



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 3 Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés

Auteurs :

Rachida IDIR – CEREMA
Adélaïde FERAILLE – ENPC
Nicolas SERRES & Sandrine BRAYMAND – ICUBE

R/15/RECY/024
LC/14/RECY/44
LC/14/RECY/45
LC/14/RECY/46
Septembre 2015

Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79



Projet National de recherche et développement

FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés

RAPPORT N° : R/15/RECY/024

DATE D'ETABLISSEMENT : Septembre 2015

AUTEUR(S) :
Rachida IDIR - Adélaïde FERAILLE - Nicolas SERRES & Sandrine BRAYMAND

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : CEREMA – ENPC – ICUBE

THEME DE RATTACHEMENT : 3

LETTRE DE COMMANDE : LC/14/RECY/44 – LC/14/RECY/45 – LC/14/RECY/46





Site internet : www.pnrecybeton.fr

Président : Jacques ROUDIER

Directeur : Horacio COLINA

Directeur Scientifique : François DE LARRARD

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr, tél. : 01 44 13 32 79

<p>Rachida IDIR</p> <p>Laboratoire Eco-Matériaux Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement / Direction territoriale Ile-de-France</p>	
<p>Adelaide FERAILLE</p> <p>Laboratoire Navier Université Paris-Est</p>	
<p>Nicolas SERRES</p> <p>Laboratoire ICube INSA Strasbourg</p>	
<p>Sandrine BRAYMAND</p> <p>Laboratoire ICube Université de Strasbourg</p>	

Evaluation environnementale de bétons à base de granulats recyclés

Avertissements au lecteur :

L'interprétation des résultats dans ce rapport est étroitement liée aux formulations utilisées dans l'étude RECYBETON, avec un choix spécifique de paramètres permettant d'atteindre les objectifs du cahier des charges (E/C, dosage adjuvant, dosage ciment...). En aucun cas il ne faudrait en tirer des conclusions hâtives afin de ne pas généraliser à tous les bétons recyclés.

De plus, certaines données utilisées avec les logiciels SimaPro et GaBi proviennent de la base de données (suisses) Ecoinvent. BETie utilise les modules d'information de données environnementales moyennes française de l'ATILH, très éloignées des données d'Ecoinvent.

Résumé

En France, sur environ 300 millions de tonnes déchets de chantier produits par an, seule une partie du béton est recyclée. L'utilisation des granulats recyclés en travaux routiers est bien développée et des études sur le recyclage du « béton pour faire du béton » sont en cours. L'objectif de ce travail est d'établir des analyses de cycle de vie (ACV) de bétons composés de granulats recyclés (avec différentes proportions) en comparaison à des bétons à base de granulats naturels. Le bilan environnemental des échantillons, formulés selon le cadre du PN RECYBETON, a été réalisé selon la norme NF EN 15804+A1. Il résulte de l'utilisation de granulats recyclés dans les formulations des bétons une augmentation des impacts environnementaux, à différentes échelles. Cette conclusion a pu être observée avec trois logiciels (BETie, SimaPro et GaBi). Une analyse de sensibilité a mis en évidence que ce résultat est principalement dû à l'augmentation de la teneur en ciment dans ces bétons. Cette quantité importante de ciment dans les échantillons contenant 100% de granulats recyclés s'explique par la nécessité de tendre vers des classes de résistances mécaniques ciblées. Le caractère neutre dans les ACV des formulations béton n'incorporant qu'une part de granulats de béton recyclé doit être souligné, dans la mesure où les résultats sont assez proches de ceux obtenus avec la référence (granulats naturels) et que ces mélanges représentent sans doute une des voies opérationnelles de développement du recyclage des bétons dans les bétons.

Abstract

In France, about 300 million tons of building waste are produced annually. However, only a small part of the concrete is recycled. The use of recycled aggregates in road works is well developed and studies concerning recycling concrete to manufacture concrete are underway. This work aims to realize life cycle assessment (LCA) of recycled aggregates concrete in comparison with a natural aggregates concrete. The environmental behavior of the samples was carried out according to the NF EN 15804+A1 standard. The use of recycled aggregates in concrete formulations increases environmental impacts at different levels. This conclusion was observed with three softwares (BETie, SimaPro and GaBi). This result seems due to the increase of the cement content in the samples, because a standardized mechanical strength is required. The good environmental behavior of the concrete formulations incorporating only a part of recycled concrete aggregates must be emphasized, since the results are quite close to those obtained with the reference (natural aggregates). These mixtures are probably one of the operational ways for the development of recycling concrete in concrete.



Table des matières

1. Introduction et contexte de l'étude.....	7
2. Objectifs de l'étude.....	8
3. Personnes en charge de l'étude	8
4. Présentation de l'Analyse de Cycle de Vie	8
4.1. Objectifs d'une ACV :	9
4.2. Etapes d'une ACV :	10
4.3. Avantages et limites d'une ACV	12
4.4. Outils de l'ACV	12
4.5. Cadre normatif.....	13
5. Champ de l'étude	12
5.1. Présentation des échantillons	12
5.2. L'unité fonctionnelle	15
5.3. Frontières du système.....	15
5.4. Impacts environnementaux calculés.....	16
5.5. Logiciels de calcul et bases de données environnementales utilisés.....	16
5.5.1 Présentation de la base de donnée Ecoinvent [®]	16
5.5.2 Présentation du logiciel BETie.....	17
5.5.3 Présentation du logiciel GaBi.....	17
5.5.4 Présentation du logiciel SimaPro et des méthodes utilisées	17
5.6 Exigences relatives à la qualité des données.....	19
5.6.1 Exigences temporelles.....	19
5.6.2 Exigences géographiques	19
5.6.3 Exigences technologiques.....	19
6. Analyse de l'inventaire du cycle de vie et recueil des données.....	21
6.1 Informations pratiques sur les données d'inventaire	21
6.2 Données d'inventaire par poste du système.....	21
6.2.1 Production du sable et des gravillons recyclés	21
6.2.2 Production des fillers calcaires	27
6.2.3 Production du ciment Portland.....	27
6.2.4 Production des adjuvants	28
6.2.5 Production de l'eau de gâchage.....	28

7. Résultats d'ACV des bétons.....	30
7.1 ACV des bétons avec le logiciel BETIe	30
7.2 ACV des bétons avec les logiciels GaBi et SimaPro.....	32
8. Analyse de sensibilité	34
8.1. Comparaison des impacts environnementaux entre bétons de classe de résistance C25/30 et C35/45.....	34
8.2. Corrélation entre les quantités des composants du béton et les impacts par indicateur	36
8.2.1 Cas du béton de classe de résistance C25/30.....	36
8.2.2 Cas du béton de classe de résistance C35/45.....	39
8.3. Influence du dosage en ciment.....	41
9. Conclusions.....	44
10. Références bibliographiques.....	46

1. Introduction et contexte de l'étude

En France, sur un total d'environ 300 millions de tonnes déchets de chantier produits par an, seule une partie du béton est recyclée (Roudier, 2014). Afin de tenir compte des contraintes liées au développement durable, un objectif peut être de réutiliser l'intégralité des matériaux issus de la déconstruction, comme constituants de nouveaux bétons.

Difficilement envisageable économiquement hier, la réutilisation des matériaux issus de la déconstruction ouvre aujourd'hui de nouvelles perspectives. En effet, les impacts environnementaux associés à la construction sont de plus en plus considérés et la raréfaction de certaines matières premières justifient les recherches qui sont entreprises pour démontrer que la valorisation des matériaux recyclés réduit l'impact environnemental (Roudier, 2014).

La prise de conscience accrue de l'importance de la protection de l'environnement et des possibles impacts associés aux produits fabriqués et consommés augmente l'intérêt pour le développement durable. Le développement durable est défini comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins (Rapport Brundtland, 1987).

Le Projet National RECYBETON est un projet collaboratif de recherche et développement qui vise principalement à faire évoluer les comportements au niveau national en favorisant la réutilisation et l'intégration de produits issus de la déconstruction dans la formulation de bétons. L'utilisation des granulats recyclés en travaux routiers est déjà bien développée et des études sur le recyclage du « béton pour faire du béton » sont en cours (Roudier, 2014). Toutefois, beaucoup de questions subsistent, et le présent projet vise à y répondre sur la façon d'aboutir à :

- La réutilisation de l'intégralité des matériaux issus des bétons déconstruits, y comprises les fines, comme constituants des nouveaux bétons.
- Le recyclage des matériaux issus de la déconstruction des bétons comme matière première dans la production de liants hydrauliques.

Les bétons déconstruits sont pour la plupart déjà valorisés en techniques routières. Leur recyclage dans les bétons est une autre voie de valorisation.

Le PN RECYBETON se déroule sur une période de 4 à 5 ans et a démarré en février 2012. Le budget global est de l'ordre de 5 M€, soutenu par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.

2. Objectifs de l'étude

Le but de ce travail, qui s'inscrit dans le cadre du PN RECYBETON, est d'établir des analyses de cycle de vie (ACV) de bétons composés de granulats recyclés en comparaison à des bétons à base de granulats naturels. Cette étude sera basée sur des données de différentes formulations préalablement mises au point par les équipes qui traitent le thème 0-Action 6 dudit projet. Ce travail sera réalisé en conformité avec la nouvelle norme européenne NF EN 15804+A1 ainsi qu'avec l'annexe nationale (Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction).

Ce rapport contient :

- la présentation de l'analyse de cycle de vie (ACV).
- la méthode d'analyse de cycle de vie de différentes formulations de bétons définies dans le PN. Cette partie comporte la présentation : des échantillons, du champ de l'étude, des logiciels, des bases de données et les méthodes utilisés pour la modélisation des impacts environnementaux.
- l'analyse des résultats de l'ACV.

3. Personnes en charge de l'étude

Ce travail est un projet collaboratif entre le laboratoire ICube, le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) et l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Ce projet est piloté par Adelaïde FERAILLE (ENPC), Nicolas SERRES (ICube) et Rachida IDIR. Rachida IDIR est le correspondant de l'étude auprès du PN RECYBETON.

4. Présentation de l'Analyse de Cycle de Vie

L'analyse de cycle de vie est un outil normalisé (normes ISO (14 040 – 14 044) récapitulées dans le tableau 1 permettant l'évaluation des flux de matières et d'énergies et des impacts environnementaux potentiels d'un système (« produit » ou « service ») au cours de son cycle de vie.

Tableau 1 : Listes des normes régissant l'ACV (ISO 14040, 2006)

ISO 14 040	Gestion environnementale – Analyse de cycle de vie – Principe et cadre
ISO 14 044	Gestion environnementale – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices
ISO 14 048	Formats d'échanges de données
ISO 14 049	Rapports techniques sur des exemples d'analyse des inventaires

La pensée « cycle de vie » correspond à un concept de production et de consommation qui vise la prise en compte des relations environnementales, économiques et sociales propres à un produit ou à un service pendant tout son cycle de vie, c'est-à-dire « du berceau au tombeau » qui est divisé en cinq étapes CIRAIG (2005):

- 1) L'extraction et la transformation des matières premières ;
- 2) La fabrication du produit (préparation et transport des matières premières nécessaires à la fabrication) ;
- 3) La mise en œuvre (l'emballage et la distribution);
- 4) La vie en œuvre (l'utilisation ou la mise en place d'un produit dans un ouvrage) ;
- 5) La fin de vie du produit (la disposition finale lors d'une opération de démolition, réhabilitation ou entretien qui comprend le transport des déchets liés à cette étape jusqu'à un site de valorisation ou d'élimination);

Ces 5 étapes sont présentées sur la figure 1.

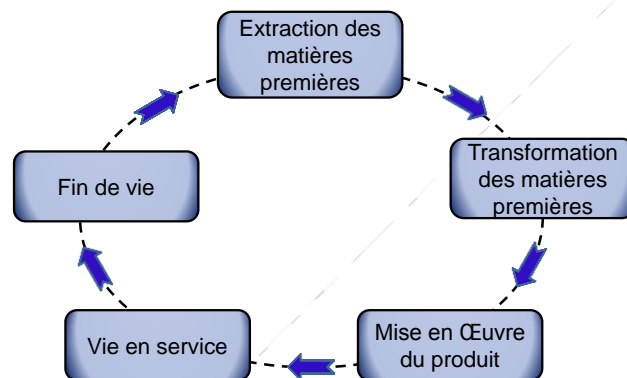


Figure 1 – Les étapes de cycle de vie d'un produit

Il est cependant possible de distinguer une ACV durant le cycle de vie complet (du berceau à la tombe) et une ACV durant une partie du cycle de vie (comme du berceau jusqu'à la porte de l'usine ou de la carrière). « *La performance environnementale d'un béton ou d'une structure en béton peut être évaluée pendant le cycle de vie entier ou pendant une phase ou plusieurs phases spécifiques du cycle de vie* » (ISO/FDIS 13315-1, 2013)

4.1. Objectifs d'une ACV :

Une ACV peut avoir plusieurs objectifs :

- 1) Comparer les impacts sur l'environnement¹ : dans les choix de conception notamment dans le choix des matériaux, des procédés ou bien des emballages ;

¹ En moyennant le respect de certaines conditions : même durée de vie de l'ouvrage, même unité fonctionnelle, mêmes qualité des données (intrants), prise en compte des phases identiques du cycle de vie...

- 2) Faire avancer l'état des connaissances : élaboration de politiques publiques, base scientifique pour arbitrer des divergences, aide à la décision industrielle (investissement, nouvelle technologie...);
- 3) Communiquer : en interne ou en externe (clients, fournisseurs...).

4.2. Etapes d'une ACV :

L'analyse du cycle de vie se décompose en 4 étapes illustrées sur la figure 2 (ISO 14040, 2006) :

a) Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette première étape se précise de manière itérative au fur et à mesure de l'avancée de l'analyse. Elle permet de définir les frontières de l'étude, la définition des fonctions du produit, ainsi que l'unité fonctionnelle et le flux de référence. L'unité fonctionnelle est l'unité à laquelle seront rapportés tous les flux entrants et sortants du système.

b) Inventaire des flux de matières et d'énergies associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue.

L'étape d'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV) consiste à inventorier tous les flux entrants et sortants relatifs au système étudié.

L'inventaire et son analyse se font en 4 étapes :

- Quantification de tous les flux associés à chaque processus élémentaire : pour chaque étape du système, il faut quantifier tout ce qui entre et tout ce qui sort.
- Mise à l'échelle des flux élémentaires identifiés en fonction du flux de référence. Ceci consiste à prendre le flux de référence (la quantité étudiée du produit final) et à remonter de processus élémentaire en processus élémentaire tous les flux élémentaires correspondants.
- Quantification des émissions et des extractions pour chaque processus élémentaire : le but de cette étape est de quantifier tous les éléments qui ont un impact environnemental à chaque étape.
- Agrégation des flux élémentaires : toutes les données pour une source d'impact sont agrégées pour calculer les impacts à l'étape suivante. Par exemple, toutes les émissions de CO₂ de tous les processus élémentaires sont additionnées pour ne représenter qu'une seule valeur.

c) Evaluation des impacts potentiels à partir des flux matières et énergies recensés.

La démarche ACV s'efforce de rendre l'évaluation aussi objective que possible en traduisant des flux quantifiables et mesurables. Cette étape a pour but de traduire les consommations et les rejets recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux

(effet de serre, trou dans la couche d'ozone, smog, acidification, eutrophisation, toxicité...).

Pour cela, les flux sont classés dans différentes catégories d'impact pour lesquels ils participent. Il existe différentes méthodes d'évaluations des impacts (qui seront décrites par la suite).

Ensuite, ces ensembles de flux sont caractérisés, à partir d'indicateurs, en impacts environnementaux. Le choix des catégories d'impact et des indicateurs associés se font en relation avec les objectifs et les systèmes étudiés.

D'autres opérations facultatives peuvent être effectuées selon l'objectif poursuivi, comme la pondération (à chaque impact est affecté un poids, puis les différents impacts sont agrégés pour obtenir une note finale) ou la normalisation.

d) Interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs retenus.

L'interprétation a pour objectif d'analyser les résultats et d'expliquer les limites de l'inventaire et/ou de l'évaluation des impacts, afin de fournir des recommandations de manière la plus transparente possible. Elle met en avant les points forts et les points faibles d'un système et permet la connaissance des paramètres et des étapes sensibles. Ceci ouvre des perspectives en matière de diminutions des impacts. Cette étape est itérative avec les 3 précédentes de manière à toujours valider le fait que les résultats obtenus permettent de répondre aux objectifs de l'étude.

