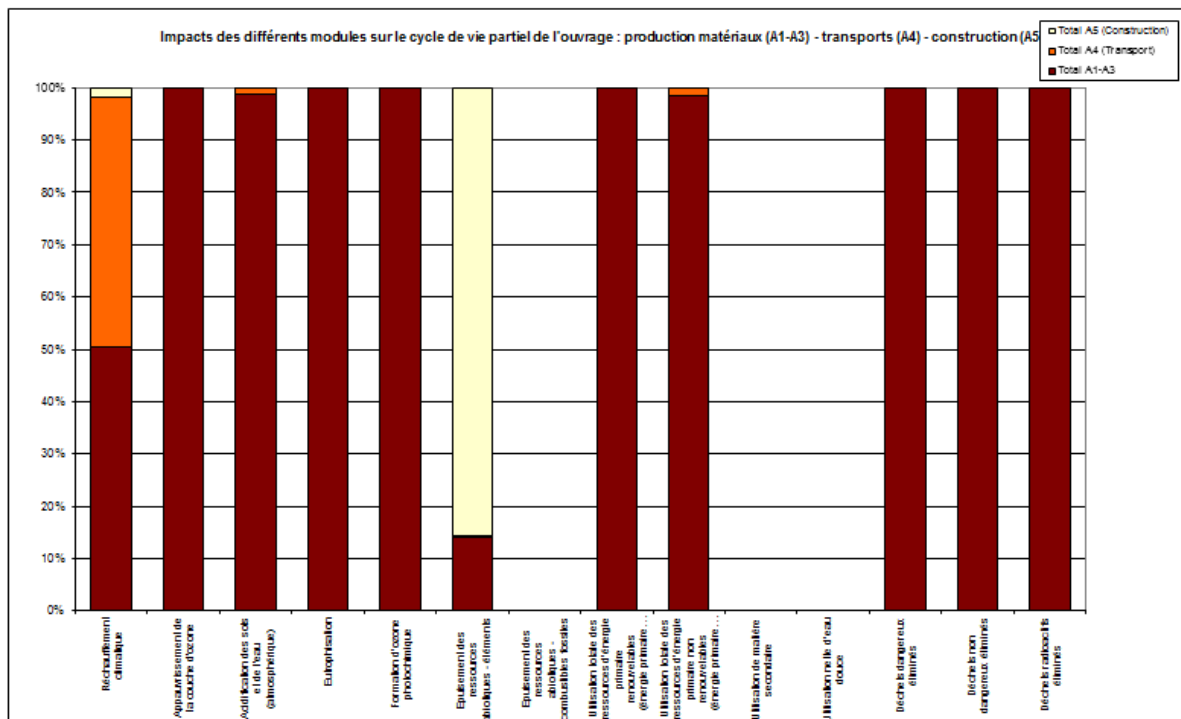


Figure 21: Exemple de diagramme résultat

Les résultats sont calculés à partir de données pouvant provenir de différentes sources :

- La base de données DIOGEN (pour les matériaux disponibles sur cette base, bétons, bois, métaux, ...).
- La base de données Ecoinvent (pour les matériaux qui ne sont pas disponibles sur DIOGEN ainsi que pour tous les process tels que électricités, transports, énergie, ...)
- Des valeurs forfaitaires qui sont établies à partir de relevés de suivis de chantiers. La façon d'établir ces valeurs forfaitaires est expliquée ci-après.

Des suivis de chantier ont donc été réalisés pour obtenir des grilles de recueil de données mise en œuvre par un groupe de travail initié par le SETRA (maintenant CEREMA). Ces chantiers concernaient des ponts en béton armé et béton précontraint ainsi que des ponts mixtes acier béton.

Les grilles de recueil de données se présentent également sous forme de fichier Excell dans lesquelles on retrouve :

- les caractéristiques principales du chantier (telles que sa localisation, le type de structure réalisée, le coût, la durée, ...),
- un tableau avec toutes les matières premières, leurs quantités, leurs parts de déchets et les informations relatives à leurs transports
- Les informations relatives aux engins et matériels utilisés avec les informations suivantes : la liste de tous les engins, leurs caractéristiques leurs masses et les informations relatives à leur transport jusqu'au chantier, le taux d'utilisation et la consommation des différents engins et la liste du matériel et sa consommation
- Les informations relatives aux moyens humains nécessaires et notamment le mode de transport et les kilomètres parcourus par le personnel jusqu'au chantier et sur le chantier.

L'étude de ces fichiers de suivi de chantier permet l'établissement des forfaits de mise en œuvre. A ce jour ce travail est toujours en cours en vue d'améliorer ces ratios en ayant à disposition un plus grand nombre de suivis de chantier. En effet plus on a de suivis de chantier, plus on couvre la diversité des ouvrages et plus finalement les ratios de mise en œuvre sont en adéquation avec le terrain. C'est donc un des développements à venir prochainement dans une nouvelle version de l'outil CIOGEN.

## 6. Fin de vie, réutilisation

Lors d'une Analyse de Cycle de Vie, l'étape de fin de vie est une étape à part entière. Le périmètre de l'ACV peut être cradle to grave (du berceau à la tombe) ou cradle to cradle (du berceau au berceau) ; la phase de fin de vie est alors très différente. Dans le cas d'une ACV cradle to grave cette étape comporte la mise en décharge, dans le cas d'une ACV cradle to cradle elle comporte alors le recyclage, la réutilisation, la valorisation et la mise en décharge. Au cours de ces années passées à travailler sur la réalisation d'ACV à l'échelle des matériaux puis des ouvrages, il m'a semblé intéressant et important de se pencher plus particulièrement sur cette étape de fin de vie.

En premier lieu lors de la réalisation d'une ACV à l'échelle d'un « produit », les objectifs sous-jacents sont de minimiser les impacts environnementaux, de réduire les consommations énergétiques et de ressources naturelles, de diminuer les transports les emballages, ... de conduire à une éco-conception. Or dans ce cadre d'éco-conception, l'un des principes de base est de concevoir le produit pour qu'il soit démontable, déconstruit, recyclable plus facilement [Jolliet et al, 05]. Dans cette partie, nous chercherons alors à voir comment ce principe peut s'appliquer à l'échelle du secteur de la construction. Il s'agira de réflexions très prospectives.

En second lieu les ressources naturelles sur cette planète ne sont pas illimitées. Cela fait plusieurs années que l'on entend parler des limites des ressources fossiles. Cependant ces limites évoluent en même temps que les progrès techniques d'extraction de ressources qui ne semblaient pas exploitables auparavant et qui ne le sont pas toujours sans dégâts environnementaux. Concernant certains métaux on annonce une pénurie de zinc en 2025, de plomb en 2030, de cuivre en 2040 [Matière Grise]. Le sable est la deuxième ressource naturelle utilisée après l'eau, 15 milliards de tonnes sont extraites par an. Denis Delestrac dans son documentaire intitulé « Le sable enquête sur une disparition », sur Arte en 2013, sonne l'alerte sur un matériau qui n'était pas classé comme ressource épuisable. Or le sable est utilisé dans la fabrication du verre, du béton (le béton dans le monde représente 6 milliard de m<sup>3</sup>). Denis Delestrac met l'accent sur le fait qu'après avoir utilisé du sable issu des carrières puis des rivières, on extrait massivement du sable des fonds marins ce qui n'est pas sans effets sur les écosystèmes. Ainsi est ce que les décharges ne sont pas les nouvelles carrières, voir les nouvelles mines ?

Le secteur du BTP (Bâtiment Travaux Publics) est un important consommateur de matériaux (447 MT de granulats pour l'année 2006) et produits manufacturés (21,4 MT de ciment en 2008, 44 MT de béton, en plus de 44 Mm<sup>3</sup> de béton prêt à l'emploi, en 2008, 10 à 15 T de métal par habitant, en 2010, 2,8 MT de mortier en 2008, 47,24 MT de tonnes de bitume routier, enrobés, émulsions et liant bitumineux en 2008, en France). Il en résulte un gisement de déchets de construction et de démolition en France non négligeable estimé à 5,5 T/hab en 2004, contre 1,8 T/hab dans l'Europe des 27. Les chiffres donnés proviennent du rapport du projet ASURET (Analyse Systémique de l'Utilisation de Ressources renouvelables de la Technosphère) [ASURET, 2010]. Le BTP est ainsi responsable de 40% des déchets produits en France, en 2009, avec une production de 359 MT. Ce secteur produit ainsi des déchets inertes, des déchets non dangereux (DND) et des déchets dangereux (DD) (amiante, peinture, produits chimiques et électriques).

Ainsi dans le contexte de réduction de l'accès aux matières premières et dans un contexte général de développement durable ou encore d'économie circulaire, les questions de

réemploi, recyclage dans ce domaine de la construction prennent sens. Dans ce chapitre une première partie présentera les définitions usuelles des termes importants. Puis il m'a semblé intéressant de montrer des exemples de réalisations dans le domaine de la construction avec des matériaux du réemploi avant d'en présenter la problématique de façon plus approfondie. Et enfin, je présenterai deux exemples de réutilisation pour illustrer ce chapitre. Le premier exemple a été traité par Raphael Brière dans sa thèse [Brière, 2016] ; il s'agit de la réutilisation d'un élément constitutif de bâtiment (une poutre en béton armé). Le second exemple, exploré par Sarah Allouch [Allouch 2015], qui étudie la réutilisation de matériaux à l'échelle de la déconstruction d'un bâtiment complet. Ces exemples ont été construits dans une démarche très prospective.

## 6.1. Définitions usuelles

Commençons par définir quelques termes usuels tels que présentés dans la législation française.

### 6.1.1. Déchets

Un déchet est défini dans l'article L541-1-1 du code de l'environnement comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » [Code de l'environnement], [Directive 2008/98/CE] :

Les typologies de déchets sont définies à l'article R541-8 du code de l'environnement [Code de l'environnement] :

- Déchets dangereux (DD) : tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe I au présent article. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets de l'annexe II au présent article.
- Déchets non dangereux (DND) : tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux.
- Déchet inerte : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.
- Déchet ménager : tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur est un ménage.
- Déchet d'activités économiques : tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage.
- Biodéchet : tout déchet non dangereux biodégradable de jardin ou de parc, tout déchet non dangereux alimentaire ou de cuisine issu notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires.

Il est intéressant de se rappeler qu'historiquement, le concept de déchet est apparu en 1883 lorsque le préfet de Paris Eugène Poubelle rend obligatoire l'utilisation de bacs à ordures et qu'alors la poubelle a engendré une plus grande consommation de matière puisqu'au

auparavant on tentait de produire le moins possible de déchets. Ainsi on note que l'on cherche aujourd'hui à inverser ce processus [Huygen, 2008].

### *6.1.2. Démolition, déconstruction*

Le guide Eyrolles publié en 2006 sur la démolition des bâtiments [Philip et al, 2006] propose une première définition pour la démolition : « C'est l'ensemble des actions visant à décomposer une structure, un ouvrage, en éléments suffisamment réduits pour être évacués, éventuellement recyclés, dans les meilleures conditions de sécurité, en mettant en œuvre les procédés et les méthodes les mieux adaptés. »

Dans le guide, le terme « déconstruction » n'est mentionné à aucun moment. De même, dans un document émis par le gouvernement néo-zélandais mis à jour en octobre 2013 [Demolition New Zealand], aucune distinction n'est réellement faite. La démolition y est décrite comme « la déconstruction, le démantèlement ou la destruction d'un bâtiment impliquant des modifications dans le gros œuvre ».

En 2011, Thomsen & al [Thomsen et al 2011] ont présenté la déconstruction comme un procédé positif constitué de deux phases :

- La planification contrôlée de la déconstruction d'un bâtiment qui permet d'obtenir un ensemble de matériaux et d'éléments.
- L'utilisation de ces éléments dans d'autres bâtiments ou dans des applications permettant de limiter le « down cycling » c'est-à-dire l'utilisation d'un produit dans des applications de moindre qualité entraînant une perte des propriétés et de la fonctionnalité.

Le terme « déconstruction » y est clairement opposé à la « démolition » qui est vu comme un procédé assez grossier où les différents éléments sont abattus et envoyés pêle-mêle en décharge. L'institut « Delta » installé aux Etats-Unis est une organisation qui œuvre depuis 15 ans dans la région des Grands Lacs au développement économique et durable de la région. Cet institut a publié un guide méthodologique en 2011 pour la déconstruction des édifices et la réutilisation des matériaux récupérés [Deconstruction 2011]. La déconstruction est définie comme « processus de démantèlement systématique d'une structure dans le but de récupérer un maximum de matériau en vue de réutilisation ou de recyclage dans un cadre économique, écologique et social responsable » et est synonyme de démolition douce (« soft demolition »). Là aussi, la déconstruction est opposée à la démolition dite « traditionnelle » décrite quelques lignes plus haut où un maximum de déchets sont placés en décharge à moindre frais sans volonté de réutiliser, recycler ou revaloriser les matériaux du bâtiment détruit.

### *6.1.3. Le réemploi*

La directive européenne de 2008/98/CE définit le réemploi comme étant : « toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus ». Cette directive impose aux états membres de l'Union Européenne, selon l'article 11, un objectif de réemploi, recyclage et valorisation de la matière dans le BTP, à hauteur de 70% en poids à l'horizon 2020, en établissant une certaine hiérarchie dans le traitement des déchets.





**Figure 22: Hiérarchisation de la prévention et de gestion des déchets (Article 4.1 de la directive 2008/98/CE)**

On parle de l'approche des 3R-V : Réduire, Réutiliser, Recycler, Valoriser, [Huygen, 2008]. D'un point de vue environnemental, il est plus efficace de réutiliser que de recycler. Ainsi, le collectif d'architectes encore heureux définit le réemploi et la réutilisation de la façon suivante. Le réemploi c'est se servir à nouveau d'un objet ou d'une partie de l'objet, tel qu'il a été conçu, pour un usage autre. Le réemploi conserve alors la forme. Le recyclage conserve la matière, on détruit l'objet et on en réintroduit la matière dans un nouveau cycle, c'est de la matière première secondaire. La réutilisation conserve alors la fonction, on réutilise l'objet pour un usage similaire à son usage premier<sup>7</sup>.

En parallèle dans la directive européenne de 2008/98/CE, la notion de réutilisation n'est pas abordée mais est défini le terme valorisation comme étant: « toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie. » Le terme de recyclage est défini de la façon suivante : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins ».

Le recyclage n'est pas nécessairement une bonne solution. Ce fait est abordé à la fois dans la directive européenne de 2008 qui donne une hiérarchisation de la gestion des déchets (Figure 22) mais également par le collectif d'architectes Encore heureux ou dans les écrits de Huygen [Huygen, 2008] [Matière grise]. En effet, le « downcycling », ou décyclage, réduit la qualité du matériau dans le temps. De plus quand les constituants ne peuvent être aisément séparés, recycler revient à recycler un « tout » dans lequel certains constituants altèrent le matériau d'une part, et d'autre part peuvent contribuer à contaminer la biosphère.

En conclusion, l'intérêt principal du réemploi est bien de nature environnementale puisqu'il contribue non seulement à la préservation des ressources mais le produit étant réemployé quasiment tel que, il n'induit que très peu de contributions supplémentaires.

<sup>7</sup> <http://encoreheureux.org/> (collectif d'architectes)

#### 6.1.4. Différents types de déchets dans le secteur de la construction

Quels sont les différents types de déchets dans le secteur de la construction ?

Le secteur du Bâtiment et Travaux Publics produit des déchets de toutes natures recoupant les trois classes de déchets :

- inertes : béton, pierres, briques, tuiles, céramiques, carrelages, verres, terres, granulats et gravats non pollués...,
- non dangereux (banals) : bois non traités, métaux, matières plastiques, matériaux d'isolation sans amiante, textiles, déchets d'emballages non souillés, déchets verts...,
- dangereux : goudron et produits goudronnés, amiante, résidus de peinture, de colles et mastics avec solvants ou contenant des oxydes de métaux lourds, emballages souillés, certains bois traités ou souillés, suies, acides et bases....

Ainsi les types de déchets sont associés à des types d'installations de stockage et à des coûts associés (Tableau 21) :

**Tableau 21** : Coût de la mise en décharge dans les installations de stockage [FFB 2010]

Installations de stockage	Prix (à la tonne)
Installations de stockage de déchets dangereux (ISDD)	Entre 200 et 500 euros
Installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND)	Entre 60 et 120 euros
Installations de stockage de déchets inertes (ISDI)	Entre 3 et 12 euros

Dans une logique de réemploi ou de réutilisation, une redéfinition du statut de déchet est nécessaire pour pouvoir manier les éléments en fin de vie. Le principe de sortie du statut de déchet apparaît pour la première fois dans la directive cadre européenne 2008/98/CE (« end of waste »). Il s'agit alors de définir les conditions sous lesquelles certains déchets cessent d'être des déchets.

On peut utiliser le terme de « Non-déchet », qui n'est pas officiel mais qui a été utilisé dans le cadre d'une étude de l'association RECORD (REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement)<sup>8</sup>, pour désigner un déchet ayant cessé d'être un déchet et pouvant être utilisé en substitution de matière première. Lorsqu'un déchet cesse d'être déchet, il ne relève plus du champ d'application sur les déchets.

Quatre conditions sont à respecter pour sortir du statut de déchet (article 6 de la directive 2008/98/CE) :

- Un usage courant à des fins spécifiques de l'objet
- L'existence d'un marché (offre et demande)
- Le respect des exigences techniques et de la législation et des normes applicables au produit

<sup>8</sup> [http://www.record-net.org/storage/etudes/12-0147-1A/rapport/Rapport\\_record12-0147\\_1A.pdf](http://www.record-net.org/storage/etudes/12-0147-1A/rapport/Rapport_record12-0147_1A.pdf)

- L'utilisation de l'objet ne doit pas avoir d'effets nocifs sur la santé ou sur l'environnement (évaluer les impacts supposés différents entre le recyclage et l'utilisation du non-déchet, et l'élimination du déchet).

Le déchet peut alors perdre son statut lorsque :

- Le procédé de recyclage/valorisation est achevé
- L'objet ou la substance est prêt à être utilisé dans les mêmes conditions que la matière première substituée
- Le recycleur a concrètement prouvé qu'il répondait aux critères spécifiques et il a produit une attestation de conformité pour le lot concerné.

Le Ministère Français affirme ainsi qu'un déchet ne cesse d'être un déchet que lorsqu'il est effectivement vendu, c'est-à-dire au moment où il quitte le site de recyclage vers son utilisateur. Par contre, le statut de déchet peut être rendu si le non-déchet n'est pas utilisé ou est éliminé.

Une interprétation différente de cet article [Directive 2008/98/CE] est faite par les différents pays de l'UE, chacun ayant notifié des arrêtés et des critères de sortie du statut de déchet qui diffèrent d'un pays à l'autre. Ceux-ci ont été réalisés avec l'appui du ministère de l'environnement et de fédérations d'industries liées aux déchets, pour chaque pays. Cette question de la sortie du statut de déchet est un point délicat qui donne lieu à des réflexions. Ainsi, l'association RECORD a développé une méthodologie générale utilisée comme cadre pour développer ces critères<sup>5</sup> :

1. Flux entrant : les caractéristiques problématiques doivent pouvoir être contrôlées, à l'entrée ou durant le recyclage
2. Procédés et techniques de recyclage : la qualité du non-déchet doit pouvoir être vérifiée via le procédé de recyclage
3. Qualité du produit : contrôle des risques liés au non-déchet par rapport aux contraintes environnementales liées à la législation produit
4. Applications potentielles : le non-déchet doit être traité
5. Contrôle de qualité : mise en place de procédures de contrôle qualité

Une fois les critères développés, une étude d'impact doit être réalisée et porter sur les impacts environnementaux et sanitaires, économiques, sur le marché, réglementaires et socio-économiques.

Une fois les contraintes réglementaires posées nous allons donner quelques exemples de pratiques de réemploi dans le domaine de la construction.

## **6.2. Pratiques de réemploi dans le monde**

La question du réemploi n'a commencée à être abordée que récemment en France. Mais au niveau international, des progrès considérables ont été faits à plusieurs niveaux et peuvent nous servir de modèle. Cette partie dresse un panorama non exhaustif des pratiques de réemploi en lien avec les pratiques constructives.

### *6.2.1. Belgique*

Plusieurs initiatives ont vu le jour en Belgique en vue de promouvoir le réemploi. Un guide pratique du réemploi et de la réutilisation des matériaux de construction a été publié en 2013<sup>9</sup>, résultat d'une collaboration entre la Confédération Construction, la fédération

---

<sup>9</sup> [http://www.cifful.ulg.ac.be/images/stories/Guide\\_reemploi\\_materiaux\\_lecture\\_2013.pdf](http://www.cifful.ulg.ac.be/images/stories/Guide_reemploi_materiaux_lecture_2013.pdf)

RESSOURCES (qui représente le secteur de l'économie sociale du réemploi) et le CIFIUL (centre d'ingénierie pédagogique de l'Université de Liège). Ce guide définit les rôles à tenir par les différents acteurs lors d'un projet de construction à base de réemploi, et met en avant plusieurs projets pilotes qui ont servi comme base à ces procédures ainsi que des pistes sur les possibilités de réemploi de divers matériaux. Le pays a pour objectif de faire évoluer la réglementation dans un horizon de 5 ans afin d'imposer un minimum de réemploi dans les marchés publics.

