



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 3

Évaluation environnementale du béton de granulats recyclés – 2^{ème} étape

Rédigé par
S.BRAYMAND, A.FERAILLE, N.SERRES

ICUBE - ENPC

R/17/RECY/042
LC/15/RECY/81 et 82
Juillet 2017

Résumé

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés de bétons est souvent évoqué sans qu'il ne soit démontré. L'objectif de cette étude est de vérifier si les bétons de granulats recyclés de bétons sont réellement plus éco-respectueux que les bétons de granulats naturels selon les critères normatifs de la méthodologie ACV (Analyse du Cycle de Vie) appliquée aux matériaux de construction. Ainsi cette étude vise à comparer les impacts environnementaux, de Bétons de Granulats Recyclés (BGR) et de Bétons de Granulats Naturels (BGN). L'originalité de ces travaux réside dans une comparaison multi-paramètres des facteurs impactant l'ACV de tels bétons (dosage et nature du ciment, taux de substitution des granulats, distances de transport des granulats et du béton). La comparaison multi-paramètres est rendue possible dans cette étude par le séquençement de l'étude en trois étapes. Les analyses du cycle de vie (ACV) de BGR par rapport à des BGN ont réalisées dans un premier temps pour des bétons dont les compositions sont calculées avec des objectifs de résistances égales. Cette exigence conduit à étudier des bétons de composition variable pour des taux de substitution en recyclés croissants. Ensuite, des formulations optimisées de bétons (BGR et BGN) utilisant des superplastifiants sont mises en œuvre et leurs ACV évaluées. L'optimisation des formulations a permis de conserver la même teneur en ciment pour des résistances mécaniques proches. Pour cette partie de l'étude dont le but est l'étude de l'influence de la distance de transport liée aux circuits d'acheminement des granulats et l'étude de l'influence du taux de substitution en granulats recyclés, les compositions de bétons sont réalisées à volumes égaux de constituants (hormis le dosage en adjuvant). Quatre taux de substitution sont proposés : 0, 10%, 30% et 100%. Pour cette partie de l'étude, plusieurs distances de transport associées à 4 schémas d'acheminement des granulats et du béton sont déterminées. Ces distances sont calculées pour plusieurs villes selon les circuits d'acheminement déterminés. Enfin, les ACV de deux chantiers expérimentaux du PN sont réalisées pour étendre l'étude à l'échelle d'un élément d'ouvrage.

Abstract

The eco-friendly property of Recycled Aggregates Concrete (RAC) is frequently mentioned, not always demonstrated. The aim of this study is to confirm whether concrete from Recycled Concrete Aggregates (RCA) are really more eco-friendly than Natural Aggregates Concrete. Comparisons are performed according to the normative criteria of LCA methodology applied to construction materials. Thus, this study aims to compare the environmental impacts of Recycled Aggregate Concrete (BGR) and Natural Aggregate Concrete (BGN). The originality of this work resides in a multi-parameter comparison of the factors impacting the LCA of such concretes (cement content and cement type, aggregate substitution rate, transport distances of aggregates and concrete). The study focuses first on the influence of the composition parameters of the concrete, in particular the content of recycled aggregates, the cement dosage and type, and the water content. The use of recycled aggregates in concrete formulations increases environmental impacts at different levels. This result is due to the increase of the cement content in the samples, because a standardized mechanical strength is required. Then, optimized formulations of concrete with close mechanical strengths are performed in order to obtain the same cement content and the same efficient water content (to take into account only the substitution rate). Four substitution rates are tested: 0, 10%, 30% and 100%. Moreover, in order to take into account impact distance, several transport distances of natural and recycled aggregates are proposed, it allows to study the integrated management of demolition waste streams in several areas. Finally, LCA of experimental construction site are proposed.

Sommaire

Résumé.....	2
Abstract	2
Sommaire.....	3
Introduction et contexte de l'étude.....	9
Objectif et contenu de l'étude	9
Équipes impliquées dans l'étude.....	10
Collaboration avec les autres travaux du GT3.	10
Communication et Publications sur l'étude.....	11
A Principaux résultats et conclusions de la phase 1 de l'étude réalisée en tranche 2.....	12
A.1 Rappel : la méthodologie ACV.....	12
A.2 Étude réalisée en tranche 2	15
A.3 Analyse complémentaire au rapport précédent : analyse d'impact des étapes du processus 20	
A.4 Recommandations en fin de première phase	22
B Bétons étudiés : compositions et propriétés.....	23
B.1 Matériaux et Méthodes de formulation :.....	23
B.2 Propriétés à l'état frais et durcis des bétons de l'étude	24
C Étude de la sensibilité aux transports : territorialisation et discrimination des circuits d'acheminement des granulats.....	26
C.1 Définition des circuits d'acheminement et calcul des distances parcourues	26
C.2 Sensibilité aux circuits des quantités de matériaux transportés et kilomètres parcourus ...	31
C.3 Analyse des circuits pénalisants	36
C.4 Comparaison des distances à vol d'oiseau et routières	39
C.5 Présentation d'un circuit court : exemple du chantier de Muttenz en Suisse.....	40
C.6 Conclusion : sensibilité aux transports sur une analyse en t.km.....	41
D Analyse du Cycle de Vie des Bétons pour les circuits sélectionnés.....	43
D.1 Méthodologie ACV	43
D.2 ACV des compositions témoin sans transport	47
D.3 ACV du transport des granulats et du béton pour les circuits sélectionnés.....	49
D.4 ACV des bétons sur les circuits sélectionnés : étude de la sensibilité au transport selon le taux de substitution	54
D.5 ACV des bétons sur le circuit 4 : circuit court avec recyclage in situ	73

D.6	Analyse comparative de la part du transport entre le circuit 4 et les autres circuits.....	76
D.7	Conclusion sur l'analyse de la sensibilité aux transports	78
E	Analyse à l'échelle de l'ouvrage : application de l'ACV aux chantiers expérimentaux du PN.....	79
E.1	Données d'étude et éléments étudiés	80
E.2	Résultats : ACV à l'échelle des éléments des chantiers expérimentaux	83
F	Discussion et Perspectives.....	89
F.1	Eco-respectabilité des bétons de granulats recyclés et ACV : comment prendre en compte les impacts évités.....	89
F.2	Bétons de granulats recyclés et économie circulaire – Conférence DESIRE –Brussels janvier 2016	91
	Conclusion générale.....	93
	Bibliographie	99
	Annexes.....	100
	Synthèse des résultats ACV obtenus en tranche 2.....	100
	Compositions des bétons étudiés : méthode de formulation utilisée.....	102
	Calcul des distances selon les circuits	106
	Traitement des distances selon la masse transportée.....	110
	ACV des constituants et du transport	111
	ACV complètes	112
	Données utilisées.....	116
	Conférence DESIRE janvier 2016	121

Liste des Figures

Figure 1 Selon ISO 14040	12
Figure 2 Schématisation de la démarche de réalisation d'une ACV	12
Figure 3 Schématisation de la démarche de détermination des indicateurs d'impacts environnementaux.....	13
Figure 4 Indicateurs selon EN 15804.....	13
Figure 5 - Indicateurs d'impacts environnementaux de la norme NFP 01-010.	15
Figure 6 Tendances d'évolution des principaux indicateurs d'impacts observées en tranche 2.....	19
Figure 7 Étude d'impact- ACV tranche 2 Simapro.....	21
Figure 8 Représentation des possibilités d'acheminement des granulats.....	26
Figure 9. Circuits étudiés pour l'acheminement des granulats et le transport du béton.	27
Figure 10 Mode de calcul des distances à prendre en compte.....	28
Figure 11 Calculs des distances pour le circuit 1.....	29
Figure 12 Calculs des distances pour le circuit 2.....	29
Figure 13 Calculs des distances pour le circuit 3a	30
Figure 14 Calculs des distances pour le circuit 3b.....	30
Figure 15 Calculs des distances pour le circuit 4.....	31
Figure 16 Analyse de sensibilité pour le transport des granulats selon les villes et les circuits	34
Figure 17 Analyse de sensibilité pour le transport des granulats et du béton selon les villes et les circuits.....	36
Figure 18 Evolution des t.km selon le taux de recyclés pour les circuits les plus ou moins pénalisants des villes concernées (G = transport des granulats ; G-B = transport des granulats et du béton)	38
Figure 19 Illustration d'un chantier avec circuit court. Muttentz à Bâle.....	41
Figure 20– Schématisation de la démarche de réalisation d'une ACV.	45
Figure 21 ACV des bétons témoins.....	48
Figure 22 FDES des granulats à partir des fiches de l'UNPG.....	48
Figure 23 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du circuit 1- sauf indicateurs déchets.....	56
Figure 24 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du circuit 1- indicateurs déchets.....	57
Figure 25 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits pénalisants – sauf indicateurs déchets.....	59
Figure 26 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits pénalisants – indicateurs déchets.....	60
Figure 27 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants.....	63
Figure 28 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits favorables – sauf indicateurs déchets.....	65
Figure 29 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits favorables – indicateurs déchets	66
Figure 30 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits favorables – circuit 1.....	68
Figure 31 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants – CEM III.....	71
Figure 32 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants – CEM V.....	73
Figure 33 Étude d'impact pour le circuit 4 composition à 30% de granulats recyclés	75
Figure 34 Étude d'impact pour le béton témoin, composition à 30% de granulats recyclés	76

Figure 35 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du béton à 30% – sauf indicateurs déchets.....	78
Figure 36 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du béton à 30% – indicateurs déchets.....	78
Figure 37 – Plan de masse du chantier.....	80
Figure 38 : : Comparaison environnementale entre le chantier de Chaponost tel qu'il a été réalisé (avec des granulats recyclés) et tel qu'il aurait pu l'être (REF : sans granulats recyclés)	83
Figure 39 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec un béton de référence (sans granulats recyclés).....	84
Figure 40 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec le béton avec granulats recyclés.....	84
Figure 41 Étude d'impact sur les bétons utilisés pour le chantier de Chaponost.....	86
Figure 42 : Comparaison environnementale entre le chantier du CG 77 tel qu'il a été réalisé (avec des granulats recyclés) et tel qu'il aurait pu l'être (REF : sans granulats recyclés).....	87
Figure 43 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec un béton de référence (sans granulats recyclés).....	87
Figure 44 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec le béton avec granulats recyclés.....	88
Figure 45 Impacts évités :épuisement de la ressource en granulat naturel et stockage de déchet.....	91
Figure 46: Fitage du squelette granulaire du béton de granulats recyclés sur celui de granulats naturels concassés.....	103
Figure 47 Distances de travail - Strasbourg.....	106
Figure 48 Distances de travail - Lyon	107
Figure 49 Distances de travail – Lille.....	108
Figure 50 Distances de travail – Bordeaux	109

Liste des tableaux

Tableau 1 Indicateurs selon EN 15804	14
Tableau 2 : Les différentes formulations de bétons de l'étude (Sedran, 2013).....	16
Tableau 3 Informations relatives aux données utilisées dans l'étude.....	18
Tableau 4. <i>Compositions de bétons</i>	24
Tableau 5 résultats de consistance et résistances mécaniques.....	24
Tableau 6 – Exemple de traitement des distances parcourues par les granulats et le béton – Lille 6 30% de GR – circuit par circuit.	32
Tableau 7 – Circuits* les plus pénalisants hors circuit 4 selon la quantité de granulat recyclé ou naturel transporté sur une distance, ville par ville, composition par composition.	32
Tableau 8 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel transporté sur une distance, ville par ville, composition par composition.	33
Tableau 9 – Circuits* les plus pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.....	34
Tableau 10 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4	35
Tableau 11 – Circuits4* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.	35
Tableau 12- comparaison des distances à vol d'oiseau et distances routières	40
Tableau 13 – Choix des transports.....	44
Tableau 14 – Données utilisées pour créer le processus « Malaxage ».....	44
Tableau 15 : Indicateurs d'impacts environnementaux pris en compte.....	45
Tableau 16– Compositions retenues.	46
Tableau 17 Influence du ciment par rapport aux roches massives aux quantités correspondant à la composition de béton	49
Tableau 18 ACV transport pour 1 t.km selon le camion	50
Tableau 19 – Circuits* les plus pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.	51
Tableau 20 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4	51
Tableau 21 Analyse comparative du transport pour la ville de Strasbourg ; fonction du taux de substitution.....	51
Tableau 22 Analyse comparative du transport pour la ville de Lyon ; fonction du taux de substitution	52
Tableau 23 Analyse comparative du transport pour la ville de Bordeaux ; fonction du taux de substitution.....	53
Tableau 24 Analyse comparative du transport pour la ville de Lille ; fonction du taux de substitution	53
Tableau 25 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4	73
Tableau 26 – Circuits4* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.	73
Tableau 27 : Composition des bétons coulés sur le chantier de Chaponost.....	80
Tableau 28 : Composition des bétons coulés sur le chantier du CG 77	82
Tableau 29 ACV des bétons utilisés pour el chanteir exprimental de Chaponost	85

Tableau 30 : Quantification des indicateurs d'impacts environnementaux avec les 3 logiciels.....	100
Tableau 31 : squelette granulaire du béton de référence de granulats naturels	102
Tableau 32 : Composition théorique de bétons de granulats naturels concassés pour 1 m ³	103
Tableau 33: Résultats du squelette granulaire superposé	103
Tableau 34: Composition théoriques de bétons de granulats recyclés en kg pour 1 m ³	104
Tableau 35 ACV transport pour 1 t.km selon le camion	111
Tableau 36 ACV pour les 1 T de granulats : FDES retraités par les logiciels	111

Introduction et contexte de l'étude

L'étude présentée dans ce rapport se place au sein des préoccupations du thème 3 du PN Recybeton qui traite des aspects liés au développement durable. En parallèle d'une analyse socio-technico-économique dans laquelle la ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en France a été évaluée (Mongeard - Lafarge France, 2016), une caractérisation du comportement environnemental de bétons recyclés au travers d'essais de lixiviation a été menée. Cette étude constitue un autre aspect du développement durable des bétons de granulats recyclés : leur évaluation environnementale par la détermination d'impacts.

Objectif et contenu de l'étude

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés de bétons est souvent évoqué sans qu'il ne soit systématiquement démontré. L'objectif de cette étude est de vérifier si les bétons de granulats recyclés de bétons sont réellement plus éco-respectueux que les bétons de granulats naturels selon les critères normatifs de la méthodologie analyse du cycle de vie (ACV) appliquée aux matériaux de construction. Ainsi cette étude « Évaluation environnementale du béton de granulats recyclés » vise à comparer les impacts environnementaux décrits dans une Déclaration Environnementale de Produits (DEP), par la réalisation d'Analyses de Cycles de Vie (ACV) de Bétons de Granulats Recyclés (BGR) et de Bétons de Granulats Naturels (BGN).

Les travaux présentés dans ce document complètent une première phase de cette étude qui a fait l'objet d'un rapport remis en tranche 2 au PN RECYBETON (Idir, 2015). Lors de cette première phase de l'étude, le bilan environnemental de bétons avec différentes proportions de granulats recyclés et formulés selon le cadre du PN RECYBETON (GT1) a été réalisé suivant la méthode ACV, en appliquant les éléments de la norme 15804+A1 (AFNOR, 2014) entrée en vigueur en 2014. Les travaux réalisés dans cette tranche avaient dû être adaptés au fur et à mesure pour tenir compte de cette évolution de la normalisation au cours de la mise en œuvre du programme, en intégrant le passage de la norme française (NFP 01-010 – Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires) à la norme européenne (NFEN 15804- Déclaration Environnementale de produits). Pour cette raison, plusieurs logiciels d'ACV et bases de données associées avaient été utilisés.

Les conclusions de cette première phase indiquaient que l'utilisation de granulats recyclés dans les formulations des bétons du PN entraîne 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. Les résultats mettent globalement l'accent sur la dégradation des indicateurs pour les formulations contenant 100% de granulats recyclés.

Les résultats de cette phase de l'étude correspondaient à une approche « matériaux » du problème, c'est-à-dire l'étude de l'influence des paramètres de composition des bétons, notamment la teneur en granulats recyclés ou naturels, le dosage en ciment et le dosage en eau. Pour cette première phase de l'étude, des circuits courts pour le transport des granulats ont été pris comme hypothèse de travail. Il est apparu que des éléments tels que le transport des matériaux pendant les différentes

phases de la production du béton et des modifications aux formulations de bétons initialement étudiées sont des voies de développement à prendre en compte à l'issue de cette première phase .

Suite à cette étude, il est ressorti que les éléments suivants doivent être approfondis et /ou étudiés :

- L'influence du procédé de fabrication des bétons sur les distances de transport ; en particulier l'influence du choix des scénarii de mélange granulats naturels/recyclés sur les distances de transport des granulats et du béton puis sur les indicateurs d'impacts environnementaux (voir GT6 Pré-mélanges).
- La définition des frontières du système à l'échelle élément ou ouvrage par des méthodes effectives de réalisation des bétons à l'échelle des chantiers expérimentaux du PN.
- La possibilité d'évaluer ou non, à l'aide d'une analyse du cycle de vie, l'influence de l'utilisation des granulats naturels d'une part sur une réduction de l'emploi des granulats naturels, et d'autre part sur la diminution de la quantité de déchets déposés dans les centres d'enfouissement techniques : l'outil ACV peut-il être un vecteur pour favoriser l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons ?

Ainsi l'étude cette étude comporte les parties suivantes :

- Synthèse des travaux de l'étude précédente réalisée en tranche 2
- Présentation des matériaux d'étude
- Étude de la sensibilité aux transports : territorialisation et discrimination des circuits d'acheminement des granulats.
- Analyse du Cycle de Vie des Bétons pour les circuits sélectionnés
- Analyse à l'échelle de l'ouvrage : application de l'ACV aux chantiers expérimentaux du PN
- En discussion et perspective, la possibilité de prendre en compte l'économie de ressources granulats sera abordée et la comparaison avec les problématiques liées à l'économie circulaire sera présentée.

Équipes impliquées dans l'étude

Ce travail est un projet collaboratif entre le laboratoire ICube (Université de Strasbourg, INSA Strasbourg) et le laboratoire Navier-ENPC (École des Ponts et chaussées, Université de Paris Est). Les personnes en charge de ce projet sont Sandrine BRAYMAND (ICube), Adélaïde Feraille (ENPC) et Nicolas Serres (ICube).

Collaboration avec les autres travaux du GT3.