Une ACV traite des impacts environnementaux potentiels. L'ACV ne prédit pas les impacts environnementaux absolus en raison de l'expression relative des impacts par rapport à une unité fonctionnelle de référence. Elle ne prédit pas non plus l'intégration des données environnementales dans l'espace et le temps et l'incertitude inhérente à la modélisation des impacts.

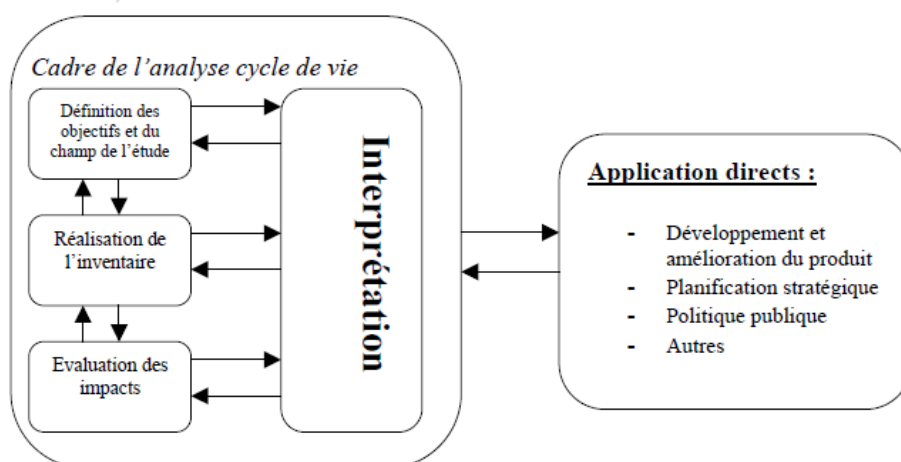


Figure 2 – Relations entre les différentes étapes du processus d'analyse de cycle de vie (KAWAI et al. 2005).

4.3. Avantages et limites d'une ACV

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation rigoureuse ayant pour objectif de déterminer l'origine des impacts environnementaux de manière exhaustive et transparente. C'est une approche multi-étapes, multi-composants et multi-critères. Cependant, l'ACV n'est pas un outil parfait. Elle ne prend pas en compte les aspects économiques et sociaux. Les résultats vont dépendre très fortement du choix des frontières du système, de l'unité fonctionnelle et de la qualité des données. Bien que l'ACV d'un ouvrage en béton construit – par exemple – en 1980 n'est pas obsolète si cet ouvrage est encore en usage aujourd'hui, des données dans le temps peuvent être modifiées et ainsi rendre une ACV « obsolète », comme l'introduction de nouvelles techniques de fabrication et de mise en œuvre ou de valorisation des déchets ; de nouveaux modes de transport... vont modifier les résultats et donc l'interprétation que l'on va pouvoir faire. Les éventuelles erreurs peuvent également venir de ceux qui réalisent l'ACV qui peuvent éventuellement manquer d'impartialité qui peut entraîner de mauvaises interprétations.

4.4. Outils de l'ACV

a) Les logiciels

Les logiciels calculent des impacts environnementaux à partir de données d'inventaire rentrées par l'utilisateur. Les logiciels sont complétés par des bases de données et plusieurs méthodes d'évaluation des impacts.

Parmi les principaux logiciels, on peut citer SimaPro² qui sera utilisé lors de cette étude. SimaPro est un logiciel d'ACV payant édité par l'entreprise Pré Consultants (Pays-Bas). Il possède de nombreuses données qui permettent de simuler des changements de conception ainsi que de nombreuses méthodes permettant d'évaluer les impacts des différents flux. Il est vendu avec une douzaine de bases de données. Dans le cadre de cette étude nous l'utiliserons avec la base Ecoinvent³.

Le logiciel GaBi⁴, également utilisé dans cette étude, utilise une base de données interne (GaBi) développée spécifiquement à partir de données d'industriels. C'est un logiciel performant lorsque l'on veut identifier la complexité des flux au sein d'un process industriel. En effet, à la différence de SimaPro qui fonctionne par ajout de process au sein d'un système, GaBi fonctionne en spécifiant les flux associés à un système.

Un logiciel simplifié et gratuit a été développé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie), « *Bilan-Produit* », adapté aux petites et moyennes entreprises qui veulent mesurer leurs impacts environnementaux.

² <http://www.pre-sustainability.com/simapro>

³ www.ecoinvent.org

⁴ <http://www.gabi-software.com/>

Enfin, il existe d'autres logiciels qui peuvent être généralistes, sectoriels ou dédiés à la construction et aux bâtiments. TEAM⁵, développé par PWC-Ecobilan, n'est pas un logiciel dédié spécifiquement au bâtiment. Il n'est pas spécifiquement adapté à la réalisation de FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire). DEAM est la base de données associée à TEAM. TEAM bâtiment est un logiciel (qui a priori n'est plus distribué) permettant l'évaluation environnementale à l'échelle du bâtiment. OpenLCA⁶, logiciel opensource, est ouvert à plusieurs bases de données et peut s'appuyer sur Ecoinvent. On peut citer aussi le logiciel BETie (Béton et Impacts Environnementaux) qui sera également utilisé dans cette étude. Ce logiciel est dédié aux calculs des impacts environnementaux du béton.

b) Les bases de données accompagnants les logiciels

On distingue deux types de bases de données :

- **Les bases de données généralistes** : elles contiennent les flux entrants et/ou sortants de nombreux matériaux, traitements ou transports pouvant être utilisés dans divers domaines d'applications. La plus utilisée, parce que très complète, est la base suisse Ecoinvent[®] qui est incluse dans SimaPro. On peut également citer GaBi qui accompagne le logiciel du même nom, et DEAM qui est la base de données associée à TEAM bâtiment.
- **Les bases de données spécifiques** : elles donnent des informations uniquement pour un secteur particulier ou une « région » particulière. Par exemple, LCA Food est une base de données spécifique aux produits agro-alimentaires et INIES est une base de données publique française de référence des caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction.

La base de données INIES est actuellement la base de référence au niveau français pour les produits de construction. Elle met à disposition des FDES (plus de 1500) de produits de construction (plus de 27 000 produits du marché) fournies par les fabricants ou syndicats professionnels.

4.5. Cadre normatif

L'étude est réalisée en conformité avec la norme NF EN 15804+A1, norme européenne qui remplace la norme française NF P01-010. Par ailleurs, la norme XP P 01-064 est la norme complémentaire française à la norme NF EN 15804+A1. La figure 3 synthétise les informations relatives à la réalisation d'une ACV selon la norme NF EN 15804+A1 et le tableau 2 définit, à titre d'exemple (parmi les paramètres décrivant les impacts environnementaux de la norme NF EN 15804+A1), les paramètres décrivant l'utilisation des ressources et considérés dans cette étude.

⁵ <http://ecobilan.pwc.fr/fr/boite-a-outils/team.jhtml>

⁶ <http://www.openlca.org/The-openLCA-project.4.0.html>

Tableau 2 : Paramètres décrivant l'utilisation de ressources de la norme NF EN 15804+A1

Paramètre	Unité
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables	MJ
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables	MJ
Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires ⁷ renouvelables	MJ
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ
Utilisation nette d'eau douce	m ³

Les autres informations environnementales décrivant les catégories de déchets à renseigner conformément à la norme NF EN 15804+A1, sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 : Informations environnementales supplémentaires décrivant les catégories de déchets à renseigner conformément à la norme NF EN 15804+A1

Paramètre	Unité
Déchets dangereux éliminés	kg
Déchets non dangereux éliminés	kg
Déchets radioactifs éliminés	kg
Composants destinés à la réutilisation	kg
Matériaux destinés au recyclage	kg
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg
Energie fournie à l'extérieur	MJ

5. Champ de l'étude

5.1. Présentation des échantillons

L'étude porte sur 10 formulations de bétons présélectionnées par l'équipe du thème 0-Action 6 du PN. Ces bétons ont vocation à être utilisés par les différents partenaires du projet national dans le cadre de leurs études propres et à des fins de comparaisons inter-laboratoires.

Ces bétons sont de classe de résistance (C25/30, C35/45). Les valeurs correspondent à la résistance caractéristique minimale à la compression (mesurée sur éprouvette cylindrique à 28 jours) de la classe de résistance C25/30 pour le fractile 5 % (probabilité qu'il y ait 5% de la population en dessous de cette valeur). Ces deux classes de résistance sont

⁷ Dans cette étude il s'agit de combustibles de substitution (issus de déchets).

représentatives des bétons couramment utilisés dans le domaine du génie civil, ce qui permettra à l'issue de l'étude, d'avoir des bilans environnementaux représentatifs d'échantillons rencontrés généralement.

Ces bétons sont composés de ciment, d'eau, d'adjuvants, de filler calcaire, de graviers et de sable naturels et/ou recyclés.

- Le ciment utilisé est un *ciment CEM II/A-L 42.5* de Rochefort fourni par Holcim (producteur du ciment). Ce genre de ciment est couramment utilisé pour la confection de bétons C25/30 et C35/45.

- Les granulats naturels ont été sélectionnés par l'Union Nationale des Producteurs de Granulats, en tant qu'intermédiaire privilégié auprès des producteurs (qui ont fournis les matières premières) : un sable semi-concassé lavé 0/4 (coefficient d'absorption d'eau de 0,8%) de la carrière Lafarge de Sandrancourt (78 – *Sable Sandrancourt*) et des gravillons calcaires concassés 4/10 (coefficient d'absorption d'eau de 0,51%) et 6,3/20 (coefficient d'absorption d'eau de 0,46%) de la carrière Lafarge de Givet (08 – *Gravillon Givet*).

- Les fillers calcaires *Betocarb HP-OG* sont de la compagnie Omya⁸.

- Deux adjuvants de la société MC Chimie⁹ ont été utilisés : le *superplastifiant MC PowerFlow 3140* et le *retardateur de prise Centrament Retard 370*.

- L'eau de gâchage utilisée est de l'eau de réseau

- Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique effectuée sur la plateforme DLB de Gonesse¹⁰ (95). Ils sont fournis en 3 coupures 0/4, 4/10, 10/20.

Nous travaillerons sur deux types de formulations appelées 1/**Formules sur granulats secs** quand les granulats recyclés sont utilisés à l'état sec et 2/**Formules sur granulats humides** lorsque les granulats recyclés sont utilisés à l'état humide. Nous remarquerons que les quantités d'eau ajoutées pour les deux cas sont différentes. Il n'y a qu'une famille de bétons, mais la façon d'acheminer l'eau dans le malaxeur dépend de l'humidité initiale des granulats. En effet, étant donnée leur forte absorption, les granulats recyclés sont utilisés dans un état d'humidité correspondant à 1% (en valeur absolue) au-dessus de leur absorption ; soit une teneur en eau de :

- 9,9% pour le sable recyclé 0/4
- 6,6 % pour le gravillon recycle 4/10
- 6,8 % pour le gravillon recyclé 10/20

Cette démarche permet de les saturer et d'éviter des raidissements précoces des bétons liés à l'absorption d'eau différée des granulats. La sursaturation est plafonnée à 1% pour limiter

⁸ <http://www.omya.fr/internet/fr/q2wcontent.nsf/vwWebDirectName/home>

⁹ <http://www.mc-bauchemie.fr/>

¹⁰ <http://www.dlb-recyclage.fr/implantations/gonesse>

les risques d'égouttage et la mise en place de gradients d'humidité dans les zones de stockage.

Le tableau 4 présente les dénominations et les compositions des différentes formulations. Les granulats naturels sont secs dans la partie supérieure du tableau et ils sont saturés en eau dans la partie inférieure du même tableau.

Tableau 4 : Les différentes formulations de bétons de l'étude (Sedran, 2013).

	C25/30-0R-0R	C25/30-0R-30R	C25/30-0R-100R	C25/30-30R-0R	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R	C35/45-0R-0R	C35/45-0R-100R	C35/45-30R-30R	C35/45-100R-100R	
Constituant (kg/m³)											
Formules sur granulats secs	Eau d'ajout	190	210	244	213	228	303	185	238	220	284
	Ciment	270	276	282	276	277	326	299	336	321	381
	Rapport Eau efficace/C	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
	Filler Calcaire	45	31	31	31	31	50	58	53	44	70
	Sable	780	813	806	549	500	-	771	782	491	-
	Sable recyclé 0/4	-	-	-	235	218	673	-	-	214	663
	Gravillon Givet 4/10	267	228	-	190	171	-	264		168	-
	Gravillon recycle 4/10	-	-	163	-	145	304	-	158	142	299
	Gravillon Givet 6,3/20	820	462	-	829	552	-	810	-	542	-
	Gravillon recycle 10/20	-	296	701	-	167	442		682	164	435
	Superplastifiant	1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18	2,1	2,18	1,64	2,78
	Retardateur de prise	0	0	-	1,1	1,1	2,6	0	0	1,3	3
	Eau efficace (kg/m ³)	180	185	189	185	185	199	175	185	179	184
	Formules sur granulats humides	Eau d'ajout	177	178	178	179	177	186	172	173	170
Ciment		270	276	282	276	277	326	299	336	321	381
Rapport Eau efficace/C		0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
Filler Calcaire		45	31	31	31	31	50	58	53	44	70
Sable		788	821	814	554	505	0	779	790	496	0
Sable recyclé 0/4		0	0	0	258	240	740	0	0	235	729
Gravillon Givet 4/10		268	229	0	191	172	0	265	0	169	0
Gravillon recycle 4/10		0	0	174	0	155	324	0	168	151	319
Gravillon Givet 6,3/20		824	464	0	833	555	0	814	0	544	0
Gravillon recycle 10/20		0	316	749	0	178	472	0	728	175	465
Superplastifiant		1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18	2,1	2,18	1,64	2,78
Retardateur de prise		0	0	0	1,1	1,1	2,6	0	0	1,3	3
Eau efficace (kg/m ³)		180	185	189	185	185	199	175	185	179	184

5.2. L'unité fonctionnelle

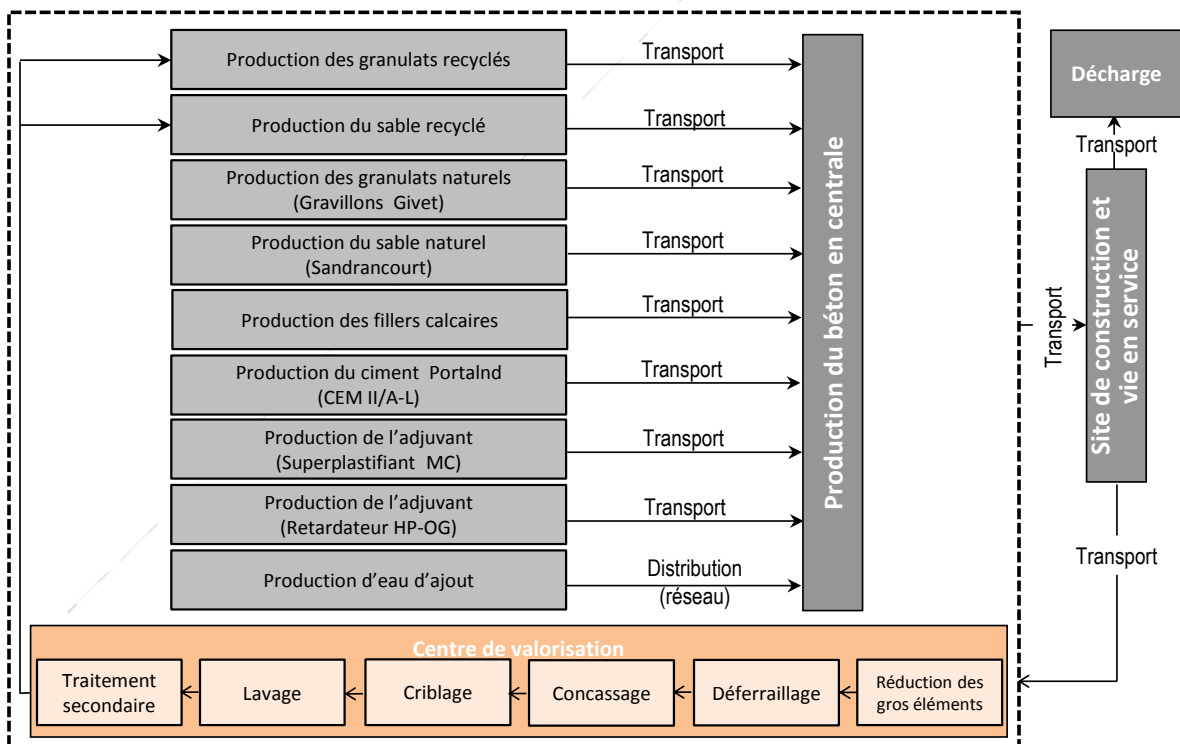
L'unité fonctionnelle de l'étude est « Produire 1m³ de béton de classe de résistance comprise entre C25/30 et C35/45 ».