Le collectif Rotor<sup>10</sup>, fondé en 2005 et constitué d'une dizaine d'architectes, réfléchit à l'usage et au réemploi des matériaux, à l'obsolescence des structures. Plusieurs projets sont ainsi menés dans une optique de professionnalisation du réemploi. Le réemploi de matériaux se fait généralement de façon informelle. Confrontée à des projets publics de grande ampleur, l'association soulève plusieurs questions: comment prescrire dans un cahier des charges un matériau aux caractéristiques non connues ? Comment s'assurer qu'un matériau (issu d'une source éphémère) sera disponible au moment de l'exécution ? Où trouver l'expertise technique pour sa mise en œuvre ? L'un des premiers projets concrets de Rotor a été la mise en place du site internet Opalis<sup>11</sup>. Ce site offre une cartographie des revendeurs professionnels, des fiches matériaux de type cahier des charges pour les grandes familles de matériaux rencontrés sur le marché de la récupération en Belgique (ex : bois de construction, brique, carrelage, antiquités architecturales, ...), ainsi que des conseils et des réponses à tous types de questions se référant au réemploi.

Un cas particulier de la Belgique est la construction en brique de réemploi. Il est communément admis que l'on construise avec des briques de réemploi qui sont préférées aux briques industrielles. En effet, elles sont considérées comme plus authentiques, plus rigides (car ayant fait leurs preuves), et plus esthétiques. Bien que la brique ne soit pas un matériau facile à récupérer ni évident à remettre en œuvre, la filière bénéficie d'une bonne organisation des acteurs qui la constituent. Il est à noter que des filières de réemploi peuvent donc se mettre en place même dans des cas complexes.

Enfin, on compte la mise en place de la formation de « valoriste » dont la finalité est de concevoir et mettre en œuvre une politique de gestion-valorisation des déchets en entreprise. Cette formation s'adresse plutôt à des travailleurs ou demandeurs d'emploi ayant un diplôme de technicien supérieur ou de diplômé.

### 6.2.2. Pays-Bas

Les Pays-Bas montrent un intérêt pour l'éco-conception au travers du concept de « Cradle to Cradle », concept défini par l'architecte designer William McDonough et le chimiste allemand Michael Braungart en 1995.

Le cabinet d'architectes Superuse Studios, basé à Rotterdam, a plusieurs réalisations à son actif, notamment des projets d'intérêt public, en réinventant la possibilité d'usage de certaines fournitures qui seraient devenues obsolètes bien qu'en très bon état. 60% des matériaux de construction utilisés dans leurs projets sont d'occasion.

Ils s'appuient sur de nouveaux concepts :

- Superuse/superutilisation : transformation de matériaux, de pièces et d'éléments mis au rebut en vue d'un nouvel usage, afin de leur donner une nouvelle vie non planifiée à l'origine.

---

<sup>10</sup> <http://www.rotordb.org/>

<sup>11</sup> [Optalis.be](http://Optalis.be)

- Mise en place d'un « facteur de pertinence de superutilisation » qui décrit le rapport entre la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire à la réutilisation d'un déchet (y compris le processus de conservation et de transport) et la quantité d'énergie consommée à l'origine pour sa production.

Superuse Studios construit suivant les principes de la Supply Driven Architecture (SDA) [Poelman, 2009]. Dans la SDA, l'objectif est de construire les nouveaux bâtiments avec des éléments et des matériaux de bâtiments déconstruits tout en respectant les normes de sécurité, d'énergie, de confort et d'esthétique. Ce sont donc les plans de l'architecte qui s'adaptent aux produits disponibles et non l'inverse. En effet, les concepteurs disposent aujourd'hui d'un immense catalogue de 100 000 matériaux parmi lesquels ils peuvent piocher pour réaliser leurs idées. Dans la SDA, la créativité des architectes pour concevoir de nouveaux édifices est favorisée par les matériaux à disposition dans les environs du chantier. Cette nouvelle approche demande une plus grande adaptabilité pour imaginer des structures à partir d'une offre limitée de matériaux dont il est nécessaire d'avoir une idée de la localisation.

La Villa Welpeloo à Enschede, illustrée Figure 23 est construite par Superuse Studios selon ce principe de SDA. Les fondations sont en coquillages. La façade est presque entièrement faite à partir des planches intérieures d'enrouleurs de câbles provenant d'une usine à proximité. La structure métallique est élaborée à partir des éléments d'une ancienne machine d'une usine textile. Les luminaires sont faits à partir de baleines de parapluie.



Figure 23: Villa Welpeloo, SuperUse Studios<sup>12</sup>

Les Pays-Bas ont développé un intérêt pour le traitement des déchets de construction dans les années 1970, à partir du constat de la baisse de qualité des sols. Les rejets dus à la lixiviation ont alors été jugés plus nocifs que la composition chimique globale des matériaux [Eikelboom et al, 2001]. Cela a servi comme base à l'établissement du « Building Materials Decree » (BMD), qui est l'une des réglementations les plus importantes dans le domaine, entrée en vigueur en 1999. Le BMD ne fait pas de distinction entre matières premières, secondaires et déchets, dans la mesure où elles ont la même matrice et doivent obéir aux mêmes normes.

### 6.2.3. Royaume-Uni

Le BedZED, Beddington Zero (Fossil) Energy Development, est un célèbre écoquartier anglais, construit en 2002 à Sutton au Sud de Londres. Ce quartier se veut non seulement

<sup>12</sup> <https://smartarch.wordpress.com/category/projects/>

<http://superuse-studios.com/index.php/2009/10/villa-welpeloo/>

durable et peu consommateur en énergie mais aussi le lieu d'une véritable mixité sociale. Ce projet utilise plusieurs éléments de réemploi :

- 95% de la structure métallique est issue de profils réemployés, plus de 100 tonnes collectées dans un rayon de 50km, dans les décharges ou auprès d'entreprises de déconstruction.
- 54 km d'éléments de charpente bois sont réemployés.

Un guide a été mis en place, en mai 2008, pour les particuliers, entreprises et autorités publiques, « Reclaimed building products guide<sup>13</sup> ». Ce guide explique comment gérer un projet à base de réemploi. Plusieurs tableaux synthétiques mettent en avant les caractéristiques de divers types d'éléments faits de matériaux différents, leur possibilité d'application, et une comparaison financière avec l'emploi d'un matériau neuf. Le guide présente également des études de cas de réemploi. Et enfin le guide donne un inventaire des entreprises proposant les matériaux de réemploi, par zone géographique, avec leurs coordonnées.

#### 6.2.4. *Etats Unis*

Aux Etats-Unis, la construction résidentielle se fait essentiellement en bois. Cela rend sa déconstruction plus facilement envisageable. Aujourd'hui la démolition est plus courante car plus rapide. On promeut néanmoins la déconstruction. La déconstruction demande moins d'appareils performants que la démolition mais plus de main d'œuvre. Elle se doit d'être moins coûteuse de sorte à combler la « perte de temps ». On économise de l'argent au niveau des taxes sur les matériaux en les revendant ou en les réutilisant sur d'autres projets. On envisage aussi de développer des moyens pour une déconstruction plus rapide et plus productive, comme un outil performant qui pourrait retirer les clous plus vite qu'avec un marteau [CIB, 2014]. Pour faire face à la lenteur de la déconstruction et à la nécessité de réévaluer le bois déconstruit, on envisage de réévaluer le bois sur place en faisant venir un inspecteur ou expert au moment de la déconstruction. Celui-ci déciderait directement de la possibilité de réemploi ou de recyclage du bois au moment de sa déconstruction, maximisant ainsi le réemploi/recyclage du bois et diminuant la quantité de bois jeté en décharge. D'autres stratégies sont envisagées, comme imposer un pourcentage minimum de matériaux recyclés à utiliser sur un projet, mettre en place une formation en recyclage des entreprises auprès des ouvriers, et mettre en place une prime sur le réemploi.

D'autre part, la construction métallique concerne essentiellement les bâtiments commerciaux. On ne peut pas démolir la structure métallique avec un boulet de démolition. On démolit tout ce qu'il y a autour de la structure, puis on démantèle la structure. On éviterait la location de matériel de démolition coûteux et on récupérerait les matériaux pour une utilisation postérieure. Par ailleurs, la démolition pose plus de problèmes de sécurité que la déconstruction. Les compagnies d'assurances pourraient jouer un rôle, les entreprises évalueraient alors l'économie qu'ils pourraient faire sur leur assurance si celle-ci est plus grande que la différence de coût entre démolition et déconstruction.

Pour l'acier, le réemploi est la solution la moins énergivore, mais difficile à accomplir car les dimensions et capacités de charge ne sont souvent pas les bonnes. Il faudrait alors penser à construire une forme standardisée de bâtiments, avec la même forme et la même structure, ce qui donnerait des dimensions plus communes et réemployables.

---

<sup>13</sup> [http://www2.wrap.org.uk/downloads/Reclaimed\\_building\\_products\\_guide.0ccbb626.5259.pdf](http://www2.wrap.org.uk/downloads/Reclaimed_building_products_guide.0ccbb626.5259.pdf)

Les États-Unis ont connu une histoire différente de celle de l'Europe, et ont vu l'émergence de plusieurs associations et collectifs qui se sont spécialisés dans le réemploi, notamment compte tenu des catastrophes climatiques. Par exemple, The ReUse People of America (TRP) a été créé en 1993 à la suite des inondations de Tijuana au Mexique qui ont nécessité une reconstruction rapide, principalement à base de matériaux déjà présents sur le site.

Il existe des associations à but non lucratif qui proposent de déconstruire les bâtiments afin de récupérer un maximum de matériaux réutilisables. Les récupérations concernent autant des éléments du second œuvre (portes, fenêtres, sanitaires...) que des éléments du gros œuvre (poutres en bois, planchers et éléments de toiture...). « The Rebuilding Center<sup>14</sup> » and « The Reuse people<sup>15</sup> » stockent alors les éléments récupérés dans de gros entrepôts où les entreprises peuvent venir acheter des matières premières secondaires.

#### 6.2.5. Canada

Le Québec a connu de nombreux changements depuis la mise en place de la « Politique québécoise de gestion des matières résiduelles au Québec » avec un plan d'action 2011-2015 et deux points concernant les matériaux de construction : recycler ou valoriser 80 % des résidus de béton, de brique et d'asphalte ; trier à la source ou acheminer vers un centre de tri 70 % des résidus de construction, de rénovation et de démolition du segment du bâtiment. Sur le même schéma que la directive européenne 2008/98/CE, on retrouve le principe 3RV-E (Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation, Elimination). Le réemploi y est défini comme étant « L'utilisation répétée d'un produit [ou de matériaux de construction] sans modification importante de son apparence ou de ses propriétés ». Le réemploi est envisagé comme créateur d'emplois, moyen de développement d'organismes, moyen de subvenir aux besoins de personnes défavorisées, et moyen d'éviter la mise en décharge. Différentes infrastructures sont développées pour gérer les résidus de chantiers de construction et déconstruction :

- les écocentres, qui sont des sites d'apport de matières résiduelles par des particuliers et des petites entreprises,
- les centres de réemploi de matériaux de construction,
  - les entreprises de démolition qui se spécialisent dans la revente des matériaux
  - les organismes d'économie sociale, qui présentent l'avantage d'avoir accès à une main d'œuvre bon marché
  - les entreprises privées

Les 18 centres présents en 2006 au Québec présentaient néanmoins les inconvénients de ne pas répondre aux besoins de la population : l'espace restreint, absence d'un inventaire complet et de plusieurs produits assurant un choix suffisant. Deux autres points essentiels sont la garantie de l'approvisionnement et la disposition d'équipements pour effectuer des tests de conformité sur les produits [Millette, 2010].

La BRIQ (Bourse de résidus industriels du Québec) est une plateforme fonctionnant sur le principe selon lequel les résidus des uns sont des matières premières pour d'autres. Créée en 2005 par le Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI), le projet regroupe plusieurs partenaires, des ministères et organismes publics et des entreprises privées.

---

<sup>14</sup> <http://www.rebuildingcenter.org/>

<sup>15</sup> <http://thereusepeople.org/>

Le 3RMCDQ (Regroupement des récupérateurs et des recycleurs des matériaux de construction et de démolition du Québec) est une association reconnue regroupant plusieurs acteurs. Elle fait la promotion de méthodes écologiques et responsables dans la construction et démolition, en créant des groupes de travail et en diffusant l'information (participation à des congrès, remise de prix, ...).

#### 6.2.6. France

L'exposition Matière Grise, qui s'est tenue au Pavillon Arsenal à Paris au dernier trimestre de 2014, a présenté toute une réflexion sur le réemploi dans la construction. Un livre accompagnant l'exposition a été édité par le cabinet d'architectes Encore Heureux, [Matière grise]. On y retrouve 75 projets de par le monde ainsi que des essais et des entretiens réalisés auprès d'acteurs du réemploi de divers types. L'exposition et le livre présentent une vision autre de l'architecture, ancrée dans une économie circulaire, où l'on s'efforce de "consommer plus de matière grise pour engendrer moins de matières grises". Elle propose une nouvelle approche de la construction, en ne considérant plus le matériau ayant servi comme déchet à évacuer mais comme matière à réutiliser et réadapter.

Les bâtisseurs d'Emmaüs est une association créée en 2007, référence en matière de réemploi en France. Elle est basée à Neuilly Plaisance et est composée de professionnels du bâtiment et de l'insertion qui visent à réinsérer des personnes issues de milieux précaires par des activités de constructions, de rénovations et de réhabilitations. L'association a aussi pour objectif la mise au point de solutions constructives par le réemploi de matériaux et composants de la construction. L'association a lancé une étude de faisabilité en 2013, en vue de créer un pôle de récupération en produits du bâtiment pour la région Île-de-France, avec une réflexion sur un modèle économique viable. Celle-ci a déjà mené une étude sur le réemploi des fenêtres en bois en fin de vie, en 2012.

Bellastock<sup>16</sup>, une association d'architecture créée en 2006, propose une vision alternative de la construction en travaillant sur les cycles de matière. Profitant de la déconstruction des entrepôts Printemps sur l'île Saint-Denis, Bellastock a ainsi implanté un laboratoire d'expérimentation sur ce terrain nommé Act'lab. Des expérimentations ont permis de détourner des éléments de leur usage initial : un réseau de tubes Sprinkler anti-incendie ont ainsi été démantelés, reconditionnés puis associés à des skydômes pour obtenir des luminaires.

---

<sup>16</sup> <http://www.bellastock.com/>





**Figure 24 : Exemple de luminaire obtenu avec des matériaux de réemploi<sup>17</sup>**

En parallèle avait été mené le projet de recherche Repar (REemploi comme Passerelle entre l'Architecture et l'industrie) pour le compte de l'ADEME afin d'expérimenter le réemploi in situ avec un travail sur la collecte des matériaux, leur préparation au réemploi et leur remise en œuvre.

On en retient la nécessité de la traçabilité des matériaux de déconstruction, afin de connaître leur histoire et leur mise en œuvre pour les déposer et le reposer correctement, ainsi que la mise en place d'une organisation pour le stockage. Le laboratoire a aussi trouvé une réutilisation possible pour le béton, où l'on trouve des morceaux de béton réassemblés pour des murs ou revêtements de sol.

D'autre part, la réglementation française, en perpétuelle évolution, prend une tournure favorable au réemploi, bien que cela soit surtout théorique pour le moment. Cela sera règlementé par la mise en place d'ATEX (Appréciation Technique d'Expérimentation), qui permet la mise en place de techniques ou de matériaux nouveaux après approbation par un comité d'expert présidé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

On peut noter que les points communs entre ces différents pays est la réglementation qui peut même aller parfois jusqu'à la législation qui oblige au réemploi et/ou au recyclage. Il semble que les questions du bien déconstruire sont en cours d'évaluation dans plusieurs pays en lien avec la construction en vue de la déconstruction. Enfin il est à noter que dans les pays les plus avancés en matière de réemploi, des filières d'enseignement sont mises en place.

---

<sup>17</sup> <http://www.bellastock.com/realisations/glaneuse/>

### 6.3. La problématique du réemploi

#### 6.3.1. Qu'est-ce que le réemploi ?

Comme présenté dans le paragraphe 6.1.3, l'intérêt principal d'utiliser des matériaux de réemploi est donc l'avantage environnemental qu'ils présentent.

La pratique du réemploi nécessite néanmoins une vérification préalable du respect des différents critères d'exigence de ces matériaux, tant du point de vue technique que du confort. Ce point est un des freins important au développement plus large du réemploi et sera abordé plus largement au paragraphe 6.3.2. Construire avec des matériaux du réemploi diffère de la construction traditionnelle, et nécessite donc une concertation poussée entre les différents acteurs : ingénieurs, entreprises, et maîtrise d'œuvre.

Enfin, les filières de réemploi et de réutilisation ont des bénéfices sociaux et économiques. Ces solutions alternatives demandent plus de main d'œuvre que d'autres filières de fin de vie : pour 10 000 t de déchets il faut un poste pour les incinérer, 6 pour les enterrer et 36 pour les réutiliser<sup>18</sup>. De plus, l'apprentissage lié à la prise en main des techniques de déconstruction donnent l'opportunité à des personnes peu ou pas qualifiées de s'insérer sur le marché du travail. Quant aux bénéfices économiques, ils varient selon les études de cas. En effet, les coûts de la fin de vie d'un bâtiment dépendent d'un certain nombre de paramètres : le type de structure, les temps, le coût du travail, l'expérience des compagnons, les coûts de mise en décharge et le prix de revente des matériaux.

Ainsi construire avec des matériaux issus du réemploi est une alternative très intéressante en termes de construction respectueuse de l'environnement y compris pour des aspects sociétaux et économiques. Cependant des obstacles existent.

#### 6.3.2. Les freins au réemploi

Dans cette section nous allons présenter plusieurs freins au réemploi et à la réutilisation, une nouvelle fois de façon non exhaustive, pour des matériaux et des éléments issus de bâtiments qui n'ont pas été conçus dans cette optique. Dans un futur plus ou moins proche il faut espérer que la déconstruction aura été pensée dès la conception. Mais pour l'instant les freins les plus importants au réemploi semblent être la certification, la caractérisation et le stockage.

Pour commercialiser un produit de construction celui-ci doit être certifié par le règlement européen n°305/2011. Cette certification impose sept exigences fondamentales :

- Résistance mécanique et stabilité ;
- Sécurité en cas d'incendie ;
- Hygiène, santé et environnement ;
- Sécurité d'utilisation ;
- Protection contre le bruit ;
- Economie d'énergie et isolation thermique ;
- Utilisation durable des ressources naturelles.

Au travers de la dernière exigence on peut entrevoir des perspectives relatives à la réutilisation et au réemploi. Cependant, l'objectif à long terme est de pouvoir commercialiser des produits de réutilisation dont les performances seraient certifiées ce qui encouragerait l'utilisation de ces éléments de récupération dans les chantiers de construction. Le marquage « CE » est ainsi imposé pour la commercialisation d'un grand

---

<sup>18</sup><http://nepis.epa.gov/> Resource Conservation Challenge: Campaigning Against Waste

nombre de produits. Un produit est marqué CE s'il est couvert par une norme harmonisée. Ces normes précisent les caractéristiques essentielles que doit posséder le produit ainsi que les tests à effectuer pour évaluer ses performances.

Lorsqu'un produit n'est pas couvert par une norme harmonisée, le producteur a la possibilité de demander une ETE (Evaluation Technique Européenne) qui peut être considérée comme une norme harmonisée mais pour un produit spécifique d'un fabricant. Une ETE permet donc de disposer d'une méthode d'évaluation des performances d'un produit. Cette ETE se base elle-même sur un DET (Document d'Evaluation Technique) qui constitue un référentiel technique pour élaborer l'ETE. Ce document contient donc une description générale du produit de construction, ses caractéristiques essentielles ainsi que les méthodes d'évaluation nécessaires pour évaluer les performances du produit<sup>19</sup>.

Une fois ces conditions remplies, la déclaration de performances peut être réalisée et la certification obtenue. Un industriel peut obtenir une dérogation sous 3 conditions<sup>17</sup> :

- Le produit est fabriqué individuellement ou sur mesure par un procédé unique sur un site de construction unique ;
- Le produit est fabriqué sur le site de construction en vue d'être incorporé dans l'ouvrage de construction ;
- Le produit est fabriqué dans le but de rénover ou de protéger un ouvrage faisant partie d'un environnement classé ou en raison de la valeur architecturale du bâtiment.