Une proposition de travail collaboratif avec d'autres actions du GT3 a été faite au cours de cette étude. Afin de cerner le fonctionnement socio-économique dans lequel interviennent ces nouvelles pratiques une étude a été confiée à Lafarge-Holcim avec pour objectif de fournir une image aussi fidèle et représentative que possible de la ressource nationale en matériaux recyclés susceptibles d'être utilisés –voire déjà employés- dans les bétons, et de mettre en perspective cette ressource en regard des dispositifs et lieux de recyclage déjà en place

Ainsi les données collectées au cours de l'étude réalisé par Lafarge France « La ressource en matériaux inertes recyclable dans le béton en France » (Mongeard - Lafarge France, 2016) ont été utilisées de manière à territorialiser les scénarii envisagés en s'appuyant sur une cartographie fiable

des sites, et en recherchant à optimiser les distances de transport en identifiant des localisations pertinentes de stockage et de traitement.

Ainsi, les conclusions de ce rapport validé en avril 2016 sont utilisées à plusieurs reprises dans ce rapport. La pertinence sera jugée par la minimisation des distances parcourues et des impacts potentiels générés par ces installations. La typologie des matériaux inertes et les volumes générés par les sites identifiés n'a pas été prise en compte pour le choix des sites de cette étude ACV car non connue au moment de la réalisation des travaux (études menées en parallèles). En complément des territorialisations de cette étude réalisée par Lafarge France, une comparaison des distances à vol d'oiseau (étude Lafarge) et routière sera proposée.

Communication et Publications sur l'étude

Plusieurs communications ont été réalisées ou proposées sur cette étude du PN Recybeton ;

- Technodating Pôle Fibre Energivie, 26 juin 2015 à Seltz
- HISER International Conference, 21, 22, & 23 June 2017, Delft, The Netherlands
- ATHENS 2017 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Athens, Greece, 21st to 24th June 2017.
- RUGC17, 35èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, "Le Génie Civil face aux défis Environnementaux", 21-24 mai 2017, Nantes

A Principaux résultats et conclusions de la phase 1 de l'étude réalisée en tranche 2

A.1 Rappel : la méthodologie ACV

La prise en compte des enjeux du développement durable lors des opérations de construction incite aujourd'hui les maîtres d'ouvrage et les architectes à faire le choix de matériaux plus « éco-respectueux ». L'évaluation de cette éco-respectabilité se fait par la réalisation d'écobilans ou d'ACV. (Jolliet, 2005). L'ACV évalue les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un système auquel une fonction spécifique est attribuée. C'est une analyse multi-étapes (cycle de vie de l'extraction des matières à la fin de vie) et multi-critères (plusieurs indicateurs d'impact). La méthodologie générale d'une ACV est définie selon la norme NF ISO 14040.

La définition des objectifs et du champ de l'étude conduit à préciser la fonction du système étudié, l'unité fonctionnelle de l'étude et les frontières du champ étudié.

Lors de la réalisation de l'inventaire, les aspects environnementaux liés à l'activité étudiée sont listés (consommation de fioul, rejet de CO₂, production de déchet spécifique, rejet de métaux lourds dans la nappe phréatique...). Un aspect environnemental est quantifiable et/ou mesurable, il peut être qualifié d'entrant ou sortant.

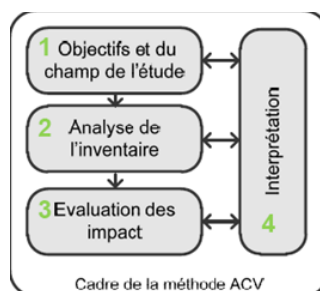


Figure 1 Selon ISO 14040

Les valeurs mesurables et quantifiables d'inventaires de cycle de vie (ICV) sont extraites de bases de données référencées (ex : Ecoinvent) ou établies directement par les producteurs de matériaux ou de systèmes.

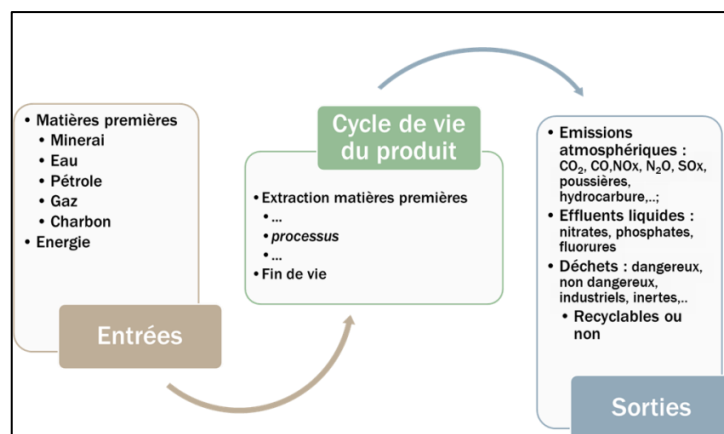


Figure 2 Schématisation de la démarche de réalisation d'une ACV.

L'étape suivante qui consiste à déterminer les impacts environnementaux est cruciale, c'est à ce stade de l'étude que l'évaluation prend tout son sens. Au cours de cette étape, les inventaires de flux (entrants et sortants) sont regroupés en une liste d'indicateurs d'impacts potentiels (ex : émission de gaz à effet de serre). À ce niveau, plusieurs approches méthodologiques existent (CML, Recipe...).

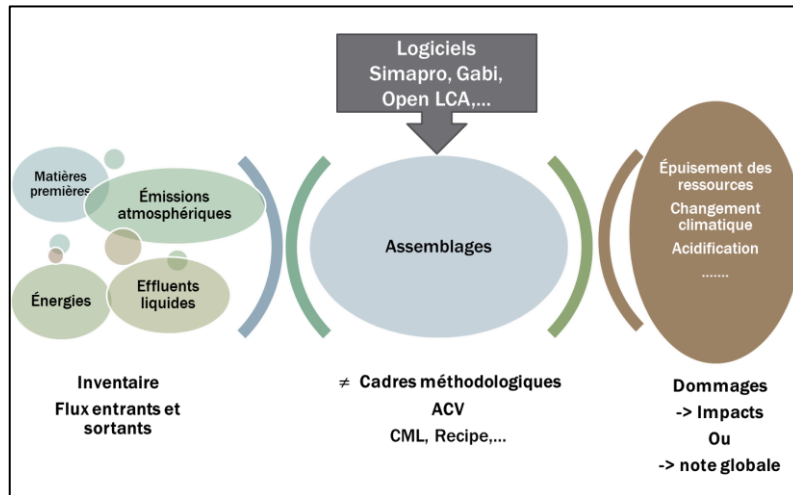


Figure 3 Schématisation de la démarche de détermination des indicateurs d'impacts environnementaux

Le cadre méthodologique réglementaire appliqué aux matériaux de construction est défini dans la norme NFEN 15-804 qui conduit à l'obtention de déclaration environnementale de produit (DEP). Il est à noter que nous sommes dans une période de transition entre la norme française (NFP 01-010) et la norme européenne, période qui se déroule entre 2014 et 2019. Ainsi les FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) obtenues selon la version française peuvent être utilisées comme référence pour les valeurs d'impact en application jusqu'en juin 2019 mais toute nouvelle déclaration de matériau doit se faire selon le format DEP européen depuis le 1er juillet 2014. Les indicateurs d'impacts selon le format NFEN 15804 sont classés en 4 catégories : impacts environnementaux – utilisation des ressources - catégories de déchets - flux sortants.

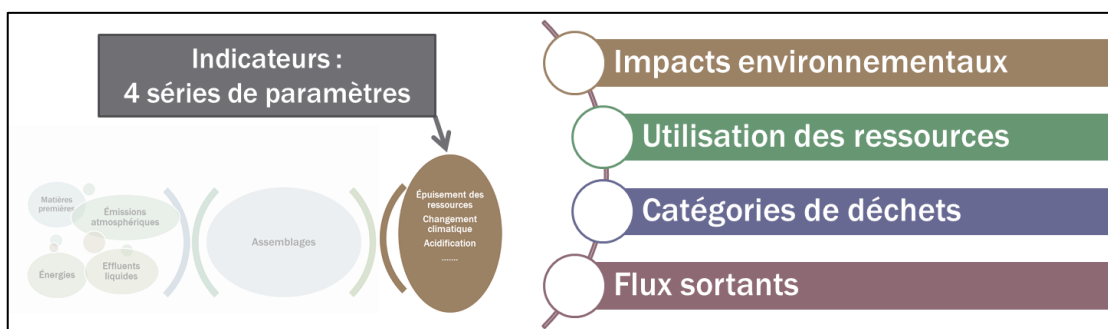


Figure 4 Indicateurs selon EN 15804

Tableau 1 Indicateurs selon EN 15804

Impacts environnementaux		Utilisation des ressources	
Catégorie d'impact	Unité /UF ou UD	Paramètre	Unité /Uf ou UD
Épuisement des ressources abiotiques non fossiles	kg de Sb équiv.	E primaire renouvelable sauf utilisées mat. premières	MJ
Épuisement des ressources abiotiques fossiles	MJ	E primaire renouvelable utilisées mat. premières	MJ
Acidification des sols et de l'eau	kg de SO ₂ équiv.	E primaire renouvelable totale	MJ
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg de CFC 11 équiv.	E primaire non renouvelable sauf utilisées mat. premières	MJ
Réchauffement climatique	kg de CO ₂ équiv.	E primaire non renouvelable utilisées mat. premières	MJ
Eutrophisation	kg de (PO ₄) ³⁻	E primaire non renouvelable totale	MJ
Formation d'ozone photochimique	kg d'éthène équiv.	Matière secondaire	kg
Catégories de déchets		Combustibles secondaires renouvelables	MJ
Paramètre	Unité /UF ou UD	Combustibles secondaires non renouvelables	MJ
Déchets dangereux éliminés	kg	Eau douce	m ³
Déchets non dangereux éliminés	kg		
Déchets radioactifs éliminés	kg		
Flux sortants			
Composants -> réutilisation	kg		
Matériaux -> recyclage	kg		
Matériaux récup. d'énergie	kg		
Énergie fournie à l'extérieur	MJ		

Parmi ces indicateurs, le changement climatique (calculé avec le potentiel de réchauffement global) correspond (aux unités près) à ce qui est communément appelé empreinte carbone ou bilan carbone. Ainsi, lors de la réalisation d'un bilan carbone, l'analyse est multi étapes mais n'est pas multicritère puisqu'un seul indicateur d'impact est étudié et analysé. Pour mémoire, les contributeurs principaux parmi les Gaz à Effet de Serre (GES), contributeurs du changement climatique, sont (AFNOR, 2014) :

- Dioxyde de carbone : CO₂ (équivalence CO₂ = 1)
- Méthane : CH₄ (équivalence CO₂ = 25)
- Protoxyde d'azote : N₂O (équivalence CO₂ = 298)

Pour mémoire, les indicateurs d'impacts environnementaux de la norme NFP 01-010 sont listés ci-après (Figure 5).

N°	Impact environnemental	Unité			
1	Consommation de ressources énergétiques :		Épuisement + Utilisation		
	Énergie primaire totale				
	dont énergie récupérée ⁽³⁾				
	Énergie renouvelable				
Énergie non renouvelable		MJ			
2	Indicateur d'épuisement de ressources (ADP)	kg équivalent antimoine	Détail fossile ou non		
3	Consommation d'eau	litres			
4	Déchets solides	Valorisés	kg	Dans utilisation	
		Éliminés	Déchets dangereux		kg
			Déchets non dangereux (DIB)		kg
			Déchets inertes		kg
			Déchets radioactifs		kg
5	Changement climatique	kg éq CO ₂			
6	Acidification atmosphérique	kg éq SO ₂			
7	Pollution de l'air	m ³	N'est pas comptabilisé		
8	Pollution de l'eau	m ³			
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 éq.			
10	Formation d'ozone photochimique	kg d'éthylène éq.			

Figure 5 - Indicateurs d'impacts environnementaux de la norme NFP 01-010.

La connaissance de la signification des indicateurs d'impact, de la méthodologie utilisée pour les obtenir et des aspects environnementaux dont ils sont issus conditionnent l'objectivité des interprétations et utilisations des Analyses de Cycle de Vie.

Le changement de méthodologie pour passer de la normalisation française à la normalisation européenne peut générer des erreurs lorsque des inventaires du cycle de vie (ICV) réalisés avec une méthodologie FDES (NFP 01-010) sont implantés dans un calcul de DEP (NF EN 15-804). Une grande rigueur doit être appliquée pendant la période de transition 2014-2019, puisque les nouvelles déclarations doivent être faites au format DEP mais que les anciens formats sont utilisables jusqu'en 2019.

A.2 Étude réalisée en tranche 2

L'étude portait sur 10 formulations de bétons (Tableau 2) présélectionnées par l'équipe du thème 0-Action 6 du PN. Ces bétons sont de classe de résistance (C25/30, C35/45).

Deux types de formulations avaient servies à l'étude appelées : formules sur granulats secs quand les granulats recyclés sont utilisés à l'état sec et formules sur granulats humides lorsque les granulats recyclés sont utilisés à l'état humide . Pour rappel, l'appellation des compositions XR-YR indique le taux de recyclé respectivement pour le sable (X) et le gravier (Y).

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

Tableau 2 : Les différentes formulations de bétons de l'étude (Sedran, 2013).

Constituant (kg/m ³)	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
	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 Giv et 4/10	267	228	-	190	171	-	264	-	168	-
Gravillon recyclé 4/10	-	-	163	-	145	304	-	158	142	299
Gravillon Giv et 6,3/20	820	462	-	829	552	-	810	-	542	-
Gravillon recyclé 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	169
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 Giv et 4/10	268	229	0	191	172	0	265	0	169	0
Gravillon recyclé 4/10	0	0	174	0	155	324	0	168	151	319
Gravillon Giv et 6,3/20	824	464	0	833	555	0	814	0	544	0
Gravillon recyclé 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

Les frontières du système définies étaient

- Processus de production
 - 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).

- Principaux processus exclus pour la production du béton :
 - 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.

Les catégories d'impacts environnementaux évalués dans cette étude, conformément à la norme NF EN 15804+A1, étaient 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.

La modélisation des scénarii avait 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. L'origine des données utilisées est rappelée Tableau 3.

Tableau 3 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

Ainsi les distances utilisées pour le transport vers la centrale à béton étaient comprises entre 19 et 27 t.km selon les compositions

Les résultats d'ACV obtenus, présentés en annexes ont conduit aux **conclusions suivantes** :

Le fait d'utiliser des logiciels d'ACV différents, avec des bases de données différentes et des méthodes d'assemblage différentes conduit à des résultats différents. De plus, le logiciel Betie considère comme unité fonctionnelle la réalisation de 1 m² de paroi, l'épaisseur de celle-ci étant déduit de la résistance du béton (dans le cas de l'étude en tranche 2 : 20 cm), pour les autres logiciels, l'unité fonctionnelle est la production d'1 m³ de béton. Le format FDES a aussi été utilisé pour certaines études réalisées avant le passage au format européen (Betie) Il n'est donc pas possible et même imprudent de comparer les résultats d'un logiciel à l'autre. Ce qu'il faut comparer ce sont les tendances et en l'occurrence, celles-ci observées formulations par formulations sont les mêmes sauf en ce qui concerne les indicateurs déchets. Ces tendances sont illustrées Figure 6 pour les bétons C25/30.

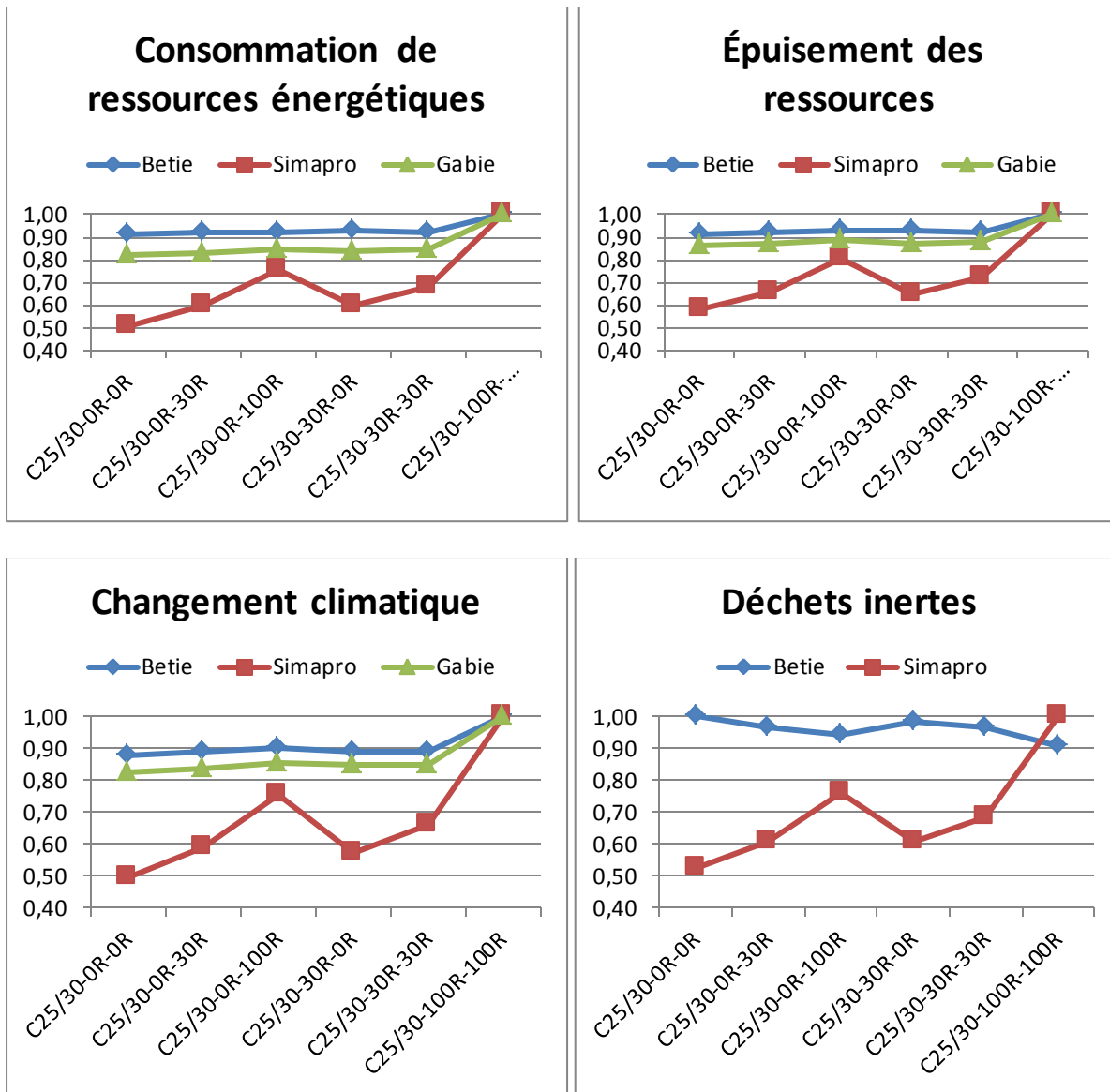


Figure 6 Tendances d'évolution des principaux indicateurs d'impacts observées en tranche 2

Les bétons formulés avec des granulats recyclés (formulations 100R-100R : 100% recyclé sable et 100% recyclé gravier) présentent les impacts les plus élevés.