C25/30 et C35/45 correspondent aux classes de résistance à la compression selon la norme EN 206-1 et on vise ici des valeurs moyennes respectives de 30 MPa et 40 MPa. Les C25/30 sont de classe d'environnement XC1 et les C35/45 de classe XF, selon la norme NF EN 206-1 (NF EN 206-1, 2010).

5.3. Frontières du système

La figure 4 décrit le processus de production du béton et présente les frontières du système considérées dans cette étude. Les étapes sont les suivantes:

- Production de granulats ;
- Le traitement des matériaux rentrant dans la production du béton ;
- Le transport des matériaux jusqu'à la centrale à béton ;
- La fabrication des bétons en centrale (malaxage).



Frontières considérées

Figure 4 : Frontières du système étudié

Les principaux processus exclus pour la production du béton sont :

- L'acheminement du béton vers les sites d'exploitation ;

- L'utilisation et la fin de vie du produit (l'élimination des déchets du béton après déconstruction, le transport du béton vers les sites de stockage, la valorisation du béton après usage) ;
- L'administration de la centrale à béton ;
- L'éclairage et le chauffage des bâtiments de la centrale à béton ;
- la fabrication des outils de production du béton ;
- Les déplacements du personnel travaillant dans la centrale.

5.4. Impacts environnementaux calculés

Les catégories d'impacts environnementaux évaluées dans cette étude, conformément à la norme NF EN 15804+A1, sont les suivantes :

- Le réchauffement climatique ;
- L'appauvrissement de la couche d'ozone ;
- L'acidification des sols et de l'eau ;
- L'eutrophisation ;
- La formation d'ozone photochimique ;
- L'épuisement des ressources abiotiques - éléments ;
- L'épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles.

5.5. Logiciels de calcul et bases de données environnementales utilisés

La modélisation des *scénarii* a été réalisée à l'aide de trois logiciels : BETie, SimaPro et GaBi associés pour ces deux derniers à la base de données Ecoinvent[®] et à des données bibliographiques.

Il y a un intérêt à utiliser deux logiciels d'ACV s'appuyant sur la même base de données Ecoinvent et d'un outil d'évaluation professionnel (BETie), notamment pour obtenir des résultats robustes et fiables.

5.5.1 Présentation de la base de donnée Ecoinvent[®]

La base de données Ecoinvent[®] est une des plus grandes bases de données d'inventaire de cycle de vie actuelles qui regroupe un grand nombre de données d'inventaires de produits matériels ou de services. Cette base de données contient des données de divers secteurs telles que l'énergie, les matériaux minéraux, les substances chimiques, les processus de transport, les processus de traitement de déchets, l'agriculture, l'électronique, l'ingénierie et autres (Frischknecht *et al.* 2005). Elle correspond aux énergies moyennes actuellement utilisées dans plusieurs pays européens. Elle peut ne pas être représentative du mode de production d'électricité française qui est encore principalement d'origine nucléaire.

5.5.2 Présentation du logiciel BETie

Lancé en novembre 2011 par le SNBPE (Syndicat National du béton Prêt à l'Emploi) à l'usage des professionnels du bâtiment, BETie (Béton et Impacts Environnementaux) est un outil d'édition de FDES qui calcule les impacts de béton prêt à l'emploi. Deux versions existent : une version de base, qui depuis février 2013, est accessible au grand public via le site INIES ; et une version professionnelle, utilisée dans cette étude, permettant la création de FDES dans le cadre d'un projet spécifique : choix du type de béton, impacts des transports amont et aval, dimension de la partie d'ouvrage considérée (par rapport à l'unité fonctionnelle). Ce logiciel est utilisable au format de la norme NF EN 15804+A1.

5.5.3 Présentation du logiciel GaBi

GaBi est logiciel d'ACV, basé notamment sur l'utilisation de la base de données Ecoinvent[®]. Ce logiciel permet de modéliser plus d'un millier de procédés industriels différents. Les renseignements nécessaires pour réaliser une modélisation en ACV sont relatives à la structure des produits, assemblages et/ou composantes telles que la masse, le type de matériau ou encore le procédé de production.

5.5.4 Présentation du logiciel SimaPro et des méthodes utilisées

SimaPro est un logiciel d'ACV qui permet de modéliser, analyser des cycles de vie complexes et de quantifier des impacts environnementaux suivant toutes les étapes du cycle de vie selon les normes ISO 14040 et ISO 14044.

Les principales caractéristiques du logiciel sont :

- L'intégration d'une base de données complète qui permet d'évaluer l'ACV de n'importe quel produit ou matériau, du secteur de l'agroalimentaire à celui de la construction ;
- La possibilité de modéliser une ACV avec un scénario complet, avec toutes les étapes du cycle de vie et tous les impacts correspondants.

Plusieurs méthodes d'évaluations ont été utilisées dans cette étude pour réaliser l'évaluation des impacts sous SimaPro et GaBi :

- 1/ CML
- 2/ Cumulative Energy Demand (CED)
- 3/ Environmental Design of Industrial Products (EDIP)

Le tableau 5 indique, pour chaque méthode, les catégories d'impact évaluées par les différents indicateurs associés.

Tableau 5 : Catégories d'impact évaluées en fonction des méthodes d'analyse

Catégories d'impacts (7)	Méthodes		
	CML	CED	EDIP
Réchauffement climatique	X		X
Appauvrissement de la couche d'ozone	X		X
Acidification des sols et de l'eau	X		X
Eutrophisation	X		X
Formation d'ozone photochimique	X		X
Epuisement des ressources abiotiques - éléments	X		X
Epuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	X	X	

5.5.3.1 Présentation de la méthode CED (*Cumulative Energy Demand*)

Cette méthode a été initialement développée par (Boustead & HANCOCK, 1979) puis repris par Ecoinvent[®]. Cette méthode est une méthode monocritère qui se concentre principalement sur l'énergie. Elle prend en compte les différents inventaires de l'énergie directe ou indirecte ou l'énergie grise du système étudié. Pour la méthode il est possible d'utiliser la valeur des pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur (incluant l'énergie d'évaporation de l'eau) pour le calcul des quantités d'énergie dans les matériaux. On distingue deux principales catégories d'impact : renouvelable et non renouvelables avec un total de 8 indicateurs d'impact : 5 pour la première catégorie et 3 pour la seconde.

Les flux « **Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables** » et « **Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables** » ont été calculés suivant cette méthode CED. Suivant cette méthode, l'énergie non renouvelable (énergie fossile plus énergie nucléaire) est calculée à partir des masses de combustibles utilisés (kg), converties en énergies (MJ) par multiplication avec le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) des combustibles ou le Potentiel d'Énergie (uranium).

Pour calculer l'Énergie renouvelable par la méthode CED, les énergies (en MJ) issues de différentes catégories (biomasse, vent, solaire, géothermie, eau) sont directement additionnées.

5.5.3.2 Présentation de la méthode CML

Cette méthode a été développée au center of environmental science of Leiden university CML. La version CML IA 2001 est publiée dans le rapport (Guinée *et al.* 2002). Elle comporte les deux approches impact (problem oriented) et dommage (dommage oriented). Des versions antérieures de la méthode existent, CML 1992, CML V2 Baseline 2000 et des versions récentes de la méthode comportant quelques corrections.

La version CML 2001 comporte 15 catégories d'impact et 50 indicateurs. L'impact est évalué sur des indicateurs mid-point.

5.5.3.3 Présentation de la méthode EDIP (*Environmental Design of Industrial Products*)

EDIP (Wensel *et al.* 1997), est une méthodologie d'ACV danoise, évaluant l'impact sur des indicateurs mid-point. Cette méthode possède plusieurs versions : 1997, 2003 et 2007. On retrouve dans cette méthode des indicateurs reconnus, déjà utilisés dans la méthode CML et EcoIndicateur99. A la différence de la version 97, la version de 2003 de la méthode fournit des indicateurs spatialisés. Elle fournit deux types d'indicateurs : 2 indicateurs globaux et 14 indicateurs localisés. Tous les indicateurs sont rapportés au /personnes.ans. Cette méthode est spécifique pour l'Europe.

Les déchets non dangereux, les déchets dangereux et les déchets radioactifs sont calculés par la méthode EDIP.

5.6 Exigences relatives à la qualité des données

5.6.1 Exigences temporelles

Dans le cas des granulats recyclés, les données ont été récoltées en 2007 sur sites, comme pour les granulats naturels, par l'UNPG et correspondent à des fabrications suivant une technologie moderne. Les autres données utilisées proviennent de la base de données Ecoinvent[®] et peuvent donc avoir des temporalités variables.

5.6.2 Exigences géographiques

Nous avons choisi d'étudier la production de bétons sur le territoire national. Ainsi les processus modulables au cas français (type mix énergétique) ont bien été adaptés. Cependant, il reste que la réalisation du bilan environnemental s'est appuyée sur la base Ecoinvent[®] qui n'a pas toujours de données nationales ; par exemple le ciment Portland est fabriqué aux Etats-Unis, les données relatives au filler calcaire sont issues d'une entreprise en Suisse. Néanmoins, les distances de transport depuis les centres de recyclage correspondent aux utilisations routières et elles ne sont sans doute pas représentatives du futur maillage territorial, ni optimisées pour une production de granulats recyclés à usage béton.

5.6.3 Exigences technologiques

Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique effectuée sur la plateforme DLB de Gonesse. La production du sable naturel est typique de la production de la carrière Lafarge de Sandrancourt. Les gravillons naturels proviennent de la carrière de Givet. La production du filler calcaire est typique de la production suisse.

Tableau 6 : Informations relatives aux données utilisées dans l'étude

Postes du système	Procédés utilisés	Sources des données	Hypothèses	Echelle technologique	Echelle géographique	Echelle temporelle
Production du sable recyclé		Données industrielles (UNPG, 2011)	-	Technologie française : 7 installations de recyclage : 3 fixes et 4 mobiles	France	2007
Production du gravillon recyclé	-	Données industrielles (UNPG, 2011)	-	Technologie française : 7 installations de recyclage : 3 fixes et 4 mobiles	France	2007
Production du gravillon naturel		Données industrielles (UNPG, 2011)	-	Technologie typique pour la production française	France	2007
Production du sable naturel		Données industrielles (UNPG, 2011)	-	Technologie typique pour la production française	France	2007
Production du filler calcaire	Limestone, milled, packed, at plant/CH	Ecoinvent®	-	Niveau technique élevé	Suisse	2010
Production du ciment Portland	Portland slag sand cement, at plant/CH	Ecoinvent®	-	Technologie typique pour la production suisse	Suisse	2010
Production du Superplastifiant	-	Données industrielles (SYNAD, 2006)	-	Données des 4 plus gros fabricants de superplastifiants d'Europe	Europe	2006
Production du Retardateur de prise	-	Données industrielles (SYNAD, 2005)	-	Données des 4 plus gros fabricants de retardateurs de prise d'Europe	Europe	2005
Production d'eau de gâchage	Tap water, at user/CH	Ecoinvent®	-	Exemple d'eau fonctionnant en Suisse	Suisse	2010
Transport vers la centrale à béton	Transport, lorry 16-32t, EURO5/RER	Ecoinvent®	Rapportée à la distance définie par défaut pour le logiciel BETIe	-	Europe	2010

6. Analyse de l'inventaire du cycle de vie et recueil des données

6.1 Informations pratiques sur les données d'inventaire

Le tableau 6 regroupe des informations relatives aux données utilisées dans cette étude à savoir : les procédés utilisés, la source des données, les hypothèses posées, les périmètres temporels géographiques et technologique.

6.2 Données d'inventaire par poste du système

6.2.1 Production du sable et des gravillons recyclés

Les données de base utilisées pour le calcul des impacts liés au traitement des granulats recyclés de type gravillon sont extraites de la fiche environnementale établie par l'UNPG (Union Nationale des Producteurs de granulats) « Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés ».

Les tableaux suivants répertorient, pour une tonne de granulats recyclés produite, les flux intrants des consommations de ressources naturelles énergétiques (Tableau 7), des ressources naturelles non énergétiques (Tableau 8), consommations d'eau (Tableau 9), consommation d'énergie et de matière récupérées (Tableau 10), des émissions dans l'air (Tableau 11) dans l'eau (Tableau 12), dans le sol (Tableau 13) ainsi que des déchets valorisés et déchets éliminés (Tableau 14).

Le sable recyclé est compris dans ces données. Le sable et les gravillons recyclés sont en effet produits ensemble au cours de la même opération de criblage en fin de chaîne : ce qui représente le même niveau d'impacts environnementaux pour les deux coupures granulométriques.

Tableau 7 : Inventaire des consommations de ressources naturelles énergétiques et indicatrices énergétiques associés à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Consommation de ressources naturelles énergétiques		
Bois	kg	7,26E-03
Charbon	kg	2,26E-01
Lignite	kg	6,87E-02
Gaz naturel	kg	7,23E-02
Pétrole	kg	7,73E-01
Uranium	kg	6,05E-06
Etc. *	kg	4,60E-06
Indicateurs énergétiques		
Energie Primaire Totale	MJ	4,74E+01
Energie Renouvelable	MJ	5,39E-01
Energie Non Renouvelable	MJ	4,68E+01
Energie Procédé	MJ	4,74E+01
Electricité**	kWh	1,85E-01

*La catégorie etc. correspond aux consommations de tourbe.

** La valeur de l'électricité est seulement celle consommée sur le site de production de granulats. Les autres consommations ont été intégrées dans les autres indicateurs énergétiques en prenant en compte le modèle électrique français.

Tableau 8 : Consommation de ressources naturelles non énergétiques associée à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Argile	kg	1,19E-02
Bauxite (en Al_2O_3)	kg	4,44E-03
Bentonite	kg	2,95E-03
Cadmium (Cd)	kg	1,55E-06
Calcaire	kg	8,91E-02
Chlorure de Potassium (KCl)	kg	2,06E-05
Chlorure de Sodium (NaCl)	kg	7,58E-03
Chrome (Cr)	kg	4,73E-03
Cuivre (Cu)	kg	6,45E-04
Dolomie	kg	5,59E-04
Etain (Sn)	kg	3,66E-05
Fer (Fe)	kg	2,21E-01
Fluorite (en CaF_2)	kg	8,03E-05
Gravier	kg	1,19E-01
Kaolin ($Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$)	kg	3,22E-06
Magnésium (Mg)	kg	8,78E-04
Manganèse (Mn)	kg	3,36E-03
Molybdène (Mo)	kg	1,20E-04
Nickel (Ni)	kg	1,25E-02
Plomb (Pb)	kg	1,08E-05
Phosphore (P)	kg	2,06E-05
Rutile (TiO_2)	kg	4,44E-05
Sable	kg	6,25E-05
Soufre (S)	kg	7,97E-06
Sulfate de Baryum ($BaSO_4$)	kg	3,90E-03
Zinc (Zn)	kg	1,46E-04
etc.*	kg	1,25E-04

* La catégorie « etc. » correspond à la somme des flux suivants : anhydrite, basalte, carbone (*dans la matière organique*), dioxyde de carbone, cérium, diatomite, europium, gadolinium, gallium, granite, gypse, hélium, indium, krypton, lanthanum, roches métamorphiques, neodymium, praseodymium, pumice, rhénium, schiste, samarium, nitrate de sodium, sulfate de sodium, tantalium, tellurium, ulexite, vermiculite, xénon.

Tableau 9 : Consommation d'eau (prélèvements) associée à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Eau : Lac	litre	6,90E+00
Eau : Mer	litre	1,05E+00
Eau : Nappe Phréatique	litre	1,44E+01
Eau : Origine non Spécifiée	litre	6,30E+00
Eau : Rivière	litre	1,93E+01
Eau Potable* (réseau)	litre	0,00E+00
Eau Consommée (Total)	litre	4,80E+01

* Les consommations d'eau potable du réseau ont été intégrées dans les autres flux en tenant compte de l'origine de l'eau potable.