Dans le cas du réemploi et de la réutilisation, la difficulté se situe dans la caractérisation du matériau et / ou produit susceptible d'être réutilisé ou réemployé. En effet, la production industrielle en série des matériaux neufs permet un contrôle relativement facile de la qualité finale. Pour un élément réutilisé à partir d'un bâtiment démolé, les caractéristiques mécaniques résiduelles sont plus difficiles à estimer. Il est important de rassembler un certain nombre d'informations comme les caractéristiques initiales (propriétés mécaniques initiales, conception du bâtiment...), l'historique pendant le cycle de vie (les conditions d'utilisation) ainsi que l'influence des procédés de déconstruction qui peuvent endommager l'élément à réutiliser. Des organismes certificateurs comme le CSTB<sup>20</sup> proposent différentes certifications qui ont la caractéristique de reposer sur la base du volontariat :

- L'ATec (Avis technique) : c'est un avis formulé par un groupe d'experts sur l'aptitude à l'usage des ouvrages réalisés avec des procédés innovants ;
- Le Pass'Innovation : c'est une procédure d'évaluation rapide pertinente pour les techniques innovantes bénéficiant d'un retour d'expérience réussi ou d'une évaluation étrangère favorable ;
- L'ATex (Appréciation Technique d'Expérimentation) : cette évaluation technique est réservée aux procédés non traditionnels appliqués sur différents chantiers pendant une durée limitée ou sur une technique constructive sur un chantier précis à réaliser.

Ainsi ce type de certification pourrait être utilisé dans le cadre du réemploi et lui permettre de se développer.

Enfin la question du stockage et de sa gestion est une question primordiale.

---

<sup>19</sup>[http://economie.fgov.be/fr/modules/publications/general/quoi\\_de\\_neuf\\_pour\\_la\\_commercialisation\\_des\\_produits\\_de\\_construction\\_.jsp](http://economie.fgov.be/fr/modules/publications/general/quoi_de_neuf_pour_la_commercialisation_des_produits_de_construction_.jsp)

<sup>20</sup> [www.evaluation.cstb.fr](http://www.evaluation.cstb.fr)

Dans une gestion idéale des flux de matériaux, il ne serait pas nécessaire de recourir à des espaces de stockage permettant d'entreposer les éléments de récupération : ceux-ci iraient directement du chantier de démolition au nouveau site de construction ou resteraient sur place dans une optique de démolition-reconstruction. Cette situation idéale pourrait voir le jour dans l'avenir. Mais dans l'état actuel ce cas semble peu représentatif de ce qui se passe d'où la nécessité d'implanter des zones de stockage. Ces zones de stockage devraient être situées à la fois proches des zones de déconstruction et des zones de construction ; donc plutôt dans des zones urbanisées. Malheureusement dans les zones urbanisées, les terrains se font rares et chers ce qui rend compliqué la construction de surfaces de stockage.

En parallèle le stockage des éléments déconstruits doit se faire avec une attention toute particulière portée à la non dégradation des produits. Il est en effet important de préserver les propriétés mécaniques résiduelles des éléments mais aussi leur aspect extérieur. Enfin une connaissance de ces propriétés mécaniques résiduelles est primordiale, mais difficile à obtenir puisque la caractérisation peut être destructive d'une part et d'autre part, l'accès à l'historique des matériaux et produits difficile.

Ainsi la phase de stockage est un élément clé du dispositif de réemploi puisqu'elle devrait permettre de caractériser les matériaux et produits et d'en créer une banque de données à disposition des industriels intéressés tout en les conservant dans les meilleures conditions possibles. Des challenges qui ne sont pour l'heure pas relevés.

### 6.3.3. Comment construire en réemployant ?

Est-il réellement envisageable de construire en utilisant des matériaux du réemploi ? Des exemples dans différents pays ont été montrés dans le paragraphe 6.2. Addis [Addis, 2006] en présente également mais surtout il propose une méthodologie et des conseils à suivre pour mener à bien un projet de réemploi.

Son idée est d'être à même de choisir la meilleure option parmi : le réemploi in situ, la récupération d'un élément faisant partie d'un bâtiment à démolir, le fait de se fournir dans une ressourcerie ou un fournisseur de matériel remis à neuf.

Le processus de prise de décision doit suivre un certain schéma, s'appliquant aussi bien au bâtiment dans son ensemble, qu'à chaque élément et aux composants de ces éléments, Figure 25.

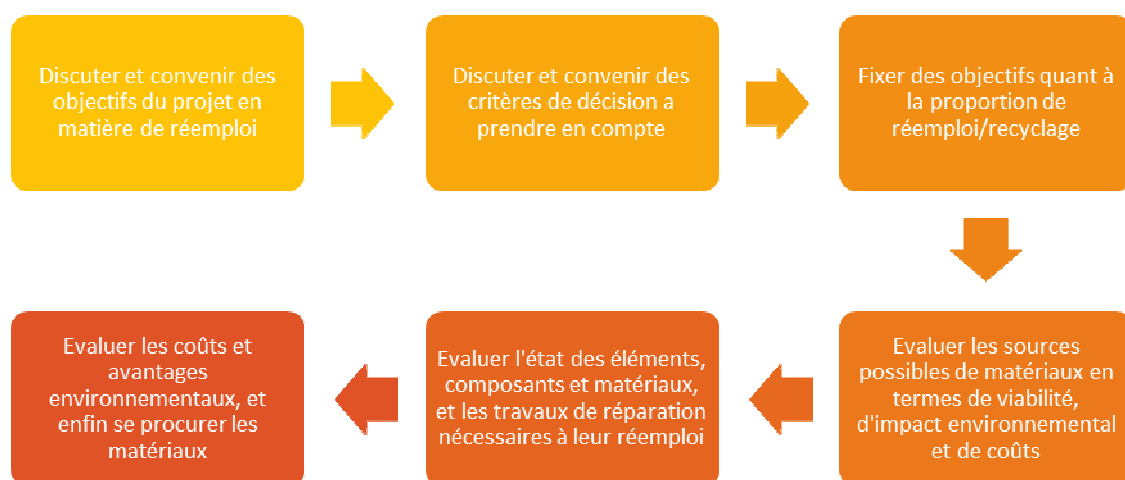


Figure 25: Prise de décisions [Addis, 2006]

Pour un projet de réemploi in situ, il est nécessaire d'évaluer le bâtiment à réemployer en amont. Il s'agit alors de réaliser une expertise de la structure existante, et de définir les travaux à mener de sorte à pouvoir réutiliser les éléments structurels, ainsi que sur l'enveloppe, les fondations et les autres éléments.

Pour un projet de réemploi hors du site, il est nécessaire également de se procurer les éléments en amont, avant d'atteindre la phase de conception détaillée. La procédure devient plus complexe quand la conception d'un élément affecte celle des autres. Une fois les éléments en main, on peut mettre en place un programme pour les réincorporer dans un bâtiment. Ainsi dans [Addis, 2006] Bill Addis présente différents cas d'études dans lesquels ont été réemployés des matériaux et éléments de structure. L'étude de ces différents cas lui permet ainsi de proposer les étapes à suivre pour une mise en œuvre optimale du réemploi dans une construction :

- 1- Préparer au préalable une liste des éléments recherchés et identifier les sources potentielles
- 2- Concevoir le bâtiment dans ses grandes lignes
- 3- Spécifier le type, la taille, les quantités et les performances des éléments recherchés
- 4- Identifier les sources de matériaux
- 5- Evaluer l'état de ces matériaux
- 6- Développer une description méthodologique et les coûts des processus nécessaires à la remise en forme des éléments en vue de leur réemploi
- 7- Convenir sur les prix et se procurer les éléments
- 8- Faire un schéma plus détaillé de la conception
- 9- Se mettre d'accord avec l'entreprise de démolition sur les méthodes de déconstruction
- 10- Organiser le conditionnement, le transport et le stockage des éléments
- 11- Organiser le reconditionnement, la remise à neuf et les essais sur les éléments à réutiliser
- 12- Organiser le transport jusqu'au chantier de construction, qui doit disposer d'une aire de stockage si nécessaire
- 13- Compléter la conception en détail quand la nature et l'état précis des matériaux à réemployer sont connus

Ainsi il est important de noter que le réemploi ne peut se faire sans s'affranchir d'un tri préalable sur le chantier assorti d'un diagnostic des matériaux et / ou produits potentiellement réutilisables. L'exemple du site Opalis ainsi que les travaux de l'asbl ROTOR présentés au paragraphe 6.2.1 peuvent donner une idée de ce qu'il serait intéressant de développer.

#### **6.4. Exemples de prise en compte du réemploi en ACV ?**

##### *6.4.1. A l'échelle du composant*

Dans sa thèse Raphael Brière [Brière, 2016] présente une évaluation comparative de la réutilisation d'une poutre en béton armé issue de la déconstruction, de son recyclage et de sa mise en décharge. Cette étude cas s'appuie sur l'exemple d'un plancher porté par plusieurs poutres en béton armé, Figure 26 :

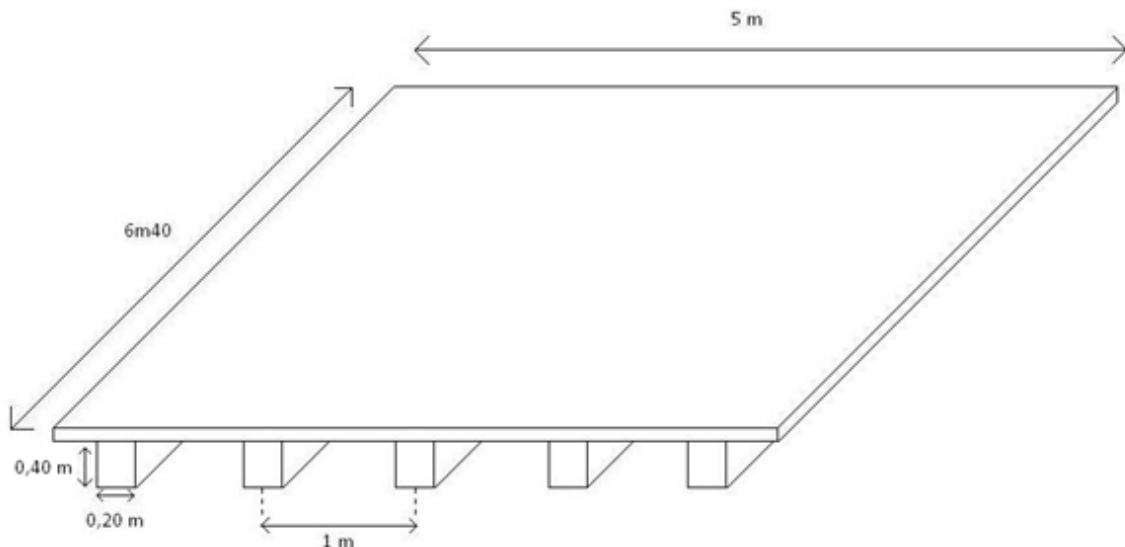


Figure 26: Schéma de l'étude de cas

Les poutres sont de section constante et rectangulaire d'une largeur de 20 cm et d'une hauteur de 50 cm dont 18 cm de plancher.

La première étape du travail a consisté en dimensionner les aciers présents dans une poutre. La quantité totale d'acier a été estimée à 36,4kg.

Puis pour chacun des cas traités, le système modélisé en ACV est présenté dans les tableaux 22, 23 et 24.

Pour la réutilisation de la poutre les étapes suivantes ont été prises en compte :

- La phase de collecte qui comprend la démolition du plancher et le sciage ;
- La phase de transport ;
- Le reprocessing qui consiste à remettre des armatures d'acier au niveau des extrémités de la poutre afin de permettre le scellement ;
- Les impacts évités qui représentent l'économie de 36,4 kg d'acier et 0,6m<sup>3</sup> de béton.

Etape	Process Ecoinvent	Quantité
Démolition du plancher	« Diesel, burned in building machine »	433 MJ
Sciage	« Electricity, medium voltage, at grid /FR »	127 kWh
Transport	« Transport, lorry 16-32t, EURO 4 »	64 tkm
Reprocessing (scellement)	« Electricity, medium voltage, at grid /FR »	1,25 kWh
	« Epoxy resin, liquid, at plant »	0,2 kg
	« Steel, electric un and low alloyed, at plant/RER »	3,8 kg
Impact évités (acier)	« Steel, electric un and low alloyed, at plant/RER »	57,6 kg
Impacts évités béton	« Concrete, normal, at plant »	0,512 m <sup>3</sup>

Pour le recyclage de cette poutre les étapes suivantes ont été prises en compte :

- La phase de collecte qui comprend la démolition du plancher et le sciage et une étape de concassage du béton ;
- La phase de transport ;
- Le recyclage des 36,4 kg d'acier ;
- Les impacts évités qui représentent l'économie de 32,9 kg d'acier (répartis uniformément entre de l'acier primaire et secondaire) et 1380 kg de graviers.

Etape	Process Ecoinvent	Quantité
Démolition	« Diesel, burned in building machine/GLO »	433 MJ
Concassage	« Diesel burned in building machine/RER »	14 MJ
Transport	« Transport, lorry 16-32t, EURO 4 »	38,7 tkm
Recyclage	« Steel, electric, un-and-low alloyed, at plant /RER» (modifié)	66 kg
Impacts évités	« Steel, converter, unalloyed, at plant/RER»	30 kg
	« Steel, electric, un and low alloyed, at plant»	30 kg
	«Gravel, round at mine»	1,18 t

Pour la mise en décharge de la poutre les étapes suivantes ont été prises en compte :

- La phase de collecte qui comprend la démolition du plancher et le sciage et le concassage ;
- La phase de transport ;
- Le recyclage des 36,4 kg d'acier ;
- Les impacts évités qui représentent l'économie de 32,9 kg d'acier (répartis uniformément entre de l'acier primaire et secondaire) ;
- La mise en décharge de 1,5t (la poutre pèse 1,5 t et elle est mise en décharge intégralement).

Etape	Process Ecoinvent	Quantité
Démolition	« Diesel, burned in building machine/GLO »	433 MJ
Concassage	« Diesel at regional storage/RER »	14 MJ
Recyclage	« Steel, electric un and low alloyed, at plant » (modifié)	66 kg
Transport	« Transport, lorry 16-32t, EURO 4 »	21 tkm
Impacts évités (acier)	« Steel, converter, unalloyed,	30 kg

	<i>at plant/RER»</i>	
	« Steel, electric un and low alloyed, at plant »	30 kg
Mise en décharge	ISDI	1,18 t

Dans cet exemple aucun impact n'est associé au stockage excepté le fait de transporter jusqu'à un lieu de stockage. Ce point serait à creuser puisque ces questions de stockage sont centrales dans la problématique de réemploi. Ainsi il sera nécessaire à terme d'être à même de comptabiliser d'un point de vue environnemental ces zones de stockage ainsi que la qualification du stock.

Dans un premier temps, nous comparons nos trois scénarios sans prendre en compte les impacts évités. Les résultats sont présentés sur la Figure 27 :

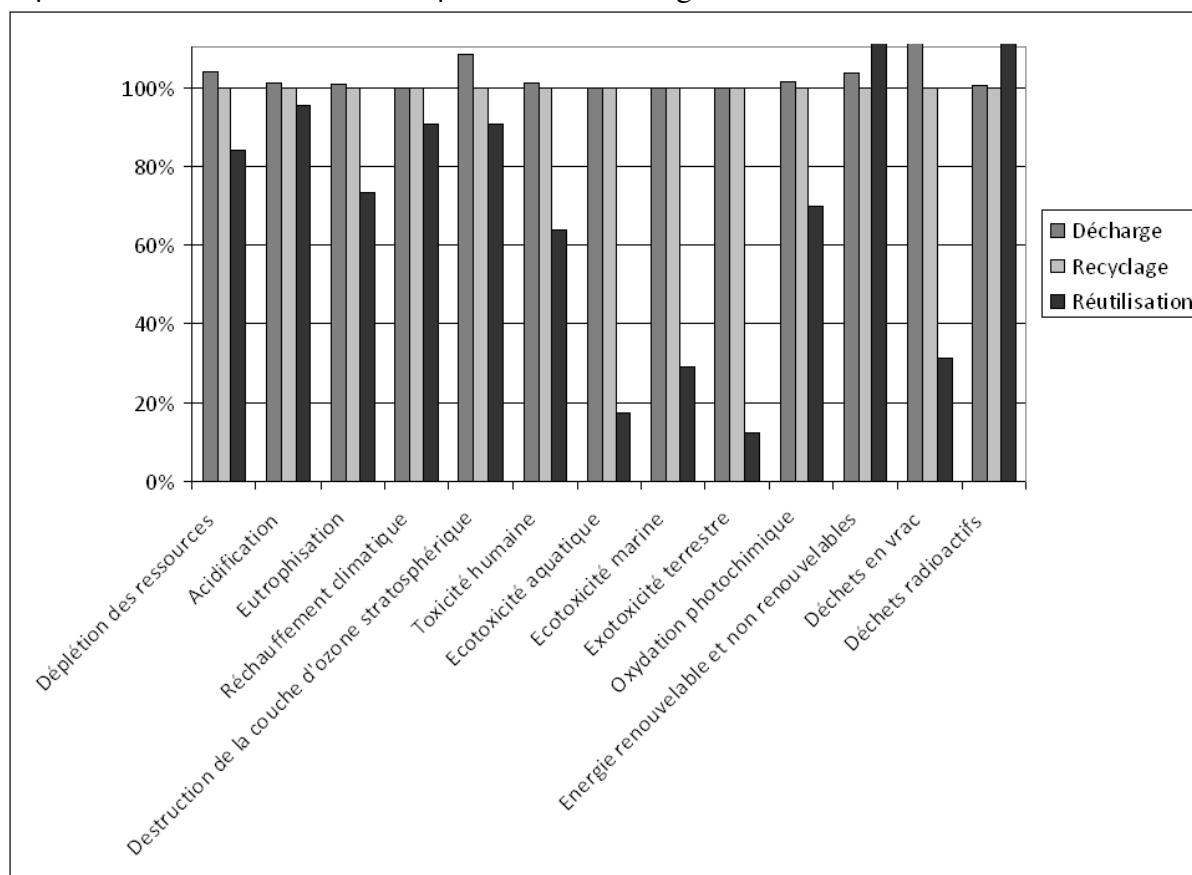
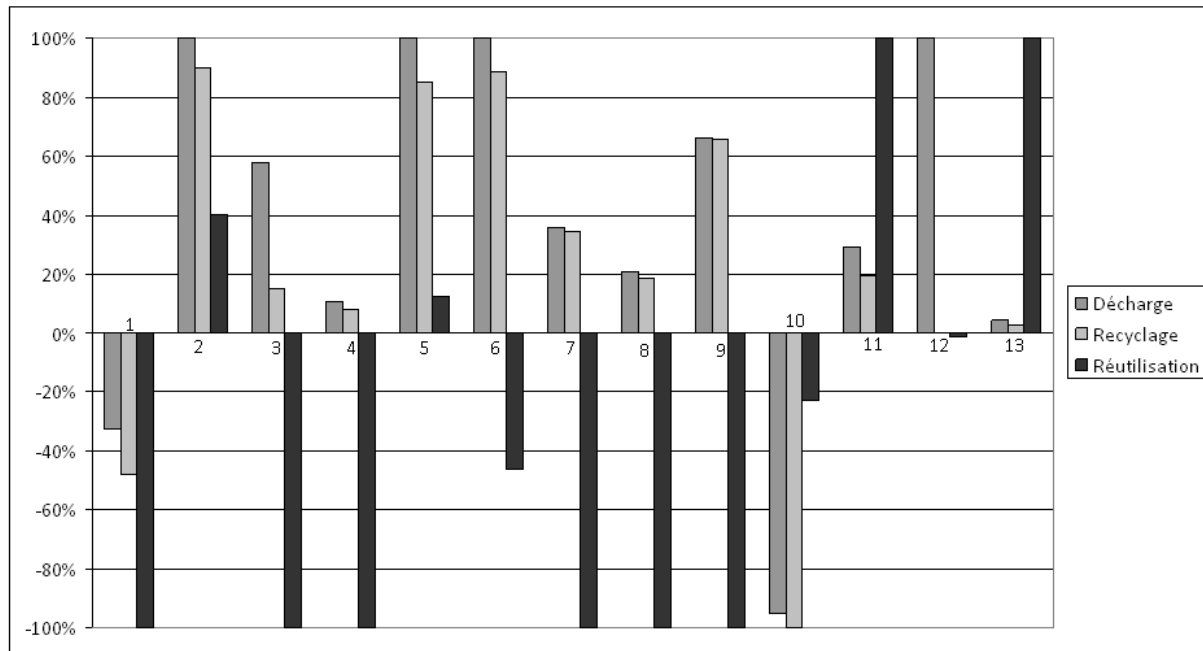


Figure 27: Comparaison des trois scénarios sans les impacts évités [Brière, 2016]

Les scénarios de recyclage et de mise en décharge ont des résultats très proches à l'exception de l'indicateur « Déchets en vrac » où le fait d'enfouir les déchets inertes multiplie par un facteur 100 le résultat de la décharge sur cet indicateur. Sur les autres catégories, la différence est négligeable entre ces deux scénarios ce qui semble logique étant donné que des hypothèses identiques ont été posées concernant la collecte ou le reprocessing par exemple. Par rapport à ces deux cas, le scénario de réutilisation présente des impacts plus faibles (de 5 à 80%) pour la plupart des indicateurs considérés. Les seules exceptions sont les catégories « Energie renouvelable et non renouvelable » et « Déchets radioactifs » qui sont sensibles au mix électrique français. Or, l'électricité est exclusivement utilisée dans le cas de la réutilisation pour déposer la poutre. Un deuxième facteur important influe sur les résultats : il s'agit du procédé de recyclage. Il permet effectivement



de transformer un déchet en matière valorisable mais le procédé de production de l'acier recyclé est source de pollutions importantes qui diminue les effets positifs du recyclage dans les scénarios de décharge et de recyclage. Ces premiers résultats montrent que le coût énergétique supplémentaire nécessaire à la récupération est rentabilisé du point de vue environnemental lorsque l'on considère l'ensemble des catégories d'impact s'il permet d'éviter un procédé de recyclage. L'influence des impacts évités est montrée sur Figure 28.