Quelle que soit la classe de résistance, pour les différents indicateurs, les résultats pour les formulations 30R-30R, OR-30R et 30R-OR sont proches de ceux obtenus avec la formulation des bétons à base de sable et de granulats naturels (OR-OR).

À taux de substitution égal, les impacts montrent une augmentation pour tous les indicateurs pour le béton C35/45 par rapport au béton C25/30.

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.

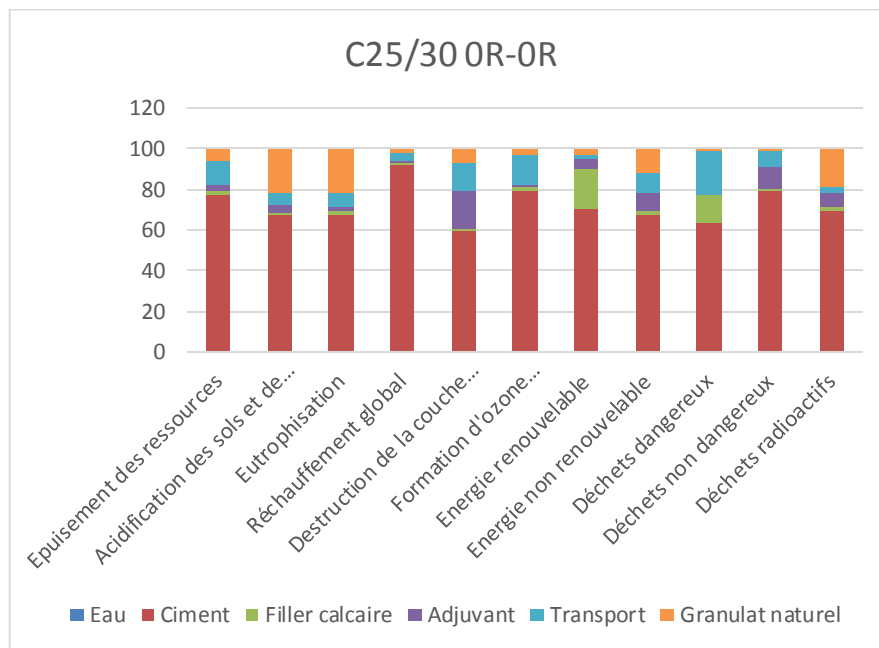
Ainsi il est primordial de retenir que les conclusions énoncées ci-dessus ne peuvent pas être généralisées, elles ne sont valables que pour les compositions de bétons analysées.

Il faudra démontrer dans la suite de l'étude 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.

Il faudra également être très vigilant dans la suite de l'étude sur la description de la méthode ACV notamment en ce qui concerne le modèle ACV utilisé pour les éléments des ICV intégrés. Une attention particulière sera portée sur l'application des facteurs de caractérisation conformément à la norme NFEN 15804.

A.3 Analyse complémentaire au rapport précédent : analyse d'impact des étapes du processus

Avant de réaliser les études de sensibilité au transport, nous proposons ci-après une étude d'impact (réalisée à partir des résultats Simapro) pour identifier les étapes du processus qui ont un fort impact sur les résultats ACV. Ces études d'impact sont présentées Figure 7 pour quelques bétons C25/30.



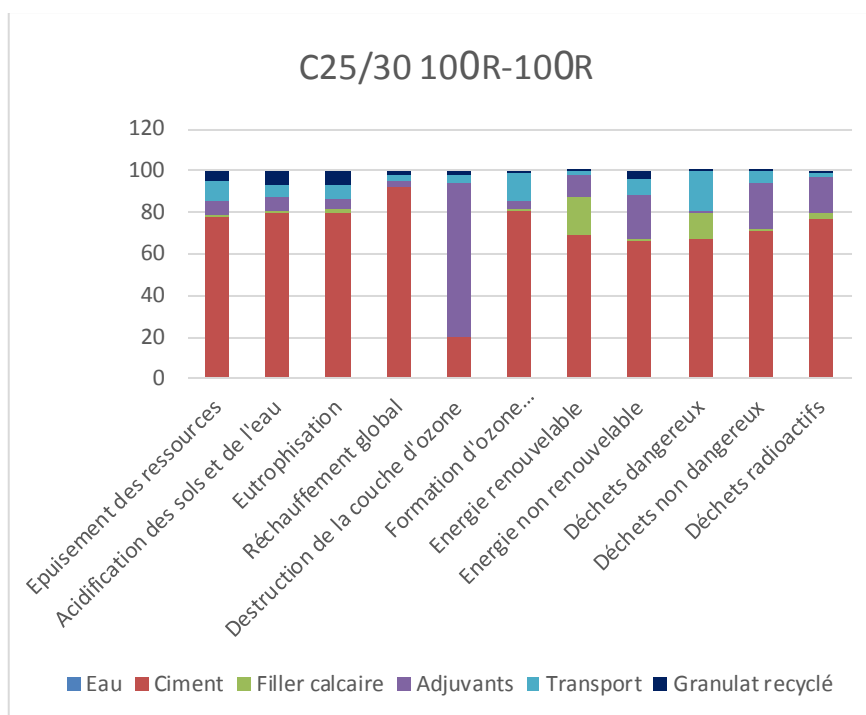
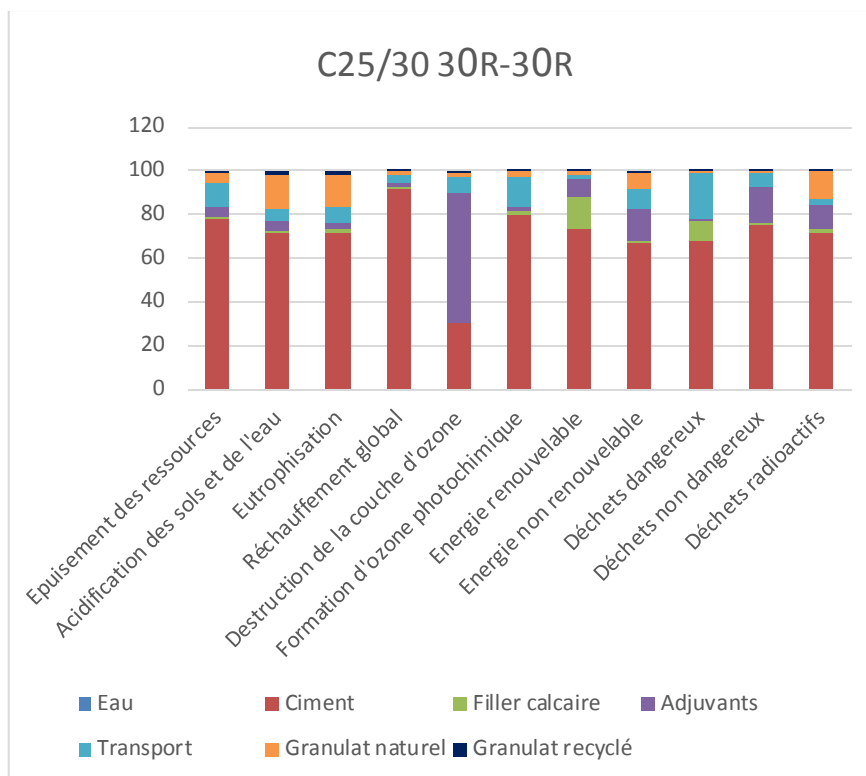


Figure 7 Étude d'impact- ACV tranche 2 Simapro

Cette étude d'impact confirme la prédominance de l'influence du ciment sur la plupart des indicateurs environnementaux.

A.4 Recommandations en fin de première phase

Il serait intéressant 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). Cette approche permettrait d'analyser l'effet réel de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés.

Il faudrait considérer 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.

Remarque : 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.

Le sujet de la carbonatation, très discuté au niveau européen notamment, pourrait être abordé, 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 ; reste que ce sujet de la carbonatation est difficile à intégrer dans cette étude par manque d'information sur les compositions des bétons parents de démolition et donc sur leur potentiel de carbonatation.

Enfin, la méthode ACV utilisée sera affinée pour améliorer sa robustesse et son adéquation avec les indicateurs d'impact de la norme EN 15804, notamment en ce qui concerne les indicateurs déchets. Pour mémoire, la réalisation des travaux de cette première phase en tranche 2 du PN, (étude entre 2014 et 2015), coïncidait avec le passage des FDES aux DEP et les méthodes de calculs n'avaient pas nécessairement été suffisamment consolidées ce qui devra être fait dans la suite de l'étude.

B Bétons étudiés : compositions et propriétés

Pour cette phase de l'étude réalisée en tranche 4, des formulations optimisées de bétons (BGR et BGN) utilisant des superplastifiants sont mises en œuvre avant de réaliser leurs ACV. L'optimisation des formulations a permis de conserver la même teneur en ciment pour des résistances mécaniques proches, avec une valeur minimale garantie. Les compositions étudiées sont issues d'un travail de Doctorat du Laboratoire ICube (Deodonne, 2015) au cours duquel les compositions à 0% et 100% ont été réalisées. Les compositions à 10 et 30% sont réalisées au cours de cette deuxième phase de l'étude (action 3.4, tranche 4) et les résultats des propriétés des bétons à l'état frais et durci sont présentés dans ce document.

Ainsi, les compositions de bétons sont réalisées à volumes égaux de constituants (hormis le dosage en adjuvant) et quatre taux de substitution sont proposés : 0, 10%, 30% et 100%.

Le détail de la méthode de formulation utilisée est donné en annexes. Les informations principales sont données ci-après.

B.1 Matériaux et Méthodes de formulation :

Un ciment CEM I 52,5 N de l'usine Lafarge de Saint Pierre la Cour a été utilisé. Sa composition et ses caractéristiques sont données en annexes. Les granulats recyclés utilisés sont ceux fournis dans le cadre du PN, . L'adjuvant superplastifiant avait été fourni par l'entreprise CHRYSO pour une thèse réalisée au laboratoire ICube, sa composition ne peut être transmise au PN (Deodonne, 2015).

Pour rappel, Les granulats naturels concassés (GNC) proviennent des carrières Lafarge de Sandrancourt (78) pour le sable 0/4 mm et de Givet (08) pour les granulats plus grossiers (4/10 mm et 6,3/20 mm). Les granulats recyclés sont issus d'une production spécifique de plateforme des Docks de Limeil-Brévannes « DLB » de Gonesse (95).

Objectifs visés pour les bétons :

- Classe de résistance visée : C25/30, classe de résistance minimale acceptable : 20/25 MPa
- Consistance visée : S4 (obtenue par ajout d'adjuvant)
- Classe d'exposition : XC1

Remarque : cette classe d'exposition conduit à une valeur limite acceptable C20/25 selon la norme NF EN 206-1 ; comme nous utilisons un CEM I 52,5, nous avons conservé un objectif C25 /30.

Selon la norme NF EN 206-1, ces objectifs conduisent à un dosage minimum en ciment de 260 kg/m³ et un rapport E/C maximal de 0,65, valeur utilisée pour ces formulations. Afin de n'étudier que l'influence de la substitution du granulat naturel par le granulat recyclé, le rapport E/C et le dosage en ciment seront gardés constants pour tous les bétons (eau constante= eau efficace).

La constitution du squelette granulaire théorique du béton de granulat naturel de référence a été réalisée en utilisant la méthode CES Dreux Gorisse. En effet, il a été montré dans la thèse de Kunwufine Deodonne que le malaxage des granulats recyclés même saturés conduit à une modification du squelette granulaire et, de fait, à une modification du module de finesse. Ainsi il n'a pas été choisi de construire le squelette granulaire à partir des méthodes d'empilement granulaire optimal, cet empilement se modifiant au cours du malaxage. Une compacité prévisionnelle de 0,8 a été supposée pour déterminer le volume de granulats.

La constitution du squelette granulaire théorique du béton de granulat recyclé a été déterminé de façon à se rapprocher au mieux de celui du granulat naturel (fitage par la méthode des moindres carrés), ici encore, l'objectif est de réduire le nombre de paramètres qui diffèrent entre les 2 bétons. Le volume de granulats recyclés à incorporer au béton tient compte des masses volumiques mesurées de ces granulats recyclés (inférieures à celles des granulats naturels).

Les compositions de bétons théoriques sont ensuite corrigées pour garantir une formulation à Eeff/C constant (coefficient d'absorption des granulats, teneur en eau des granulats et extrait sec des adjuvants).

Les compositions des bétons étudiés sont données Tableau 4, le détail des compositions (proportions sable/gravillon/gravier) sont précisées Tableau 31 à Tableau 34 en annexes « Compositions des bétons étudiés : méthode de formulation utilisée ».

Tableau 4. Compositions de bétons.

	0% GRB	10% GRB	30%GRB	100% GRB
Eau efficace(kg)	169	169	169	169
Eau totale	182	192	213	284
Ciment (kg)	260	260	260	260
Granulat Naturel (GN)I (kg)	1906	1715	1334	-
Granulat Recyclé de Béton (GRB) (kg)	-	153	458	1527
Superplastifiant (kg)	1,92	1,95	2,08	2,34

B.2 Propriétés à l'état frais et durcis des bétons de l'étude

Les résultats obtenus sur les bétons à 0% et 100% de granulats recyclés sont les suivants (essais sur cube) :

Tableau 5 résultats de consistance et résistances mécaniques

	0% GRB	10% GRB	30%GRB	100% GRB
Rc 1 (MPa)	9,1	11,2	13,5	6,8
Rc 28 (MPa)	32± 1,1	34,9± 2	33,1± 1,15	29 ± 1,0
Affaissement 5 min	200 (S4)	195 (S4)	190 (S4)	200 (S4)
Affaissement 30 min	190 (S4)	185 (S4)	155 (S4)	145 (S3)
Affaissement 90 min	190 (S4)	160 (S3-S4)	Non mesuré	70 (S2)

Remarque 1 : l'objectif de la thèse (Deodonne, 2015) lors de sa réalisation était de garder les mêmes proportions volumiques des constituants, c'est pour cela que le dosage en eau des bétons avec granulats naturels n'a pas été diminué, même s'il aurait pu l'être la valeur minimale requise par la norme (C20/25) étant atteinte.

Remarque 2 : les bétons à 10 et 30% de GRB ont été coulés immédiatement après le malaxage, ceux à 0 et 100% ont été coulés à l'issue des mesures d'affaissement (90 min), cette différence contribue à expliquer l'écart entre les résultats pour le 0% GRB et les 10 et 30%. Une mise en place tardive dans les moules nuit à la bonne compacité des bétons.

Remarque 3 : les périodes de réalisation des bétons ne sont pas les mêmes (+ de 1 an entre les bétons 0%GR, 100%GR et les bétons 10%GR, 30%GR). Les caractéristiques de l'adjuvant utilisé, formulé spécifiquement pour l'étude, ont pu évoluer entre les 2 périodes.

Les résultats de résistance mécanique et de consistance sur les bétons à l'état frais et durci confirment que les objectifs visés sont atteints pour le béton de granulat naturel (0%GR). La substitution de GN par GR affecte le maintien de la consistance dans le temps. Les résistances mécaniques sont diminuées lorsque 100% de GR sont utilisés. Pour les autres dosages, compte tenu des périodes différées de fabrication des bétons, il peut être considéré que les résistances mécaniques sont identiques. Le gain de résistance à 24h pour les mélanges à 10% et 30% pourrait s'expliquer par un meilleur empilement granulaire mais cette explication doit être confirmée par de nouveaux essais sur des bétons réalisés à des périodes identiques dans des conditions strictement égales.

Les résultats obtenus valident l'utilisation de ces compositions comme compositions référentes pour cette phase de l'étude d'ACV. Lors de l'interprétation des résultats des indicateurs d'impacts environnementaux, la résistance mécanique plus faible des bétons à 100% GR sera prise en compte. Cependant, l'objectif du PN est de développer des bétons à 10% ou 30% de GR, et pour ces formulations, les valeurs sont très proches.

Lors de l'analyse des résultats d'indicateurs d'impacts environnementaux, l'effet indirect des écarts de masse volumique entre les GR et les GN sera évoqué. En effet, cette différence de masse volumique associée à l'utilisation d'une méthode de formulation des bétons en volume, conduit à des bétons avec GR qui contiennent EN MASSE moins de granulats. Cette diminution de masse génère une baisse de la masse de matériau transportée et influence l'impact transport.

C Étude de la sensibilité aux transports : territorialisation et discrimination des circuits d'acheminement des granulats.

En plus de l'influence sur l'ACV du taux de substitution en granulats recyclés dans les bétons, la sensibilité au transport des granulats (naturels et recyclés) et du béton sera analysée dans cette phase de l'étude.

Dans un premier temps l'analyse est réalisée au niveau du territoire et les distances parcourues pour acheminer les granulats vers les centrales à béton sont évaluées et comparées pour plusieurs circuits d'acheminement. Cette étude est réalisée à partir des cartographies des carrières, gravières, sablières et des centrales à béton. Le gisement de granulat recyclé pouvant être plus proche des centrales à béton que les carrières de granulats naturels dans certaines régions fortement urbanisées, nous espérons pouvoir définir selon les régions, et selon le taux de substitution de granulats naturels dans le béton, le circuit le plus avantageux, c'est-à-dire celui qui conduit à minimiser la distance parcourue par les matériaux, à savoir les granulats et le béton après fabrication en centrale. Les possibilités d'acheminement des granulats sont représentées Figure 8. Cette étude multicritère, multi circuits est justifiée en partie par les conclusions de l'étude Lafarge France, en partie 2 (Mongear - Lafarge France, 2016).