Tableau 10 : Consommation d'énergie et de matière récupérées associée à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Matière Récupérée : Acier	kg	1,52E+00
Matière Récupérée : Minérale	kg	1,00E+03

Remarque : aucune énergie n'est récupérée d'un autre procédé permettant d'alimenter le site. Seules sont récupérées de la matière minérale en vue de produire les granulats recyclés et de la ferraille envoyées au recyclage.

Tableau 11 : Émissions dans l'air associées à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Hydrocarbures (non spécifiés, excepté méthane)	g	3,06E-01
HAP (non spécifiés)	g	2,39E-03
Méthane (CH ₄)	g	2,86E+00
Composés organiques volatils	g	4,52E+00
Dioxyde de Carbone (CO ₂) d'origine fossile	g	2,87E+03
Dioxyde de Carbone (CO ₂) d'origine biomasse	g	8,30E+00
Monoxyde de Carbone (CO)	g	1,41E+01
Oxydes d'Azote (NOx en NO ₂)	g	3,07E+01
Protoxyde d'Azote (N ₂ O)	g	1,06E-01
Ammoniaque (NH ₃)	g	4,84E-02
Poussières (non spécifiées)	g	2,08E+01
Oxyde de soufre (SOx en SO ₂)	g	5,05E+00
Hydrogène Sulfureux (H ₂ S)	g	6,62E-03
Acide Cyanhydrique (HCN)	g	2,88E-04
Composés Chlorés organiques (en Cl)	g	5,25E-05
Acide Chlorhydrique (HCl)	g	4,06E-02
Composés chlorés inorganiques (en Cl)	g	5,25E-03
Composés chlorés non spécifiés (en Cl)	g	5,13E-09
Composés fluorés organiques (en F)	g	2,45E-04
Composés fluorés inorganiques (en F)	g	5,25E-03
Composés halogénés (non spécifiés)	g	3,48E-04
Métaux (non spécifiés)	g	7,18E-03
Métaux alcalins et alcalino terreux non spécifiés non toxiques	g	5,72E-03
Antimoine et ses composés (en Sb)	g	2,33E-05
Arsenic et ses composés (en As)	g	3,00E-04
Cadmium et ses composés (en Cd)	g	1,02E-04
Chrome et ses composés (en Cr)	g	1,65E-02
Chrome hexavalent (en Cr)	g	4,06E-04
Cobalt et ses composés (en Co)	g	2,60E-04
Cuivre et ses composés (en Cu)	g	2,52E-03
Etain et ses composés (en Sn)	g	1,69E-04
Manganèse et ses composés (en Mn)	g	3,99E-04
Mercure et ses composés (en Hg)	g	2,66E-04
Nickel et ses composés (en Ni)	g	1,39E-03
Plomb et ses composés(en Pb)	g	2,01E-03
Sélénium et ses composés (en Se)	g	5,89E-05
Zinc et ses composés (en Zn)	g	5,63E-03
Vanadium et ses composés(en V)	g	1,14E-03
Silicium et ses composés (en Si)	g	1,17E-02
etc.*	g	1,01E-01

Remarque : pour l'indicateur de pollution de l'air, la contribution des poussières émises sur les installations pour la production d'une tonne de granulats recyclés aux impacts est de 50 %.

Tableau 12 : Émissions dans l'eau associées à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
DCO (Demande Chimique en Oxygène)	g	1,26E+01
DBO5 (Demande Biochimique en Oxygène à 5 jours)	g	1,12E+01
Matière en Suspension (MES)	g	1,19E+00
Cyanure (CN)	g	7,47E-04
AOX (Halogènes des composés organiques adsorbables)	g	6,80E-05
Hydrocarbures (non spécifiés)	g	3,35E+00
Composés azotés (en N)	g	2,20E-01
Composés phosphorés (en P)	g	4,22E-01
Composés fluorés inorganiques (en F)	g	1,62E-01
Composés chlorés organiques (en Cl)	g	4,95E-04
Composés chlorés inorganiques (en Cl)	g	3,17E+01
Composés chlorés non spécifiés (en Cl)	g	1,06E-04
HAP (non spécifiés)	g	4,38E-04
Métaux (non spécifiés)	g	8,48E-01
Métaux alcalins et alcalino terreux non spécifiés non toxiques	g	3,60E+01
Aluminium et ses composés (en Al)	g	1,37E-01
Arsenic et ses composés (en As)	g	3,73E-03
Cadmium et ses composés (en Cd)	g	1,65E-03
Chrome et ses composés (en Cr)	g	2,95E-04
Chrome hexavalent (en Cr)	g	4,06E-02
Cuivre et ses composés (en Cu)	g	1,74E-02
Etain et ses composés (en Sn)	g	1,23E-03
Fer et ses composés (en Fe)	g	1,30E+00
Mercure et ses composés (en Hg)	g	1,39E-04
Nickel et ses composés (en Ni)	g	1,05E-01
Plomb et ses composés (en Pb)	g	3,93E-03
Zinc et ses composés (en Zn)	g	1,05E-01
Composés organiques dissous non spécifiés	g	8,78E+00
Composés inorganiques dissous non spécifiés	g	9,31E-02
Composés inorganiques dissous non spécifiés non toxiques	g	5,31E+01

Tableau 13 : Émissions dans le sol associées à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Arsenic et ses composés (en As)	g	9,07E-06
Biocides	g	2,80E-05
Chrome et ses composés (en Cr)	g	1,15E-04
Chrome hexavalent (en Cr)	g	8,03E-05
Cuivre et ses composés (en Cu)	g	5,42E-05
Fer et ses composés (en Fe)	g	6,49E-02
Plomb et ses composés (en Pb)	g	1,65E-06
Zinc et ses composés (en Zn)	g	4,12E-04
Métaux lourds (non spécifiés)	g	1,26E-02
Métaux alcalins et alcalino terreux non spécifiés non toxiques	g	1,72E-01
Huiles	g	3,46E+00
Divers composés répandus dans le sol non spécifiés non toxiques	g	1,99E-01

* La catégorie « Divers composés » correspond à la somme des flux d'acétamide, aluminium, bore, brome, carbone, chlorure, chlorure de choline, fluorure, azote, phosphore, silicium, soufre, acide sulfurique.

Remarque : aucune émission directe dans le sol n'est générée sur site. Ces émissions sont liées aux procédés indirects liés au fonctionnement des sites (production d'électricité, des consommables, gestion des déchets...).

Tableau 14 : Déchets valorisés et déchets éliminés associés à la production d'une tonne de granulats recyclés (UNPG, 2011)

Flux	Unités	Production
Matière récupérée Total	kg	1,79E+00
Matière récupérée Acier	kg	1,77E+00
Matière récupérée Aluminium	kg	3,09E-05
Matière récupérée Métal (non spécifié)	kg	6,15E-04
Matière récupérée non spécifiée	kg	1,27E-02

Flux	Unités	Production
Déchets dangereux	kg	1,95E-02
Déchets non dangereux	kg	4,13E-01
Déchets inertes	kg	4,97E-02
Déchets radioactifs	kg	4,53E-05

Remarque : une incohérence peut ici être signalée dans la mesure où à une tonne de granulats recyclés ne sont pas associés moins de 2 kg de matière récupérée. Cette masse devrait correspondre au moins à la masse de granulats non recyclés dans la route et mise en décharge (plusieurs dizaines de pourcents). Cette information manque.

6.2.2 Production des fillers calcaires

Le module Ecoinvent[®] : *Limestone, milled, packed, at plant/CH* inclut le dynamitage, tous les transports sur le site (y compris ceux de la remise en état des zones naturelles modifiées pendant la transformation des sites), une partie de l'énergie de chauffage pour les bâtiments liés à l'infrastructure. L'affectation des terres de la carrière est incluse.

6.2.3 Production du ciment Portland

Le module utilisé est : *Portland slag sand cement, at plant/CH* de la base de données Ecoinvent[®]. Ce module inclut les processus suivants : (1) extraction des matières premières de la terre (en carrière), transport et stockage ; (2) préparation des grains bruts : récupération des matériaux provenant des carrières, dosage de la composition chimique attendue et broyage du mélange ; (3) pyrolyse : traitement permettant de déshydrater les grains bruts et la calcination du calcaire en amenant les composants du mélange à réagir pour former le clinker (qui est ensuite refroidi) ; (4) récupération et stockage du clinker : suite à un ajout de gypse, le clinker est broyé en une poudre fine, transporté et stocké.

Ce processus tient également compte du transport de tous les combustibles et des matériaux utilisés de leur lieu d'extraction vers la cimenterie. Autrement dit, il comprend les émissions liées à la combustion de carburant pour le transport des matériaux vers la cimenterie et de combustible dans les fours à ciment.

6.2.4 Production des adjuvants

Les données de base utilisées pour le calcul des impacts liés au traitement des deux adjuvants : superplastifiant MC-PowerFlow 3140 et retardateur Centrament Retard 370 (MC Chimie) sont extraites des déclarations environnementales établies par la SYNAD (Syndicat National des Adjuvants) sur des adjuvants commerciaux : « Superplastifiants » et « Retardateurs de prise » respectivement.

Ces éco-profilés couvrent la production en Europe des superplastifiants et des retardateurs de prise jusqu'à leurs mises en application. Le transport des adjuvants du fabricant vers le consommateur/client n'est pas pris en compte.

Les membres de l'EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations) ont recueilli les données de fabrication pour la synthèse et le mélange des superplastifiants et des retardateurs de prise en 2005. Ces déclarations environnementales se basent sur les chiffres des quatre plus gros fabricants de superplastifiants et de retardateurs de prise d'Europe et sont des moyennes des types d'adjuvants décrits.

Les tableaux 15 et 16 récapitulent les inventaires des consommations et émissions pour la production de 1 kg de l'adjuvant superplastifiant et 1 kg de l'adjuvant retardateur respectivement.

6.2.5 Production de l'eau de gâchage

La norme NF EN 1008 autorise plusieurs types d'eau pour la fabrication des bétons (à l'exception des eaux usées). Pour l'exploitation d'une carrière et de ses installations de fabrication de granulats, l'eau de surface est généralement utilisée, quelque fois celle de la nappe phréatique. Le procédé Ecoinvent[®] qui traduit le mieux ces considérations est : *Tap water, at user/CH*. Les opérations suivantes ont été considérées : purification de l'eau ; dépistage de particules, de sable ou de plancton ; sédimentation des particules solubles (floculation). L'adoucissement de l'eau (décarbonatation) est également considéré. Enfin, la désinfection suite à la floculation correspond à l'étape d'ozonisation, permettant l'amélioration de la filtrabilité. La chloration est la dernière étape considérée pour la purification de l'eau potable.

Tableau 15 : Inventaire des consommations et émissions pour la production de 1 kg d'un adjuvant superplastifiant [SYNAD, 2006]

Matière première consommée	Unité	Valeur
charbon, brun	g	82
charbon, dur	g	51
Pétrole brut	kg	0.16
Gaz naturel	m3	0.22
<i>Rejetés à l'air</i>		
CO ₂	kg	0.72
CO	g	0.55
NO _x	g	1.8
SO _x	g	3.6
N ₂ O	mg	67
Méthane	g	1.2
Butane	mg	11
Pentane	mg	14
Méthanol	mg	60
Ethane	mg	8.9
Benzène	mg	7.4
Non-méthane VOC	g	0.29
Hydrocarbure Aromatique	µg	39
Polycyclique		
Acide acétique	mg	63
Ammoniac	g	2.1
Arsenic (As)	µg	58
Chrome VI (Cr)	µg	16
Mercure (Hg)	µg	94
Nickel (Ni)	mg	0.46
Vanadium (V)	mg	1.2
Dioxines	ng	43
CFC-10	µg	2.0
CFC-114	µg	1.8
Halon-1211	µg	4.1
Halon-1301	µg	5.0
<i>Rejetés à l'eau</i>		
Demande chimique d'oxygène	g	2.6
Hydrocarbure Aromatique	µg	67
Polycyclique		
Huiles, non-spécifiés	g	0.63
Barytine	mg	51
Nickel (Ni)	mg	3.9
<i>Rejetés au sol</i>		
Chrome VI (Cr)	mg	0.22
Huiles, non-spécifiés	g	0.66
<i>Rejet solide</i>		
Rejet non-toxique	g	21
Rejet toxique	g	0.45
<i>Energie totale</i>		
Energie totale	MJ	18.3

Tableau 16 : Inventaire des consommations et émissions pour la production de 1 kg d'un adjuvant retardateur de prise [SYNAD, 2005]

Matière première consommée	Unité	Valeur
Charbon, brun	g	18
charbon, dur	g	21
Pétrole brut	kg	0.13
Gaz naturel	m3	0.21
<i>Rejetés à l'air</i>		
CO ₂	g	76
CO	g	0.81
N ₂ O	mg	35
NO _x	g	1.7
SO _x	g	1.4
Butane	mg	2.4
Ethane	mg	16
Méthane	g	58
Méthanol	mg	63
Propène	mg	9.9
Benzène	mg	36
Cumène	mg	27
Hydrocarbure Aromatique	µg	25
Polycyclique		
Hydrocarbonés, spécifiques non-	g	0.19
Acide Acétique	mg	99
Ammoniac	g	0.2
Dioxines	µg	0.012
Arsenic (As)	µg	16
Chrome VI (Cr)	µg	5.6
Mercure (Hg)	µg	29
Nickel (Ni)	mg	0.15
Vanadium (V)	mg	0.43
CFC-10	µg	18
HCFC-140	mg	0.12
CFC-113	µg	5.1
Halon-1211	µg	1.9
Halon-1301	µg	1.0
<i>Rejetés à l'eau</i>		
Demande chimique d'oxygène	g	4.1
Nitrate	g	0.5
Phosphate	mg	97
Pentoxide de phosphore	g	0.62
Barytine	mg	14
Nickel (Ni)	mg	1.6
Hydrocarbonés, spécifiques non-	mg	21
Huiles, non-spécifiques	g	0.12
Benzène	mg	65
<i>Rejetés au sol</i>		
Chrome VI (Cr)	µg	25
Huiles, non-spécifiées	g	0.11
Parathion	mg	0.11
<i>Rejet solide</i>		
Rejet non-toxique	g	91
Rejet toxique	g	0.74
<i>Energie totale</i>		
Energie totale	MJ	15.7

7. Résultats d'ACV des bétons

7.1 ACV des bétons avec le logiciel BETIe

Les résultats obtenus à partir du logiciel BETIe sont présentés sur la figure 5. Ils se présentent sous la forme de valeurs d'impacts pour deux indicateurs d'impacts environnementaux emblématiques : la consommation de ressources énergétiques (en MJ) et le changement climatique (en kg éq CO₂). L'ensemble des résultats est présenté dans le tableau 17.

Tableau 17 : Quantification des indicateurs d'impacts environnementaux avec le logiciel BETIe.

	C25/30-0R-0R	C25/30-0R-30R	C25/30-0R-100R	C25/30-30R-0R	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R	C35/45-0R-0R	C35/45-0R-100R	C35/45-30R-30R	C35/45-100R-100R
Consommation de ressources énergétiques	5,72	5,77	5,77	5,79	5,77	6,24	6,04	6,35	6,29	6,87
Épuisement des ressources ($\times 10^{-3}$)	2,26	2,28	2,29	2,29	2,28	2,47	2,38	2,51	2,48	2,70
Consommation d'eau	3,26	3,32	3,43	3,32	3,32	3,57	3,32	3,55	3,42	3,67
Déchets valorisés	3,57	3,44	3,35	3,49	3,44	3,22	3,59	3,38	3,47	3,21
Déchets dangereux ($\times 10^{-4}$)	1,89	1,99	2,06	1,92	1,99	2,31	2,05	2,38	2,23	2,60
Déchets non dangereux ($\times 10^{-3}$)	1,09	1,36	1,23	1,25	1,36	1,71	1,14	1,35	1,41	1,86
Déchets inertes	1,19	1,15	1,12	1,17	1,15	1,08	1,20	1,13	1,16	1,08
Changement climatique	0,650	0,662	0,667	0,661	0,662	0,741	0,698	0,755	0,738	0,832
Acidification atmosphérique ($\times 10^{-3}$)	2,20	2,19	2,16	2,21	2,19	2,32	2,34	2,39	2,41	2,58
Pollution de l'air	47,0	46,9	46,6	47,2	46,9	48,8	48,9	49,9	49,7	52,4
Pollution de l'eau	0,149	0,146	0,144	0,147	0,146	0,142	0,151	0,148	0,150	0,145
Formation d'ozone photochimique ($\times 10^{-4}$)	1,52	1,51	1,52	1,53	1,51	1,58	1,59	1,64	1,64	1,70

Les résultats mettent en évidence que les bétons formulés avec des granulats recyclés (formulations 100R-100R) présentent les impacts les plus élevés. Ce résultat peut en partie être expliqué par une présence importante de ciment dans les échantillons formulés avec un maximum de matière recyclée (Tableau 4). Cette présence importante de ciment est liée à la nécessité de tendre vers des classes de résistance ciblées. Or, il est reconnu que les granulats recyclés présentent des propriétés mécaniques plus faibles que les granulats naturels. L'ajout de ciment permet d'améliorer les performances mécaniques des bétons.