**Figure 28: Comparaison des trois scénarios avec les impacts évités (Avec 1 : déplétion des ressources ; 2 : acidification ; 3 : eutrophisation ; 4 : réchauffement climatique ; 5 : destruction de la couche d'ozone stratosphérique ; 6 : toxicité humaine ; 7 : ecotoxicité aquatique ; 8 : ecotoxicité marine ; 9 : ecotoxicité terrestre ; 10 : oxydation photochimique ; 11 : énergie renouvelable et non renouvelable ; 12 : déchets en vrac ; 13 : déchets radioactifs.) [Brière, 2016]**

Encore une fois, les scénarios de recyclage et d'enfouissement ont des résultats proches. La principale différence se situe au niveau de la gestion des déchets de béton qui dans le premier cas sont utilisés en techniques routières et dans le deuxième cas sont directement enfouis.

Le scénario de réutilisation présente des impacts plus faibles sur toutes les catégories d'impact à l'exception des indicateurs « Oxydation photochimique », « Energie renouvelable et non renouvelable » et « Déchets en vrac ». L'acier de haut fourneau engendre des impacts plus importants d'un facteur 10 que l'acier recyclé pour l'« Oxydation photochimique ». Or, dans les scénarios de recyclage et de décharge, nous considérons qu'une partie de l'acier recyclé permet de préserver de l'acier primaire. Quant aux deux autres catégories, l'explication est identique que pour la figure précédente. La demande énergétique, notamment en électricité, a une plus forte contribution dans le cas de la réutilisation au moment du sciage.

Globalement, ces deux figures montrent que dans ce cas particulier et d'un point de vue environnemental la réutilisation de la poutre peut être considérée comme une solution pertinente.

#### 6.4.2. A l'échelle du bâtiment

Dans son projet de fin d'études, Sarah Allouch [Allouch 2015] a repris l'étude de cas de la résidence Desbals à Toulouse, tirée du guide de l'ADEME « Déconstruire les bâtiments » publié en 2003. Ce guide présente, entre autres, un suivi d'une démolition sélective et d'une démolition traditionnelle sur deux bâtiments similaires de la résidence Henri Desbals à Toulouse. Une analyse de cycle de vie comparative a été faite entre ces deux modes de démolition, dans le cadre de la thèse de Raphael Brière [Brière, 2016]. L'unité fonctionnelle choisie est : « Démolir un lot de 40 logements d'un immeuble collectif ». Les frontières du système sont les suivantes :

- la production et le transport des matériaux constitutifs du bâtiment, ainsi que les phases du cycle de vie du bâtiment antérieures à sa déconstruction ;
- le transport des ouvriers et leur vie sur chantier ;
- l'acheminement des engins de démolition/déconstruction ;
- le désamiantage ;

ne sont donc pas pris en compte.

Cette analyse a donné les résultats suivants, Figure 29.

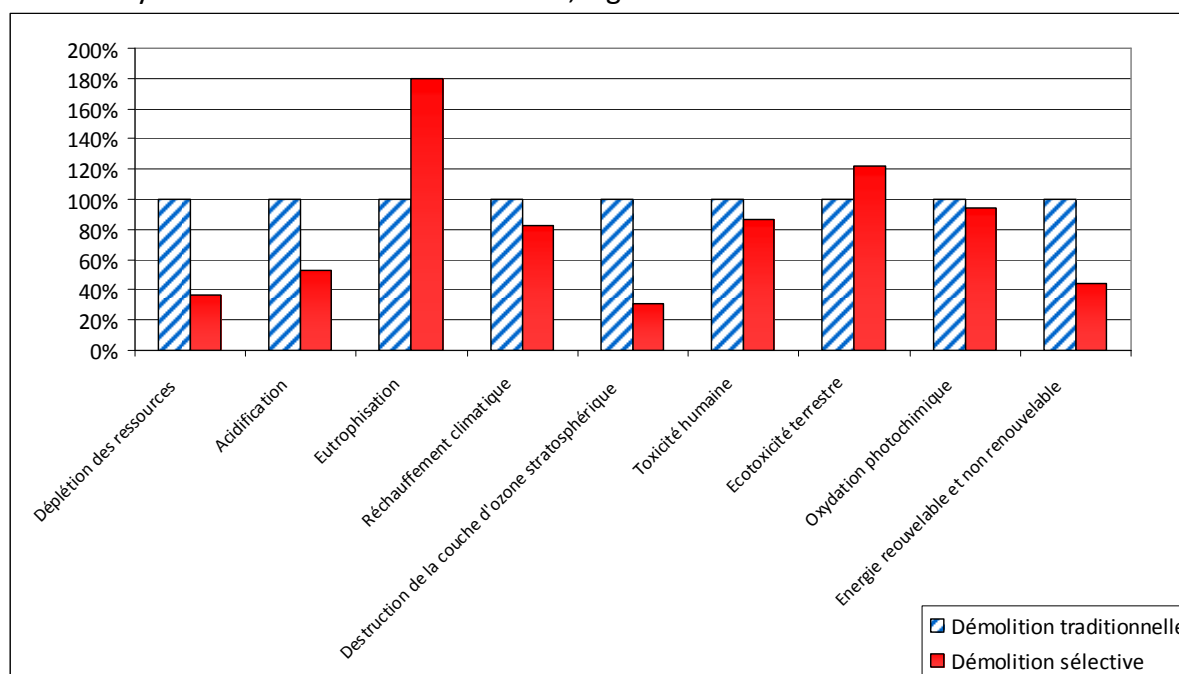


Figure 29: Comparaison de la démolition sélective et de la démolition traditionnelle dans le cas de la résidence Henri Desbal, Toulouse [Brière, 2016]

Pour les trois premières catégories d'impact, les impacts de la démolition sélective sont respectivement 20, 3.7 et 2,9 fois supérieurs tandis qu'ils sont 2 fois inférieurs pour la catégorie « Déchets en vrac ». Sur une majorité des catégories d'impact (8 sur les 13), la démolition sélective présente des impacts moindres. Dans la catégorie « Déchets radioactifs », on retrouve la même logique que précédemment c'est-à-dire que la consommation d'électricité française implique la production de déchets radioactifs ce qui n'est pas le cas pour le scénario de la démolition traditionnelle.

Concernant les 4 autres catégories, cette différence s'explique principalement par le module Ecoinvent de mise en décharge. En effet, dans les deux modélisations présentées ci-dessus, le module Ecoinvent de mise de décharge choisi est différent. Dans le cas de la démolition traditionnelle, les déchets enfouis sont composés majoritairement de déchets inertes tandis

que pour la démolition sélective, les déchets placés en installation de stockage sont des Déchets Industriels Banals (DIB) non triés. Dans sa thèse, Raphael Brière s'est alors attaché à comprendre et adapter les scénarios de mise en décharge présents dans Ecoinvent.

En s'appuyant sur ce travail de thèse et le PFE d'Andrea Rigotti [Rigotti, 2013], Sarah Allouch s'est intéressée à la modélisation en ACV du réemploi sur ce cas d'étude.

Ainsi, l'unité fonctionnelle est toujours : « Démolir un lot de 40 logements d'un immeuble collectif », comme dans le cas de la comparaison entre démolition sélective et démolition traditionnelle, mais l'analyse se concentre maintenant sur la fin de vie des bâtiments, sur la déconstruction en vue du réemploi et la gestion des matériaux de réemploi (transport, stockage, réemploi).

On reprend une partie de la phase de curage qui a lieu à la démolition sélective, à savoir le nettoyage préalable, pour débarrasser le bâtiment des déchets ménagers abandonnés et qui équivaut à 16 182 MJ de « Diesel, burned in building machine » [Brière, 2016].

Dans un premier temps, on dépose la couverture. La dépose de l'isolation se fait manuellement, mais en utilisant des nacelles, (124kWh, « Diesel, burned in building machine »). La dépose des murs est faite manuellement en utilisant un chariot télescopique (5960 kWh « Electricity, medium voltage, at grid/FR »). Pour ce qui est des dalles et de la structure en béton, plusieurs découpages sont envisageables. On se place ici dans le cas où ces éléments seraient stockés dans un premier temps et n'auraient pas de dimensions imposées par un projet de construction à la suite de la dépose. On se propose de faire le parallèle avec des éléments neufs existants, préfabriqués. On fait une découpe d'abord autour des escaliers, puis au milieu sur la partie avant de la dalle. Les dimensions choisies pour le découpage sont raisonnables, elles s'accordent avec celles de prédalles normalisées du commerce (FEHR technologies) qui présentent une longueur maximale de 10 m et une largeur variant de 2,50 m à 3,80 m.

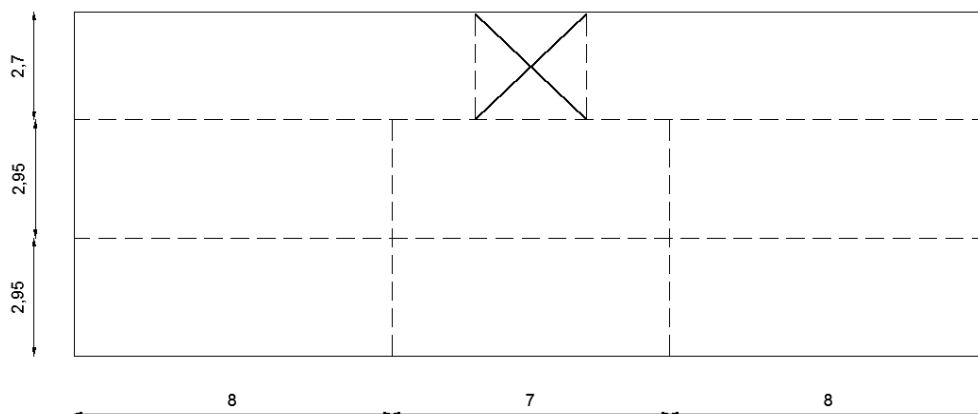


Figure 30: Découpage de dalle sur un étage, un escalier [Allouch, 2015]

La découpe de dalle se fait à raison de 20 ml par jour avec une meuleuse ou scie hydraulique, à dire d'expert. En découpant un appartement comme indiqué ci-dessus (Figure 30), on a une longueur totale de 71,8m pour un ensemble de 2 appartements, soit 1436 m pour tout l'immeuble, ce qui nous fait 574,4 h de découpe (5514,3 kWh « Electricity, medium voltage, at grid/FR »). Les dalles sont déplacées à l'aide d'une grue mobile (117752 kWh « Electricity, medium voltage, at grid/FR »). Le temps total de dépose est de 104 h pour les menuiseries (charpente et menuiseries intérieures et extérieures). La dépose de la charpente bois se fait à l'aide d'une tronçonneuse (54,6 kWh, « Electricity, medium voltage,

at grid/FR ».). Sarah Allouch [Allouch, 2015] prend en compte des taux de chute pour les différents matériaux, chutes qui sont alors recyclées.

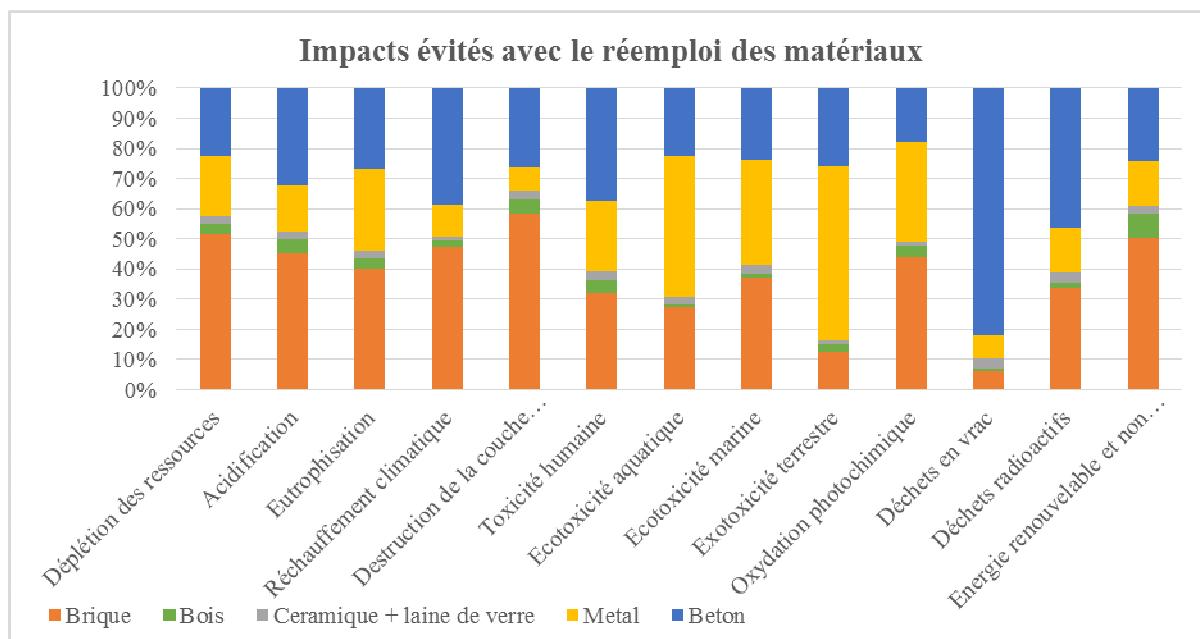
Pour le transport des matériaux à réemployer vers les centres de stockage, on s'est basé sur le modèle présenté dans Opalis<sup>21</sup> pour la répartition des revendeurs autour de Bruxelles et on fera une approximation selon le type de matériaux. Pour la terre cuite, on prend des centres à 40 km, pour le bois 40 km, pour les isolants 30 km. Pour le béton, que l'on ne retrouve pas sur Opalis, le réemploi du béton n'étant pas chose courante, et en assumant la pratique courante et étant donné que l'on trouve beaucoup de béton en France, on prendra une distance de 20 km pour un revendeur de dalle en béton près de Toulouse. À titre d'exemple, l'aéroport se situe à environ 12 km du centre-ville et du quartier où se trouve notre bâtiment. Pour le transport, on utilisera le processus Ecoinvent « *Transport, lorry 16-32 t, EURO 4* ».

	<b>Éléments du bâtiment</b>	<b>Matériaux Ecoinvent</b>
<b>Gros-œuvre</b>	Béton plancher et dallage	<i>Concrete block, at plant/DE S</i>
	Balcon et escalier en béton armé	<i>Pre-cast concrete, min. reinf., prod. mix, concrete type C20/25, w/o consideration of casings RER S</i>
	Briques (murs extérieurs) et conduits de fumée	<i>Brick, at plant/RER S</i>
	Carrelage - Parement intérieur	<i>Ceramic tiles, at regional storage/CH S</i>
	Ciment dans parement intérieur	<i>Cement mortar, at plant/CH S</i>
	Fondations et murs enterrés	<i>Concrete, sole plate and foundation, at plant/CH S</i>
	Armatures (ferraillage)	<i>Reinforcing steel, at plant/RER S</i>
<b>Charpente-Couverture</b>	Isolation laine de verre	<i>Glass wool, fleece, production mix, at plant, density between 10 to 100 kg/m3 RER S</i>
	Zinguerie	<i>Zinc, from combined metal production, at refinery/SE S</i>
	Charpente bois	<i>Sawn timber, hardwood, planed, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER S</i>
	Accessoires cheminée	<i>Brick, at plant/RER S</i>
<b>Menuiserie</b>	Parquet, en pin	<i>Sawn timber, paraná pine (SFM), kiln dried, u=15%, at sawmill/BR S</i>
	Plinthes, en bois de sapin	<i>Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 40% water content DE S</i>

**Tableau 25: Matériaux choisis dans la base de données Ecoinvent [Allouch, 2015]**

La Figure 31 présente les impacts évités grâce au réemploi des matériaux de construction. Nous avons choisi de présenter les impacts évités à part puisque dans l'état actuel du travail nous ne sommes pas en mesure de dire ce que remplace exactement un matériau réemployé et donc de traiter correctement les questions d'allocation.

<sup>21</sup> <http://opalis.be/>

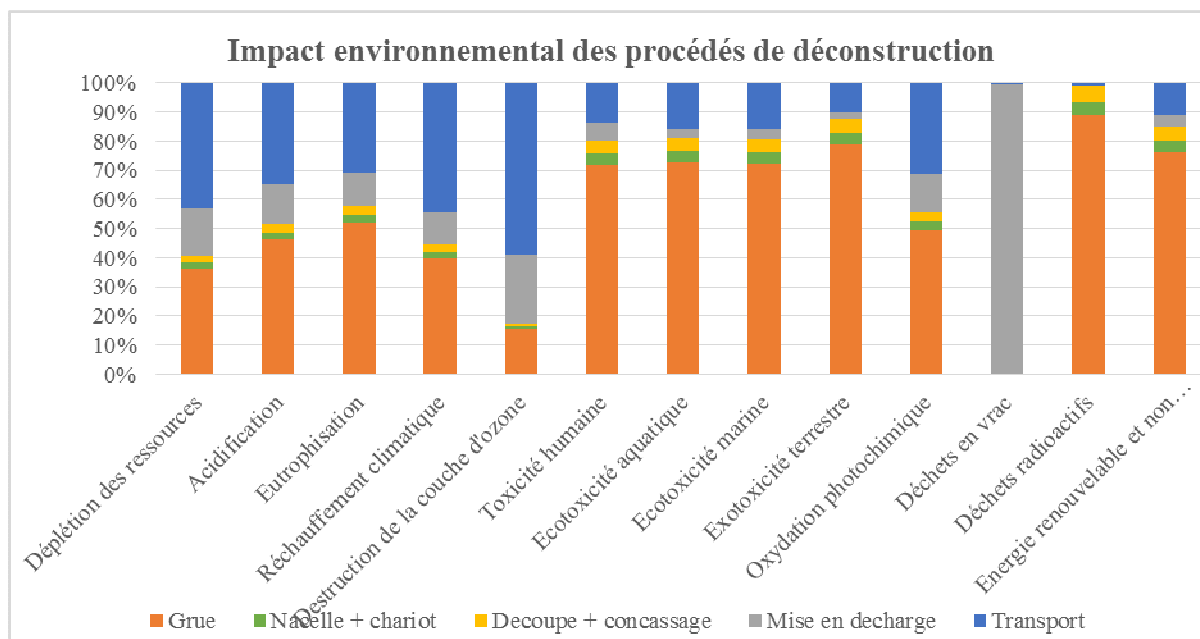


**Figure 31: Impacts évités par le réemploi de matériaux [Allouch, 2015]**

Les matériaux présentant les impacts les plus importants sont le béton, la brique et le métal (armatures essentiellement, et zinguerie de façon minime). En considérant que le béton armé est la combinaison du béton et du métal, on remarque que globalement, les impacts les plus importants proviennent du béton armé. On a près de 70% pour l'écotoxicité aquatique et plus de 80% pour l'écotoxicité terrestre. La brique aussi présente des impacts importants, avec 50% environ pour la déplétion des ressources, la destruction de la couche d'ozone et les énergies renouvelables et non renouvelables.

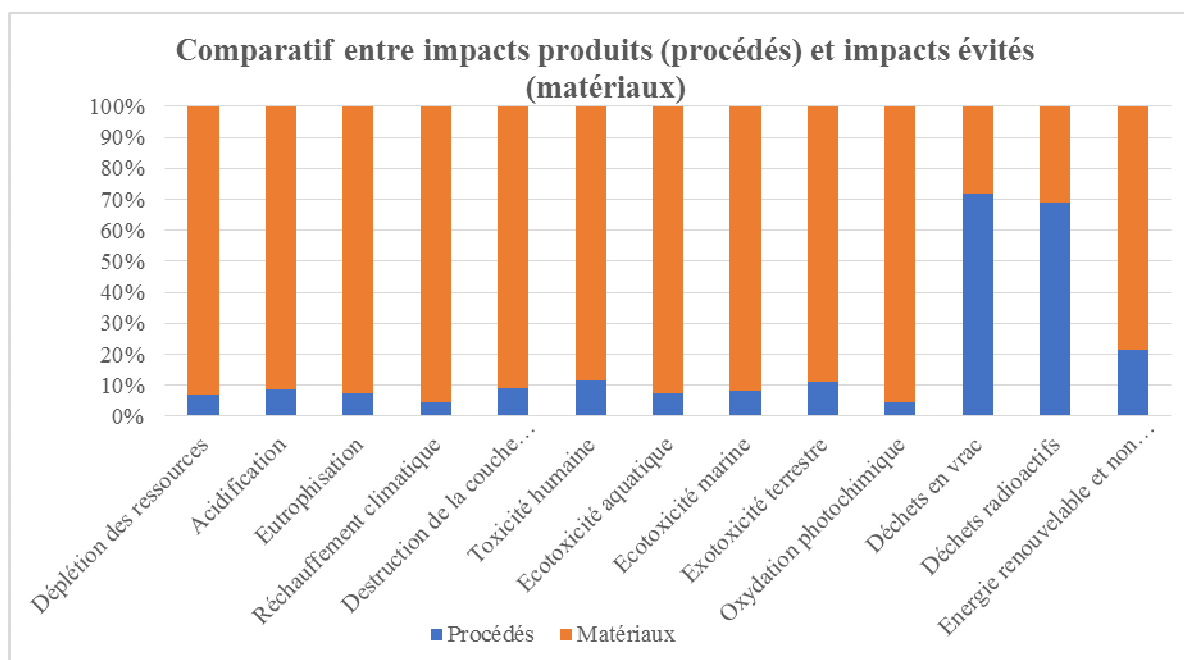
D'un autre côté, on a les processus de déconstruction, qui incluent les appareils de découpe, l'utilisation de la grue et des autres engins de levage, et le transport vers les centres de réemploi, de recyclage et la déchetterie pour le plâtre. En prend aussi en compte la mise en décharge, dans le cadre des impacts positifs générés par la déconstruction de la structure du bâtiment.