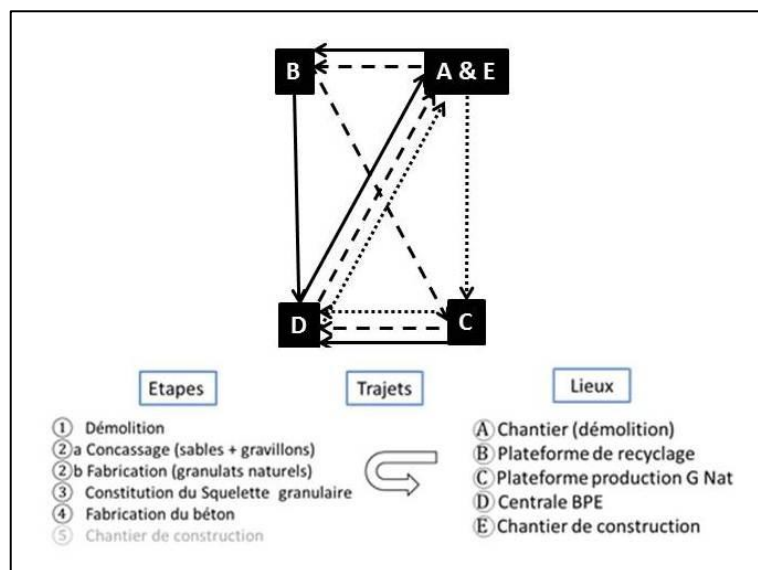


Figure 8 Représentation des possibilités d'acheminement des granulats

C.1 Définition des circuits d'acheminement et calcul des distances parcourues

C.1.1 Circuits d'acheminement

Les circuits d'acheminement des granulats recyclés et naturels étudiés sont décrits ci-dessous et Figure 9. ils correspondent aux questionnement et préconisation identifiés entre autres dans le rapport Lafarge France (Mongear - Lafarge France, 2016): « La problématique spatiale est particulièrement importante lorsque l'on considère un des leviers majeurs de développement de la filière, à savoir l'élaboration d'un mixte naturel-recyclé prêt à la production de béton. Ce mixte peut

être fait par les carrières, sur un site d'extraction de matériaux naturels par l'acheminement de matériaux recyclés »

- Fabrication des granulats recyclés sur les plateformes de recyclage ; transport vers centrales BPE.
- Fabrication des granulats recyclés sur les plateformes de recyclage ; transport vers les sites de granulats naturels les plus proches ; mélange granulats naturels, granulats recyclés (10 – 30%) sur site ; transport vers centrales BPE du mélange naturel recyclé.
- Fabrication des granulats recyclés sur sites granulats naturels ; (transport depuis chantier) ; mélange granulats naturels/granulats recyclés (10 – 30%) sur site ; transport vers centrales BPE du mélange naturel recyclé.
- Recyclage du béton sur site.

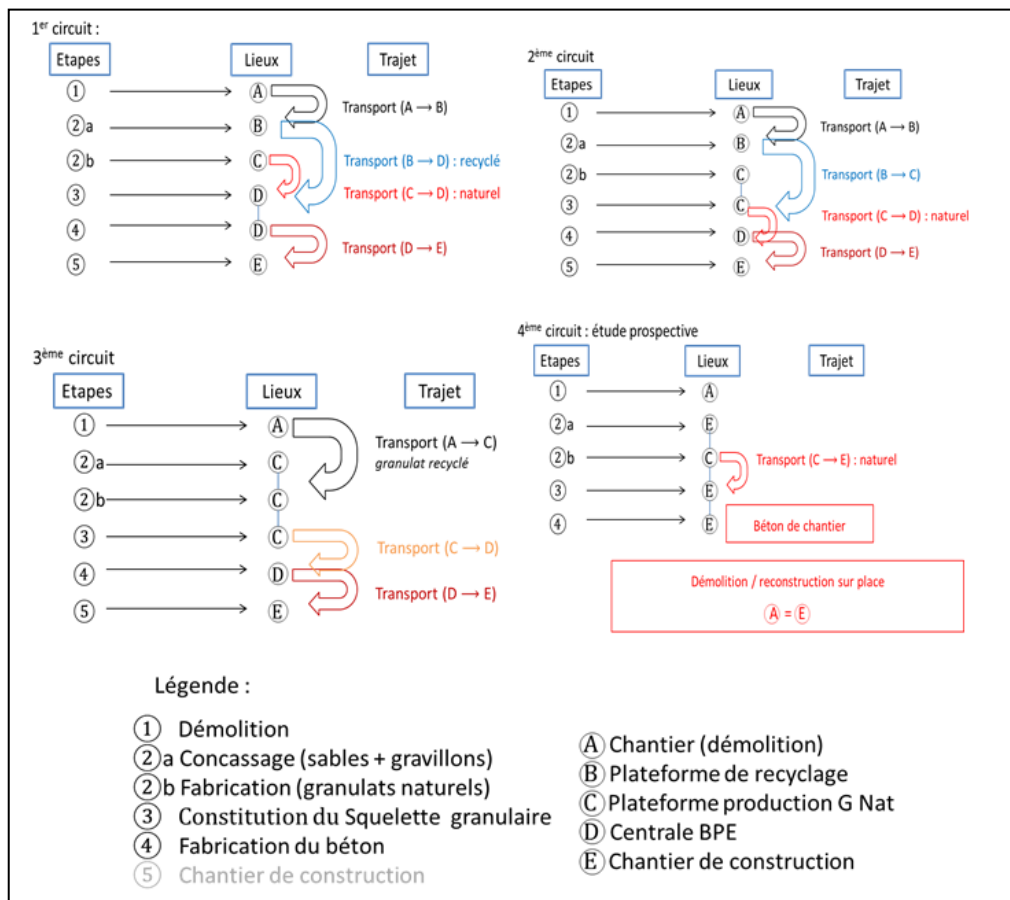


Figure 9. Circuits étudiés pour l'acheminement des granulats et le transport du béton.

C.1.2 Calcul des distances de transport associées aux circuits

L'application est faite pour 4 grandes villes : Strasbourg, Lille, Lyon et Bordeaux. Le choix des villes a été conditionné par l'étude Lafarge France, partie 3 (Mongeard - Lafarge France, 2016). Il a été relevé que « deux types de situation peuvent se présenter : la ressources en granulats naturels est rare et le recyclé peut trouver sa place. Second cas, l'écoulement des granulats recyclés sur les marchés traditionnels est difficile et rend nécessaire d'envisager d'autres débouchés ». Pour chacun de ces circuits et chacune des villes, les distances entre les sites A à E ont été calculés en faisant les hypothèses suivantes illustrées Figure 10 :

- Le chantier de démolition et celui de construction sont situés au centre-ville
- À chaque étape et selon les circuits étudiés, les 3 sites correspondant à une distance minimale entre 2 lieux sont retenus (Figure 10). Ces distances minimales sont déterminées à partir des données de localisation des différents sites issus de l'étude réalisée en tranche 3 « Étude du gisement national et analyse de sa répartition sur le territoire » - Étude Lafarge Holcim. (Mongeard - Lafarge France, 2016). Certains sites jugés de trop petite capacité ou trop spécifiques ont été écartés. Ensuite la valeur moyenne de ces 3 distances est calculée et utilisée dans l'analyse ACV.
- Les distances sont calculées en distances vol d'oiseau à partir des coordonnées GPS en système Lambert 2.

Un calcul des distances réelles routières est également fait. Il est présenté en fin de ce chapitre.

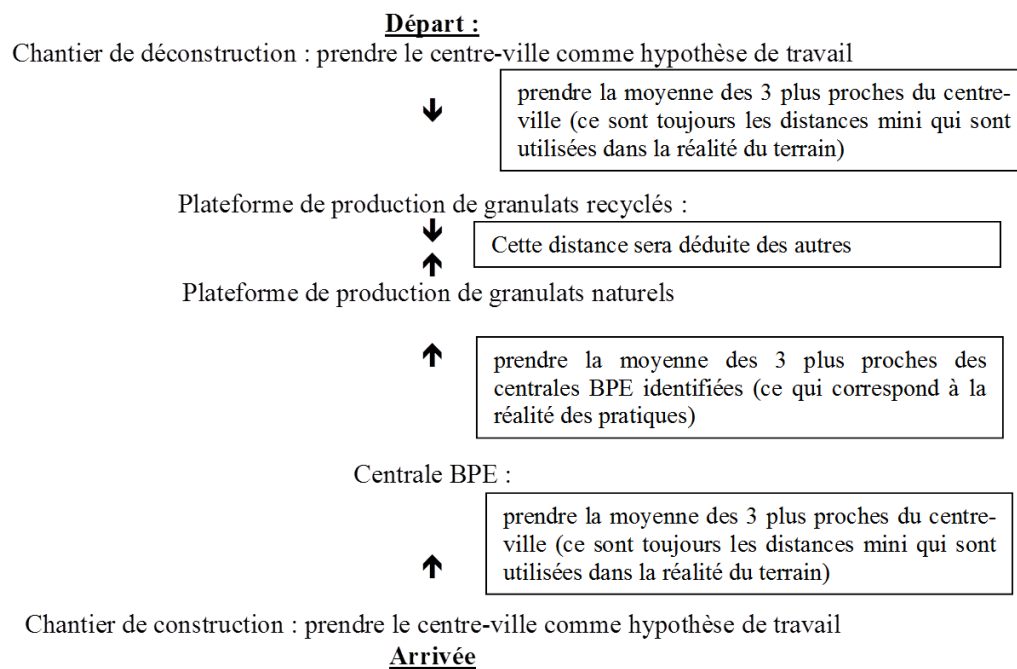


Figure 10 Mode de calcul des distances à prendre en compte

Ainsi pour chacun des circuits décrits Figure 9, les distances ente sites sont calculées telles que représentées Figure 11 à Figure 15.