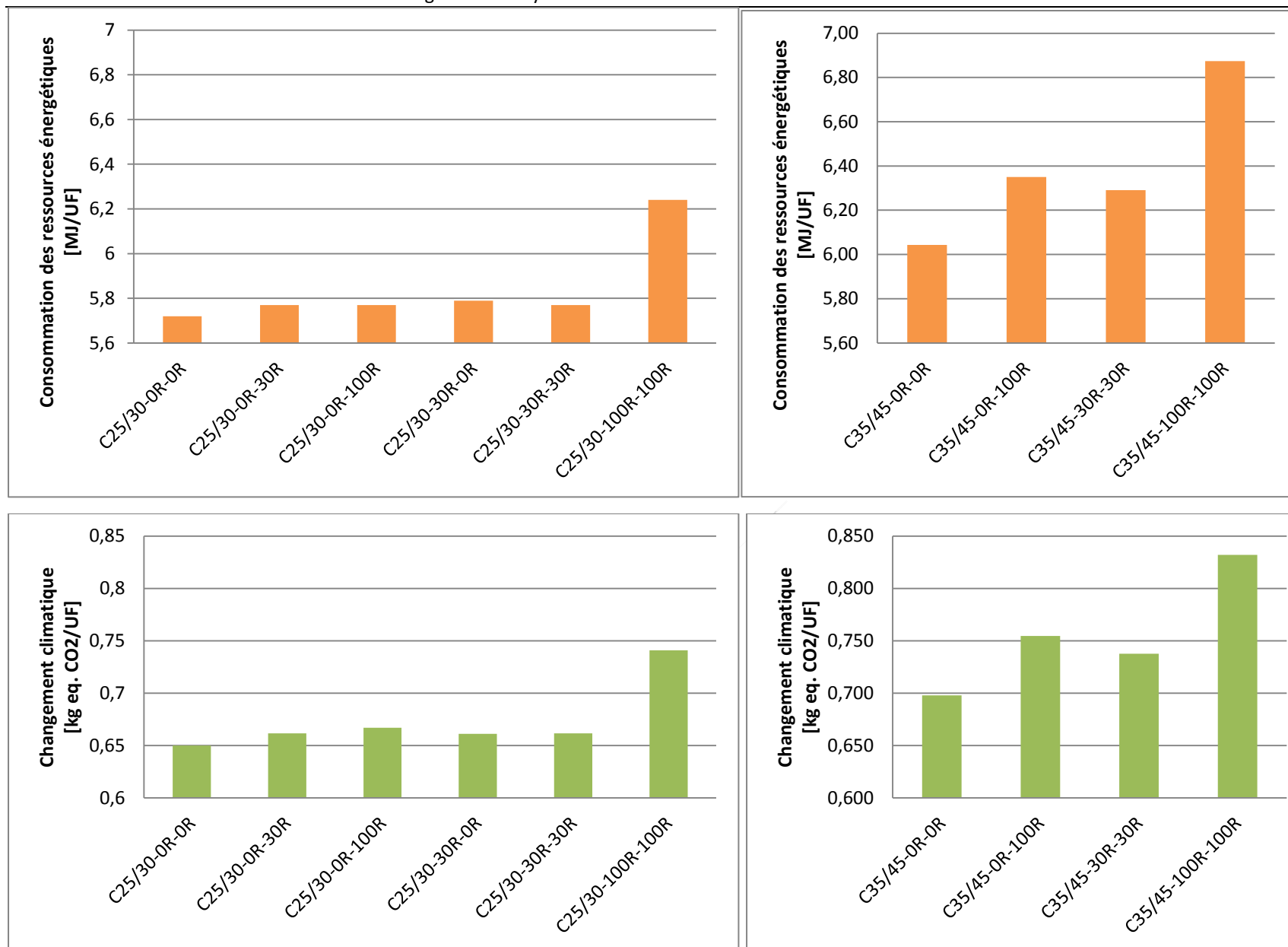


Figure 5 : Comparaison des bétons de classe de résistance C25/30 avec le logiciel BETie.

Quelle que soit la classe de résistance, un compromis semble toutefois envisageable pour les formulations 30R-30R, 0R-30R et 30R-0R. En effet, pour les différents indicateurs, les résultats sont proches de ceux obtenus avec la formulation des bétons à base de sable et de granulats naturels.

Enfin, ce qui peut être souligné à la lecture de ces résultats, c'est que le fait d'employer des granulats recyclés ne pénalise pas les indicateurs de l'ACV, contrairement à celui d'utiliser plus de ciment pour compenser les caractéristiques mécaniques des granulats.

7.2 ACV des bétons avec les logiciels GaBi et SimaPro

Les résultats obtenus à partir des logiciels d'ACV SimaPro et GaBi sont présentés sur les figures 6 à 9 (Annexe 1). Ceux-ci se présentent sous la forme de valeurs d'impacts pour chaque indicateur, dans l'unité correspondante. Ces résultats peuvent également être présentés sous la forme de pourcentages d'augmentation des valeurs d'impact des bétons avec granulats recyclés, par rapport à celles des bétons sans granulat recyclé (Tableau 19). Les barres partant vers la droite des cases figurent les augmentations d'impact par rapport au béton sans granulat recyclé, les barres partant vers la gauche, les diminutions. Les valeurs brutes correspondantes sont présentées dans le tableau 18 (Annexe 2).

De manière générale, il apparaît que les bétons de granulats recyclés présentent des impacts plus élevés, quelques soient les catégories d'impact et les indicateurs associés ou les classes de résistances.

Concernant les données d'inventaire, le sable recyclé est assimilé aux gravillons recyclés, afin d'avoir la comparaison la plus rigoureuse entre les granulats naturels et les granulats recyclés, en utilisant la fiche « Module d'information environnementales de la production de granulats recyclés » établie par l'UNPG. Cette fiche générique ne prend pas en compte la granulométrie des différents éléments ; nous avons déjà noté plus haut (§6.2.1 – page 19) que les sables et gravillons étaient produits ensemble aux cours des mêmes étapes de traitement. De la même manière, le sable naturel sera assimilé aux gravillons naturels et nous faisons ainsi l'hypothèse que cette assimilation engendre peu d'écarts d'impacts environnementaux.

Tableau 19 : Pourcentages d'augmentation des impacts par rapport au béton sans matériau recyclé (gravillons + sable).

Catégorie d'impact	Unité	C25/30						
		% Sable	0	0	0	30	30	100
		% granulat	0	30	100	0	30	100
		% matière recyclée	0	16	52	13	30	100
Photochemical oxidation	% kg C2H4 eq		54,5	160,1	43,3	97,6	272,9	
Acidification	% kg SO2 eq		25,9	73,2	21,3	45,5	131,8	
Global warming (GWP100)	% kg CO2 eq		18,6	52,4	16,0	32,8	101,3	
Non-renewable, Total	% MJ		17,7	48,9	17,3	33,2	96,5	
Bulk waste	% kg		15,3	43,9	15,6	30,2	89,3	
Hazardous waste	% kg		15,1	42,9	15,4	30,6	74,9	
Abiotic depletion	% kg Sb eq		13,9	39,2	12,0	25,1	72,0	
Eutrophication	% kg PO4--- eq		5,6	14,7	6,6	10,9	39,3	
Radioactive waste	% kg		1,2	-5,0	12,0	8,1	33,7	
Ozone layer depletion (ODP)	% kg CFC-11 eq		1,9	3,7	2,7	2,9	23,0	
Renewable, Total	% MJ		-4,7	-4,5	-2,6	-3,1	21,4	
Water depletion	% m3		-0,2	-2,8	2,2	0,3	9,2	

Catégorie d'impact	Unité	C35/45				
		% Sable	0	0	30	100
		% granulat	0	100	30	100
		% matière recyclée	0	52	30	100
Photochemical oxidation	% kg C2H4 eq		164,2	101,3	274,2	
Acidification	% kg SO2 eq		77,7	48,0	140,1	
Global warming (GWP100)	% kg CO2 eq		60,0	37,6	110,3	
Non-renewable, Total	% MJ		52,7	35,4	106,9	
Bulk waste	% kg		48,7	33,4	97,6	
Abiotic depletion	% kg Sb eq		42,4	27,2	77,9	
Hazardous waste	% kg		40,3	29,8	77,6	
Radioactive waste	% kg		0,6	10,3	59,8	
Eutrophication	% kg PO4--- eq		21,0	14,6	48,9	
Renewable, Total	% MJ		6,2	0,7	35,3	
Ozone layer depletion (ODP)	% kg CFC-11 eq		12,9	8,1	34,4	
Water depletion	% m3		2,2	2,9	16,4	

8. Analyse de sensibilité

8.1. Comparaison des impacts environnementaux entre bétons de classe de résistance C25/30 et C35/45

Le pourcentage de différence entre la valeur des impacts environnementaux des bétons C35/45 par rapport aux C25/30 a été calculé. Ceci pour les différents pourcentages de matériau recyclé ; et pour les différents indicateurs de l'ACV. La formule de comparaison utilisée est la suivante :

$$\left(\frac{\text{Valeur impact pour bétons C35/45} - \text{Valeur impact pour bétons C25/30}}{\text{Valeur impact pour bétons C25/30}} \right) \times 100.$$

Les impacts montrent une augmentation pour tous les indicateurs pour le béton C35/45 par rapport au béton C25/30 (Tableau 20).

Les deux plus fortes augmentations sont observées sur les indicateurs « production de déchets radioactifs » et « consommation des énergies renouvelables », avec des pics atteignant respectivement de 34,8% et 28,2%.

L'augmentation de l'indicateur « déchet radioactifs » est probablement liée au surplus de ciment dans les formules avec des matériaux recyclés, induisant de plus grandes quantités d'énergie électrique consommées. Par ailleurs, pour l'énergie renouvelable, le résultat peut être relativisé dans la mesure où la part de l'électricité produite par ce type d'énergie n'a été que de 10,5% en 2013... et il est très vraisemblable que les données ciment datées de 2010 donnent encore moins de crédit aux énergies renouvelables.

De plus, l'observation des résultats de la comparaison indicateur par indicateur montre une augmentation à peu près égale pour les différentes formulations pour les différents pourcentages de matériaux recyclés.

Les deux bétons ayant des applications différentes, ils ne sont pas comparables et ne peuvent se substituer l'un à l'autre. En général, pour les applications nécessitant des bétons C35/45, les volumes de béton seront plus faibles. Cependant, la comparaison des pourcentages d'augmentation des impacts entre un béton C35/45 et un béton C25/30 met en évidence un comportement différent pour ces deux familles de formulations.

Afin d'expliquer ces résultats, une comparaison des quantités des composants du béton en fonction de la quantité de matière recyclée peut être menée.

Tableau 20 : Pourcentages d'augmentation des impacts entre un béton C35/45 et un béton C25/30.

[%]	Abiotic depletion	Acidification	Eutrophication	Global warming (GWP100)	Ozone layer depletion	Photo-chemical oxidation	Non-renewable, Total	Renewable, Total	Water depletion	Hazardous waste	Bulk waste	Radio-active waste
0R-0R	6,6	10,1	9,7	10,9	12,2	7,0	10,2	16,2	7,4	1,2	8,6	20,4
0R-100R	6,7	8,0	13,7	11,8	20,6	3,9	9,0	28,2	13,5	-1,1	9,0	27,4
30R-30R	6,6	8,3	11,9	11,5	16,8	5,0	9,0	20,7	10,3	0,1	8,8	20,9
100R-100R	6,9	7,5	13,6	9,5	19,2	2,1	10,0	24,9	14,9	2,0	8,5	34,8

8.2. Corrélation entre les quantités des composants du béton et les impacts par indicateur

8.2.1 Cas du béton de classe de résistance C25/30

Les quantités de chaque composant du béton ont été ramenées à des pourcentages d'augmentation par rapport au béton sans matériau recyclé, et présentées en fonction du pourcentage de matière recyclée dans chaque formulation.

Le pourcentage de matière recyclée a été calculé en sommant les quantités de granulats recyclés et de sable recyclé. Les quantités de superplastifiant et de retardateur de prise ont été sommées pour donner la quantité totale d'adjuvant.

L'hypothèse à vérifier est la suivante : les variations de quantités de composants des bétons en fonction du pourcentage de granulats recyclés impactent fortement l'ACV de ces bétons.

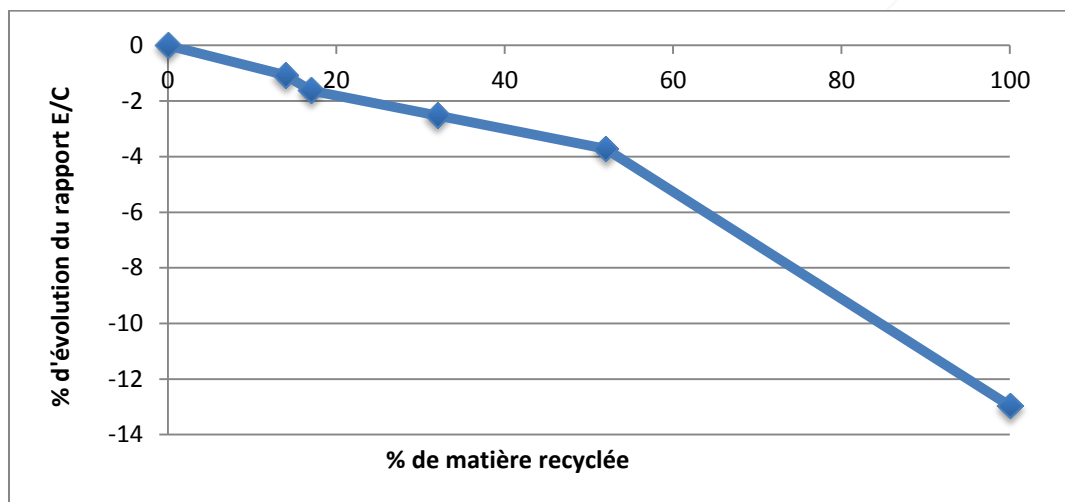


Figure 10 : Evolution du rapport E/C en fonction du pourcentage de matière recyclée (béton C25/30).
Remarque : « E » signifie ici l'eau totale (somme de l'eau d'ajout et de l'eau venant des granulats humides).

Le rapport E/C, corrélé à la maniabilité du béton dans les échantillons, évolue de manière inversement proportionnelle à la quantité de matériau recyclé. Ceci peut s'expliquer par :

- Une plus faible contribution des granulats recyclés à la résistance mécanique du béton par rapport aux granulats naturels et la nécessité d'une compensation par du ciment d'autant plus importante que le taux de substitution de granulats recyclés augmente,
- Une adjuvantation du béton généralement plus importante qui permet de compenser l'ajout d'eau supplémentaire pour maintenir la maniabilité visée (forte porosité des granulats recyclés).