La Figure 32 présente les impacts environnementaux des procédés de déconstruction.



**Figure 32: Impact environnemental des différents procédés de construction [Allouch, 2015]**

L'utilisation de la grue est un des procédés les plus impactants, avec plus de 70% pour 6 catégories. Cela s'explique par le fonctionnement de la grue tout le long de la découpe des planchers en béton, qui est lente (20 ml par jour). En second lieu vient le transport des matériaux, notamment pour la destruction de la couche d'ozone, avec près de 60%. Dans le travail détaillé de Sarah Allouch une analyse de sensibilité sur l'utilisation de la grue est alors menée. Elle montre l'intérêt environnemental d'utiliser des étais afin de moins faire fonctionner la grue [Allouch, 2015].



**Figure 33: Part relative des impacts entre les procédés et les matériaux [Allouch, 2015]**

En mettant en parallèle les deux graphiques obtenus, on se rend facilement compte que les impacts produits par la déconstruction sont largement compensés par les impacts évités par le réemploi des matériaux.

Ces deux exemples traités permettent de montrer que le réemploi de matériaux peut s'avérer intéressant en termes d'impacts environnementaux évalués avec la méthode ACV. Ces résultats doivent néanmoins être pris avec recul. En effet de nombreuses hypothèses ont été faites et de véritables données de chantier n'étaient pas disponibles aussi ces résultats mériteraient d'être repris et agrémentés d'analyses de sensibilité.

## 6.5. Vers une économie circulaire

La pratique du réemploi est un processus complexe qui nécessite une collaboration étroite des différents acteurs et notamment la maîtrise d'ouvrage. Une des grandes difficultés est que le réemploi ne peut être soumis à des schémas préétablis puisqu'il dépend très fortement de nombreux paramètres dépendant de son « histoire » : contraintes subies, composition initiale, assemblage, ... La pratique du réemploi nécessite un compromis entre les différents aspects d'un élément : esthétique, fonction, performance, durabilité, méthode de construction (ex. béton ou métal) et coûts. Malgré ces difficultés, qui sont et seront source d'innovations dans le domaine de la construction, son intérêt environnemental est réellement important. La directive européenne 2008/98/CE, Figure 22, le place juste après la prévention des déchets, notamment en raison du fait qu'il ne nécessite que peu de reprocessing et donc induit peu d'impacts environnementaux. Ainsi il s'intègre parfaitement dans le cadre d'une économie circulaire vers laquelle notre économie actuelle devrait tendre. En effet, elle repose sur plusieurs principes tels que définis par le ministère du développement durable<sup>17</sup> :

- L'éco-conception : prendre en compte des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit et les intégrer dès sa conception.
- L'écologie industrielle et territoriale : mettre en place un mode d'organisation industrielle sur un même territoire caractérisé par une gestion optimisée des stock et des flux de matières, de l'énergie et des services.
- L'économie de la fonctionnalité : privilégier l'usage à la possession, vendre un service plutôt qu'un bien.
- **Le réemploi : remettre dans le circuit économique des produits qui ne correspondent plus aux besoins premiers du consommateur.**
- La réutilisation : réutiliser certains déchets ou certaines parties du déchet encore en état de fonctionnement dans l'élaboration de nouveaux produits.
- La réparation : trouver une deuxième vie aux biens en panne.
- Le recyclage : réutiliser les matières issues des déchets.

En parallèle, avec la loi transition énergétique pour la croissance verte promulguée le 17 août 2015, l'économie circulaire franchit une étape importante. En effet, la loi consacre son titre IV à la lutte contre les gaspillages et la promotion de l'économie circulaire. Elle prévoit notamment<sup>22</sup> :

- La réduction de moitié des quantités de déchets mis en décharge.
- L'objectif de recycler 60% des déchets en 2025.

---

<sup>22</sup> <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-economie-circulaire,45403.html>

- L'amélioration de la conception des produits pour réduire leur impact environnemental et augmenter leur durée de vie.
- La mise en place d'une stratégie nationale de transition vers une économie circulaire.

L'économie circulaire fonctionne sur le modèle d'une boucle, «du berceau au berceau», où les produits et matériaux sont conçus pour être facilement réparés et/ou remplacés. Dans une économie circulaire, l'idée est d'acheter des services ou des fonctions, et non des produits. Ainsi les producteurs seraient toujours responsables de leurs produits. En fin de vie, le produit serait réemployé ou recyclé et ce en s'affranchissant des questions de sortie du statut de déchets. L'opinion publique, si défavorable à la réutilisation de déchets, ne pourra plus percevoir le déchet comme dangereux puisque la notion de déchet sera en passe de disparaître. Dans la boucle de l'économie circulaire, le déchet n'est jamais vu comme tel il est une ressource, un flux de matière. On note également que du coup la ressource peut être relativement proche de la demande. En effet lorsque l'on démolit c'est souvent pour reconstruire. Ainsi si un travail amont est réalisé proprement une boucle vertueuse peut être mise en place. Cette boucle vertueuse pourrait être très fortement liée à du « stockage virtuel ». On sait que le stockage ne pose pas trop de problèmes en zone rurale mais qu'il est une question primordiale des zones urbaines. Or c'est bien dans les zones urbaines que l'on démolit et reconstruit. Dès lors, si dès l'amont de la démolition un diagnostic matériaux et structures est réalisé proprement on peut envisager une mise à disposition de ces matériaux de réemploi sur un délai relativement court (et donc sans stockage) en lien avec les chantiers de construction proches. Il s'agirait d'une forme de « stockage virtuel » qui répondrait alors à une réalité du terrain qui est bien la raréfaction de la ressource en lien avec son éloignement.

Au-delà de cette volonté politique affichée autour de la promotion de l'économie circulaire, promouvoir le réemploi passera également par une augmentation des coûts de mise en décharge et/ou des coûts de transport. Changer les habitudes ancrées depuis des dizaines d'années ne passera que par une « obligation » économique. Au-delà du discours vertueux autour de l'environnement la réalité est bien que tant qu'économiquement on ne gagne pas il ne se passe rien.



## 7. Conclusions et Perspectives

Mon travail jusqu'à présent m'a permis de cheminer, d'un point de vue environnemental, depuis le matériau jusqu'à l'ouvrage. C'est un cheminement finalement assez classique et habituel. On commence par s'intéresser en détails à l'amont (ici le matériau) puis on déambule jusqu'à l'aval (ici l'ouvrage au sens large) en réalisant au final que c'est bien à l'échelle de l'ouvrage qu'une évaluation environnementale prend tout son sens. Et ceci parce que la question de la fonctionnalité, primordiale en ACV, n'a de sens qu'à l'échelle de l'ouvrage. Cependant, bien connaître le matériau est, à mon sens, primordial pour réaliser des bilans environnementaux représentatifs. Ainsi le travail réalisé dans la base de données DIOGEN doit se poursuivre. En effet, cette base de données s'attache à fournir les données environnementales relatives aux matériaux et matériels utilisés pour les ouvrages de génie civil sur le territoire français. Dans le contexte français la base INIES (base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipement et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages) a été initiée relativement au bâtiment et propose des Déclarations Environnementales de Produits (DEP) qui prennent en compte le cycle de vie complet du produit. Dans le cas des ouvrages de génie civil la durée de vie est très dépendante de la maintenance, qui est elle-même très dépendante de la politique du gestionnaire de l'ouvrage. Ainsi nous avons souhaité mettre à disposition une base de données permettant de faire une évaluation de l'ouvrage jusqu'à la phase chantier et pas au-delà. En effet un bilan environnemental à la réception de l'ouvrage permet une évaluation sur un périmètre identique à celui utilisé pour l'évaluation économique. De plus, dans le domaine du génie civil peu d'éléments faisant l'objet d'un dimensionnement standardisé sont utilisés. C'est la raison pour laquelle utiliser des DEP n'est pas pertinent dans ce contexte. A ce jour il manque encore un grand nombre de données pour être à même de rendre plus robustes les ACV réalisées à l'échelle des ouvrages. Le travail restant à faire est un travail de collecte de données et de compréhension fine des procédés sur des éléments manquants (par exemple : les peintures pour les ouvrages d'art, les aciers inoxydables de plus en plus utilisés) ; la méthodologie relative à la constitution de cette base a en effet été étudiée largement. Cependant un volet peu étudié jusqu'à présent mériterait d'être approfondi, il s'agit du volet lié aux analyses de sensibilité qui permettrait de donner plus de crédits aux résultats obtenus. C'est l'un des points sur lesquels je souhaite développer mes compétences et ce pas seulement sur la base de données DIOGEN mais en faisant de façon plus systématique des analyses de sensibilité lors des différentes études. Cette base de données est en cours de migration de la norme NFP 01 010 à la norme NF EN 15804 ce qui implique une reprise des modélisations existantes puisque les fiches DIOGEN fournissent des indicateurs d'impact (et non des flux). Ce travail, fastidieux et long, n'est pas un travail de recherche mais bien d'application de ce qui a été développé précédemment. Ainsi je continuerai, dans la mesure de mes possibilités de compléter cette base. Actuellement le travail se poursuit au gré des stagiaires que nous arrivons à recruter sur des financements publics ce qui n'est pas des plus satisfaisants.

Le matériau étant vu comme une première étape, j'ai alors poursuivi mes études en m'intéressant à l'infrastructure et au pont, notamment au travers de CIOGEN qui se veut un outil simple de calculs environnementaux à l'échelle du pont. CIOGEN s'appuie sur les données DIOGEN, des données Ecoinvent et des données de chantier qui permettent de calculer des forfaits de mise en œuvre. C'est ainsi un outil appuyé sur une réalité de terrain.

Cet outil mériterait d'être enrichi avec une plus grande base de chantiers afin d'avoir les ratios de mises en œuvre les plus réalistes possibles. L'expérience couplée de l'infrastructure ferroviaire et de l'ouvrage m'a donné envie d'aller au-delà en s'interrogeant plus largement sur l'infrastructure de transport et sa fonctionnalité. C'est l'un des points sur lesquels je reviendrai dans mes perspectives de recherche.

Le chapitre sur la fin de vie et la réutilisation poursuit une démarche très prospective. En effet actuellement le réemploi est très peu réalisé et pourtant, comme dit au paragraphe 6.5 le ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer insiste fortement sur l'économie circulaire et présente dans ce cadre le réemploi comme une solution à étudier voire à privilégier (Figure 22) d'après la directive 2008/98/CE. Ainsi les deux démarches présentées ici, mériteraient d'être étudiées plus en détail. Notamment sur la question de l'élément constitutif il serait intéressant de vérifier quel élément serait susceptible d'être réutilisé le plus facilement, et/ou à quelles conditions les éléments les plus intéressants d'un point de vue réemploi pourraient être récupérés tout en évaluant comment son bilan environnemental en serait affecté. Le but final étant de contribuer à bâtir des règles d'éco-conception qui inscrivent les matériaux et les éléments d'ouvrage dans une continuité composée de cycles de vie successifs. Un travail en lien étroit avec les dé constructeurs prend ici tout son sens et permettrait d'identifier les difficultés de stock, tant en terme de gestion que de zones de stockage. Le terme économie circulaire est très à la mode et on peut craindre que ce ne soit qu'une passade, cependant les pénuries de ressources naturelles et leur accessibilité au plus grand nombre est une réalité qui place le réemploi en tête des solutions techniques à envisager. Ce qui n'est d'ailleurs pas une nouveauté puisque par exemple les pierres constitutives de la prison de la bastille se retrouvent dans différents bâtiments parisiens !

Les questions environnementales sont de plus en plus présentes dans notre quotidien depuis l'accessibilité à la ressource jusqu'aux différentes formes de pollutions toujours plus nombreuses. Cet environnement dégradé inquiète le citoyen que je suis et je souhaite, à ma toute petite échelle, faire en sorte que les ouvrages sur lesquels je travaille soient évalués d'un point de vue environnemental en vue de ne pas construire des innovations techniques désastreuses pour l'environnement. Enfin diverses techniques constructives existent (ou existaient) plus ou moins en lien avec un contexte territorial (ex : constructions en pierre dans les Cévennes, constructions en bois dans les Alpes). Ces techniques constructives étaient souvent liées à une accessibilité à la ressource. Dans le contexte actuel, revaloriser ce type de modes constructifs me paraît important d'autant plus qu'au-delà des aspects environnementaux [Colas, 2014] des aspects sociétaux entrent en jeu au travers du développement d'emploi local. Et je pense que si l'on veut préserver durablement notre environnement cela passe par de l'utilisation à bon escient des matériaux sans viser des performances excessives et non nécessaires. On a parfois besoin de construire pour une population massive et parfois non. Dans le cas où on est plus « expérimental » pourquoi ne pas chercher à utiliser des modes constructifs plus ancrés dans le territoire que l'on pourrait presque qualifier de « niches environnementales ».

Au-delà de ces conclusions et réflexions larges, je souhaiterais poursuivre mes efforts de recherche dans quatre directions.

### **1. Comment l'outil ACV peut valoriser l'utilisation de matériaux recyclés et/ou réemployés ?**

En 2012 l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil) a labellisé le projet national Recybéton qui devrait se terminer courant 2017. Partant du constat que le béton est un des matériaux les plus consommés dans le monde, les professionnels de la construction, de plus en plus sensibles aux questions liées à la préservation de l'environnement, s'interrogent sur le devenir du béton lors de la fin de vie des constructions. On constate que contrairement à ce qui se passe dans d'autres pays européens (Europe du Nord) le béton récupéré dans les déchets de chantier est très peu recyclé dans des bétons. On l'utilise principalement pour les travaux routiers (remblais). L'objectif affiché de ce projet national est de « changer la tendance au niveau national en favorisant la réutilisation de l'intégralité des produits issus des bétons déconstruits ». Pour ce faire les différents aspects à aborder dans ce PN sont regroupés en trois thèmes principaux :

- Technologie et procédés,
- Matériaux et structures,
- Développement durable.

J'ai le plaisir de partager avec François Buyle Bodin la responsabilité du thème sur le développement durable, dans lequel nous avons réalisé, entre autres, des ACV de bétons à base de granulats recyclés afin d'être à même de les qualifier d'un point de vue environnemental. Or dans l'état actuel des connaissances il est difficile de montrer par un bilan environnemental la pertinence du béton à base de granulats recyclés. L'une des raisons est pour moi la non représentativité de l'indicateur épuisement des ressources abiotiques. En effet dans le calcul de cet indicateur, les sables et granulats sont considérés comme largement présents. Or si ceci est juste à l'échelle mondiale, il reste qu'à l'échelle territoriale l'approvisionnement en granulats peut être plus complexe. En raison de la préservation de la biodiversité il est en France de plus en plus difficile de se fournir en granulats alluvionnaires et il est tout aussi délicat d'ouvrir de nouvelles carrières pour en extraire des roches. De plus tous les granulats disponibles ne sont pas tous utilisables pour fabriquer des bétons. Ces « subtilités » locales ne sont pas prises en compte dans un indicateur global. Ainsi il me paraît important de pouvoir mettre en évidence ces éléments contextuels dans une analyse de cycle de vie ce qui passe par la mise en place d'un nouvel indicateur de ressources. Des travaux existent sur cette thématique (par exemple [Ioannidou, 2015] qui ont développé un indicateur basé sur l'accessibilité aux carrières). Un travail de contextualisation territorial est important pour comprendre les facteurs déterminants sur ce type d'indicateurs.

En lien avec ma conclusion précédente sur le travail prospectif réalisé sur le réemploi, la valorisation du réemploi et du recyclage en ACV n'est pas évidente. Or elle peut l'être d'un point de vue environnemental voire développement durable. Un travail complémentaire à celui sur l'indicateur de ressources pourrait être mené dans ce sens.

## **2. Est-il possible de valoriser en ACV les aménagements paysagers autour des ouvrages ?**

Au cours de mes travaux précédents, notamment dans le cadre de contrats de recherche avec des industriels, ceux-ci souhaitent fréquemment valoriser le fait qu'ils aménagent l'environnement en créant des espaces verts. Or les indicateurs de biodiversité ne sont pas encore suffisamment robustes et font l'objet de recherches. Pour autant, au-delà des indicateurs de biodiversité comment doit-on prendre en compte en ACV la création d'un espace dit vert ? Comment peut-on modéliser la croissance des plantes ? Existe-t-il des plantes à croissance plus rapide et qui capteraient plus de CO<sub>2</sub> et/ou autres polluants ?

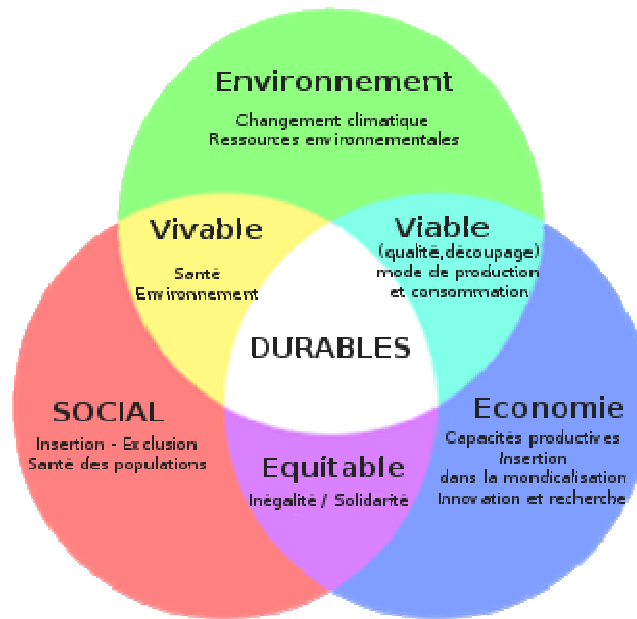
L'ACV pourrait-elle jouer un rôle pour conseiller en fonction du terrain et de l'environnement les plantes les plus adaptées ? Ce sont des questions que je me pose personnellement et que je souhaiterais aborder dans de futures recherches si cela semble pertinent. Cependant cela ne pourrait se faire sans l'aide des « sachants » qui sont, d'après une première étude rapide, les jardiniers qui savent et se transmettent les conditions idéales de plantation. Par ailleurs dans le cadre de la chaire ParisTech « Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures », l'un des partenaires est AgroParisTech qui semble tout désigné pour apporter un soutien sur cette thématique.

### **3. Comment prendre en compte l'infrastructure dans son ensemble ?**

Comme je le disais en conclusion, mes travaux précédents sur les ponts et l'infrastructure ferroviaire m'ont donné l'envie de traiter l'infrastructure dans son ensemble. Ainsi l'infrastructure linéaire peut être vue comme la compilation sur une longueur donnée, d'un prorata de passage supérieur, de passage inférieur, de tunnel et de route ; tout comme a été modélisée l'infrastructure ferroviaire (paragraphe 5.1). Pour les infrastructures linéaires, la question de la maintenance est primordiale et dépend, entre autres, du gestionnaire de l'infrastructure. Ainsi disposer d'un outil permettant d'étudier d'un point de vue environnemental différents scénarios de maintenance me semble intéressant. D'autre part ce travail peut être l'occasion également de prendre en compte l'usage de l'infrastructure et donc le trafic. Celui-ci peut d'ailleurs être lié à la maintenance de l'infrastructure. Ce travail s'articule parfaitement avec la lettre de mission confiée par Ségolène Royal à l'Observatoire Energie Environnement Transport (OEET) dans lequel la ministre indique qu'il faut : *« prolonger les travaux sur l'évaluation des impacts sur les émissions de gaz à effet de serre des projets d'infrastructures de transports. Il s'agira notamment de développer des approches du cycle de vie, tenant compte de l'entretien et du renouvellement des infrastructures, ainsi que du recyclage des matériaux. Dans ce cadre, la prise en compte du trafic porté et/ou impacté par les infrastructures présente des enjeux importants pour l'évaluation, qu'il conviendra de bien apprécier en vue de proposer des documents méthodologiques »*. J'ai eu l'opportunité de travailler avec le Laboratoire Ville et Mobilité Transports (LVMT) sur la prise en compte des phases de transport en ACV notamment au travers de l'encadrement avec Anne de Bortoli de cours sous forme de projet. Ceux-ci nous ont permis de commencer à réfléchir sur ces questions au travers d'exemples précis dictés par des prescripteurs et nous ont donné envie de continuer. Ainsi un des points qui nous semble important est, en zone urbaine, la question du partage de la chaussée entre différents modes de transport (Bus, Bus à Haut Niveau de Service, Tramway, Véhicules Légers, Poids Lourds, Vélos, ...). D'autre part une étude fine de la maintenance en lien avec le trafic nécessitera des adaptations des procédés existants dans les bases de données utilisées habituellement.