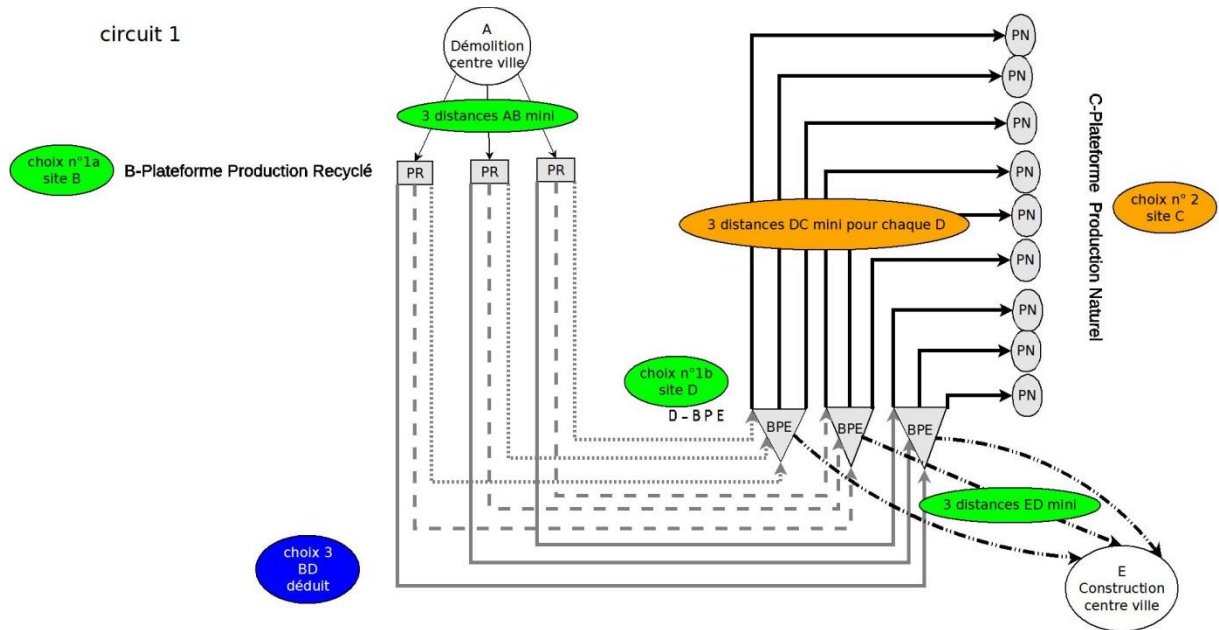


Figure 11 Calculs des distances pour le circuit 1

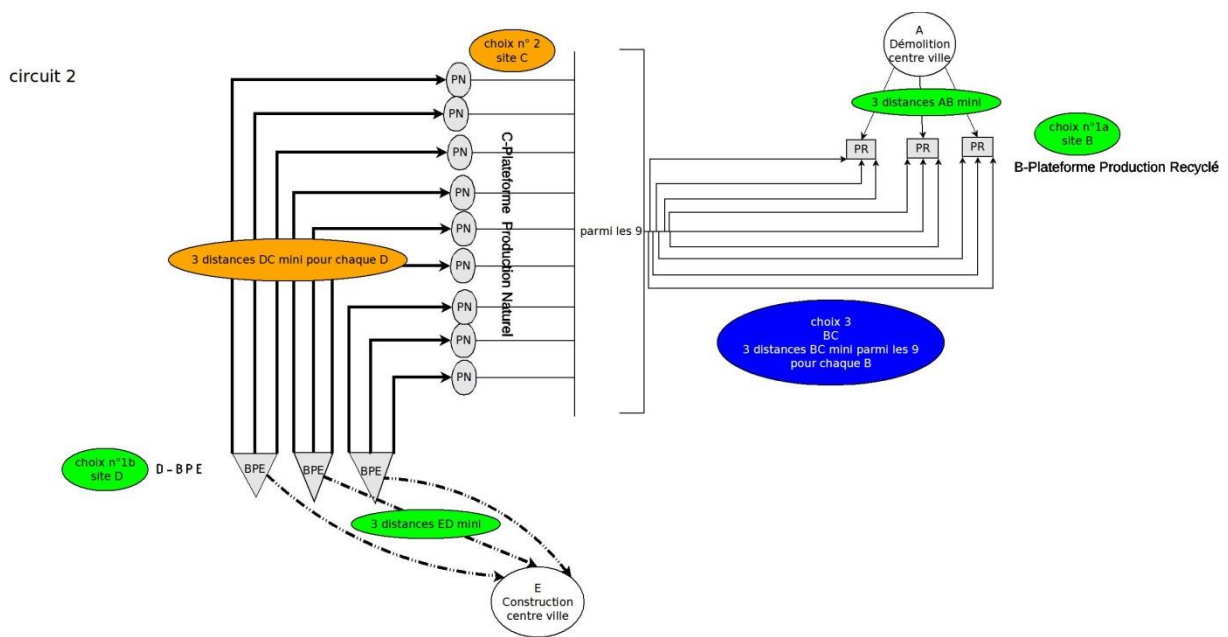


Figure 12 Calculs des distances pour le circuit 2

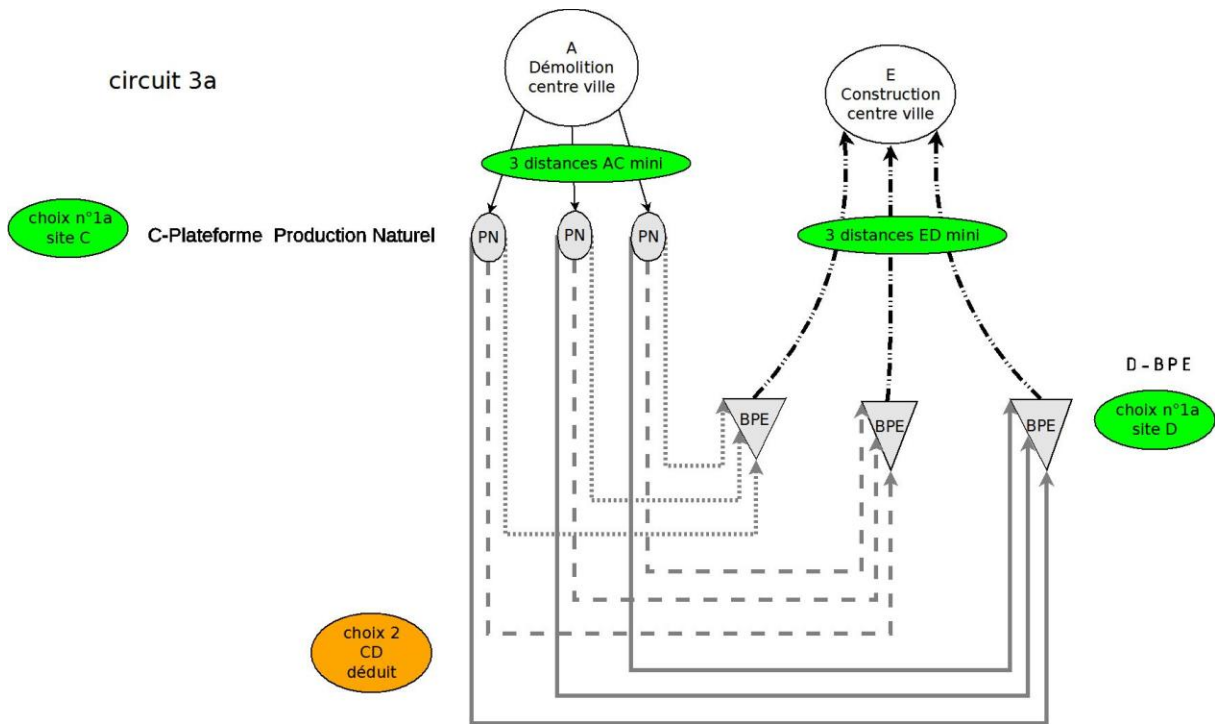


Figure 13 Calculs des distances pour le circuit 3a

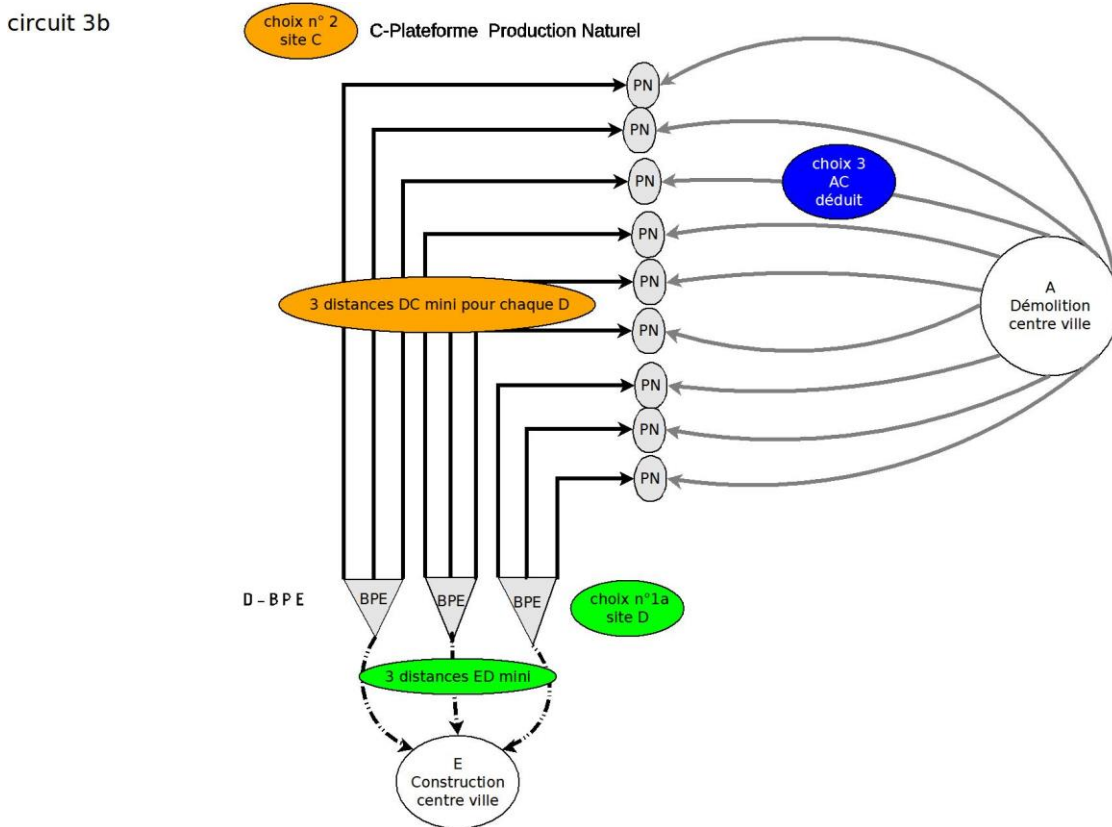


Figure 14 Calculs des distances pour le circuit 3b

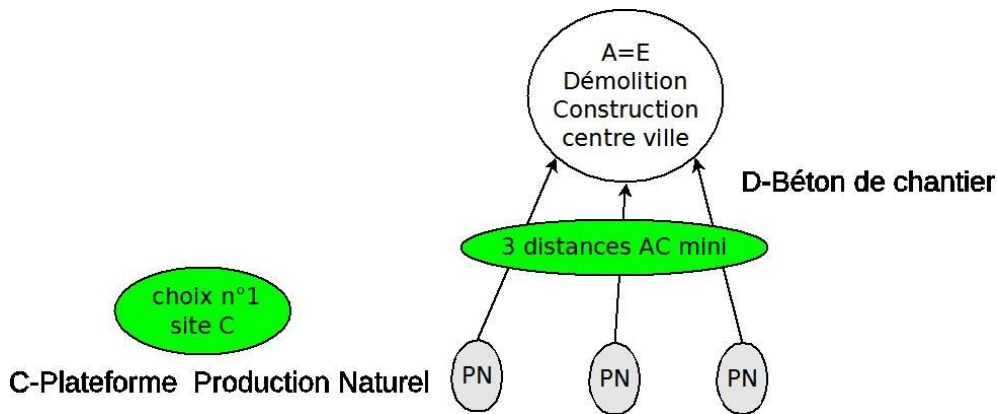


Figure 15 Calculs des distances pour le circuit 4

Les résultats de calculs de distances pour chacune des étapes des circuits pour les 4 villes sont donnés en annexes. Les feuilles de calculs avec les lieux et coordonnées des sites seront fournies dans un fichier MS Excel.

C.1.3 Nomenclature

Une nomenclature spécifique a été adoptée pour les différents échantillons, tenant compte de la ville sélectionnée (Strasbourg, Lyon, Bordeaux ou Lille), de la teneur en granulat recyclé (0, 10, 30 ou 100%) et du circuit adopté (circuit 1, circuit 2, circuit 3a, circuit 3b, circuit 4 et circuit 0 ⁽¹⁾) :

Ville (STG, LYO, BDX, LIL, TEM ⁽²⁾)_Pourcentage (0, 10, 30, 100)_Circuit (CIR1, CIR2, CIR3a, CIR3b, CIR4, CIR0)

Par exemple, un échantillon étudié à Strasbourg, contenant 30% de granulat recyclé et réalisant le circuit 2 sera nommé STG_30_CIR2

C.2 Sensibilité aux circuits des quantités de matériaux transportés et kilomètre Part du transport (%)

On s'intéresse à la fois à la quantité transportée et aux kilomètres parcourus. Pour les circuits choisis, l'objectif est ici de faire une première analyse en « t.km » pour les facteurs circuits / composition / ville avec comme critère la quantité de granulat recyclé ou naturel transporté sur une distance.

Ensuite, l'analyse des circuits les plus pénalisants selon les villes est faite et l'influence de la composition sur l'ampleur de cette pénalité est évaluée.

Pour les circuits 1 à 3, le transport du béton après fabrication en centrale est le même, de fait il n'intervient pas dans cette analyse comparative.

Les combinaisons suivantes ne seront pas analysées car elles ne correspondent à aucune réalité :

- 0% de GR pour les circuits 3a : lorsqu'il n'y a pas de granulat recyclé d'incorporé, le choix de la plateforme de traitement des granulats naturels ne se fera pas en fonction de la distance minimale par rapport au chantier de démolition.

⁽¹⁾ Circuit 0 : porte - arrivée BPE

⁽²⁾ TEM : témoin, hors ville.

- 0% de GR pour le circuit 1, le circuit 2 et le circuit 3b, sans GR, ils sont identiques.
- 100% de GR pour le circuit 2 : lorsqu'il n'y a pas de granulat naturel dans la composition, le granulat recyclé produit sur la plateforme de recyclage ne circulera pas via la plateforme de production de granulat naturel. On garde cependant les circuit 3 qui envisagent une fabrication des granulats recyclés sur les plateformes de granulats naturels.

Ainsi l'analyse du circuit le plus pénalisant pour les compositions à 0% de GR n'a pas de sens. Il n'y a pour les BGN qu'un seul acheminement possible. L'ensemble de ces correctifs a été appliqué manuellement au tableau de traitement des données présenté en annexes.

Le circuit 4 qui correspond au « circuit court » avec un béton réalisé sur le chantier (avec ou sans granulat recyclé) est analysé à part puisque pour ce dernier le transport du béton après fabrication n'existe pas et les distances parcourues par les granulats naturels sont calculées entre leur lieu de production et le centre-ville (au contraire des autres circuits pour lesquels cette distance est celle entre leur lieu de production et la centrale BPE). Pour le comparer aux autres circuits, ce sont les sommes des distances granulats recyclés, granulats naturels et transport qui doivent être prises en compte. Son analyse sera donc faite séparément. Dans ce cas l'analyse du circuit le plus pénalisant pour les compositions à 0% de GR (bétons de granulats naturels) permet de comparer les distances entre une solution BPE ou chantier pour des bétons de granulats naturels.

Le tableau complet de calcul des valeurs en t.km pour les circuits sélectionnés est donné en annexes. Ci-dessous un exemple pour une ville donnée et un taux de substitution.

Tableau 6 – Exemple de traitement des distances parcourues par les granulats et le béton – Lille 6 30% de GR – circuit par circuit.

	Granulat recyclé			Granulat naturel			Béton			total t.km	différence min/max hors circuit 4 t.km	Tkm granulats	Max	Max hors circ 4	Min hors circ 4	T km granulat + béton	Max	Min
	km	T	t.km	km	T	t.km	km	T	t.km									
LIL_30_CIR1	5,771	0,458	2,643	17,393	1,334	23,202	3,159	2,267	7,162	33,007		25,845						
LIL_30_CIR2	36,256	0,458	16,605	17,393	1,334	23,202	3,159	2,267	7,162	46,969		39,807			33,007			
LIL_30_CIR3a	34,438	0,458	15,773	17,57	1,334	23,438	3,159	2,267	7,162	46,373		39,211			46,373			
LIL_30_CIR3b	34,261	0,458	15,692	17,393	1,334	23,202	3,159	2,267	7,162	46,056		38,894			46,056			
LIL_30_CIR4				16,868	1,334	22,502				22,502	13,962	22,502	39,807	39,807	25,845	22,502	46,969	22,502

Les circuits les plus pénalisants hors circuit 4 sont donnés Tableau 7, les moins pénalisants

Tableau 8.

Tableau 7 – Circuits* les plus pénalisants hors circuit 4 selon la quantité de granulat recyclé ou naturel transporté sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	<i>CIRCUITS 1-2-3b</i>			
	8,062	7,338	33,151	10,241
10%	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>
	9,831	8,225	35,402	12,572
30%	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>
	12,892	9,99	39,807	14,472
100%	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>
	18,075	11,808	52,587	19,159

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

Tableau 8 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel transporté sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	<i>CIRCUITS 1-2-3b</i>			
	8,062	7,338	33,151	10,241
10%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	8,701	7,359	30,712	10,64
30%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	9,975	7,399	25,845	11,435
100%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	14,444	7,545	8,812	14,226

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

Une première lecture des tableaux nous indique que plus le taux de granulats recyclés est élevé, plus le circuit identifié comme pénalisant le devient. De même l'augmentation du taux de recyclé nuit aux circuits les moins pénalisants sauf pour Lille qui a une configuration particulière.

Ci-après (Figure 16) l'analyse graphique de sensibilité aux circuits du transport des granulats selon les villes et les taux de substitution, elle illustre les rapports « circuit étudié/circuit le plus pénalisant » pour chaque taux de substitution et chaque ville. Ainsi les circuits les plus pénalisants identifiés Tableau 7 sont impactés d'une valeur 1 dans la figure suivante.

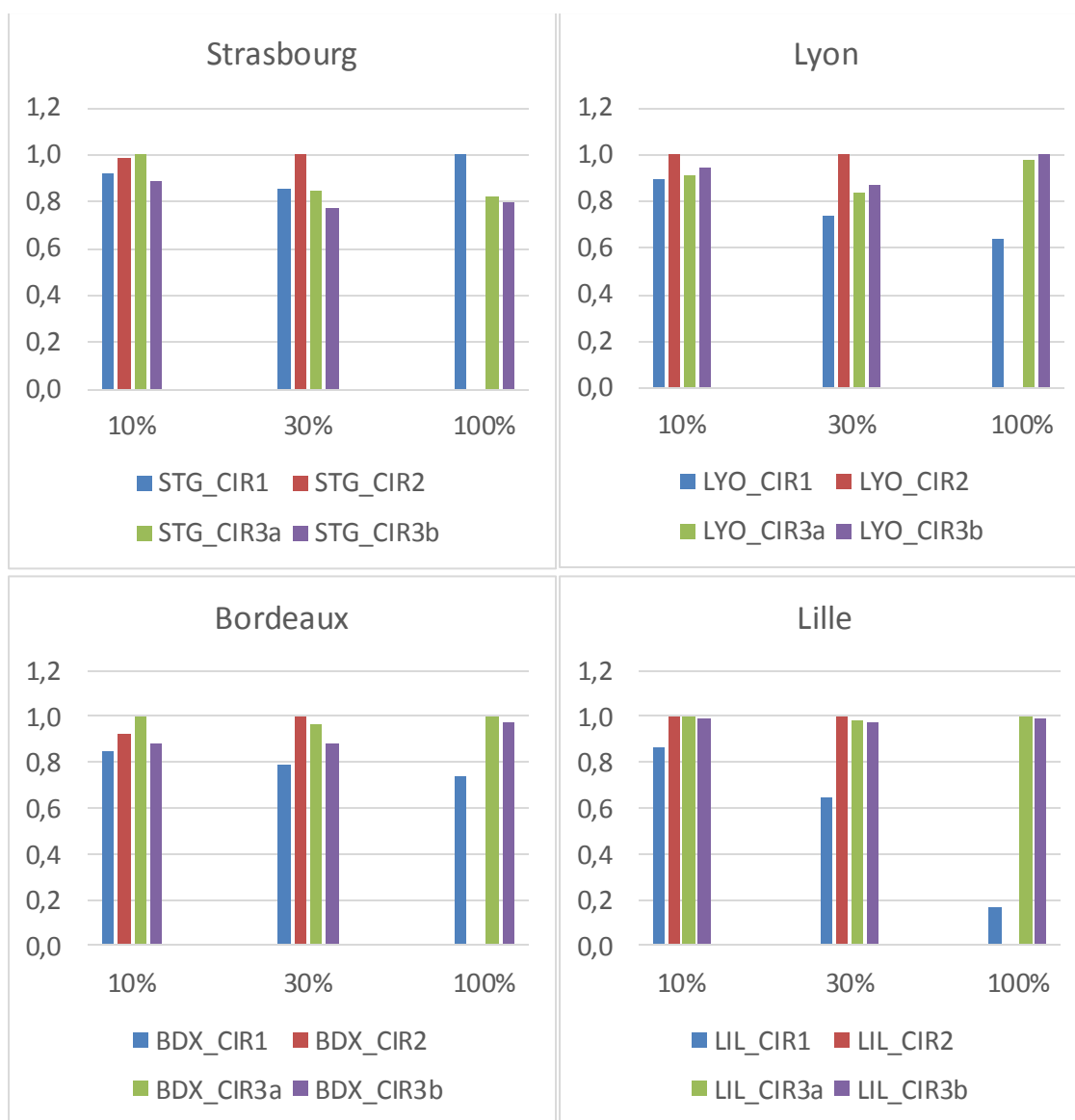


Figure 16 Analyse de sensibilité pour le transport des granulats selon les villes et les circuits

Lorsque le transport du béton est introduit, les distances prises en considération incluent le transport des granulats naturels, des granulats recyclés et du béton après sa fabrication, les résultats des circuits les plus impactant ou les moins impactant par ville et par composition restent identiques (avec des valeurs en t.km supérieures car elles incluent la distance centrale BPE – chantier de construction). Les résultats sont les suivants :

Tableau 9 – Circuits* les plus pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	CIRCUITS 1-2-3b			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10%	CIRCUIT 3a	CIRCUIT 2	CIRCUIT 3a	CIRCUIT 3a
	17,707	14,733	42,737	21,333
30%	CIRCUIT 2	CIRCUIT 2	CIRCUIT 2	CIRCUIT 2
	20,582	16,345	46,969	23,026
100%	CIRCUIT 1	CIRCUIT 3b	CIRCUIT 3a	CIRCUIT 3a
	25,108	17,62	59,137	26,982

Tableau 10 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	<i>CIRCUITS 1-2-3b</i>			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	16,577	13,867	38,047	19,989
30%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	17,665	13,754	33,007	22,049
100%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	21,477	13,357	15,362	40,574

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

Lorsque le trajet centrale BPE – chantier est inclus, l’augmentation du taux de recyclé ne nuit plus systématiquement aux circuits les moins pénalisants.

En intégrant le circuit 4, les résultats des circuits les moins impactant sont bien évidemment modifiés, le circuit le moins impactant est toujours le circuit 4.

Tableau 11 – Circuits 4* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	9,347	7,401	32,15	12,076
10%	8,41	6,659	28,929	10,866
30%	6,542	5,18	22,502	8,452
100%	0			

Une première lecture de ces tableaux indique que l’effet du taux de substitution sur les transports n’est pas le même lorsque on intègre le trajet BPE-chantier. Plus le taux de recyclé est élevé, moins le circuit est pénalisant (pour les circuits les moins pénalisants)

Ci-après (Figure 16) l’analyse graphique de sensibilité aux circuits du transport des granulats **et du béton** selon les villes et les taux de substitution. Comme précédemment, elle illustre les rapports « circuit étudié/circuit le plus pénalisant » pour chaque taux de substitution et chaque ville. Ainsi les circuits les plus pénalisants identifiés Tableau 9 sont impactés d’une valeur 1 dans la figure suivante.

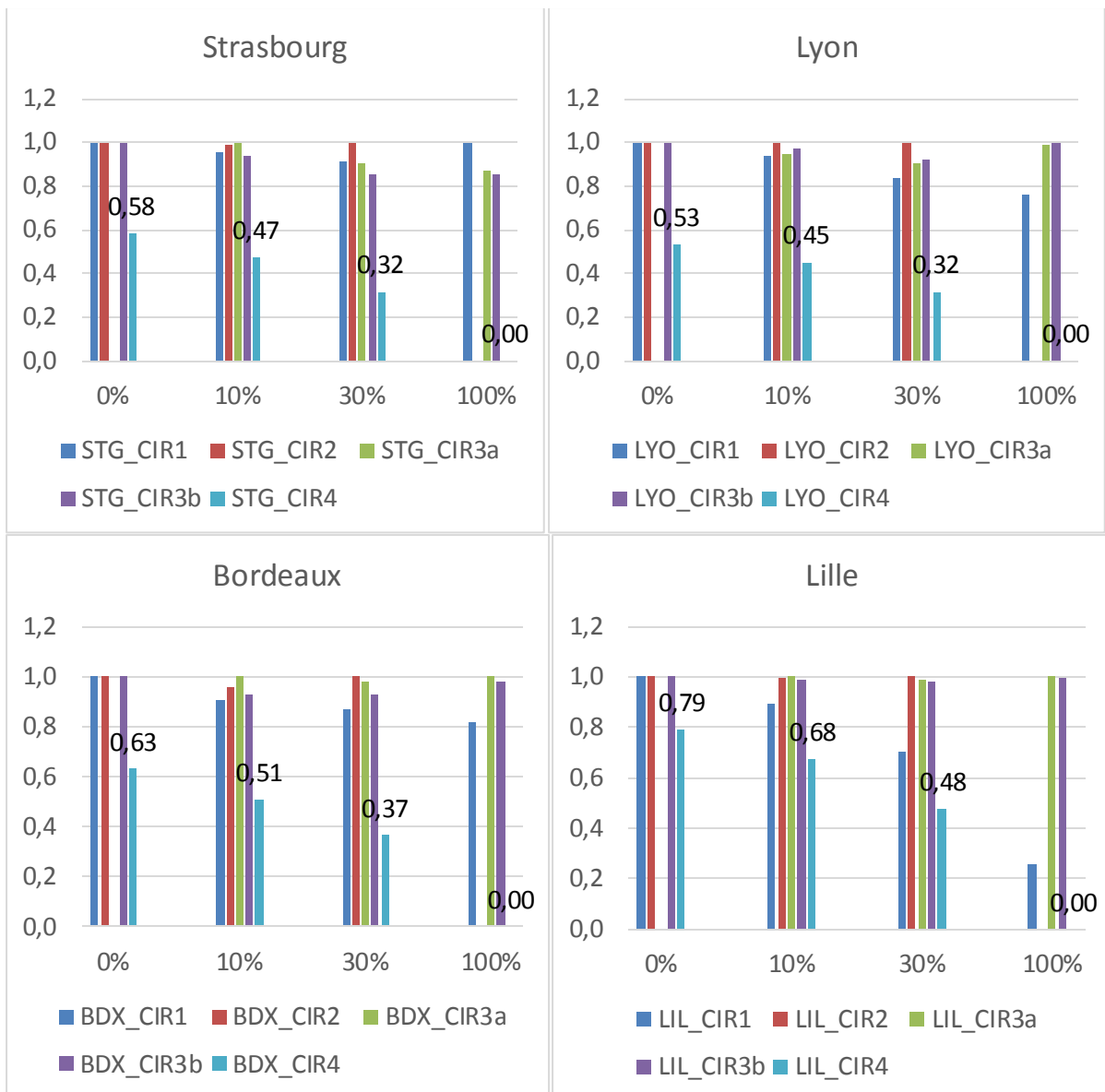


Figure 17 Analyse de sensibilité pour le transport des granulats et du béton selon les villes et les circuits

C.3 Analyse des circuits pénalisants

Analyse hors circuit court.