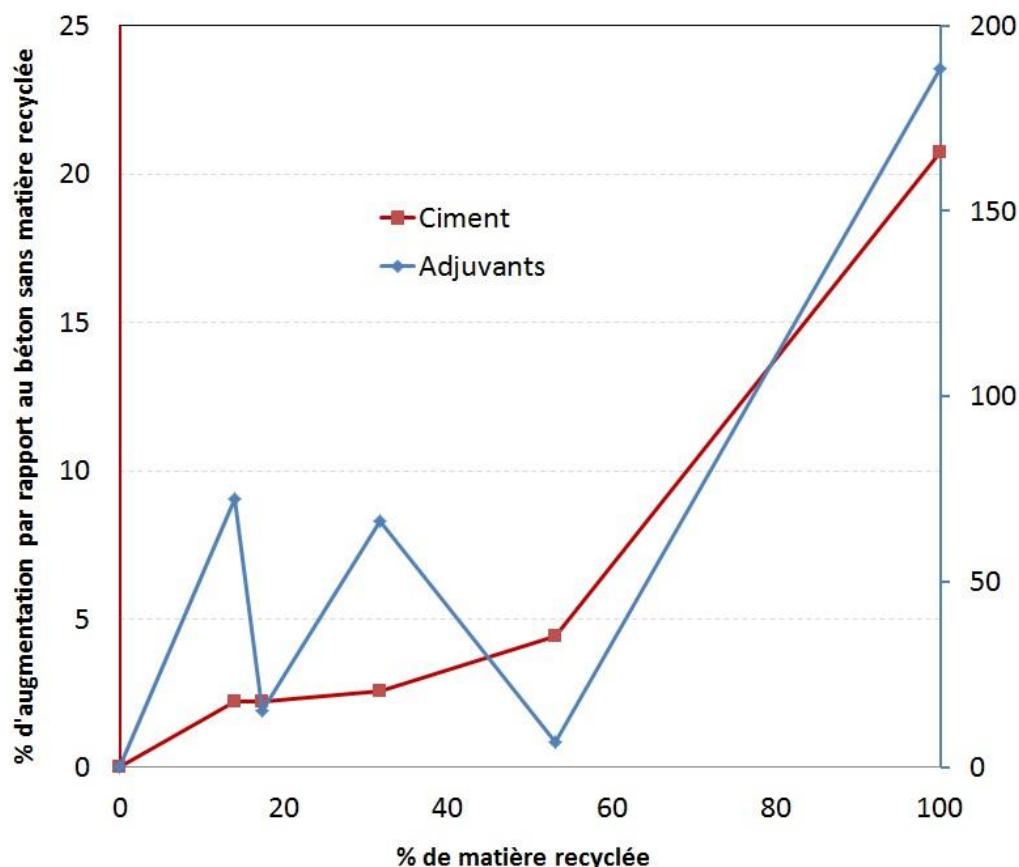


Figure 11 : *Evolution de la quantité d'adjuvants et du dosage en ciment en fonction du pourcentage de matière recyclée (béton C25/30).*

Globalement, il apparaît que les échantillons formulés avec beaucoup de matière recyclée nécessitent des teneurs plus importantes en produits intermédiaires potentiellement plus impactant pour l'environnement (ciment, adjuvant...) (Figure 11). Ainsi, pour tous les indicateurs d'impacts environnementaux, les résultats sont plus prononcés pour ces échantillons (Figure 12 et Tableau 21).

Tableau 21 : *Valeurs d'évolution des impacts par rapport au béton non recyclé (béton C25/30).*

% de matière recyclée	Unité	0	14	17	32	53	100
Abiotic depletion	% kg Sb eq	0,00	13,54	15,27	28,06	43,34	80,14
Acidification	% kg SO ₂ eq	0,00	23,46	27,76	49,56	78,85	142,96
Eutrophication	% kg PO ₄ ³⁻ eq	0,00	7,18	6,11	12,10	16,35	42,46
Global warming (GWP100)	% kg CO ₂ eq	0,00	17,34	19,79	35,28	55,79	108,01
Ozone layer depletion (ODP)	% kg CFC-11 eq	0,00	2,74	1,88	2,89	3,69	22,94
Photochemical oxidation	% kg C ₂ H ₄ eq	0,00	47,60	58,27	105,71	171,20	294,97
Non-renewable, Total	% MJ	0,00	18,95	19,20	36,33	53,20	105,07
Renewable, Total	% MJ	0,00	-2,62	-4,68	-3,15	-4,53	21,22
Water depletion	% m ³	0,00	0,17	-2,07	-3,31	-7,88	-0,79
Hazardous waste	% kg	0,00	17,77	17,22	35,14	49,18	87,19
Bulk waste	% kg	0,00	17,02	16,50	32,81	47,48	96,47
Radioactive waste	% kg	0,00	12,00	1,19	8,03	-5,08	33,53

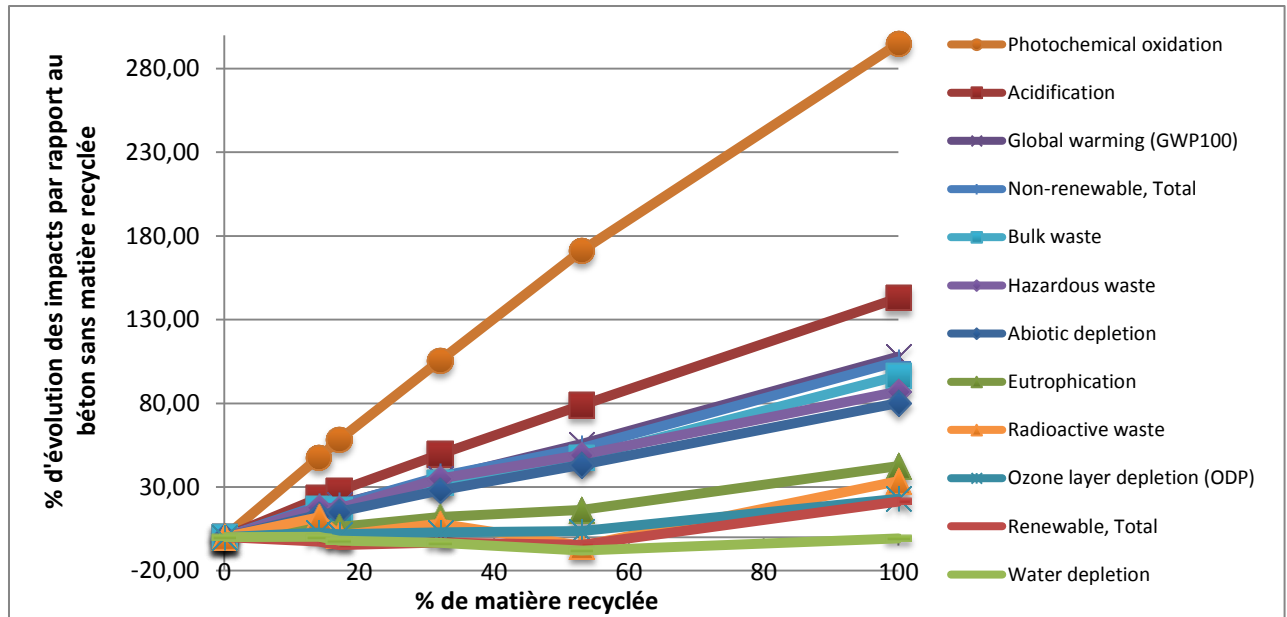


Figure 12 : Evolution des impacts par rapport au béton non recyclé, en fonction de la quantité de matière recyclée, pour le béton C25/30.

Tous les indicateurs excepté « déchets dangereux » et « diminution des ressources en eau » évoluent proportionnellement au pourcentage de matière recyclé. Différents comportements d'indicateurs peuvent être distingués :

- Le comportement des indicateurs « oxydation photochimique » et « acidification atmosphérique » est totalement corrélé à l'évolution du rapport E/C en fonction du pourcentage de matériau recyclé.

Ces indicateurs sont donc impactés pour une très grande part par la quantité de ciment.

- La courbe de l'impact « diminution des ressources en eau » peut être considérée comme constante. En général, une maniabilité constante est recherchée pour la confection du béton. Le rapport E/C reste constant, alors que le dosage en ciment augmente. On compense cet ajout par un ajout d'eau ou l'emploi d'un adjuvant superplastifiant. L'adjuvantation compense alors le surplus d'eau. Il n'est donc pas observé d'augmentation de l'eau dans le cas présent.
- Le comportement des indicateurs des énergies liées à la fabrication du ciment en fonction du pourcentage de matériau recyclé, s'il peut être lié à la quantité d'adjuvant dans la formulation, est fortement impacté par le ciment, du fait de la consommation d'énergie lors de sa fabrication (Figure 13). Une similitude logique peut être remarquée sur les figures 11 et 13 entre l'évolution du dosage en adjuvant et celle des indicateurs des énergies liées à la fabrication du ciment, le dosage en adjuvant

étant calculé en pourcentage par rapport à la masse de ciment. Ce dernier reste cependant plus consommateur d'énergie pour sa fabrication que l'adjuvant. Par ailleurs, les adjuvants sont utilisés à des dosages très faibles. Il s'agit de molécules chimiques, susceptibles d'impacter davantage les indicateurs tels que la destruction de la couche d'ozone, l'acidification ou la formation d'ozone troposphérique entres autres.

- Les autres indicateurs sont impactés à la fois par la quantité de ciment, de filler calcaires et d'adjuvants.

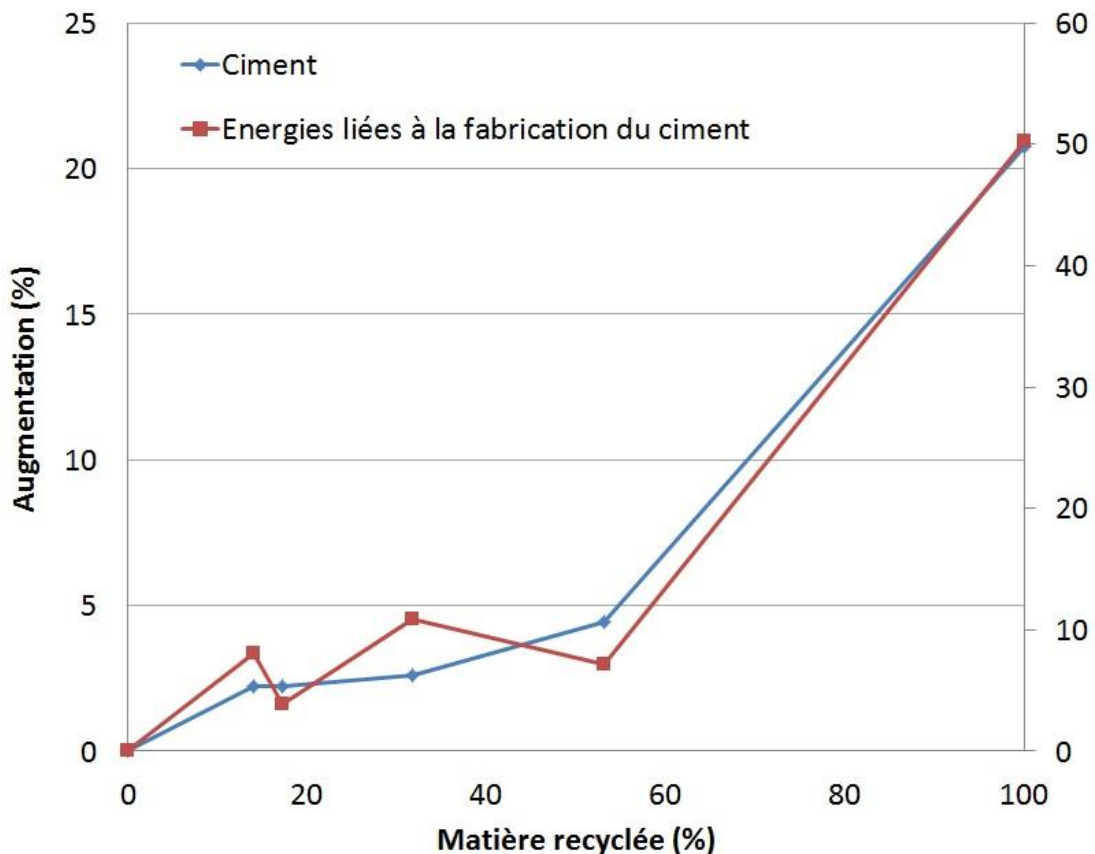


Figure 13 : Evolution comparative des courbes des indicateurs des énergies liées à la fabrication du ciment et du dosage en ciment en fonction du pourcentage de matière recyclée (béton C25/30).

8.2.2 Cas du béton de classe de résistance C35/45

Des mêmes observations ont été vérifiées avec les bétons de classe de résistance C35/45. A nouveau, les échantillons formulés avec beaucoup de matière recyclée nécessitent l'emploi de plus de matériaux (ciment, adjuvant...), à l'exception du filler calcaire qui est déduit du choix de la formulation, et n'est pas directement corrélable au pourcentage de matière recyclée. Ainsi, quel que soit l'indicateur d'impact environnemental, les résultats sont plus prononcés pour les échantillons à forte teneur en matière recyclée (Figure 14 et Tableau 22).

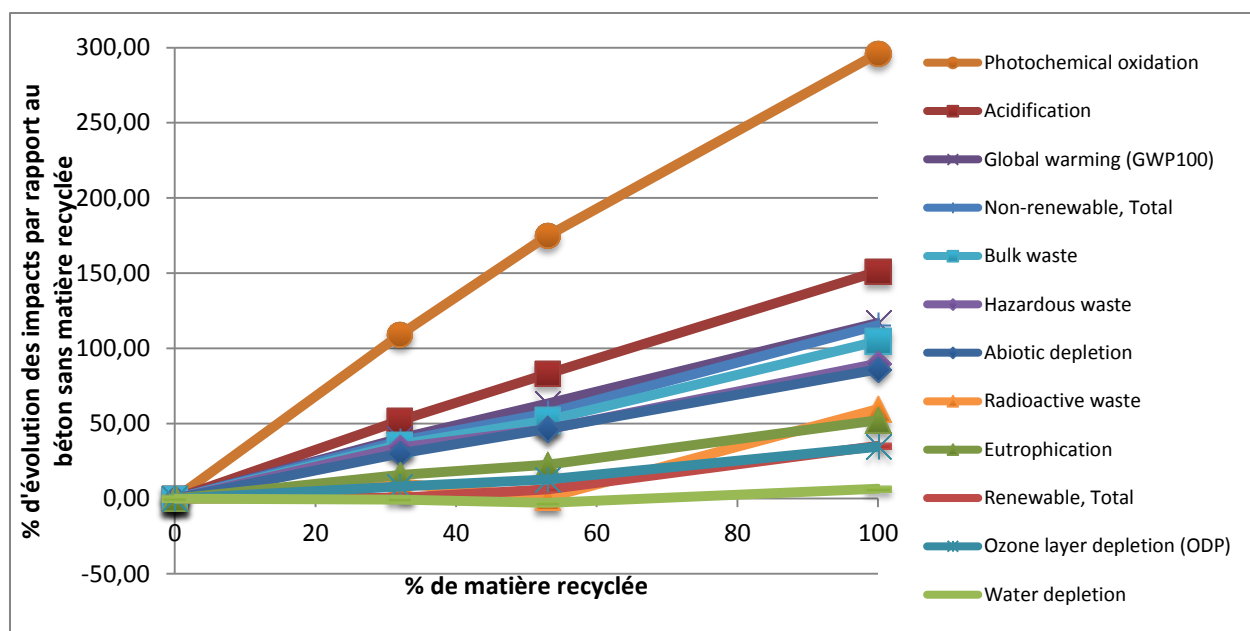


Figure 14 : Evolution des impacts par rapport au béton non recyclé, en fonction de la quantité de matière recyclée (béton C35/45).

Tableau 22 : Valeurs d'évolution des impacts par rapport au béton non recyclé (béton C35/45).

% de matière recyclée	Unité	0	32	53	100
Abiotic depletion	% kg Sb eq	0,00	30,00	46,35	85,97
Acidification	% kg SO ₂ eq	0,00	51,93	83,00	151,09
Eutrophication	% kg PO ₄ ³⁻ eq	0,00	15,69	22,51	52,09
Global warming (GWP100)	% kg CO ₂ eq	0,00	39,97	63,21	116,91
Ozone layer depletion (ODP)	% kg CFC-11 eq	0,00	8,05	12,87	34,40
Photochemical oxidation	% kg C ₂ H ₄ eq	0,00	109,04	174,77	296,13
Non-renewable, Total	% MJ	0,00	38,38	56,78	115,36
Renewable, Total	% MJ	0,00	0,64	6,18	35,16
Water depletion	% m ³	0,00	-0,71	-2,80	6,58
Hazardous waste	% kg	0,00	34,13	46,27	89,78
Bulk waste	% kg	0,00	35,92	52,09	104,65
Radioactive waste	% kg	0,00	10,27	0,55	59,66

Les résultats obtenus permettent de tirer les mêmes conclusions pour le béton C35/45 que pour le béton C25/30, concernant l'influence de la composition des bétons formulés à partir de granulats recyclés. En comparant les quantités de composants des formulations C35/45 aux formulations C25/30 (Tableau 23), on constate que les quantités de tous les composants augmentent dans le C35/45 par rapport au C25/30, excepté l'eau d'ajout, puisque la formulation du béton de résistance plus élevée nécessite une plus grande quantité d'adjuvants, ce qui entraîne une diminution du rapport E_{efficace}/C . Ces variations de quantité de composants expliquent donc l'augmentation d'impact générale pour le C35/45 par rapport au C25/30.