### **4. Comment ne pas oublier les autres aspects du développement durable ?**

Dans ce que j'ai fait jusqu'à présent je me suis focalisée sur les problèmes environnementaux. Cependant le développement durable ne se résume pas à cette question d'environnement, Figure 34. Pour être durable un développement doit donc à parts égales prendre en considérations les aspects économiques, sociétaux et environnementaux. Au fur et à mesure de l'avancement de mes travaux de recherche je prenais conscience de l'importance des aspects sociétaux et économiques. J'ai évoqué en début de paragraphe les aspects sociétaux de création (ou maintien) d'emploi liés à l'utilisation de matériaux locaux mais on peut aussi noter que dans le cas de la gêne aux usagers due à des travaux sur ponts, routes ou tunnels, il y a des impacts sociétaux et économiques importants.



**Figure 34: Les trois piliers du développement durable<sup>23</sup>**

Il me semble important de ne pas oublier que le développement durable s'appuie sur ces trois piliers et donc d'être à même de faire des évaluations sur nos objets d'étude les plus complètes possibles. Cependant ceci n'est possible qu'en s'entourant de spécialistes des domaines économiques et sociétaux puisque ce sont des aspects que je ne maîtrise pas du tout. Ainsi l'aide du LVMT prend ici tout son sens. A mon avis il est important que chacun apporte ses compétences suivant sa spécialité afin de décloisonner au maximum l'évaluation et lui donner une pertinence optimale. Par ailleurs ceci est en accord avec ce qui sera demandé dans la prochaine norme 15643-5<sup>24</sup> puisque l'évaluation des performances environnementale sera exigée au même titre que les performances sociales et économiques.

Mes activités de recherche telles que décrites dans ce document devraient se poursuivre au sein de l'Ecole des Ponts Paris Tech qui m'a permis jusqu'à aujourd'hui de développer les recherches que je souhaitais tout en me permettant d'enseigner au sein de l'Ecole mais également dans des organismes partenaires. Je souhaite poursuivre ma collaboration avec mes collègues du CEREMA et de l'IFSTTAR. Le partenariat avec le CEREMA nous permet d'ancrer nos travaux de recherche dans la réalité du terrain. L'IFSTTAR m'a donné l'opportunité, en partenariat avec Lauredan Le Guen (Département MAST) de monter une action de recherche (Cycle de vie des infrastructures et recyclage des matériaux) dans le but de structuration de la recherche par des projets transversaux. Ainsi on identifie les personnes travaillant sur ce sujet dans nos organismes ce qui permet d'échanger plus facilement. Une association CEREMA, IFSTTAR et Ecole des Ponts sur cette thématique de l'ACV des ouvrages de génie civil est une opportunité intéressante d'autant plus que nous sommes peu à travailler sur ce sujet même s'il est fortement mis en avant par notre ministère de tutelle. Enfin j'apprécie tout particulièrement l'association avec le « monde des transports » via le LVMT. Les ouvrages de génie civil n'ont de réalité que par leur fonction et

<sup>23</sup> <http://www.batnrj.com/enjeux-environnementaux-normes-certifications-iso/>

<sup>24</sup> « Contribution des ouvrages de construction au développement durable — Evaluation de la contribution des bâtiments et des ouvrages de génie civil au développement durable — Partie 5 : Cadre pour l'évaluation de la performance 9 de la contribution des ouvrages de génie civil au développement durable »

pouvoir profiter d'experts du transport pour réaliser des bilans représentatifs est une chance réelle.

## 8. Références bibliographiques

- [ACV Pont en béton] Analyse de cycle de vie d'un pont en béton – Exemple d'application pour un pont courant, Collection Technique Cimbéton, avril 2010, T87.
- [ACV structures routières] Analyse de cycle de vie de structures routières, Collection technique Cimbéton, T89, 2005
- [Addis, 2006] Addis B., Building with reclaimed components and materials. A design handbook for Reuse and Recycling, London : Earthscan, 208 pp, 2006.
- [ADEME, 2003] ADEME, Déconstruire les bâtiments: Un nouveau métier au service du développement durable, ADEME, 2003, 166 pp
- [AFCAB] AFCAB. Certification Acier pour Béton Armé. RCC03, AFNOR 58pp.
- [Alaoui et al, 07] Alaoui A. et al, Experimental studies of hydration mechanisms of sulfoaluminate clinker, ICCI 2007, Montréal, Canada
- [Allouch, 2015] Allouch S., Etude des typologies des bâtiments en vue de leur déconstruction – focus sur les possibilités de réemploi, Projet de fin d'études, master SMCD, 2015.
- [ASURET, 2010] Rouvreau L., Michel P., Vexelaire S., Villeneuve J. (BRGM), Jayr E. (CSTB), Vernus E. (INSAVALOR POLDEN), Buclet N., Renault B. (UTT CREIDD), De Cazenove A., Vedrine H. (13 Développement), (2010) – Projet ANR Asuret – Revue de l'existant (Tâche 1). Rapport final. BRGM/RP-58935-FR. 191p.
- [Bellastock, 2014] Compte rendu REPAR (Réemploi comme passerelle entre architecture et industrie).
- [Bouhaya, 2011] Bouhaya L., Feraille A., Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception, Rapport de contrat RFF, lot : voie ferrée, 2011.
- [Bouhaya, 2013] Bouhaya L., Feraille A., Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception, Rapport de contrat RFF, lot : terrassement, 2013.
- [Boutin & Laisney, 2005] Boutin M., Laisney A., « Le recyclage des matériaux composites », monographie module sciences des polymères, Institut Supérieur de Plasturgie d'Alençon, 24/11/2005, disponible ici : <http://fr.scribd.com/doc/48946421/Le-recyclage-des-materiaux-composites>
- [Brière, 2016] Brière R., Etude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources ; focus sur les procédés de transport et de décharge, Thèse de doctorat de l'université Paris-Est, 2016.
- [CIB, 2014] CIB, Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials, Mars 2014, Pays-Bas, 186 pp. ISBN 978-90-6363-085-0
- [Code de l'environnement] Code de l'Environnement disponible sur : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220>
- [COFAHE 2, 2012] COFAHE2, « Composants de Façades à Hautes Performances Énergétiques, Phase 2 », Rapport final, COMPOSITEC, GOYER, OCV REINFORCEMENTS, EXEL, NAVIER, Université Paris-Est, Centre scientifique et Technique du Bâtiment, Département Enveloppe et Revêtement, juillet 2012
- [Colas, 2014] Colas A-S., Brière R., Féraillé A., Habert G., Tardivel G., Holistic approach of a new masonry arch bridge on a Cevennes road, 9th International Masonry Conference 2014, Guimarães, Portugal.

[Cyr et al, 00] Cyr M., Carles-Gibergues A., Tagnit-Hamou A., Titanium fume and ilmenite fines characterization for their use in cement-based materials, *Cement and concrete research*, 30, 2000, pp. 1097-1104

[Das, 2011] Das S., «Life cycle assesment of carbon fiber-reinforced polymer composites», *International Journal of LCA*, 2011, 16:268-282

[Desbois, 09] Desbois Tiffany, Stabilité et durabilité des hydrates du système clinker sulfoalumineux-gypse, Thèse de doctorat Paris Est.

[Deconstruction 2011] Deconstruction and Reuse, Delta Institute, 2011, 60p

[Demolition New Zealand] Demolition – Best practice guidelines for demolition in New Zealand, disponible par le lien suivant : <http://www.business.govt.nz/worksafe/information-guidance/all-guidance-items/best-practice-guidelines-for-demolition-in-new-zealand>

[Directive 2008/98/CE] Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:fr:PDF>

[Ecoinvent] Ecoinvent Center : <http://www.ecoinvent.ch>

[Ecoinvent Report part XV, 2009] Ecoinvent Report part XV, 'Metal processing', Data v2.1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

[Eikelboom et al, 2001] Eikelboom et al., The building materials decree: an example of a Dutch regulation based on the potential impact of materials on the environment, Pays-Bas, 2001, 8pp

[Elkhadiri et al, 03] Elkhadiri I. et al, Obtaining a sulfoaluminate belite cement by industrial waste, *Mater construcc*, vol 53, n° 270, 2003

[Feraille, 2014] Feraille A., Analyse du cycle de vie d'une infrastructure ferroviaire, Rapport de contrat RFF, lot : modèle complet, 2014.

[FFB 2010] Déchets de chantier « Les réponses aux questions que vous vous posez », guide de la Fédération Française du Bâtiment, septembre 2010.

[Frischknecht, 2003 a] Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hischier R., Hellweg S., Humbert S., Köllner T., Loerincik Y., Margini M., Nemecek T. (2003). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI. Dübendorf, CH, Suisse.

[Frischknecht, 2003 b] Frischknecht R., Jungbluth N. (2003). Overview and methodology, final report Ecoinvent 2000 No.1, ESU Services, Uster, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Suisse.

[Gartner, 04] Gartner E., Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements, *Cement and concrete research*, 34, 2004, pp. 1489-1498

[Goedkoop & Spriensma, 2000] Goedkoop M., Spriensma R., « The Eco-Indicator 99: a damaged oriented method for life cycle impact assessment. PRé consultant, Amersfoort, The Netherlands, 2000, 142 P., retrieved in june 2003 from: [www.pre.nl/eco-indicator99/](http://www.pre.nl/eco-indicator99/)

[Gomes et al, 2012] F GOMES, R BRIÈRE, G HABERT, A FERAILLE and C TESSIER, Environmental evaluation of reinforced steel sold on the French market, Nantes juillet 2012

[Gomes et al, 2012a] F GOMES., A FERAILLE., Y TARDIVEL, C TESSIER, L NEEL, DIOGEN: database of environmental impacts of materials for civil engineering constructions – Application for galvanization, Intergalva 2012, Paris, 10-15 Juin 2012.

[Gomes et al, 2012b] F GOMES, A FERAILLE, G HABERT, C TESSIER, Environmental evaluation of steel plates and steel sections sold on the French market , Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group, p.367, Hofburg Palace, Vienna, 3-6 October 2012.



- [Gomes et al, 2013] F GOMES, R BRIÈRE, A FERAILLE, G HABERT, S LASVAUX, C TESSIER, Adaptation of environmental data to national and sectorial context: application for reinforcing steel sold on the French market, International journal of life cycle assessment, June 2013, Volume 18, Issue 5, pp 926-938
- [Grannec & Ravel, 2011] Grannec F., Ravel P., COFAHÉ 2, « Tâche 2.6, Evaluation Environnementale », décembre 2011
- [Guinée et al, 2002] JB GUINÉE, M GORRÉE, R HEIJUNGS, G HUPPES, R KLEIJN, L VAN OERS, A WEGENER SLEESWIJK, S SUH, HA UDO de HAES, H de BRUIJN, R VANDUIN, MAJ HUIJBREGTS, 2002. Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL)
- [Habert et al, 2011] G HABERT, Y TARDIVEL, C TESSIER, DIOGEN: base de Données d'Impacts environnementaux des matériaux pour les Ouvrages de GENie civil, GC'11
- [Hauschild, 2003] Hauschild M., Potting J. (2003). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. Institute for Product Development Technical University of Denmark.
- [Herfray, 2013] Herfray G., Feraille A., Inventaire de Cycle de Vie des matériaux composites, rapport de la chaire Bouygues « Bâtir durable & innover, 2013.
- [Hillion et al, 2013] H HILLION, F GOMES, F RIZARD, A FERAILLE, Module d'information environnemental des appareils d'appui de pont en élastomère fretté, GC'13
- [Huygen, 2008] Huygen J.M., La poubelle et l'architecte: vers le réemploi des matériaux, Actes Sud, 2008, 183 pp.
- [Ioannidoua, 2015] Ioannidoua D., Nikiasa V., Brière R., Zerbid S., Habert G., Land-cover-based indicator to assess the accessibility of resources used in the construction sector, Resources, Conservation and Recycling 94 pp 80–91, 2015.
- [Janotka et al, 99] Janotka I. and Krajci L., An experimental study on the upgrade of sulfoaluminate-belite cement systems by blending with Portland cement, Advances in Cement Research, 11, 35-41, 1999
- [Jolliet et al., 2005] Jolliet O., Saadé M., Crettaz P., Analyse du cycle de vie comprendre et réaliser un écobilan, presses polytechniques et universitaires romandes, 2005
- [Long et al, 02] Long S., Dong J., Yan C., Microwave promoted clinkering of sulfoaluminate cement, Cement and concrete research, 32, 2002, pp. 1653-1656
- [Matière grise] Choppin J., Delon N., Matière grise. Matériaux/Réemploi/Architecture. Paris : Pavillon de l'Arsenal, 2014. 365 pp.
- [Millette, 2010] MILLETTE J., Réemploi des résidus de construction, de rénovation et de démolition au Québec. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, 2010.
- [Morgan, 2005] Morgan P., Carbon fibers and their composites, Taylor and Francis, 2005, 1153 p.
- [Morin & al, 2012] Morin C., Loppinet-Serani A., Cansell F., Aymonier C., « Near- and supercritical solvolysis of carbon fibre reinforced polymers (CFRPs) for recycling carbon fibers as a valuable resource: State of the art », The journal of supercritical fluids, 2012, 66:232-240
- [NF A35-080-1, 2010] NF A35-080-1: Reinforcing steel – Weldable steel – Part 1: bars and coils, October, 2010.

- [NF EN 15 804 + A1, 2014] Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction, Avril 2014.
- [NF EN 10 020] NF EN 10 020: Definition and classification of grades of steel, September, 2000
- [Odler, 00] Odler, I., Special inorganic cement, E & FN SPON, New York, 2000
- [Oliveira et al, 05] Oliveira L.A.P. et al, The use of metakaolin to produce the eco-efficient concrete, Materials and structures, 38, 2005, pp. 403-410
- [OpenLCA] The OpenLCA program site : <http://www.openlca.org/The-openLCA-project.4.0.html>
- [Osborne, 99] Osborne G.J., Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete, Cement and concrete composites, 21, 1999, pp. 11-21
- [Philip et al, 2006] Philip J.-C., Bouyahbar F., Muzeau J.-P. : Guide pratique de la démolition des bâtiments, Eyrolles, 2006, 97p
- [Pirrone and Mahaffey, 2005] N PIRRONE and K.R MAHAFFEY, Dynamics of mercury pollution on regional and global scales – Atmospheric processes and human exposures around the world, Eds Springer (2005).
- [Poelman, 2009] Poelman W.A. Supply Driven Architecture (2009).Université de Twente, 2009.
- [Popescu et al, 02] Popescu C.D., Muntean M., Sharp J. H., Industrial trial production of low energy belite cement, Cement and Concrete Composite, vol. 25, pp. 689-693, 2002
- [Quilin, 01] Quilin K., Performance of belite-sulfoaluminate cements, Cement and concrete research, 31, 2001, pp. 1341-1349
- [Recycomp 2, 2005] « Guide déchets, valorisation des déchets composites à matrice thermodurcissable », projet Recycomp 2, janvier 2004-juin 2005, rapport disponible ici : <http://fr.scribd.com/doc/38059063/null>
- [Rigotti, 2013] Rigotti A., Etude des procédures de déconstruction de bâtiments en vue du recyclage, Rapport de PFE, Ecole des Ponts, 2013.
- [Rozycki et al. 2003] Von Rozycki C., Koeser H., Schwarz H. Ecology Profil of the German High-speed Rail Passenger Transport System, ICE, International Journal of Life cycle Assessment, 8(2), 83-91, 2003
- [Stripple et al. 2010] Stripple H., Uppenbergh S., Life cycle assessment of railways and rail transports – Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia line, Swedish Environmental Research Institute, Septembre 2010.
- [Thomsen et al 2011] Thomsen A., Schultmann F., Kohler N.: Deconstruction, demolition and destruction, Building Research & Information, 2011, 39:4, 327-332
- [Wong et al, 05] Wong H.S., Abdul Razak H., Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance, Cement and concrete research, 35, 2005, pp. 696-702

## 9. Activités en lien avec l'industrie

Contrat de recherche avec RFF : Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception, octobre 2010-janvier 2014

Contrat ATILH : Modules environnementaux des 9 types de ciment (2013-2014)

Contrat ECOCEM : Revue critique impact environnemental du laitier moulu (2012)

Projet OREVADD Données et méthodes d'évaluation des effets des infrastructures de génie civil sur le milieu naturel - indicateurs d'impact territoriaux et outil d'évaluation (SETRA-LCPC-Ecole des Ponts) (2012-2014) En charge de « l'Analyse de Cycle de Vie des passages faunes » Rapport final novembre 2014

Projet National Recybéton, co-animateur avec François Buyle Bodin du thème 3 « développement durable » 2012-2016.

Participation à la commission infrastructures (présidée par Yannick Tardivel) de l'Observatoire Energie Environnement Transport.

Participation au groupe spécialisé Eco-comparateur (présidé par Nicolas Pezas) de l'IDRRIM.

Chaire Vinci « Éco-Conception des ensembles bâtis et des infrastructures » (AgroParisTech, Ecole des Ponts ParisTech et Ecole des Mines ParisTech) débutée en 2008.

Chaire Bouygues « Bâtir durable et innover » (Ecole des Ponts ParisTech, Ecole Centrale Paris, Supelec et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)) débutée en octobre 2010.

Participation à l'organisation du colloque ORGAGEC « Matériaux organiques pour la construction : performances techniques et environnementales » organisé en août 2008 à l'Ecole des Ponts regroupant une centaine de participants (membre du comité d'organisation).

Participation à l'organisation du colloque « Mechanics and Physics of Porous Solids » en l'honneur d'Olivier Coussy, organisé en avril 2010 à l'Ecole des Ponts (membre du comité d'organisation).

Participation à l'organisation de International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction co-organisé par l'IFSTTAR et le CSTB à Nantes du 10 au 12 Juillet 2012 (membre du comité d'organisation)

Participation à l'organisation d'un séminaire dans le cadre de la chaire Sciences des Matériaux pour la Construction Durable « Recycling concrete into concrete: a scientific and industrial perspective », organisé en juillet 2014 à l'Ecole des Ponts.

## **10. Activités d'encadrement et d'enseignement**

### **10.1. Activités d'encadrement**

#### **Encadrement de stages**

Encadrement de Amine DIMASSI en stage de master (2006) "Etude de bétons à base de clinker sulfo-alumineux et de gypse : durabilité des systèmes", DEA MMS ; co-encadrement de ce stage avec Amina Alaoui.

Encadrement de Latifa IRAQI (2006) "Etude de la faisabilité d'un liant à base de plâtre et de clinker sulfoalumineux", TFE de l'Ecole Mohammedia des Ingénieurs, Rabat, MAROC ; co-encadrement de ce TFE avec Amina Alaoui.

Encadrement de Antonin Steckmeyer en stage scientifique (avril 2006-juillet 2006) : Etude de l'hydratation du système clinker sulfoalumineux – gypse ; co-encadrement de ce stage avec Viet Hung Nguyen.

Encadrement de Emilie de Longueau et Brendan Vannier en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2011): Etude de l'effet d'échelle dans les mesures de la perméabilité des bétons.

Co-encadrement avec Fernanda Gomes de Maylis Boissier en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2011): Impact environnemental des matériaux bitumeux.

Co-encadrement avec Fernanda Gomes de Guillemette Maillère en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2011): Analyse de Cycle de Vie Calcul d'impacts.

Encadrement d'Alban Montégut en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2011) : Analyse du Cycle de Vie d'un passage pour la faune.

Co-encadrement avec Fernanda Gomes de Guillaume Prévot en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2011) : Comparaison de données environnementales sur l'acier dans le cadre de l'Analyse de Cycle de Vie.

Encadrement d'Hélène Hillion en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2012) : Analyse du cycle de vie d'un appareil d'appui de pont.

Encadrement de Simon Avenel et Pierre Bérard en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2012) : Etude de l'effet d'échelle dans les mesures de perméabilité des bétons.

Encadrement d'Arthur Rouanet en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2012) : Analyse du cycle de vie d'un passage inférieur pour la petite faune.

Encadrement de Toussaint Behaghel en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2012) : Etude environnementale d'un béton bitumineux.

Co-encadrement avec Fernanda Gomes de Sandrine Guigue en stage de master 1 université Paris 6 (avril – juin 2012) : Analyse du bois dans Ecoinvent – lamellé collé et contreplaqué.

Encadrement de Andrea Rigotti en Projet de Fin d'Etudes (mars –juillet 2013) : Etude des procédures de déconstruction de bâtiments en vue du recyclage.