A la lecture des tableaux précédents et de la Figure 16, il ressort que les villes n'ont pas les mêmes répartitions territoriales des sites de production des granulats naturels et recyclés et des centrales BPE.

Cependant, **le circuit 2 reste majoritairement le plus pénalisant**, c'est le circuit qui envisage le plus d'étapes, il correspond à un transit par la plateforme de recyclage puis un pré-mélange sur le site de production des granulats naturels. Ce circuit n'est pas considéré pour les compositions à 100% de granulats recyclés car il ne correspond à aucune situation réelle : lorsqu'il n'y a pas de pré-mélange naturel/recyclé, le granulat recyclé ne transite pas par la plateforme de granulat naturel, il est

directement acheminé de la plateforme de recyclage à la centrale BPE ; sauf s'il est élaboré sur cette plateforme de granulats naturels (dans le cas des circuits 3a et 3b).

La ville de Strasbourg se distingue par le fait que, contrairement aux 3 autres villes, le circuit 1 n'est pas le moins pénalisant alors que c'est celui qui envisage le moins d'étape, c'est le circuit 3b qui est préférentiel pour cette ville. Ce constat est dû à un éloignement des plateformes de recyclage et des centrales BPE : la distance B-D est élevée. Il faut cependant relativiser cette analyse, car les écarts entre les différents circuits aux différents taux de substitution sont modérés pour cette ville : 20% d'écart maximum (Figure 16).

Les écarts entre les scénarios pour **la ville de Bordeaux** restent également faibles avec 25% d'écart au maximum (pour la composition à 100% de granulats recyclés) entre le circuit le plus pénalisant et le circuit 1 qui est le moins pénalisant. Les circuits 2 et 3 sont alternativement plus ou moins consommateurs de t.km selon la proportion de granulats recyclés, mais les variations restent faibles.

En ce qui concerne **la ville de Lyon**, le circuit 1 est nettement avantageux dès lors que 30% de granulats recyclés sont utilisés (36% d'amélioration à 100% de GR). Les faibles distances de la plateforme de recyclage à la centrale BPE (B-D) en sont la cause.

Pour ces trois villes (Strasbourg, Bordeaux, Lyon), les valeurs considérées en T.km restent dans une fourchette 7,3-19,2 t.km, pour l'ensemble des compositions et des circuits étudiés.

La ville de Lille présente une répartition territoriale très différente de celle des 3 autres villes puisque la plage de variation est de 8,8 t.km à 52,6 t.km, fonction du circuit envisagé et de la proportion de granulats recyclés (Tableau 7 et

Tableau 8). Les tableaux donnés en annexes indiquent que c'est le transport des granulats naturels qui impacte très fortement ces valeurs, très peu de sites de granulats naturels sont situés en périphérie proche du centre-ville. Pour cette ville, le circuit 1 est nettement préférentiel surtout à des taux de substitution élevés. Pour cette ville ou des villes à configuration équivalente, il pourra être intéressant de préconiser le circuit 1 et un dosage en granulat recyclé important pour diminuer cet impact du transport.

Influence du taux de substitution des granulats recyclés

A la lecture des tableaux précédents, il ressort que selon la ville, et le processus étudiés (jusqu'à la centrale BPE ou jusqu'au chantier de construction) l'influence du taux de granulats recyclés n'évolue pas de façon identique.

Ceci est normal car la somme des t.km est calculée selon

$$t.km = M_{Rec} \times D_{Rec} + M_{Nat} \times D_{Nat} + M_{bét} \times D_{bét}$$

Un taux élevé en recyclé entraîne : une augmentation de M_{Rec} , une baisse de M_{nat} et Une baisse de $M_{bét}$ (masse volumique du béton est diminuée car la masse volumique des granulats recyclés est plus faible que celle des granulats naturels à volume constant).

Remarque : les taux de substitution sont en volume et un taux de substitution de 10% en Gr n'entraîne pas une baisse de 10% du fait des différences de masses volumiques entre les recyclés et les naturels.

En contrepartie, les distance D_{Rec} , D_{Nat} et $D_{Bét}$ ne sont pas les mêmes selon les villes et les circuits sélectionnés.

Ainsi, en raison de territorialisations des sites différents d'une ville à l'autre, l'augmentation du taux de recyclés influence différemment la somme des t.km parcourues lorsque les circuits les moins pénalisants sont sélectionnés. Ces évolutions sont illustrées Figure 18

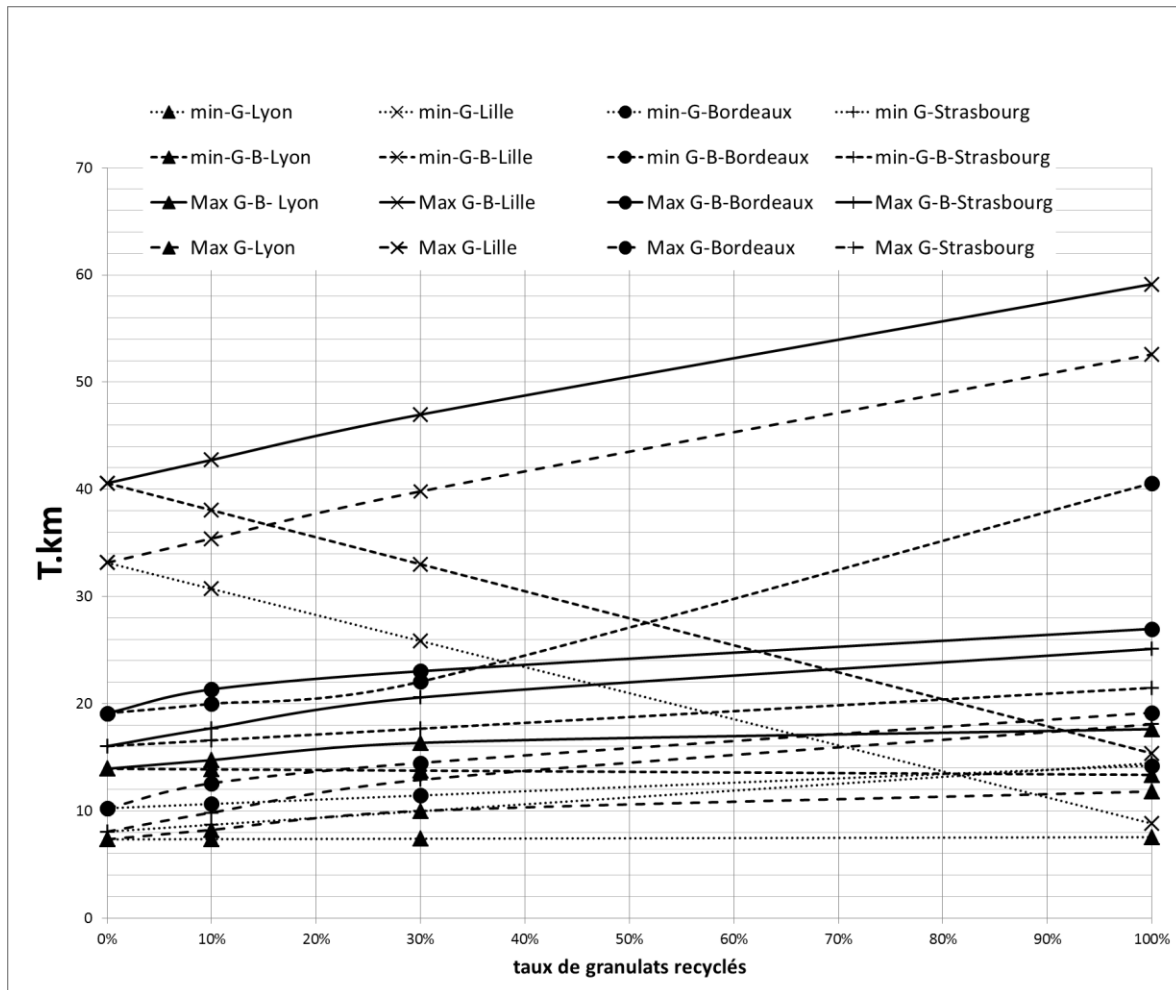


Figure 18 Evolution des t.km selon le taux de recyclés pour les circuits les plus ou moins pénalisants des villes concernées (G = transport des granulats ; G-B = transport des granulats et du béton)

En partie D.3.2 du rapport, l'influence de ces écarts (de valeurs en t.km) sur les principaux indicateurs d'impacts environnementaux sur l'ACV sera analysée.

Analyse avec étude du circuit court : circuit 4.

Comme attendu, l'introduction du circuit court (circuit 4), pour lequel les granulats recyclés sont fabriqués in situ sur le chantier de démolition/reconstruction et le béton est fabriqué sur ce même

chantier, conduit systématiquement à des valeurs inférieures (en t.km). Une comparaison des valeurs du Tableau 10 et du Tableau 11 illustre cette remarque.

La prise en compte du transport du béton de la centrale BPE au site de construction ne modifie pas les analyses précédentes en ce qui concerne le circuit le plus pénalisant, puisque le site BPE a été choisi systématiquement parmi les plus proches du centre-ville. On notera également que pour la ville de Lille, même si ce circuit court présente des valeurs réduites par rapport aux autres, ces valeurs restent élevées dans l'absolu et sont moins diminuées par la suppression du trajet BPE-Centre-ville. L'impact fort du trajet GN-BPE ou GN-centre-ville reste prédominant (Figure 17).

Dans la suite du rapport, il sera possible de déterminer, pour ces circuits les plus pénalisants identifiés Tableau 9, la contribution des transports (granulats + béton) par rapport à l'ACV complète des formulations.

C.4 Comparaison des distances à vol d'oiseau et routières

Afin d'apporter un éclairage supplémentaire à cette étude de territorialisation, les distances à vol d'oiseau et distances routières ont été comparées pour plusieurs sites. Ces comparaisons de distances site concerné <-> centre-ville sont présentées

Tableau 12.

Tableau 12- comparaison des distances à vol d'oiseau et distances routières

Centre de traitement	Distance au centre par la route	Distance au centre à vol d'oiseau		A : chantier de déconstruction	E : chantier de construction							
Ostwald - HOLLICIM - Est Granulats	4	2,5	57%	Gra. Nat. L C	Stras.	Lillers - COLAS - Scredg Keystelin - BOULONNAIS - Keystelin	1,8	1,3	35%	Gra. Nat. L C	Lille	
Lingolsheim - HOLLICIM - Holcim Granulats	6,4	4,7	36%				29,3	22,2	32%			
Oesch - INDEPENDANT TS - Sabl. OESCH	8,8	6,9	28%				Auby - EUROVIA - EIJL	32,9	25,1			31%
EQIOM granulats Carrière d'OSTWALD Leonhart	6,6	4,2	55%	Plateforme de recyclage B	Stras.	BDN Matériaux	0,55	0,4	29%	Plateforme de recyclage B	Lille	
Schroll	9,1	4,8	89%				UMN-STB	4,3	3,5			22%
	9,8	5,5	78%				BDN Matériaux	4,4	3,4			30%
HOLLICIM B. Alsace	2,6	1,4	84%	Centrale BPE D	Stras.	Boistrancourt - Vicat - B.G.I.E	1,7	1,2	38%	Centrale BPE D	Lille	
BDF Alsace - HOLLICIM	5,7	4,0	43%				LOOS - Cemex - BDF Nord & Normandie	5,1	3,7			38%
UNIBETON - Calcia	7,1	4,8	49%				Ronchin - Calcia - UNIBETON	6,1	4,9			24%
DP Granulats - ASSOCIATION - Delmonico	2,4	2,1	16%	Centrale BPE D	Lyon	Calc Gir - GSM - CALCAIRES GIRONDINS	2,5	2,2	14%	Gra. Nat. L C	Bordeaux	
Vaise - LAFARGE - CSL	5,3	4,1	31%				Brazza - Malet - Sablière de Guyenne	4,2	3,3			26%
St-Fons - LAFARGE - CSL	8,9	5,5	61%				Stema - Importateur - Stema Shipping	9	6,8			32%
Serdex	2,9	2,1	40%	Plateforme de recyclage B	Lyon	SBVM	5	3,7	36%	Plateforme de recyclage B	Bordeaux	
NCI Abilis	4	3,4	16%				Point P	5	4,6			9%
Carrière Combe Chavanne	4,7	3,7	26%				Sogirem	6,6	6,0			10%
Cemex - BDF Rhône Alpes	3,1	2,2	44%	Centrale BPE D	Lyon	Brazza - Calcia - UNIBETON	4	2,4	65%	Centrale BPE D	Bordeaux	
Lafarge - RAA	3,3	2,9	12%				Bdx - Point P - Point P	4,2	3,6			16%
Bouygues - Colas	5,6	3,5	59%				Aquitaine B. - Independants - AQUITAINE BETON	8	5,4			47%

C.5 Présentation d'un circuit court : exemple du chantier de MuttENZ en Suisse

Le chantier de la Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) répond parfaitement aux attentes du circuit n°4 car le chantier de démolition se situe à moins d'une centaine de mètres du chantier de construction (Figure 19). Le nouveau bâtiment de la FHNW est situé à MuttENZ (canton Basel-Land) dans le quartier « Polyfeld », qui se trouve juste à côté de la gare, non-loin de l'ancien bâtiment qui est (actuellement) toujours utilisé et en fonctionnement. Le bâtiment culminera à 64 m de haut et aura 12 étages. Il est prévu qu'il y ait un sous-sol, les fondations seront constituées de 160 pieux descendant entre 20 et 30 m de profondeur.

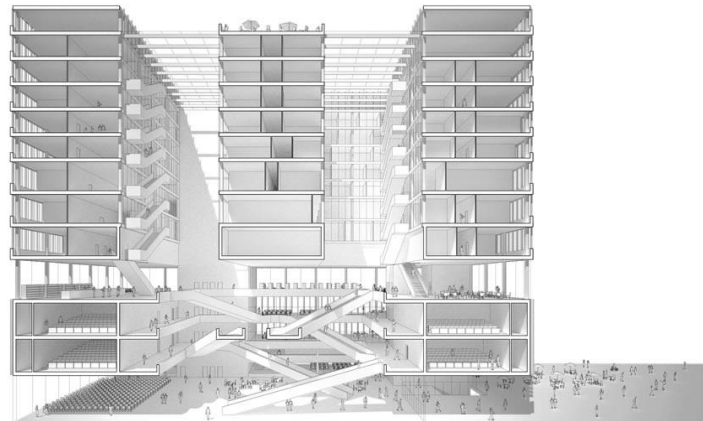


Figure 19 Illustration d'un chantier avec circuit court. Muttenz à Bâle

C.6 Conclusion : sensibilité aux transports sur une analyse en t.km

L'analyse comparative des circuits sur l'acheminement des granulats conduit à identifier pour la majorité des villes le circuit 1 comme le circuit le moins pénalisant. Ce circuit est celui qui consiste à préparer séparément les GR et les GN sur leur plateforme respective puis à acheminer les granulats sur le site de la centrale BPE. Le choix d'un prémélange sur le site de production des GN conduit à pénaliser le circuit, ce qui se traduit par une augmentation de la valeur t.km. Selon les villes la solution la plus pénalisante sera celle qui consiste à élaborer le GR sur le site de la plateforme de recyclage avant d'être acheminé sur le site des GN (circuit 2 solution la plus fréquemment pénalisante) ou bien celle qui consiste à élaborer le GR sur le site de production des GN.

Quelques villes ont des configurations particulières, ainsi pour Strasbourg le circuit 1 n'est pas le moins pénalisant alors que c'est celui qui envisage le moins d'étape. Ce constat est dû à un éloignement des plateformes de recyclage et des centrales BPE. Lille présente une répartition territoriale différente qui conduit à des écarts de valeurs en t.km entre les différents circuits de plus grande amplitude et une nette préférence pour le circuit 1. Pour cette ville, très peu de sites de granulats naturels sont situés en périphérie proche du centre-ville. Pour cette ville ou des villes à configuration équivalente, il pourra être intéressant de préconiser le circuit 1 et un dosage en granulats recyclés important pour diminuer cet impact du transport.