Tableau 23 - Différences en pourcentages de la composition des échantillons C35/45 par rapport aux C25/30.

% de matière recyclée	0	32	53	100	
Eau d'ajout (%kg)		-3	-4	-3	-9
Ciment (%kg)		11	16	19	17
Filler Calcaire (%kg)		29	42	71	40
Superplastifiant (%kg)		60	52	56	136
Retardateur de prise (%kg)		---	18	---	15
Adjuvants (%kg)		60	35	56	53

Le pourcentage d'augmentation des impacts (Tableau 20) montrait de fortes augmentations, notamment pour les indicateurs « production de déchets radioactifs » et « consommation des énergies renouvelables ».

Il a été démontré que la quantité de déchets radioactifs produite est corrélable à la quantité de ciment. La quantité de ciment est en forte augmentation dans les bétons C25/30 (21%) et C35/45 (27%) formulés avec 100% de matière recyclée par rapport aux bétons de références. Le ciment requiert beaucoup d'énergie pour sa fabrication. Cependant, tous les échantillons formulés avec un peu moins de matière recyclée (formulations 0R-30R, 0R-100R, 30R-0R, 30R-30R), quelle que soit la classe de résistance, présentent un caractère neutre vis-à-vis de la référence (0R-0R), ce qui souligne un intérêt pour le recyclage à faible taux, qui s'avère être plutôt le modèle dominant du PN RECYBETON.

8.3. Influence du dosage en ciment

Remarque : cette partie se base sur une interprétation simplifiée. Pour approfondir cette question, il serait nécessaire de formuler des bétons avec plus ou moins de ciment, mais sur la base du même cahier des charges fonctionnel et normatif.

A la lecture des résultats d'ACV précédents, il semble judicieux de déterminer si en modifiant la formulation des échantillons, les conclusions brutes de l'analyse de ces résultats seront modifiées, à savoir : est-il possible d'améliorer le bilan environnemental des bétons de granulats recyclés ?

D'après l'interprétation de l'ACV, les valeurs d'impacts environnementaux semblent étroitement liées au dosage en ciment ; en d'autres termes à la quantité de ciment contenue dans les échantillons. Des analyses ont été effectuées en augmentant leurs rapports respectifs de 0,1 afin de diminuer la quantité de ciment dans les échantillons. Cette valeur d'augmentation a été choisie faible, afin d'éviter d'impacter de manière significative les caractéristiques mécaniques du béton. Par ailleurs, dans un cas réel, il est envisageable de

modifier la teneur en adjuvant dans les échantillons pour ne pas dégrader les performances mécaniques, tout en réduisant sensiblement la quantité de ciment dans les échantillons. Les nouvelles formulations de béton correspondantes sont présentées dans le tableau 24.

Tableau 24 : Formulations des bétons, avec rapport E/C augmenté de 0,1.

Modifications apportées au rapport E/C	C25/30-OR-OR	C25/30-OR-30R	C25/30-OR-100R	C25/30-30R-OR	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R	C35/45-OR-OR	C35/45-OR-100R	C35/45-30R-30R	C35/45-100R-100R
Rapport E/C	0,7	0,76	0,87	0,77	0,82	0,93	0,62	0,71	0,69	0,75
Rapport E/C + 0,1	0,8	0,86	0,97	0,87	0,92	1,03	0,72	0,81	0,79	0,85
Constituant (kg/m ³)	C25/30-OR-OR	C25/30-OR-30R	C25/30-OR-100R	C25/30-30R-OR	C25/30-30R-30R	C25/30-100R-100R	C35/45-OR-OR	C35/45-OR-100R	C35/45-30R-30R	C35/45-100R-100R
Eau d'ajout	205	225	258	228	242	319	202	257	238	305
Ciment	255	261	268	261	263	310	282	317	303	360
Filler Calcaire	45	31	31	31	31	50	58	53	44	70
Sable	780	813	806	549	500	0	771	782	491	0
Sable recyclé 0/4	0	0	0	235	218	673	0	0	214	663
Gravillon Givet 4/10	267	228	0	190	171	0	264	0	168	0
Gravillon recyclé 4/10	0	0	163	0	145	304	0	158	142	299
Gravillon Givet 6,3/20	820	462	0	829	552	0	810	0	542	0
Gravillon recyclé 10/20	0	296	701	0	167	442	0	682	164	435
Superplastifiant	1,31	1,51	1,4	1,16	1,08	1,18	2,1	2,18	1,64	2,78
Retardateur de prise	0	0	0	1,1	1,1	2,6	0	0	1,3	3

Le tableau 25 présente pour chaque échantillon, le pourcentage de différence d'impact comprenant l'augmentation du rapport E/C de 0,1.

Tableau 25: Pourcentage de différence d'impact entre les séries en augmentant le rapport E/C de 0,1.

Catégorie d'impact	Unité	C25/30					
	% Sable	0	0	0	30	30	100
	% granulat	0	30	100	0	30	100
	% matière recyclée	0	17	53	14	32	100
Abiotic depletion	kg Sb eq	-2,9	-2,7	-2,2	-2,7	-2,4	-2,2
Acidification	kg SO2 eq	-4,0	-3,3	-2,4	-3,4	-2,8	-2,2
Eutrophication	kg PO4--- eq	-4,0	-4,0	-3,6	-4,0	-3,8	-3,7
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-5,3	-4,8	-3,7	-4,8	-4,2	-3,4
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-5,3	-5,6	-5,5	-5,5	-5,5	-5,8
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	-5,0	-3,4	-2,0	-3,6	-2,6	-1,7
Non-renewable, Total	MJ	-3,3	-2,9	-2,3	-2,9	-2,6	-2,1
Renewable, Total	MJ	-4,0	-4,4	-4,4	-4,4	-4,4	-4,4
Water depletion	m3	-1,5	-1,7	-1,8	-1,6	-1,7	-2,0
Hazardous waste	kg	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Bulk waste	kg	-3,5	-3,2	-2,6	-3,2	-2,8	-2,4
Radioactive waste	kg	-3,3	-3,4	-3,7	-3,1	-3,2	-3,3

Catégorie d'impact	Unité	C35/45			
	% Sable	0	0	30	100
	% granulat	0	100	30	100
	% matière recyclée	0	53	32	100
Abiotic depletion	kg Sb eq	-3,3	-2,7	-2,8	-2,5
Acidification	kg SO2 eq	-4,3	-2,9	-3,3	-2,5
Eutrophication	kg PO4--- eq	-4,3	-4,2	-4,2	-4,1
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-5,8	-4,3	-4,7	-3,9
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-5,7	-5,9	-5,9	-6,0
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	-5,6	-2,5	-3,1	-2,1
Non-renewable, Total	MJ	-3,6	-2,7	-2,9	-2,4
Renewable, Total	MJ	-4,1	-4,5	-4,5	-4,4
Water depletion	m3	-1,7	-2,0	-1,9	-2,2
Hazardous waste	kg	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Bulk waste	kg	-3,9	-3,1	-3,3	-2,8
Radioactive waste	kg	-3,2	-3,8	-3,3	-3,0

Après augmentation du rapport E/C de 0,1, l'indicateur « déchets dangereux » n'est pratiquement pas modifié. La diminution de la quantité de ciment n'influe donc pas sur cet indicateur. Les impacts sur tous les autres indicateurs diminuent de manière constante par rapport à la quantité de matière recyclée. Les diminutions sont comprises entre -1,5 et -6,0%. Ces résultats indiquent que les valeurs d'impacts environnementaux sont étroitement liées avec la quantité de ciment, il s'agit donc d'un critère prioritaire lors de la détermination de la formulation d'un béton. Reste à savoir si techniquement, avec des granulats recyclés, ce critère est réaliste. Une diminution de la quantité de ciment entrainera une baisse du dosage en adjuvant pour ne pas trop « fluidifier » le béton. Mais inévitablement, la résistance sera difficilement atteinte surtout pour le béton C35/45.

Ces résultats démontrent aussi le fait que l'utilisation de granulats recyclés augmente les impacts environnementaux car la formulation des échantillons contenant des granulats recyclés nécessite l'utilisation d'une quantité de ciment plus importante pour atteindre la classe de résistance mécanique souhaitée. Cette augmentation n'est pas seulement due au procédé de production des granulats.

9. Conclusions

Le bilan environnemental de bétons avec différentes proportions de granulats recyclés et formulés selon le cadre du PN a été réalisé suivant la méthode d'ACV, en conformité avec la norme NF EN 15804+A1.

Il résulte de l'utilisation de granulats recyclés dans les formulations des bétons une augmentation de tous les impacts environnementaux, à différentes échelles. Cette conclusion a pu être observée avec trois logiciels (BETie, SimaPro et GaBi). Une analyse de sensibilité a mis en évidence que ce résultat est principalement dû à l'augmentation de la teneur en ciment dans ces bétons. Cette quantité importante de ciment dans les échantillons contenant 100% de granulats recyclés s'explique par la nécessité de tendre vers des classes de résistances mécaniques ciblées. Ainsi une première recommandation pourrait être d'optimiser les formulations en visant des objectifs raisonnables de résistance afin de réduire autant que possible cette utilisation compensatrice de ciment. Il est par exemple envisageable de diminuer la quantité de ciment des différents échantillons, d'autant que des adjuvants peuvent être employés pour tendre vers les classes de résistances désirées (lorsque la quantité de ciment diminue alors le pourcentage d'adjuvant, calculé sur le poids de ciment, diminue lui aussi). Cependant, la formulation peut être faite en tenant compte d'un coefficient de sécurité pour garantir la résistance. Ce qui pourrait permettre de baisser le dosage en ciment sans affecter les performances du béton. Dans la pratique, pour des questions d'optimisation on ne peut pas abaisser le dosage en ciment, sauf si des granulats de meilleures qualités ou si un squelette granulaire plus compact sont employés. En outre, le fait de baisser la quantité de ciment en mettant davantage d'adjuvants, présenterait des impacts négatifs sur l'économie et sur certaines propriétés secondaires des bétons (viscosité, temps de prise).

Les résultats de l'étude de sensibilité sur l'influence du rapport E/C confirme la prépondérance de l'influence de la quantité de ciment sur les valeurs d'impact.

Parmi les indicateurs directement corrélés à l'énergie – qui constituent l'intérêt principal du secteur de la construction avec les émissions de CO₂ – citons l'indicateur « production de déchets radioactifs » (intégré aux informations environnementales décrivant les catégories de déchets à renseigner conformément à la norme NF EN 15804+A1) ; « oxydation photochimique » et « acidification atmosphérique » tous principalement influencés par la quantité de ciment utilisée dans les formulations.

On remarquera que les résultats mettent globalement l'accent sur la dégradation des indicateurs pour les formulations contenant 100% de granulats recyclés. Or, ce n'est pas forcément le modèle dominant visé par le PN RECYBETON. **Le caractère neutre dans les ACV des formulations béton n'incorporant qu'une part de granulats de béton recyclé (30R-0R, 0R-30R, 30R-30R) doit être souligné, dans la mesure où les résultats sont assez proches de ceux obtenus avec la référence (0R-0R) et que ces mélanges représentent sans doute une des voies opérationnelles de développement du recyclage des bétons dans les bétons.**

Dans un souci de limitation de l'impact environnemental lors de l'utilisation de granulats recyclés, il faut optimiser les formulations afin de réduire autant que possible l'utilisation excessive de ciment et d'adjuvants (sachant qu'il n'est pas possible de baisser à la fois les teneurs en ciment et en adjuvants), tout en considérant les valeurs de transport induites par les lieux de production des composants. Les distances de transport pourraient être plus faibles pour les granulats recyclés s'il apparaît que le maillage du territoire par les plateformes de tri est plus fin, et les lieux de production de granulats recyclés plus proches des villes. L'augmentation des quantités des composants des formulations autres que les granulats étant due à de plus faibles capacités mécaniques des granulats recyclés, cette étude soulève donc la nécessité d'améliorer ces dernières.

Il faut également souligner ici le manque d'un bon indicateur de ressource non-renouvelable qui illustre le bénéfice sociétal de la substitution granulats naturels/granulats recyclés. De plus, les indicateurs actuels de la norme NF EN 15804+A1 ne rendent pas compte de façon satisfaisante de l'économie de prélèvement de ressources naturelles que sont les granulats naturels. Cependant, l'avantage environnemental n'en est pas moins réel et pourrait être mis en valeur en tenant compte de la distance par rapport à la méthodologie d'ACV et au choix d'indicateurs normés. Cet aspect pourrait être abordé dans une étude ultérieure, complémentaire. Tout comme le sujet de la carbonatation, très discuté au niveau européen notamment, ainsi que le module D de la norme NF EN 15804+A1, son lien avec l'emploi de granulats recyclés et son possible traitement méthodologique.

Par ailleurs, une analyse de sensibilité sur les distances de transport probables de terrain dans le cas d'une croissance du recyclage en France permettrait d'estimer plus précisément l'incidence significative ou non de distances pour le ciment, les granulats recyclés...

10. Références bibliographiques

CIRAIG, Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Service; 2005.

P. CRETZAZ, M. SAADE, O. JOLLIET (2010), Analyse de cycle de vie comprendre et réaliser un écobilan 2^e édition, Presses polytechniques et universitaires romandes.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.

<http://www.synad.fr/medias/fichierproduit/154-FICHE-DE-DONNEES> ENVIRONNEMENTALES-ET-DE-SECURITE.pdf (mai 2014), l'EFCA

K.KAWAI, T.SUGIYAMA, K.KOBAYASHI, S.SANO, Inventory data and case studies for environmental performance evaluation of concrete structure construction, Journal of advanced concrete technology vol.3, No 3, 435-456; 2005.

Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés (31 mai 2011, UNPG) ; <http://www.unpg.fr/>; mai 2014.

NF EN 206-1 2010 : AFNOR. NF EN 206-1, Concrete – Part 1: Specification, performance, production et conformité; Avril 2004.

NF EN ISO 14040, Management environnemental, analyse de cycle de vie, principes et cadre ; Octobre 2006.

NF EN ISO 14044, Management environnemental, analyse du cycle de vie, exigences et lignes directrices (2006).

NF EN 15804+A1. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Avril 2014.

XP P 01-064. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1. Avril 2014.

Rapport Brundtland, *Notre avenir à tous*, 1987

R Frischknecht, N Jungbluth, H J Althaus, G Doka, R Dones, T Heck, S Hellweg, R Hischier, T Nemecek, G Rebitzer, M Spielmann, The ecoinvent database : Overview and methodological framework, INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT vol.10: No1, 3-9; 2005.

Roudier, <http://www.pnrecybeton.fr/> ; mars 2014.

T Sedran, Mise au point des formules de béton de référence_RECYCBETON, juillet 2013.

H Wenzel, M Hauschild, L Alting L, Environmental assessment of products, Methodology, tools and case. vol 1; 1997.

Hauschild, M. and Potting, J.: Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004.

Frischknecht R., Jungbluth N., *et al.* (2007) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; *et al.*. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp.

Annexes

Annexe 1 – ACV des bétons obtenus à partir des logiciels SimaPro et GaBi.