Encadrement de Julien Courville en stage de 4<sup>ème</sup> année à l'Université Technologique de Troyes (juillet – décembre 2013) : Réalisation de fiches DIOGEN.

Encadrement de Domitille Coulomb en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2014) : Analyse de cycle de vie appliquée sur des maisons Composites.

Co-encadrement avec Yannick Tardivel de Safia Dziris en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2014) : Développement de modules spécifiques dans un logiciel permettant l'évaluation environnementale d'ouvrages d'art.

Encadrement de Sarah Allouch en stage de master SMCD (avril – juillet 2015) : Etude des typologies de bâtiments en vue de leur déconstruction.

Co-encadrement avec Yannick Tardivel de Zakariya Loulou en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2015) : Bilan environnemental des aciers.

Co-encadrement avec Olivier Baverel de Mathieu Pichon en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2015) : Faut-il démolir ou rénover ?

Co-encadrement avec Olivier Baverel de Victor Lee en stage scientifique de l'Ecole des Ponts ParisTech (avril – juin 2015) : Etude prospective de la gestion des stocks de déconstruction reconstruction.

### **Encadrements de thèses**

Participation à l'encadrement (10%) de Tiffany Desbois en thèse (soutenue en novembre 2009) : Stabilité et durabilité des hydrates du système clinker sulfoalumineux-gypse, directeur de thèse Robert Le Roy

Encadrement (60%) de Raphael Brière en thèse (débutée en octobre 2012) : Approche conséquentielle de la fin de vie des bâtiments, directeur de thèse Olivier Baverel.

Participation à l'encadrement (30%) de Yaarob Audi en thèse (débutée en octobre 2013) : Indicateurs du développement durable adaptés aux aménagements souterrains, et le bilan environnemental de ces aménagements - aspects méthodologique et application, directeur de thèse Agnès Jullien.

Encadrement (50%) de Anne de Bortoli en thèse (débutée en octobre 2014) : Eco-conception de l'entretien routier : référentiel systémique et méthodologie opératoire, directeur de thèse Fabien Leurent

### **Encadrements de post-doc**

Co-encadrement (30%) de Viet Hung Nguyen en post-doctorat (Oct. 2005 - Juil. 2006) : Etude de l'hydratation du système clinker sulfoalumineux – gypse avec l'unité PCM au LCPC (Loïc Divet) et Amina Alaoui (Navier).

Encadrement (100%) de Tiffany Desbois en post-doctorat (décembre 2009-mai 2010) : Inventaire environnemental des sites de production des matériaux de construction, chaire Vinci.

Encadrement (100%) de Lina Bouhaya en post-doctorat (octobre 2010-mars 2013) : Analyse des cycles de vie des matériaux de l'infrastructure dans une perspective d'éco-conception, contrat de recherche avec RFF.

Encadrement (100%) de Fernanda Gomes en post-doctorat (janvier 2011-juin 2012) : Inventaire environnemental des sites de production des matériaux de construction, chaire Vinci, suite du travail de Tiffany Desbois.

Encadrement (100%) de Grégory Herfray en post-doctorat (mars – octobre 2012) : Inventaire de cycle de vie des matériaux composites, chaire Bouygues.

## **10.2. Enseignements**

Nommée en avril 2009 maître de conférences de l'Ecole des Ponts ParisTech.

Co-responsable avec Jean-Michel Torrenti de

« Durabilité des bétons » cours du Mastère Spécialisé Génie civil des grands ouvrages pour l'énergie (3h TP, 3h cours TD).  
« Bétons et innovations » semaine d'ouverture à destination d'élèves de 3<sup>ème</sup> année du département GCC (3h cours TD).

Co-responsable avec Laurent Brochard et Mathieu Rivallain de

« Conception éco-orientée » cours du département GMM obligatoire pour les 2<sup>ème</sup> années (3h cours TD).

« ACV et éco-conception des véhicules » cours du master "Mobilité et Véhicules Electriques" Fondation Renault (6h cours TD).

Co-responsable avec Anne de Bortoli de « Analyse de cycle de vie des modes urbains de transport » cours du département VET (30h cours TD).

Chargée de travaux dirigés, travaux pratiques et cours en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de l'Ecole des Ponts Paristech pour les cours « Calcul et comportement des matériaux » (18h TP), « Connaissance des métaux » (9h TP).

Accompagnement d'étudiants dans leurs projets de fin d'études (3<sup>ème</sup> année), leurs stages scientifiques (1<sup>ère</sup> année) et différents projets.

### **10.3. Participations à des jurys**

Thèse Sébastien LASVAUX : Une étude pour la simplification du modèle d'analyse de cycle de vie des bâtiments, thèse soutenue le 14 décembre 2010 devant le jury composé de Mmes A. JULLIEN, A. FERAILLE, examinatrices, et Mrs. N. KOHLER, P. ROUSSEAUX, rapporteurs, J. CHEVALIER, encadrant et B.PEUPORTIER, directeur de thèse.

Thèse Grégory HERFRAY : Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers, thèse soutenue le 4 octobre 2011 devant le jury composé de Mmes N. FRASCARIA, A. FERAILLE, examinatrices et Mrs. N. KOHLER, M. MAÏZIA, rapporteurs, Y. BOUZIDI, C. GOBIN, P. ROUSSEAUX, examinateurs et B.PEUPORTIER, directeur de thèse.

## **11.Responsabilités administratives**

De décembre 2010 à décembre 2012: déléguée au budget Ecole des Ponts auprès du directeur du laboratoire. J'étais en charge de l'élaboration et du suivi du budget Ecole des Ponts pour le laboratoire, en lien avec les responsables d'équipe et les gestionnaires, tant d'un point de vue ressources propres que d'un point de vue crédit état. En 2009 le budget considéré se décomposait de la façon suivante : 1140k€ de ressources propres et 195k€ de crédits état.

De janvier 2008 à décembre 2010 : secrétaire générale du laboratoire Navier. J'ai alors eu la responsabilité de l'équipe administrative du laboratoire, composée de 8 secrétaires et gestionnaires, en lien avec le directeur du laboratoire.

## 12. Annexes

### 12.1. Fiche DIOGEN Appareil d'appui 4 feuillets



NORME DE REFERENCE : NF EN 15804

Produit	Appareil d'appui de pont en élastomère fretté à 4 feuillets
Usages principaux	Les appareils d'appui de pont sont placés entre le tablier et les appuis. Leur rôle est de transmettre les charges verticales apportées par le tablier aux piles et au culées. Ils sont dimensionnés en drnd.
Caractéristiques principales	Conforme à la norme NF EN 1337-3
Commentaires	Document de référence : "Module d'informations environnementales des appareils d'appui de pont en élastomère fretté". L'appellation "Inventaire de Cycle de Vie" a été remplacée lors de la révision du document par "Module d'information environnemental"
Date de mise à jour de la fiche	05/12/2013

#### INDICE DE CONFIANCE

Classe de données	Information prochainement accessible						
Origine	Données spécifiques						
Commentaires	xxx						
Réserves	xxx						
Typologie (en cours d'évaluation)	Information prochainement accessible	E0	E1	E2	E3	E4	E5

#### IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		
Réchauffement climatique	kg eq. CO2	6,4
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg eq. CFC-11	7,26E-07
Acidification des sols et de l'eau (atmosphérique)	kg eq. SO2	0,023223058
Eutrophisation	kg eq. (PO4) <sup>3-</sup>	0,01583961
Formation d'ozone photochimique	kg eq. éthylène	7,26E-07
Epuisement des ressources abiotiques (ancienne norme NFP 01 010)	kg eq. Sb	6,85E-02
Consommation des ressources énergétiques (ancienne norme NFP 01 010)	MJ	180,3023917

#### UTILISATION DES RESSOURCES selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	xxx
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	xxx
<b>Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)</b>	<b>MJ</b>	<b>xxx</b>
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	xxx
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	xxx
<b>Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)</b>	<b>MJ</b>	<b>xxx</b>
Utilisation de matière secondaire	kg	xxx
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ	xxx
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ	xxx
Utilisation nette d'eau douce	m <sup>3</sup>	xxx

#### CATEGORIES DE DECHETS selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		1 dm <sup>2</sup>
Déchets dangereux éliminés	kg	
Déchets non dangereux éliminés	kg	
Déchets radioactifs éliminés	kg	

#### FLUX SORTANTS selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		1 dm <sup>2</sup>
Composants destinés à la réutilisation	kg	xxx
Matériaux destinés au recyclage	kg	xxx
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg	xxx
Energie fournie à l'extérieur	MJ	xxx

#### REFERENCE

Base de données de référence / accessibilité	Les entreprises fabriquant des appareils d'appuis maintiennent la confidentialité de leurs données. Des données de fabrication ont tout de même pu être récupérées à l'aide du manuel qualité d'une entreprise datant de la même période que la présente étude.
Date de publication / de référence des données	Données collectées sur site en 2012.
Données complémentaires	Les données émanent de la base de données Ecoinvent

#### HYPOTHESES TECHNOLOGIQUES

Technologie / Procédé de production	Les étapes de production sont : la fabrication des feuillets d'élastomères, la fabrication des frettes en acier, la réalisation de l'ébauche à partir des feuillets d'élastomères et des frettes
Filière de production	xxx
Données complémentaires	

#### HYPOTHESES MODULE D'INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Description de l'unité déclarée	L'unité fonctionnelle est le m <sup>2</sup> d'appareil d'appui en élastomère fretté de type B de dimension en plan 400*500 mm <sup>2</sup>
Hypothèses d'allocation (oui/non) si oui: type d'allocation (expansion de système/ répartition) si répartition: type (massique, énergétique, économique)	Non
Limites du système	
Liste des procédés d'extraction des matières premières	xxx
Liste des procédés de transformation de la matière	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production des feuillets d'élastomères: pré-calendrage, cisaillement en plaque (manuel), enroulement avec une feuille de toile</li> <li>• Production des frettes en acier: grenailage, cisaillement en frette, dégraissage, enduction</li> </ul>
Composition du mix énergétique pour l'électricité	Module de production d'électricité française Ecoivent (2004) : <ul style="list-style-type: none"> <li>• charbon 4,4%</li> <li>• pétrole 1%</li> <li>• gaz naturel 3,16%</li> <li>• nucléaire 78,7%</li> <li>• hydraulique 10,8%</li> <li>• autre</li> </ul>
Distance totale des transports	1271 km
Mix des modes de transports pris en compte (route, rail, fluvial, maritime)	Transport routier pour l'acier S235 et le polychloroprène
Règle de coupure adoptée	xxx



## 12.2. Fiche DIOGEN Appareil d'appui 8 feuillets



NORME DE REFERENCE : NF EN 15804

Produit	Appareil d'appui de pont en élastomère frette à 8 feuillets
Usages principaux	Les appareils d'appui de pont sont placés entre le tablier et les appuis. Leur rôle est de transmettre les charges verticales apportées par le tablier aux piles et au culées. Ils sont dimensionnés en dm3.
Caractéristiques principales	Conforme à la norme NF EN 1337-3
Commentaires	Document de référence : "Module d'informations environnementales des appareils d'appui de pont en élastomère frette". L'appellation "Inventaire de Cycle de Vie" a été remplacée lors de la révision du document par "Module d'informations environnementales"
Date de mise à jour de la fiche	05/12/2013

### INDICE DE CONFIANCE

Classe de données	Information prochainement accessible						
Origine	Données spécifiques						
Commentaires	xxx						
Réserves	xxx						
Typologie (en cours d'évaluation)		E0	E1	E2	E3	E4	E5
	Information prochainement accessible						

### IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		<i>1 dm<sup>3</sup></i>
Réchauffement climatique	kg eq. CO2	6,263200736
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg eq. CFC-11	7,29E-07
Acidification des sols et de l'eau	kg eq. SO2	0,022770104
Eutrophisation	kg eq. (PO4) <sup>3-</sup>	0,015484786
Formation d'ozone photochimique	kg eq. éthylène	2,72E-03
Epuisement des ressources abiotiques (ancienne norme NFP 01 010)	kg eq. Sb	0,067550929
Consommation des ressources énergétiques (ancienne norme NFP 01 01)	MJ	178,2126845

### UTILISATION DES RESSOURCES selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		<i>1 dm<sup>3</sup></i>
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	xxx
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	xxx
<b>Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)</b>	<b>MJ</b>	xxx
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	xxx
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ	xxx
<b>Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)</b>	<b>MJ</b>	xxx
Utilisation de matière secondaire	kg	xxx
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ	xxx
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ	xxx
Utilisation nette d'eau douce	m <sup>3</sup>	xxx

### CATEGORIES DE DECHETS selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		<i>1 dm<sup>3</sup></i>
Déchets dangereux éliminés	kg	
Déchets non dangereux éliminés	kg	
Déchets radioactifs éliminés	kg	

#### FLUX SORTANTS selon la NF EN 15804

Catégorie d'impact	Unité	Appareil d'appui
<i>Unité de référence du produit</i>		<i>1 dm<sup>3</sup></i>
Composants destinés à la réutilisation	kg	xxx
Matériaux destinés au recyclage	kg	xxx
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg	xxx
Energie fournie à l'extérieur	MJ	xxx

#### REFERENCE

Base de données de référence / accessibilité	Les entreprises fabriquant des appareils d'appui maintiennent la confidentialité de leurs données. Des données de fabrication ont tout de même pu être récupérées à l'aide du manuel qualité d'une entreprise datant de la même période que la présente étude.
Date de publication / de référence des données	Données collectées sur site en 2012
Données complémentaires	Les données émanent de la base de données Ecoivent

#### HYPOTHESES TECHNOLOGIQUES

Technologie / Procédé de production	Les étapes de production sont : la fabrication des feuillets d'élastomères, la fabrication des frettes en acier, la réalisation de tôlebauche à partir des feuillets d'élastomères et des frettes en acier, le moulage et la vulcanisation de tôlebauche
Filière de production	xxx
Données complémentaires	

#### HYPOTHESES MODULE D'INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Description de l'unité déclarée	L'unité fonctionnelle est le m <sup>2</sup> d'appareil d'appui en élastomère fretté de type B de dimension en plan 400*500 mm <sup>2</sup>
Hypothèses d'allocation (oui/non) si oui : type d'allocation (expansion de système/ répartition) si répartition, type (massique, énergétique, économique)	Non
Limites du système	
Liste des procédés d'extraction des matières premières	xxx
Liste des procédés de transformation de la matière	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production des feuillets d'élastomères: pré-calendrage, cisaillement en plaque (manuel), enroulement avec une feuille de toile</li> <li>• Production des frettes en acier: grenailage, cisaillement en frette, dégrasage, enduction</li> </ul>
Composition du mix énergétique pour l'électricité	Module de production d'électricité française Ecoivent (2004) : <ul style="list-style-type: none"> <li>• charbon 4,4%</li> <li>• pétrole 1%</li> <li>• gaz naturel 3,16%</li> <li>• nucléaire 78,3%</li> <li>• hydraulique 10,8%</li> <li>• autres 2,64%</li> </ul>
Distance totale des transports	1271 km
Mix des modes de transports pris en compte (route, rail, fluvial, maritime)	Transport routier pour l'acier S235 et le polychloroprène
Règle de coupure adoptée	xxx

### 12.3. Fiche DIOGEN du profil SOFICAR carbone résine Epoxy/fibre de carbone



Produit	Profilé composite pultrudé SOFICAR Carbon résine EPOXY/fibre de carbone
Usages principaux	Renfort pour génie civil, câble et attache pour installation offshore de profondeur, Industrie
Caractéristiques principales	Fibre haute résistance Torayca T700 ou à module intermédiaire Torayca T800
Commentaires	Profilés pultrudés de forme variable, en sortie d'usine. Les données sur la fibre de carbone sont calculées à partir de Das G., « Life cycle assesment of carbon fiber-reinforced polymer composites », International Journal of LCA, 2011, 16:268-282
Date de mise à jour de la fiche	15/11/2012

#### INDICE DE CONFIANCE

Classe de données	Information prochainement accessible						
Origine	Données spécifiques						
Commentaires	Données calculées à partir d'informations fournies par le producteur						
Réserves	Manque de données sur la fibre de carbone						
Typologie (en cours d'évaluation)	E0	E1	E2	E3	E4	E6	
	information prochainement accessible						

#### IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX selon la NF P01-010

Catégorie d'Impact	Unité	Profilé pultrudé fibre de carbone/résine EPOXY
Unité de référence du produit		kg
Consommation de ressources énergétiques		
énergie primaire totale	MJ	7,93E+02
énergie renouvelable		3,91E+02
énergie non renouvelable		4,02E+02
Epuisement de ressources	kg eq. Sb	2,30E-01
Consommation d'eau totale	l	2,90E+02
Déchets solides		5,75E-01
déchets valorisés total		
déchets éliminés :		
déchets dangereux	kg	7,91E-03
déchets non dangereux		5,62E-01
déchets inertes		
déchets radioactifs		5,32E-03
Changement climatique	kg eq. CO2	2,02E+01
Acidification atmosphérique	kg eq. SO2	7,14E-02
Pollution de l'air	m3	
Pollution de l'eau	m3	
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg eq. CFC-11	1,59E-06
Formation d'ozone photochimique	kg C2H4	2,82E-03

## IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX complémentaires

Catégorie d'impact	Unité	Profilé pultrudé fibre de carbone/résine EPOXY
Unité de référence du produit		kg
Ecotoxicité aquatique eau douce - FAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	1,95
Ecotoxicité sédiments eau douce - FSETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	4,21
Ecotoxicité aquatique marine - MAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	8,89E+00
Ecotoxicité terrestre - TAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	4,16E-03
Toxicité pour l'homme - HTP 100a	kg eq. 1,4-DCB	5,03E+00

## REFERENCE

Base de données de référence / accessibilité	Ecoinvent et données producteur
Date de publication / de référence des données	
Données complémentaires	

## HYPOTHESES TECHNOLOGIQUES

Technologie / Procédé de production	Pultrusion
Filière de production	
Données complémentaires	

## HYPOTHESES MODULE D'INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Description de l'unité déclarée	1 kg de profilé
Hypothèses d'allocation (oui/non)	Non
<ul style="list-style-type: none"> <li>si oui: type d'allocation (expansion de système/ répartition)</li> <li>si répartition: type (massique, énergétique, économique)</li> </ul>	
<b>Limites du système</b>	
Liste des procédés d'extraction des matières premières	
Liste des procédés de transformation de la matière	Pultrusion : polymérisation, coupe
Composition du mix énergétique pour l'électricité	Mix français
Distance totale des transports	Spécifique
Mix des modes de transports pris en compte (route, rail, fluvial, maritime)	Spécifique
Règle de coupure adoptée	1%

## 12.4. Fiche DIOGEN du profilé Exelcomposites résine vinylester/fibre de verre



Produit	Profilé composite pultrudé Exelcomposites résine vinylester/fibre de verre
Usages principaux	Profilé pour fenêtre
Caractéristiques principales	1 m de profilé = 1,5 kg
Commentaires	Profilés pultrudés de forme variable, en sortie d'usine
Date de mise à jour de la fiche	15/11/2012

### INDICE DE CONFIANCE

Classe de données	information prochainement accessible						
Origine		xxx					
Commentaires		xxx					
Réserve		xxx					
Typologie (en cours d'évaluation)		E0	E1	E2	E3	E4	E6
	information prochainement accessible						

### IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX selon la NF P01-010

Catégorie d'impact	Unité	Profilé pultrudé fibre de verre/résine vinylester
Unité de référence du produit		kg
Consommation de ressources énergétiques		
énergie primaire totale	MJ	8,37E+01
énergie renouvelable		2,35E+00
énergie non renouvelable		8,13E+01
Épuisement de ressources	kg eq. Sb	8,13E+01
Consommation d'eau totale	l	3,97E+01
Déchets solides		4,13E-01
déchets valorisés total		
déchets éliminés :	kg	
déchets dangereux		6,01E-02
déchets non dangereux		3,52E-01
déchets inertes		
déchets radioactifs		2,41E-04
Changement climatique	kg eq. CO2	4,49E+00
Acidification atmosphérique	kg eq. SO2	1,82E-02
Pollution de l'air	m3	
Pollution de l'eau	m3	
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg eq. CFC-11	4,53E-07
Formation d'ozone photochimique	kg C2H4	1,05E-03

## IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX complémentaires

Catégorie d'Impact	Unité	Profilé pultrudé fibre de verre/résine vinylester
Unité de référence du produit		kg
Ecotoxicité aquatique eau douce - FAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	0,00
Ecotoxicité sédiments eau douce - FSETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	1,9
Ecotoxicité aquatique marine - MAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	3,49E+00
Ecotoxicité terrestre - TAETP 100a	kg eq. 1,4-DCB	1,20E-03
Toxicité pour l'homme - HTP 100a	kg eq. 1,4-DCB	7,86E+00

Base de données de référence / accessibilité	Ecoinvent et données producteur
Date de publication / de référence des données	Validité des données producteur : 01/01/2010 - 01/01/2011
Données complémentaires	

## HYPOTHESES TECHNOLOGIQUES

Technologie / Procédé de production	Pultrusion
Filière de production	
Données complémentaires	