L'augmentation du taux de recyclés nuit aux circuits sauf pour la ville de Lille du fait de l'éloignement des sites de GN. Cette influence du taux de recyclés se retrouve dans la détermination de la valeur t.km calculée selon l'équation ci-après sauf pour la ville de Lille pour laquelle le circuit 1 est très préférentiel, les écarts de valeurs en t.km entre les circuits n'excédant pas 15% pour les prémélanges.

$$t.km = M_{Rec} \times D_{Rec} + M_{Nat} \times D_{Nat} + M_{bét} \times D_{bét}$$

La prise en compte de l'acheminement du béton de la centrale jusqu'au chantier ne modifie pas les conclusions de cette analyse puisque cette distance est identique quel que soit le circuit étudié sauf lorsqu'un circuit court est introduit. Lorsque cet acheminement de béton est pris en compte, l'effet du taux de substitution sur les transports n'est pas le même. L'introduction du circuit court (circuit 4), pour lequel les granulats recyclés sont fabriqués in situ sur le chantier de démolition/reconstruction et le béton est fabriqué sur ce même chantier, conduit systématiquement à des valeurs inférieures (en t.km). Ce circuit court n'est pas irréaliste puisque quelques chantiers pilotes ont été réalisés avec cette approche. Le chantier de Bâle est donné ici en exemple.

Cette étude a été faite en considérant les distances à vol d'oiseau entre les sites. Une étude complète des distances routières et à vol d'oiseau incite à la prudence et à une éventuelle modification des conclusions qui seront obtenues pour l'étude de sensibilité du transport sur les ACV puisque des écarts allant de 14 à 65% sont observés selon les villes et les sites.

Il n'est pas possible de donner une conclusion universelle quelle que soit la ville étudiée. Une étude du territoire est indispensable pour déterminer le circuit favorable/pénalisant au taux de substitution envisagé. L'étude présentée ici confirme que sur les villes étudiées, deux ont des configurations particulières soit par un éloignement plateforme de recyclage-BPE, soit par l'éloignement du site de GN. Une recommandation pourrait être de rapprocher les plateformes de recyclage des centrales BPE lorsque le pré-mélange n'est pas envisagé.

D Analyse du Cycle de Vie des Bétons pour les circuits sélectionnés

Les analyses de cycle de vie des bétons aux différents taux de substitution en granulats recyclés pour les circuits pénalisants identifiés précédemment pour chacune des 4 villes sont comparés ci-après.

Dans le but de proposer une sensibilité aux transports de la fabrication de ces bétons, des ACV « témoins » seront effectuées préalablement :

- ACV des bétons sans prise en compte du transport des granulats et du béton
- ACV du seul transport des granulats et du béton sur les circuits identifiés pour les villes étudiées

Ainsi la sensibilité au transport sera analysée par comparaison des ACV transport par rapport aux ACV témoins et/ou aux ACV complètes (intégrant tout le processus).

Le cas du circuit 4 sera traité indépendamment comme un exemple de circuit court à suivre lorsque les conditions le permettent, par exemple dans le cas d'un chantier de réhabilitation lourde.

Des analyses d'impacts sur la contribution des granulats, du ciment, de l'eau, des adjuvants et du transport de chacun des constituants pour quelques circuits particuliers (par exemple pénalisants) complètent cette étude de sensibilité aux transports. De plus, des ACV de bétons dont la composition est artificiellement modifiée par utilisation d'un ciment contenant moins de clinker (CEM III et CEM V) sont proposées. Ces analyses complémentaires permettent de relativiser les résultats de l'analyse de sensibilité.

La partie suivante de ce rapport (partie E) est consacrée à la réalisation des ACV de deux chantiers expérimentaux. Afin d'assurer une cohérence à ce rapport dont les objectifs sont multiples, les méthodes de calcul ACV ont été calibrées de façon identique pour les deux études (description des procédés de fabrication des bétons, bases de données ICV, méthodes d'assemblages des outils de calcul...). Des ACV « tests » ont été réalisées pour consolider les méthodes et garantir l'objectivité des résultats présentés. Les ACV de l'étude de la sensibilité aux transports a été réalisée à l'aide du logiciel SimaPro, celles des chantiers expérimentaux ont été réalisées à partir du logiciel Open LCA.

La méthode de calcul ACV commune à ces deux études (bétons/circuits/villes et chantiers expérimentaux) est présentée ci-après, suivie des résultats et analyses de l'étude de sensibilité aux transports. Pour tout ce qui suit les ACV ont été réalisées selon les modules A& à A3 de la norme EN 15804, c'est-à-dire en considérant le cycle du « berceau à la porte – Cradle to gate »

D.1 Méthodologie ACV

D.1.1 Description du modèle ACV : éléments communs aux deux études

D.1.1.1 Source et bases de données

Fabrications des constituants

La fabrication du ciment correspond aux données de l'ATILH. La fabrication des granulats correspond aux données de l'UNPG, conformes à la norme NF P01-010, datant de mai 2011 :

- Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches massives,
- Module d'informations environnementales de la production de granulats recyclés.
- La fabrication de l'adjuvant correspond aux données du SYNAD (déclaration environnementale superplastifiants, mar. 2006).

Transports et Electricité

Pour l'électricité on utilise le procédé Ecoinvent « electricity, medium voltage, FR ».

Le tableau ci-dessous précise les processus utilisés pour modéliser les transports (Tableau 13).

Tableau 13 – Choix des transports.

Élément	Camion	Processus	Source des données
Granulats	> 32 t	Transport, lorry >32t, EURO 4/RER S	Ecoinvent®
Ciment	> 32 t	Transport, lorry >32t, EURO 4/RER S	
Adjuvant	< 16 t	Transport, lorry 7.5-16t, EURO 4/RER S	
Béton	16 – 32 t ⁽³⁾	Transport, lorry 16-32t, EURO 4/RER S	

La norme européenne d'émission **EURO 4** a été sélectionnée.

On s'intéresse à la fois à la quantité transportée et aux kilomètres parcourus. C'est à dire que le transport s'envisage à la charge utile maximale du camion, et on applique ensuite un prorata dans la composition des formulations étudiées. Pour cela, on inclut un processus « Transport » (en t.km) et un processus « Operation » (en km). Le t.km ne correspond pas à une masse transportée sur une distance comme habituellement. C'est une unité « fictive » qui correspond à la part de constituant (granulat, béton...) déplacée sur une certaine distance.

Pour les transports de l'étude des chantiers expérimentaux : « transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 » et « transport, freight train, Europe without Switzerland ».

D.1.1.2 Processus Fabrication du béton

Un processus « Malaxage » a été développé en tenant compte des données suivantes (Tableau 14). Les conditions de malaxage sont les mêmes pour les 4 compositions et les chantiers expérimentaux.

Tableau 14 – Données utilisées pour créer le processus « Malaxage ».

Malaxeur (m ³)	2
Durée de malaxage (s)	55
Capacité réelle (m ³ /h)*	55
Puissance (kW)	220
Énergie consommée (MJ/m ³) ⁽⁴⁾	14,4

*Donnée recueillie auprès d'une centrale BPE.

Remarque : la consommation d'eau, pour le nettoyage du malaxeur, n'est pas prise en compte. Le béton ayant une ouvrabilité S4 dans le cas de l'étude de sensibilité aux transports, il n'est pas nécessaire de le vibrer. La vibration n'est donc pas prise en compte.

⁽³⁾ Pour simuler un camion toupie.

⁽⁴⁾ 1 kWh = 3,6 MJ

D.1.1.3 Méthodes de calcul et Expression des Résultats

Ce travail est appuyé sur les normes NF EN 15804 et XP P01/064/CN. Ainsi trois méthodes de calcul sont utilisées : CML, EDIP et CED et elles sont adaptées aux exigences de la réglementation française.

Tableau 15 : Indicateurs d'impacts environnementaux pris en compte

Indicateurs d'Impact environnemental	Unité	Méthode
Consommation de ressources énergétiques <ul style="list-style-type: none"> • Énergie primaire totale • Énergie renouvelable • Énergie non renouvelable 	MJ	Cumulative Energy Demand (CED)
Épuisement des ressources	kg équivalent Sb	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Déchets dangereux	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Déchets non dangereux	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Déchets radioactifs	kg	Environmental Design of Industrial Products (EDIP)
Changement climatique	kg équivalent CO ₂	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg équivalent CFC	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Formation d'ozone photochimique	kg équivalent C ₂ H ₄	Impact-oriented characterisation (CML 2001)
Eutrophisation	kg équivalent PO ₄	Impact-oriented characterisation (CML 2001)

D.1.1.4 Commentaire sur le modèle ACV choisi

Pour cette étude et à la demande des acteurs du PN une approche spécifique a été utilisée pour ce modèle ACV. Elle consiste à utiliser des données d'inventaires déjà réalisés pour les ciments (données de l'ATILH), pour les granulats (données de l'UNPG) et pour les adjuvants (données du SYNAD). Ces données se retrouvent dans les modules d'informations environnementales des granulats, dans les ICV des ciments et dans les déclarations environnementales des adjuvants. Habituellement la démarche de réalisation d'une ACV suit le schéma suivant Figure 20.

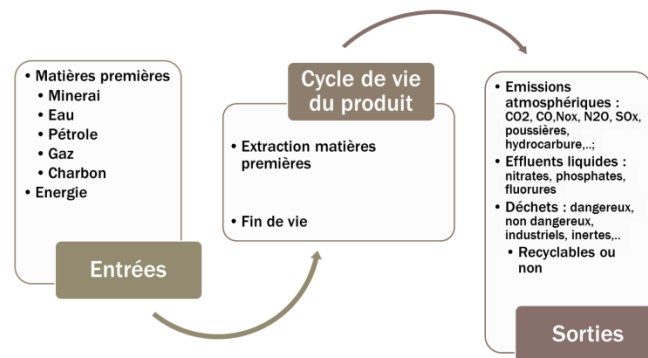


Figure 20– Schématisation de la démarche de réalisation d'une ACV.

La description de chacun des processus étape par étape conduit à renseigner les informations données en amont (« entrées » ou flux entrants). Ces informations sur les flux entrants (matières premières et énergie) sont obtenues à partir de bases de données de référence (ex : Ecoinvent).

Ensuite, un outil ACV (SimaPro, Open LCA ou autre) calcule les émissions, effluents et déchets (« Sorties » ou flux sortants).

Dans notre cas, une approche « mixte » a été utilisée.

- Pour les données « matériaux » (hors eau de composition), les processus n'ont pas été décrits. Ainsi les flux entrants et sortants issus des données d'inventaires déjà réalisés ont été directement entrés dans l'outil. Les flux sortants (émissions par ex.) ne sont pas recalculés mais directement reportés dans les inventaires.
- Pour les autres données : eau, transport, malaxage, les processus ont été décrits, les flux entrants correspondants ont été extraits de la base de données Ecoinvent et les flux sortants calculés par l'outil.

Cette approche nécessite un très lourd travail de renseignement de données (les données d'inventaires sont rentrées une par une en appliquant les facteurs de caractérisation décrits dans la norme NFEN 15-804) mais surtout une très grande vigilance afin de s'assurer de la cohérence entre les appellations des flux entrants et sortants issus des inventaires déjà réalisés et ceux réalisés par l'analyse. Les outils utilisés pour réaliser les données d'inventaires des granulats, ciment et adjuvants ne sont pas nécessairement les mêmes entre eux, ni les mêmes que ceux utilisés pour cette étude.

En résumé, l'utilisation de données d'inventaire existantes réduit le nombre de flux calculés (tous ne sont pas disponibles dans les données fournies) et conduit à une ACV dont la modélisation n'est pas parfaitement maîtrisée, ainsi il subsiste des écarts (réduits mais existants) lorsque deux logiciels sont utilisés. La consolidation des méthodes qui a été faite au cours d'un lourd travail préliminaire à cette étude a eu pour but de réduire ces écarts. Les écarts subsistants pour quelques indicateurs confirment qu'il est très risqué de comparer des ACV d'un logiciel à l'autre, et les résultats obtenus sur ces indicateurs seront analysés avec prudence.

Les résultats des ACV des granulats et du transport sont donnés en annexes. La comparaison sur les ciments n'a pas été faite puisque la nature des ciments n'était pas la même.

D.1.2 Processus pour l'étude de la sensibilité aux transports

Rappel : pour cette étude l'ACV sera réalisée à l'échelle du matériau soit au m³ de béton.

D.1.2.1 Compositions des bétons

Pour le calcul des ACV, la distinction sable, gravillon ou gravier est prise en compte, les roches meubles représentant le sable et les roches massives le gravillon et le gravier. Les compositions retenues sont présentées ci-dessous (Tableau 16).

Tableau 16– Compositions retenues.

	0% GR	10% GR	30% GR	100% GR
Eau (kg)	182	192	213	284
Ciment (kg)	260	260	260	260
Granulat naturel (kg)	1906	1715	1334	-
Granulat recyclé (kg)	-	153	458	1527
Adjuvant (kg)	1,92	1,95	2,08	2,34

D.1.2.2 Distances de transport

Une valeur moyenne (forfaitaire) de **50 km** a été fixée pour la distance « transport du ciment », pour chaque ville. Pour l’adjuvant, une distance de **165 km** a été retenue (distance à l’usine). Pour les granulats et pour le béton, la valeur est déterminée à partir des calculs présentés précédemment en partie C de ce rapport (somme des distances parcourues par les granulats).

D.2 ACV des compositions témoin sans transport

Afin de faciliter l’analyse et l’interprétation des ACV de cette étude paramétrique à trois facteurs : ville (4 valeurs), taux de GR (4 valeurs) et circuits (5 circuits car 3a et 3b). Des ACV témoins pour lesquels seuls les taux de substitutions varient ont été réalisées. Pour ces ACV témoins, les paramètres d’étude sont les suivants :

- 4 compositions (0, 10, 30 ou 100% GR),
- Transport ciment,
- Transport adjuvant,
- Pas de transport pour les granulats,
- Distance BPE / CV = 0.

Remarque : pour ces ACV témoins, le transport du ciment et de l’adjuvant est pris en compte, mais pas celui des granulats, ni du béton après fabrication. Les valeurs de ces deux derniers paramètres sont fonction du circuit choisi.

Catégorie d'impact	Unité	TEM_0_CIRO	TEM_10_CIRO	TEM_30_CIRO	TEM_100_CIRO
Epuisement des ressources	kg éq Sb	5,70E-01	5,70E-01	5,71E-01	5,72E-01
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	6,89E-01	6,85E-01	6,79E-01	6,56E-01
Eutrophisation	kg éq PO4---	9,60E-02	9,52E-02	9,35E-02	8,77E-02
Réchauffement global	kg éq CO2	2,39E+02	2,39E+02	2,39E+02	2,39E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,39E-05	1,40E-05	1,41E-05	1,43E-05
Formation d'ozone photochimique	kg éq C2H4	5,56E-02	5,56E-02	5,56E-02	5,55E-02
Energie primaire totale	MJ	2,29E+03	2,28E+03	2,27E+03	2,22E+03
Energie renouvelable	MJ	2,80E+01	2,78E+01	2,77E+01	2,69E+01
Energie non renouvelable	MJ	2,26E+03	2,25E+03	2,24E+03	2,20E+03
Déchets valorisés	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Déchets dangereux	kg	6,43E-02	6,39E-02	6,31E-02	6,02E-02
Déchets non dangereux	kg	4,65E+00	4,67E+00	4,78E+00	4,95E+00
Déchets inertes	kg	4,80E-01	4,78E-01	4,75E-01	4,62E-01
Déchets radioactifs	kg	7,40E-03	7,33E-03	7,20E-03	6,70E-03
Consommation d'eau totale	L	1,91E+05	1,88E+05	1,84E+05	1,70E+05

La comparaison entre les indicateurs d’impacts des bétons témoins est représentée Figure 21. Les valeurs illustrées correspondent aux ratios des ACV des bétons à 10, 30 et 100% de granulats recyclés et de l’ACV du béton à 0% de granulats recyclés.

On constate un écart très modéré (écart maximal = +/- 10%) entre les compositions. Ce constat n’est pas surprenant : il confirme l’effet de dilution dû à l’impact du ciment qui « écrase » les écarts entre la nature des granulats, seul paramètre (proportion de recyclé) avec la quantité d’eau et d’adjuvant qui varie entre les compositions.

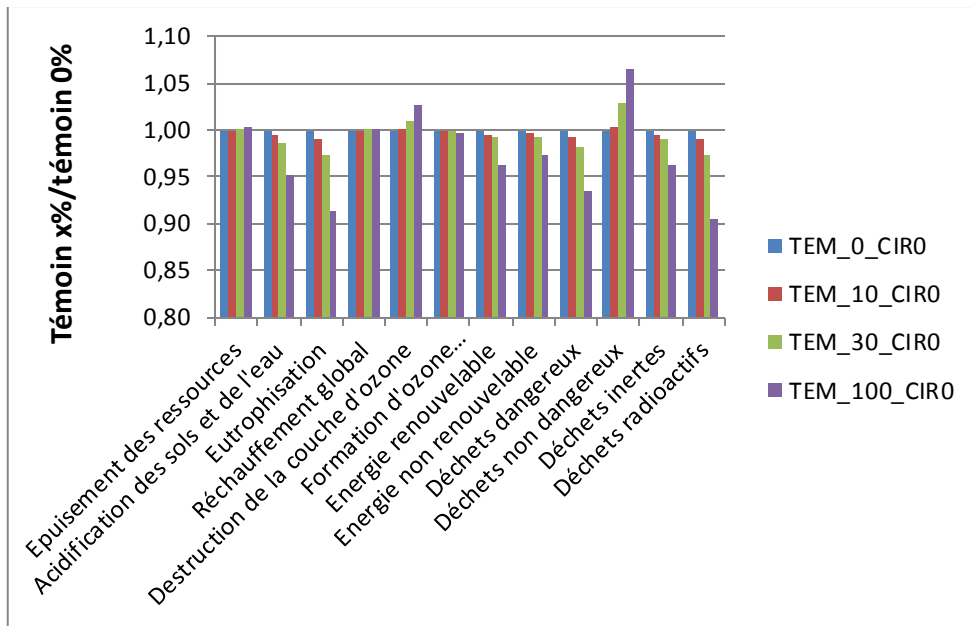


Figure 21 ACV des bétons témoins

De plus, les FDES initiales des granulats ne présentent pas des écarts très grands tels qu'illustré Figure 22, sauf pour quelques indicateurs des roches massives (acidification atmosphérique, eutrophisation, ozone photochimique) pour lesquels l'utilisation de roche massive est préjudiciable

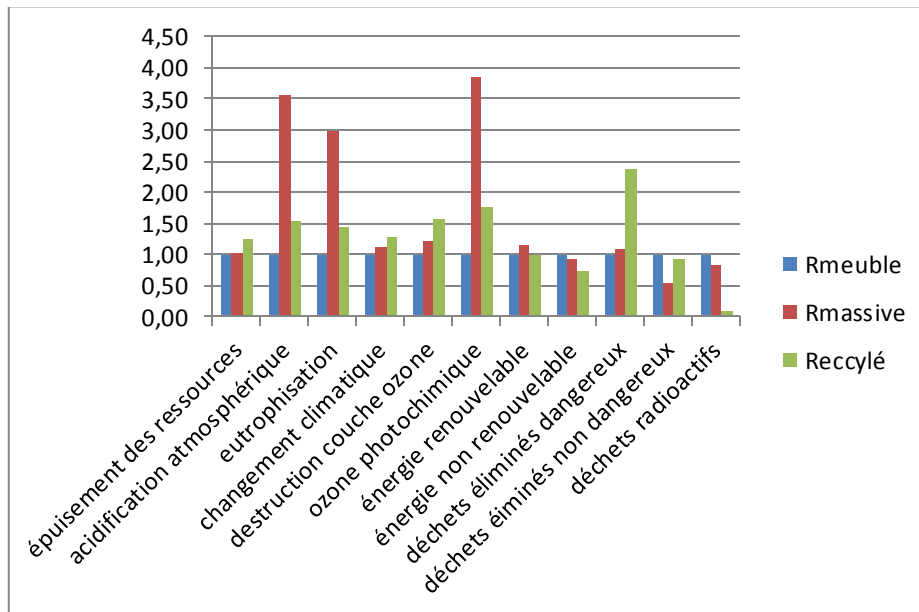


Figure 22 FDES des granulats à partir des fiches de l'UNPG

Mais pour ces indicateurs, en tenant compte de la composition (1,9 t de granulats et 260 kg de ciment), l'influence du ciment reste prédominant (4 à 5 fois supérieur) tel qu'illustré et surligné Tableau 17. La comparaison proposée ici est faite à partir des FDES initiales (UNPG et ATHIL), ainsi les incertitudes liées à la méthodologie évoquées plus haut ne peuvent intervenir ici.