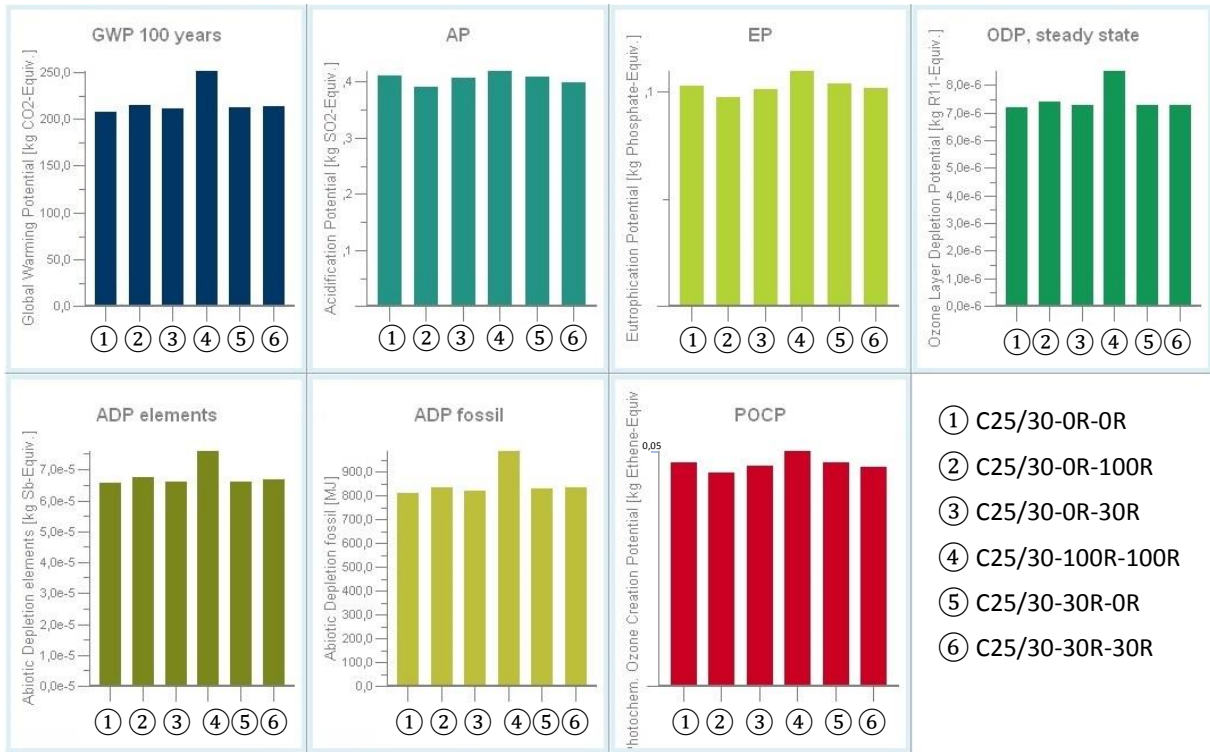


Figure 6 : Comparaison des bétons de classe de résistance C25/30 avec la méthode CML 2001, en utilisant le logiciel GaBi.

Légende: GWP: Global Warming Potential; AP: Acidification Potential; EP: Eutrophication Potential; ODP: Ozone Layer Depletion; ADP: Abiotic Depletion; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

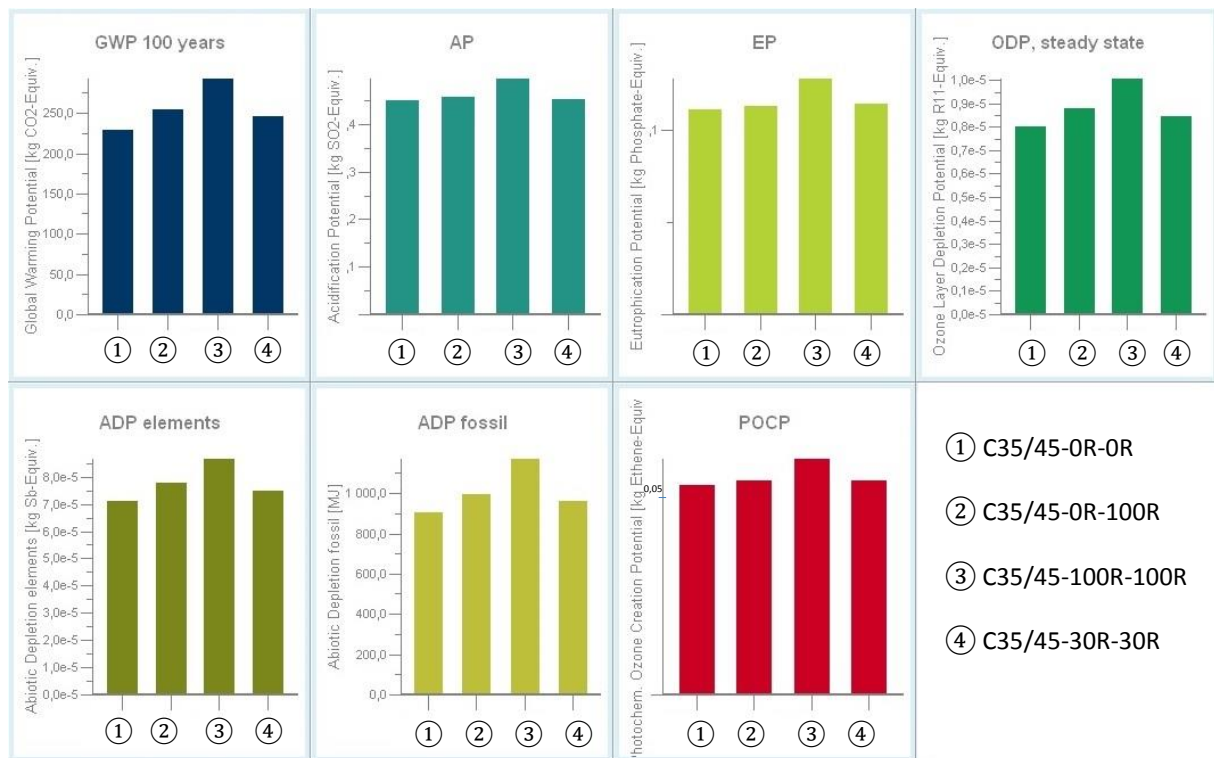


Figure 7 : Comparaison des bétons de classe de résistance C35/45 avec la méthode CML 2001, en utilisant le logiciel GaBi. *Légende :* GWP: Global Warming Potential; AP: Acidification Potential; EP: Eutrophication Potential; ODP: Ozone Layer Depletion; ADP: Abiotic Depletion; POCP: Photochemical Ozone Creation Potential.

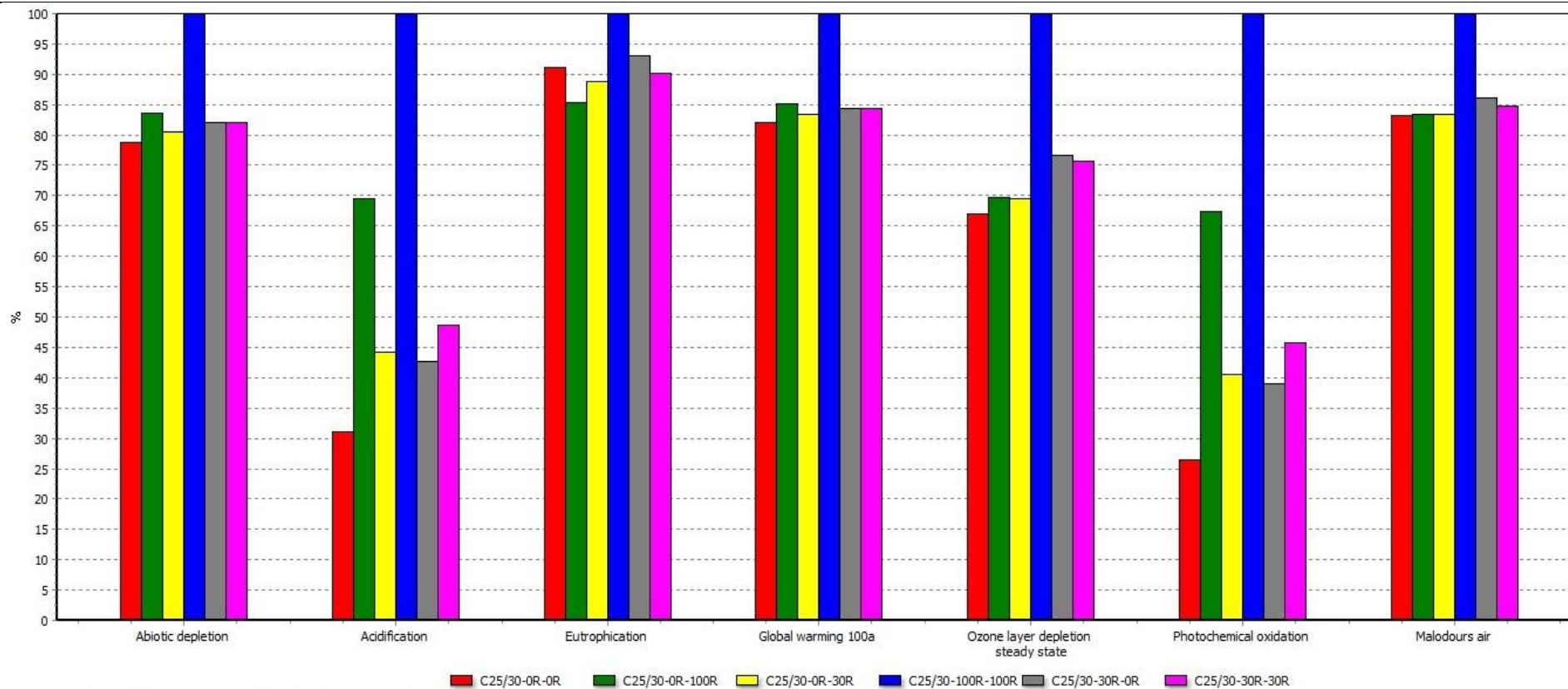


Figure 8 : Comparaison des bétons de classe de résistance C25/30 avec la méthode CML 2001, en utilisant le logiciel SimaPro.

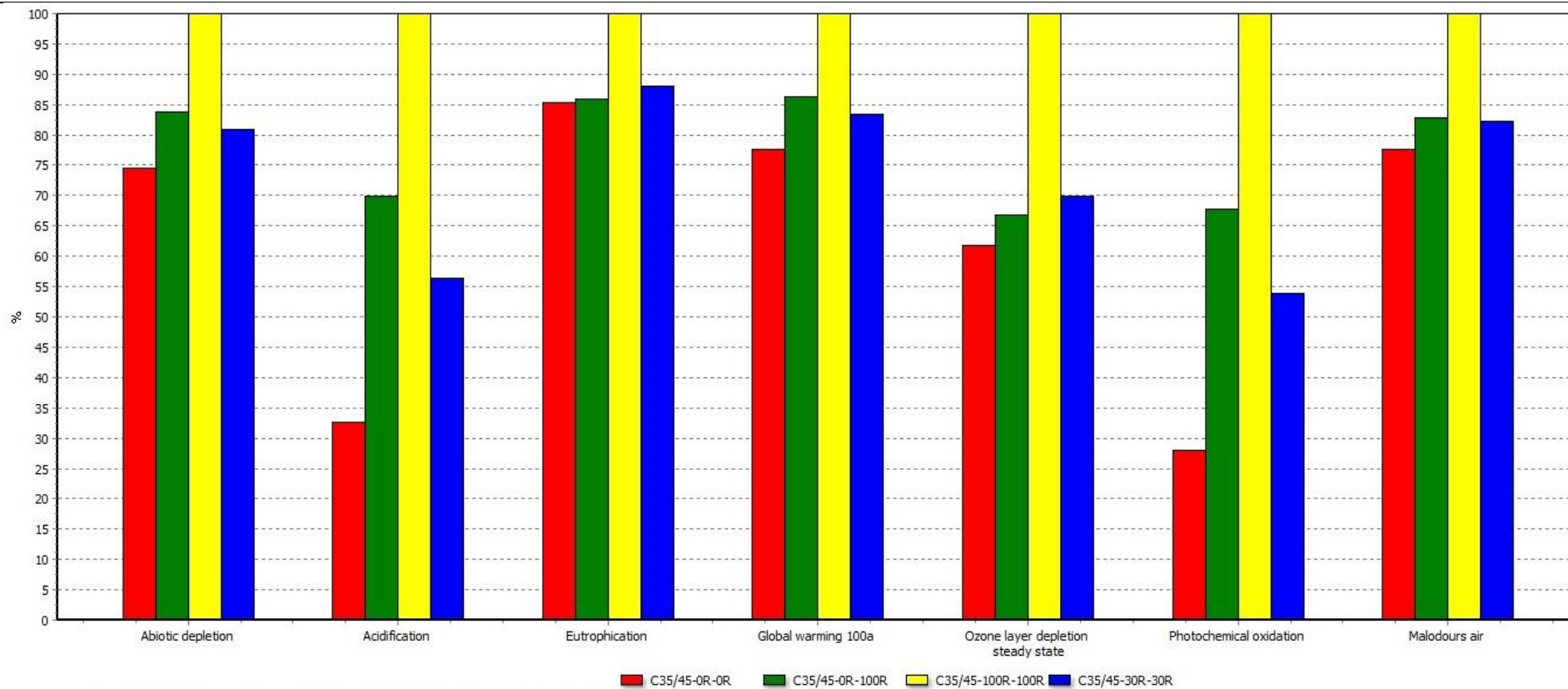


Figure 9 : Comparaison des bétons de classe de résistance C35/45 avec la méthode CML 2001, en utilisant le logiciel SimaPro.

Annexe 2 – Valeurs brutes des résultats d'ACV des bétons

Tableau 18 : Comparaison environnementale des échantillons réalisée avec le logiciel SimaPro.

Catégorie d'impact	Unité	C25/30					
	% Sable	0	0	0	30	30	100
	% granulat	0	30	100	0	30	100
	% matière recyclée	0	16	52	13	30	100
Abiotic depletion	kg Sb eq	7,12E-01	8,11E-01	9,92E-01	7,97E-01	8,91E-01	1,23E+00
Acidification	kg SO2 eq	3,92E-01	4,94E-01	6,80E-01	4,76E-01	5,71E-01	9,10E-01
Eutrophication	kg PO4--- eq	8,95E-02	9,45E-02	1,03E-01	9,54E-02	9,93E-02	1,25E-01
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	1,98E+02	2,35E+02	3,01E+02	2,29E+02	2,63E+02	3,98E+02
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	5,92E-06	6,03E-06	6,13E-06	6,08E-06	6,09E-06	7,27E-06
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,15E-02	1,78E-02	3,01E-02	1,66E-02	2,28E-02	4,31E-02
Non-renewable, Total	MJ	1,53E+03	1,80E+03	2,28E+03	1,80E+03	2,04E+03	3,01E+03
Renewable, Total	MJ	7,60E+01	7,24E+01	7,26E+01	7,40E+01	7,36E+01	9,22E+01
Water depletion	m3	1,16E+00	1,16E+00	1,13E+00	1,18E+00	1,16E+00	1,27E+00
Hazardous waste	kg	1,75E-02	2,01E-02	2,50E-02	2,02E-02	2,28E-02	3,06E-02
Bulk waste	kg	3,35E+00	3,86E+00	4,82E+00	3,87E+00	4,36E+00	6,35E+00
Radioactive waste	kg	4,68E-03	4,74E-03	4,44E-03	5,24E-03	5,06E-03	6,25E-03

Catégorie d'impact	Unité	C35/45			
	% Sable	0	0	30	100
	% granulat	0	100	30	100
	% matière recyclée	0	52	30	100
Abiotic depletion	kg Sb eq	7,59E-01	1,06E+00	9,53E-01	1,32E+00
Acidification	kg SO2 eq	4,32E-01	7,37E-01	6,21E-01	9,82E-01
Eutrophication	kg PO4--- eq	9,82E-02	1,17E-01	1,11E-01	1,42E-01
Global warming (GWP100)	kg CO2 eq	2,19E+02	3,38E+02	2,94E+02	4,38E+02
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	6,64E-06	7,40E-06	7,11E-06	8,67E-06
Photochemical oxidation	kg C2H4 eq	1,24E-02	3,13E-02	2,41E-02	4,41E-02
Non-renewable, Total	MJ	1,69E+03	2,50E+03	2,23E+03	3,33E+03
Renewable, Total	MJ	8,83E+01	9,30E+01	8,88E+01	1,15E+02
Water depletion	m3	1,24E+00	1,27E+00	1,28E+00	1,43E+00
Hazardous waste	kg	1,77E-02	2,48E-02	2,29E-02	3,13E-02
Bulk waste	kg	3,64E+00	5,27E+00	4,76E+00	6,91E+00
Radioactive waste	kg	5,63E-03	5,66E-03	6,12E-03	8,43E-03