## HYPOTHESES MODULE D'INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Description de l'unité déclarée	1 kg de profilé
Hypothèses d'allocation (oui/non)	Non
si oui: type d'allocation (expansion de système/ répartition)	
si répartition: type (massique, énergétique, économique)	
<b>Limites du système</b>	
Liste des procédés d'extraction des matières premières	
Liste des procédés de transformation de la matière	Pultrusion : polymérisation, coupe
Composition du mix énergétique pour l'électricité	Mix français
Distance totale des transports	Spécifique
Mix des modes de transports pris en compte (route, rail, fluvial, maritime)	Spécifique
Règle de coupure adoptée	1%

## 12.5. Sortie du statut de déchet

En France la classification des déchets est régie par le code de l'environnement, notamment l'article R.541-8. Il définit les différents types de déchets en concordance avec les plus récentes directives européennes en utilisant la nomenclature de substances dangereuses de la directive de 2001/59/CE (Commission Européenne, 2001). Par rapport aux propriétés des déchets dangereux l'article R.541-10 et l'annexe I de l'article R541-8 sont plus précis que la directive européenne de 2008 (Conseil de l'Union Européenne, 2008). D'après le code de l'environnement français pour qu'un déchet soit qualifié de dangereux il doit présenter au moins une des caractéristiques suivantes :

- 1) « Substances et préparations pouvant exploser sous l'effet de la flamme ou qui sont plus sensibles aux chocs ou aux frottements que le dinitrobenzène » ;
- 2) « Substances et préparations qui, au contact d'autres substances, notamment de substances inflammables, présentent une réaction fortement exothermique » ;
- 3) « Matières contenant des micro-organismes viables ou leurs toxines, dont on sait ou on a de bonnes raisons de croire qu'ils causent la maladie chez l'homme ou chez d'autres organismes vivants » ;
- 4) « Son point d'éclair est inférieur ou égal à 55°C » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme très toxiques à une concentration totale égale ou supérieure à 0,1% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme toxique à une concentration totale égale ou supérieure à 3% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme nocives à une concentration totale égale ou supérieure à 25% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme corrosives qui provoquent de graves brûlures (classe R35) à une concentration totale égale ou supérieure à 1% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme corrosives qui provoquent de brûlures (classe R34) à une concentration totale égale ou supérieure à 5% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme corrosives qui risquent de provoquer de lésions oculaires graves (classe R41) à une concentration totale égale ou supérieure à 10% » ;

« Il contient une ou plusieurs substances classées comme corrosives des irritants pour les yeux (classe R36), pour les voies respiratoires (classe R37) ou pour la peau (classes R38) à une concentration totale égale ou supérieure à 20% » ;

« Il contient une substance reconnue comme cancérigène des catégories 1 ou 2 à une concentration totale égale ou supérieure à 0,1% » ;

« Il contient une substance reconnue comme cancérigène de la catégorie 3 à une concentration totale égale ou supérieure à 1% » ;

« Il contient une substance toxique pour la reproduction, des catégories 1 ou 2, qui peut altérer la fertilité (classe R60) ou qui a de risque, pendant la grossesse, d'effets néfastes pour l'enfant (classe R61) à une concentration supérieure à 0,5% » ;

« Il contient une substance toxique pour la reproduction, de la catégorie 3, qui a un risque possible d'altération de la fertilité (classes R62), ou, pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant (classe R63) à une concentration supérieure à 5% » ;

«Il contient une substance mutagène, des catégories 1 ou 2, qui peut provoquer des altérations génétiques héréditaires (classe R46) à une concentration supérieure à 0,1% »;

«Il contient une substance mutagène, de la catégorie 3, qui a d'effet cancérigène suspecté - preuves insuffisantes (classe R40) à une concentration supérieure à 1% »;

« Substances et préparations qui, au contact de l'eau, de l'air ou d'un acide, dégagent un gaz toxique ou très toxique » ;

(Sensibilisant) : « substances et préparations qui, par inhalation ou pénétration cutanée, peuvent donner lieu à une réaction d'hypersensibilisation telle qu'une nouvelle exposition à la substance ou à la préparation produit des effets néfastes caractéristiques. Cette propriété n'est à considérer que si les méthodes d'essai sont disponibles » ;

(Ecotoxique) : « substances et préparations qui présentent ou peuvent présenter des risques immédiats ou différés pour une ou plusieurs composantes de l'environnement » ;

« Substances et préparations susceptibles, après élimination, de donner naissance, par quelque moyen que ce soit, à une autre substance, par exemple un produit de lixiviation, qui possède l'une des caractéristiques énumérées ci-avant ».

Observations sur les substances cancérigènes (§ 12 à 17):

- Dans la catégorie 1 sont «les substances que l'on sait être cancérigènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour établir l'existence d'une relation de cause à effet entre l'exposition de l'homme à de telles substances et l'apparition d'un cancer».
- La catégorie 2 « agroupe les substances devant être assimilées à des substances cancérigènes pour l'homme. On dispose de suffisamment d'éléments pour justifier une forte présomption que l'exposition de l'homme à de telles substances peut provoquer un cancer ».
- La catégorie 3 « correspond substances préoccupantes pour l'homme en raison d'effets cancérigènes possibles, mais pour lesquelles les informations disponibles ne permettent pas une évaluation satisfaisante. Il existe des informations issues d'études adéquates sur les animaux, mais elles sont insuffisantes pour classer la substance dans la catégorie 2 ».



## 12.6. CV détaillé

**Adélaïde FERAILLE-FRESNET**  
01 64 15 37 38  
E-mail : adelaide.feraille@enpc.fr

Née le 23 février 1973  
Nationalité française  
mariée, 3 enfants

**Docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées  
Structure et Matériaux**

### PARCOURS PROFESSIONNEL

---

2011... **Chercheur dans l'équipe « Structures hétérogènes », Ecole des Ponts ParisTech**

**Déléguée au budget Ecole des Ponts**

**Activités de chercheur :**

- Développement d'outils d'analyse de cycle de vie dans le domaine de la construction
- Participation à l'élaboration d'une base de données environnementales matériaux de la construction
- Développement de ces activités aux travers de collaborations scientifiques et de partenariats industriels

**Activités de déléguée au budget (jusque fin 2012):**

- Coordination des activités administratives et comptables du laboratoire en relation avec la secrétaire générale, les responsables et les secrétariats des équipes pour ce qui concerne le budget Ecole des Ponts

**Activités d'enseignement :** Chargée de travaux dirigés, travaux pratiques et cours en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de l'E.N.P.C. pour les cours « *Calcul et comportement des matériaux* », « *Connaissance des métaux* », « *Durabilité des bétons* », « *Conception éco-orientée* », « *ACV et éco-conception des véhicules* » et « *Bétons et innovations* » et accompagnement d'étudiants dans leurs projets de fin d'études, leurs stages scientifiques et différents projets. Nommée depuis avril 2009 maître de conférences de l'ENPC.

2008 - 2010 **Secrétaire générale de l'UR Navier, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (E.N.P.C.)**

**Chercheur dans l'équipe « Structures hétérogènes »**

**Activités de secrétaire générale :**

- Coordination des activités administratives et comptables du laboratoire en lien avec les responsables d'équipe (7) et les secrétaires et gestionnaires (8).
- Développement de l'information, la communication et de la valorisation des travaux du laboratoire.
- Suivi des relations avec les tutelles (Ecole des Ponts, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

**Activités de chercheur :**

○ Mes activités de recherche sont toujours celles qui ont été initiées entre 2004 et 2007 et développées au paragraphe suivant. Etant donné que mon temps de recherche est réduit, je m'attache plus particulièrement au développement d'outils d'analyse de cycle de vie.

**Activités d'enseignement** : Chargée de cours et travaux pratiques en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> année de l'E.N.P.C. pour les cours « *Calcul et comportement des matériaux* », « *Connaissance des métaux* » « *Durabilité des bétons* » et « *Bétons et innovations* » et accompagnement d'étudiants dans leurs projets de fin d'études, leurs stages scientifiques et différents projets.

2004 - 2007 **Ingénieur TPE affecté au Laboratoire d'Analyse des Matériaux et Identification (LAMI), laboratoire de l'ENPC, dans l'axe « Matériaux et structures pour le développement durable »**

- Recherche de nouveaux bétons « environnementaux » pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Recherche de sous-produits industriels utilisables comme liants ou granulats (phosphogypses, ...)
- Développement d'outils d'analyse de cycle de vie des matériaux et des structures pour, entre autre, la caractérisation de l'éco-bilan CO<sub>2</sub>
- Développement de l'activité aux travers de collaborations scientifiques et de partenariats industriels
- Encadrement de techniciens, doctorants et stagiaires
- Chargée du suivi et de l'animation des échanges entre l'ENPC et la Escuela de Caminos de Madrid, la Escuela de Caminos de Santander, l'Instituto Torroja, le Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas (CEDEX).
- Enseignement

2004 – 2000 **Adjointe au président du Département Génie Civil et Construction de l'ENPC, à la Direction de l'enseignement**

- Animation d'une équipe de trois personnes
- Coordination pédagogique en interne ENPC et ENPC/Ecole d'architecture de Marne la Vallée
- Représentation du Département auprès des industriels, des Universités et Grandes Ecoles françaises et internationales

2000 - 1996 **Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité Structures et Matériaux** : « *Le rôle de l'eau dans le comportement des bétons à haute température* », mention très honorable avec les félicitations du jury.

- Enseignement : Chargée de travaux pratiques en 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de l'E.N.P.C. pour les cours « *Elastomères* », « *Introduction aux Propriétés Mécaniques des Matériaux* » et « *Essais et Contrôle des Matériaux de Construction* » ; Chargée de travaux dirigés pour le DEA S3M.
- Encadrement de stagiaires

1995 - 1990 Divers stages (ONERA, ELF AQUITAINE, TECHNIP, ...)

## FORMATION

---

1996      **DEA de Mécanique des Solides, Structures et Systèmes Mécaniques (S3M)** à Université Paris 6 (Jussieu)-E.N.P.C), Option Mécanique de la Construction,

1995      **Maîtrise de MECANIQUE** à l'Université de Versailles Saint Quentin

## ET...

---

- Langues : Anglais (lu, écrit, parlé) ; Espagnol (lu, écrit, parlé).
- Compétences informatiques : Programmation en langage fortran 77 et en langage C ; Environnement UNIX ; Logiciels de calcul formel (Maple, Mathematica) ; Logiciels de bureautique (Word, Excel, Powerpoint, LaTeX...) ; Logiciels d'ACV (Simapro, OpenLCA)
- Représentante des enseignants-chercheurs de l'E.N.P.C. au Conseil d'Enseignement et de Recherche et au Conseil d'Administration depuis 2002.
- Pratique de l'escalade, la randonnée, le yoga et la course à pied.

## 12.7. Liste des publications

### Articles

1. **Etude du comportement d'une fissure humide soumise à une élévation de température**  
Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A.  
C. R. Acad. Sci. Paris, t.328, Série II b, pp 387-392, 2000
2. **Behaviour of a wet crack submitted to heating up to high temperature**  
Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A.  
Mechanics of Materials, vol 32, pp 471-484, 2000.
3. **Description de la microstructure du béton à l'aide de la saturation en liquide**  
Feraille-Fresnet A., Ehrlacher  
Revue Française de Génie Civil, vol 4, n° 7-8, pp 851-874, 2000.
4. **Hydrostatic interaction of a wetting fluid and a circular crack in an elastic material**  
Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A., Bui H.D.  
Mechanics of Materials, vol 35, pp 581-586, 2003.
5. **Thermo-Hydro-Chemical modeling of a porous medium submitted to high temperature : An application to an axisymetrical structure**  
Feraille-Fresnet A., Tamagny P., Ehrlacher A., Sercombe J.  
Mathematical and computer modelling, 37, pp 641-650, 2003
6. **Simplified Environmental Study on Innovative Bridge Structure**  
Lina Bouhaya, Robert Le Roy, and Adélaïde Feraille-Fresnet  
Environmental Science and Technology, 43 (6), 2066-2071, 2009
7. **Size Effect in Concrete Intrinsic Permeability Measurements**  
Lucia Alarcon-Ruiz, Maurizio Brocato, Stéfano Dal pont, Adélaïde Féraïlle,  
Transp Porous Med 85:541–564, DOI 10.1007/s11242-010-9577-9, 2010.
8. **Effect of gypsum content on sulfoaluminate mortars stability**  
Tiffany Desbois, Robert Le Roy, Alexandre Pavoine, Gérard Platret, Adélaïde Feraille,  
Amina Alaoui, EJECE volume 14 N°5, pp 579-597, 2010
9. **Adaptation of environmental data to national and sectorial context : application for reinforcing steel sold on the French market**  
F. Gomes, R. Brière, A. Feraille, G. Habert , S. Lasvaux, C. Tessier,  
Int J LCA,18 : 926-938, 2013
10. **Linking research activities and their implementation in practice in the construction sector: the LCA Construction 2012 experience**  
S. Lasvaux, A. Ventura, C. De La Roche, K. Hermel, A. Feraille, G. Habert, Y. Tardivel, C. Tessier,  
JLCA-D-13-00261, 2014
11. **Environmentally Compatible Spatial Structures: some Concepts from the Reuse of Manufactured Goods**  
O. Baverel, A. Féraïlle, M. Brocato,  
Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2013

## Communications nationales avec actes

1. **Modèle thermo-hydro-mécanique du béton soumis à de hautes températures**  
Feraille A., Jouhari M., Laalai I., Ehlacher A.  
Sciences des matériaux et propriétés des bétons, 1<sup>ères</sup> rencontres internationales, Toulouse, pp 257-264, 1998
2. **Modélisation de l'écaillage sous chargement thermique**  
Feraille A., Ehlacher A.  
14<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Toulouse, 1999
3. **Fluage thermique transitoire des pâtes de ciment**  
Pasquero D., Tamagny P., Feraille-Fresnet A.  
15<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Nancy, 2001
4. **Effects of thermal cycle and induced dehydration on porosity of a cement paste**  
Alarcon-Ruiz L., Tamagny P., Pasquero D., Feraille-Fresnet A., Massieu E.  
Alert Workshop , Aussois, octobre 2001
5. **Etude sur les données en vue de bilans environnementaux**  
Desbois T., Gomes F., Féraille A.,  
GC 2011, mars 2011
6. **Module d'information environnemental des appareils d'appui de pont en élastomère fretté**  
Hillion H., Gomes F., Rizard F., Féraille A.,  
GC 2013, mars 2013
7. **Promoting the short loop from demolition waste to construction material**  
Buyle-Bodin F, Féraille A., Masson E.,  
Conférence AVNIR Lille novembre 2013
8. **Environmental approach of the end-of-life of buildings**  
Brière R., Feraille A., Tardivel Y., Baverel O.,  
Conférence AVNIR Lille novembre 2014
9. **Prise en compte de l'incertitude en analyse de cycle de vie - Application aux ponts mixtes acier-béton**  
Grange D., Orcesi A., Tardivel Y., Feraille A.,  
Journées Ouvrages d'Art, Marne la Vallée, 2014
10. **Comparaison de bilans environnementaux de deux types de démolition**  
Brière R., Feraille A., Tardivel Y., Baverel O., Leroy R.,  
GC 2015, Paris, mars 2015
11. **Construire en souterrain : quels avantages du point de vue du développement durable ?**  
Audi Y., Jullien A., Lorino T., Feraille A., D'Aloïa Schwartzenruber L.,  
GC 2015, Paris, mars 2015

## Communications internationales avec actes

1. **Behaviour of a wet crack submitted to heating up to high temperature**

Feraille-Fresnet A., Ehlacher A.  
ICTAM 2000, Chicago, 27 Aout-2 Septembre 2000

2. **On the role of fluids in the crack of elastic materials**

Feraille-Fresnet A., Bui H.D., Ehlacher A.  
Symposium on continuous damage and fracture, Cachan, Elsevier, pp 53-64, 23-27  
octobre 2000

3. **Filling of a circular crack with two non miscible fluids**

Feraille-Fresnet A., Ehlacher A.  
IUTAM, Cardiff, juin 2001

4. **Experimental studies of hydration mechanisms of sulfoaluminate clinker**

Alaoui A., Nguyen V. H., Divet L., Feraille A., Le Roy R.  
ICCC, Montréal, 2007

5. **New cements for sustainable development**

Feraille A., Alaoui A., Steckmeyer A., Le Roy R.  
ICCC, Montréal, 2007

6. **Experimental study of sulfoaluminate concrete based material**

Alaoui A., Feraille A., Dimassi A., Nguyen V. H., Le Roy R., Divet L.  
CONSEC 07 Tours, France, 2007

7. **Behaviour of a crack submitted to a fluid penetration**

Rouby C., Feraille-Fresnet A., Ehlacher A.  
CONSEC 2010, Mexico.

8. **Environmental evaluation of reinforcing bars sold on the French market**

Gomes, F., Brière, R., Habert, G., Feraille, A., Lasvaux, S., Tessier, C.I  
International Symposium on LCA & Construction, Rilem Proceedings PRO86, pp.256-  
264, Nantes, 10-12 July 2012.

9. **Life cycle assessment of orthotropic steel bridge decks covered with bituminous concrete or UHPFRC topping layer**

Gomes F., Rivallain M., Feraille A., Marchand P., Tessier C. and Toutlemonde F.,  
International Symposium on LCA & Construction, Rilem Proceedings PRO86, pp.256-  
264, Nantes, 10-12 July 2012

10. **Environmental evaluation of steel plates and steel sections sold on the French market**

Gomes, F., Feraille A., Habert, G., Tessier, C.,  
Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, CRC  
Press, Taylor & Francis Group, p.367, Hofburg Palace, Vienna, 3-6 October 2012.

11. **Holistic approach of a new masonry arch bridge on a Cevennes road**

Colas A-S., Brière R., Féraille A., Habert G., Tardivel G.,  
9th International Masonry Conference 2014, Guimarães.

12. **Pertinence environnementale des modes de transports urbains sur le cycle de vie :  
Quels choix techniques pour le bus à haut niveau de service ?**

De Bortoli A., Feraille A., Thing Leo G., Mokssit A., Qi Y., Li Z., Luo S., Leurent F.  
Congrès mondial de la route, Séoul, novembre 2015.

**13. The DIOGEN and CIOGEN works, a specific approach in environmental assessment of civil engineering structures**

Tardivel Y., Feraille A., Montens S., Tessier C.

IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, Genève, septembre 2015.

**Communications internationales sans actes**

**1. Thermo-Hydro-Chemical modeling of concrete at high temperature : An application to an axisymetrical structure**

Feraille-Fresnet A., Tamagny P., Ehrlacher A.

Mathematical models in soil mechanics, Italie, 19-22 septembre 2000

**2. Filling of a circular crack with two non miscible fluids**

Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A.

IUTAM, Cardiff, juin 2001

**3. Hydrostatic interaction of a wetting fluid and a circular crack in an elastic material**

Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A., Bui H.D.

MMC 2001, San Diego, 27-29 juin 2001

**4. Thermo-hydro-chemical modeling of concrete at high temperature**

Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A.

International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Singapour, 29 Juillet-1 Août 2001

**5. Behavior of a wet crack submitted to heating up to high temperature**

Feraille-Fresnet A., Ehrlacher A.

Concreep-6 @MIT, Boston, Août 2001

**6. Thermo-hydro-chemical modelling of concrete at high temperature: An application to an axisymetrical structure**

Tamagny P., Feraille-Fresnet A., Sercombe J., Ranck G.

Paris, octobre 2001.

**7. DIOGEN: database of environmental impacts of materials for civil engineering constructions – Application for galvanization**

Gomes, F., Feraille, A., Tardivel, Y., Tessier, C., Neel, L.,

Intergalva 2012, Paris, 10-15 Juin 2012.

**8. Environmental information module of road bridge expansion joints**

Courville, J., Feraille, A., Tardivel, Y.,

8th International Conference on Society & Materials, SAM8, Liège, 20-21 May 2014.

**9. Scoring matrix construction in DIOGEN approach : Data quality assessment in materials production for civil engineering**

Feraille, A., Tardivel, Y., Tessier, C.,

8th International Conference on Society & Materials, SAM8, Liège, 20-21 May 2014.

**Chapitres d'ouvrages**

**1. Module d'information environnemental des matériaux de construction (Chapitre 9)**

Feraille, A., Gomes, F., Tardivel,

Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures sous la coordination de Bruno Peuportier, Presses des Mines, collection développement durable, 2013.

2. **Les bétons sous l'éclairage du développement durable (Chapitre 1)**

D'Aloïa L., Feraille, Potier J-M., Trocmé M,

Le grand livre des bétons sous la coordination de Laetitia d'Aloïa et Jean-Michel Torrenti, Editions le moniteur, 2014.

3. **Influence du revêtement en béton bitumineux ou en BFUP sur l'analyse de cycle de vie d'une dalle orthotrope (Chapitre )**

Gomes F., Rivallain M., Feraille, Marchand P., Tessier C., Toutlemonde F ;

Bulletin ouvrages d'art n°69-70, 2014.

4. **Environmental information module of construction materials (Chapter 9 )**

Feraille, A., Gomes, F., Tardivel ;

Eco-design of buildings and infrastructures, CRC Press, directed by B Peuportier F Leurent and J Roger-Estrade, 2016.