Tableau 17 Influence du ciment par rapport aux roches massives aux quantités correspondant à la composition de béton

FDES UNPG/ ATHIL	Unité	1,9 T de roche massive	260 kg de ciment CEM1	Rapport impact ciment/impact roche
énergie primaire totale		1,16E+02	1,55E+03	13,4
épuisement des ressources	kg antimony-Eq	3,19E-02	5,50E-01	17,2
acidification atmosphérique	kg SO2-Eq	1,17E-01	6,21E-01	5,3
eutrophisation	kg PO4---Eq	2,24E-02	/	/
changement climatique	kg CO2-Eq	4,88E+00	2,25E+02	46,1
destruction couche ozone	kg CFC-11-Eq	5,05E-07	3,76E-10	0,0
ozone photochimique	kg ethylene-Eq	7,60E-03	3,05E-02	4,0
énergie renouvelable	MJ-Eq	1,33E+00	1,22E+02	91,4
énergie non renouvelable	MJ-Eq	1,14E+02	1,43E+03	12,5
déchets éliminés dangereux	kg waste	1,68E-02	2,64E-02	1,6
déchets éliminés non dangereux	kg waste	4,54E-01	2,16E-01	0,5
déchets radioactifs		6,61E-04	6,89E-03	10,4

En conclusion, les FDES des granulats établis par l'UNPG indiquent que le granulat recyclé, sur la plupart des indicateurs, est plus impactant que les naturels, sauf pour 3 indicateurs. Cependant cet effet ne se retrouve pas dans les ACV des bétons à différents taux de granulats recyclés. En effet, l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons formulés à composition volumique constante ne modifie pas ou très peu les ACV des bétons. Il existe deux explications à ce résultat : dans les formulations à dosage élevé en granulat recyclé, la masse de matériau à incorporer est diminuée du fait de la masse volumique plus faible des granulats recyclés, ce qui compense les valeurs des indicateurs légèrement supérieures des FDES (indicateurs donnés pour 1 T de matériaux). Et surtout l'effet de dilution du ciment reste majoritaire.

Sur un critère d'analyse ACV/DEP de bétons, lorsque la composition est formulée à dosage volumique constant, l'utilisation de granulats recyclés n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impact.

D.3 ACV du transport des granulats et du béton pour les circuits sélectionnés

Après avoir étudié l'influence du taux de substitution en granulats recyclés sur les ACV des bétons témoins dans le paragraphe précédent, c'est l'influence de ce transport seul qui va être étudié à partir des analyses faites en partie C : étude de la sensibilité au transport sur la quantité de matériaux transportés sur une distance.

Dans le paragraphe précédent, l'influence du transport n'était pas étudié (seul le transport du ciment et des adjuvants a été intégré, cette valeur du transport étant indépendante de la composition). Pour l'analyse qui suit, les impacts environnementaux d'1 T.km sont tout d'abord présentés pour chacun des moyens de transport pris en considération dans la suite de l'étude. Seuls les résultats obtenus avec le logiciel SimaPro sont présentés, les valeurs grisées correspondent à celles pour lesquelles une valeur sensiblement différente a été obtenue avec le logiciel OpenLCA.

Ensuite ces résultats d'ACV pour 1 t.km sont combinées aux valeurs en t.km des circuits les plus et les moins pénalisants (hors circuit court, circuit 4) afin de calculer pour chacune de ces situations (circuit le plus ou le moins pénalisant) la part ACV du transport. Enfin les indicateurs d'impacts sont donnés pour 260 kg de ciment (teneur en ciment des bétons étudiés), afin de comparer la part du transport à la part du ciment pour chacun des indicateurs. Ces comparaisons ont été faites pour les 4 villes pour les 3 taux de substitution.

D.3.1 Impacts environnementaux pour 1 t.km

Pour cela, les ACV correspondant à 1 t.km ont été calculées selon le type de transport (Tableau 18) puis croisées avec les valeurs correspondant aux circuits les plus pénalisants et les moins pénalisants rappelés dans les Tableau 19 et Tableau 20. Les écarts entre les deux situations sont ensuite analysés.

Tableau 18 ACV transport pour 1 t.km selon le camion

Catégorie d'impact	Unité	Transport, 1 t.km (granulats et ciment) >32T	Transport, 1 t.km (béton) 16-32T	Transport, 1 t.km (adjuvant) 7-16T
		SimaPro	SimaPro	SimaPro
Epuisement des ressources	kg éq Sb	7,82E-04	1,17E-03	1,55E-03
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	4,19E-04	6,35E-04	8,30E-04
Eutrophisation	kg éq PO4---	1,13E-04	1,68E-04	2,17E-04
Réchauffement global	kg éq CO2	1,05E-01	1,65E-01	2,21E-01
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,54E-08	2,31E-08	3,06E-08
Formation d'ozone photochimique	kg éq C2H4	1,36E-04	1,80E-04	2,31E-04
Energie renouvelable	MJ	2,26E-02	3,53E-02	5,20E-02
Energie non renouvelable	MJ	1,80E+00	2,73E+00	3,63E+00
Déchets dangereux	kg	1,39E-03	1,79E-03	2,08E-03
Déchets non dangereux	kg	1,78E-02	2,08E-02	2,53E-02
Déchets inertes	kg	1,30E-02	1,43E-02	1,74E-02
Déchets radioactifs	kg	1,34E-06	2,16E-06	3,29E-06

Remarque : indicateurs déchets

Les indicateurs déchets obtenus pour la part transport correspondent aux déchets produits par ce process. Le calcul de ces indicateurs est dépendant du logiciel et surtout de la base de données utilisée. Pour information, le mode de calcul utilisé par SimaPro et Open LCA, associés à la base de données Ecoinvent prend en compte les infrastructures tel qu'illustré ci-dessous.



Ainsi l'utilisation de cette base de donnée et la prise en compte des infrastructures de la route, conduit à des valeurs du transport qui peuvent être non négligeables comme cela sera montré dans le chapitre D.4.

D.3.2 Analyse croisée avec les circuits d'acheminement des granulats

Pour rappel ci-dessous les valeurs en t.km et l'identification des circuits les plus et les moins pénalisants pour chaque ville et chaque taux de granulats recyclés.

Tableau 19 – Circuits* les plus pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	<i>CIRCUITS 1-2-3b</i>			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10%	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>
	17,707	14,733	42,737	21,333
30%	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>	<i>CIRCUIT 2</i>
	20,582	16,345	46,969	23,026
100%	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>	<i>CIRCUIT 3a</i>
	25,108	17,62	59,137	26,982

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

Tableau 20 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	<i>CIRCUITS 1-2-3b</i>			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	16,577	13,867	38,047	19,989
30%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	17,665	13,754	33,007	22,049
100%	<i>CIRCUIT 3b</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>	<i>CIRCUIT 1</i>
	21,477	13,357	15,362	40,574

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

La comparaison indicateur par indicateur à ce niveau n'apporterait rien de plus à celle qui a été faite sur les valeurs en t.km, à un facteur multiplicateur près (valeur de l'indicateur d'impact considéré pour la catégorie donnée Tableau 18). Les évolutions des indicateurs d'impact du transport pour 1 t.km selon le type de transport évoluant dans le même sens (Tableau 18), et dans des proportions proches, on considère pour l'analyse comparative qui suit une valeur moyenne « camion ». Les résultats complets des ACV (avec le type de transport correspondant aux catégories citées Tableau 18) pour les circuits les plus pénalisants sont donnés en annexes et seront analysés en partie D.4 de ce rapport. Dans les tableaux qui suivent, sont donnés : la valeur de chacun des indicateurs pour 260 kg de ciment, les moyennes des écarts obtenus sur les indicateurs d'impacts entre les valeurs pour le circuit le moins pénalisant et le plus pénalisant par taux de substitution, la valeur d'indicateur pour la combinaison circuit/taux la plus pénalisante et enfin le rapport entre la valeur pour cette combinaison pénalisante et la valeur pour 260 kg de ciment. (Les indicateurs d'impact de 260 kg de ciment sont obtenus après calcul par SimaPro à partir des ICV des FDES : voir méthode de calcul ACV décrite précédemment).

Tableau 21 Analyse comparative du transport pour la ville de Strasbourg ; fonction du taux de substitution

Catégorie d'impact	Unité	260 kg de ciment CEM1	Transport Scénario le plus pénalisant – Transport Scénario le moins pénalisant			Transport Combinaison la + pénalisante	Rapport (%) entre Transport Combinaison la plus pénalisante et 260 kg de ciment
			10,00%	30,00%	100,00%		
Épuisement des ressources	kg éq Sb	5,03E-01	8,83E-04	2,28E-03	2,84E-03	2,24E-02	4,45%
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	5,89E-01	4,73E-04	1,22E-03	1,52E-03	1,20E-02	2,04%
Eutrophisation	kg éq PO4---	7,57E-02	1,28E-04	3,29E-04	4,10E-04	3,22E-03	4,26%
Réchauffement global	kg éq CO2	2,29E+02	1,19E-01	3,07E-01	3,83E-01	3,07E+00	1,34%
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,08E-05	1,74E-08	4,48E-08	5,58E-08	4,40E-07	4,08%
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,08E-02	1,53E-04	3,96E-04	4,92E-04	3,71E-03	7,31%
Énergie renouvelable	MJ	1,69E+01	2,55E-02	6,58E-02	8,19E-02	6,56E-01	3,88%
Énergie non renouvelable	MJ	1,83E+03	2,04E+00	5,26E+00	6,55E+00	5,18E+01	2,83%
Déchets dangereux	kg	3,45E-02	2,13E-06	5,51E-06	6,86E-06	3,76E-02	109,00%
Déchets non dangereux	kg	1,60E+00	1,53E-03	3,95E-03	4,92E-03	4,68E-01	29,24%
Déchets inertes	kg	2,06E-01	1,47E-02	3,78E-02	4,71E-02	3,35E-01	162,71%
Déchets radioactifs	kg	5,48E-03	1,51E-06	3,91E-06	4,87E-06	3,95E-05	0,72%

Le constat est le suivant : l'impact du transport (écart min-max) rapporté au scénario le plus pénalisant (ici pour Strasbourg 100% de GR sur le circuit 1), reste faible (7% au maximum), en comparaison de l'impact du ciment (pour 260 kg ce qui correspond au dosage utilisé dans les bétons). Seul les indicateurs déchets (hors radioactif) peuvent être plus de 1,6 fois supérieurs à ceux du ciment. Cela donne un aperçu du faible impact qu'aura le transport sur l'ACV en comparaison des compositions témoins ou sur l'ACV du scénario complet, sauf sur ces indicateurs. Les écarts obtenus selon les scénarios sont de manière logique encore moins influents.

Les résultats pour les autres villes sont donnés ci-après :

Tableau 22 Analyse comparative du transport pour la ville de Lyon ; fonction du taux de substitution

Catégorie d'impact	Unité	260 kg de ciment CEM1	Transport Scénario le plus pénalisant – Transport Scénario le moins pénalisant			Transport Combinaison la + pénalisante	Rapport (%) entre Transport Combinaison la plus pénalisante et 260 kg de ciment
			10,00%	30,00%	100,00%		
Épuisement des ressources	kg éq Sb	5,03E-01	6,77E-04	2,03E-03	3,33E-03	1,60E-02	3,19%
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	5,89E-01	3,63E-04	1,08E-03	1,78E-03	8,64E-03	1,47%
Eutrophisation	kg éq PO4---	7,57E-02	9,78E-05	2,92E-04	4,81E-04	2,31E-03	3,05%
Réchauffement global	kg éq CO2	2,29E+02	9,13E-02	2,73E-01	4,49E-01	2,20E+00	0,96%
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,08E-05	1,33E-08	3,98E-08	6,55E-08	3,16E-07	2,92%
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,08E-02	1,17E-04	3,51E-04	5,78E-04	2,65E-03	5,21%
Énergie renouvelable	MJ	1,69E+01	1,95E-02	5,85E-02	9,62E-02	4,72E-01	2,79%
Énergie non renouvelable	MJ	1,83E+03	1,56E+00	4,67E+00	7,69E+00	3,71E+01	2,03%
Déchets dangereux	kg	3,45E-02	1,20E-03	3,59E-03	5,91E-03	2,67E-02	77,51%
Déchets non dangereux	kg	1,60E+00	1,54E-02	4,61E-02	7,58E-02	3,31E-01	20,69%
Déchets inertes	kg	2,06E-01	1,12E-02	3,36E-02	5,53E-02	2,36E-01	114,76%
Déchets radioactifs	kg	5,48E-03	1,16E-06	3,47E-06	5,72E-06	2,84E-05	0,52%

Tableau 23 Analyse comparative du transport pour la ville de Bordeaux ; fonction du taux de substitution

Catégorie d'impact	Unité	260 kg de ciment CEM1	Transport Scénario le plus pénalisant – Transport Scénario le moins pénalisant			Transport Combinaison la + pénalisante	Rapport (%) entre Transport Combinaison la plus pénalisante et 260 kg de ciment
			10,00%	30,00%	100,00%		
Épuisement des ressources	kg éq Sb	5,03E-01	1,51E-03	2,37E-03	3,86E-03	2,42E-02	4,80%
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	5,89E-01	8,09E-04	1,27E-03	2,06E-03	1,30E-02	2,21%
Eutrophisation	kg éq PO4---	7,57E-02	2,18E-04	3,43E-04	5,57E-04	3,48E-03	4,59%
Réchauffement global	kg éq CO2	2,29E+02	2,04E-01	3,20E-01	5,20E-01	3,31E+00	1,45%
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,08E-05	2,97E-08	4,67E-08	7,58E-08	4,75E-07	4,40%
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,08E-02	2,62E-04	4,12E-04	6,69E-04	4,00E-03	7,88%
Énergie renouvelable	MJ	1,69E+01	4,36E-02	6,85E-02	1,11E-01	7,08E-01	4,19%
Énergie non renouvelable	MJ	1,83E+03	3,48E+00	5,48E+00	8,89E+00	5,59E+01	3,05%
Déchets dangereux	kg	3,45E-02	2,68E-03	4,21E-03	6,84E-03	4,05E-02	117,45%
Déchets non dangereux	kg	1,60E+00	3,43E-02	5,40E-02	8,77E-02	5,04E-01	31,47%
Déchets inertes	kg	2,06E-01	2,51E-02	3,94E-02	6,40E-02	3,61E-01	175,03%
Déchets radioactifs	kg	5,48E-03	2,59E-06	4,07E-06	6,61E-06	4,26E-05	0,78%

Tableau 24 Analyse comparative du transport pour la ville de Lille ; fonction du taux de substitution

Catégorie d'impact	Unité	260 kg de ciment CEM1	Transport Scénario le plus pénalisant – Transport Scénario le moins pénalisant			Transport Combinaison la + pénalisante	Rapport (%) entre Transport Combinaison la plus pénalisante et 260 kg de ciment
			10,00%	30,00%	100,00%		
Épuisement des ressources	kg éq Sb	5,03E-01	3,67E-03	1,09E-02	3,42E-02	4,88E-02	9,70%
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	5,89E-01	1,96E-03	5,84E-03	1,83E-02	2,62E-02	4,44%
Eutrophisation	kg éq PO4---	7,57E-02	5,29E-04	1,58E-03	4,94E-03	7,04E-03	9,30%
Réchauffement global	kg éq CO2	2,29E+02	4,94E-01	1,47E+00	4,61E+00	6,62E+00	2,89%
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,08E-05	7,21E-08	2,15E-07	6,73E-07	9,59E-07	8,88%
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,08E-02	6,36E-04	1,89E-03	5,94E-03	8,31E-03	16,36%
Énergie renouvelable	MJ	1,69E+01	1,06E-01	3,15E-01	9,88E-01	1,42E+00	8,39%
Énergie non renouvelable	MJ	1,83E+03	8,38E+01	2,52E+01	7,89E+01	1,13E+02	6,16%
Déchets dangereux	kg	3,45E-02	6,22E-02	1,93E-02	6,07E-02	8,46E-02	245,13%
Déchets non dangereux	kg	1,60E+00	7,82E-01	2,48E-01	7,78E-01	1,07E+00	66,95%
Déchets inertes	kg	2,06E-01	5,64E-01	1,81E-01	5,68E-01	7,76E-01	376,70%
Déchets radioactifs	kg	5,48E-03	6,33E-05	1,87E-05	5,87E-05	8,47E-05	1,55%

Comme attendu, pour la ville de Lille pour la combinaison la plus pénalisante, l'influence du transport par rapport à l'ajout de ciment est un peu supérieure pour tous les indicateurs, et bien supérieures pour les indicateurs déchets.

D.3.3 Conclusion

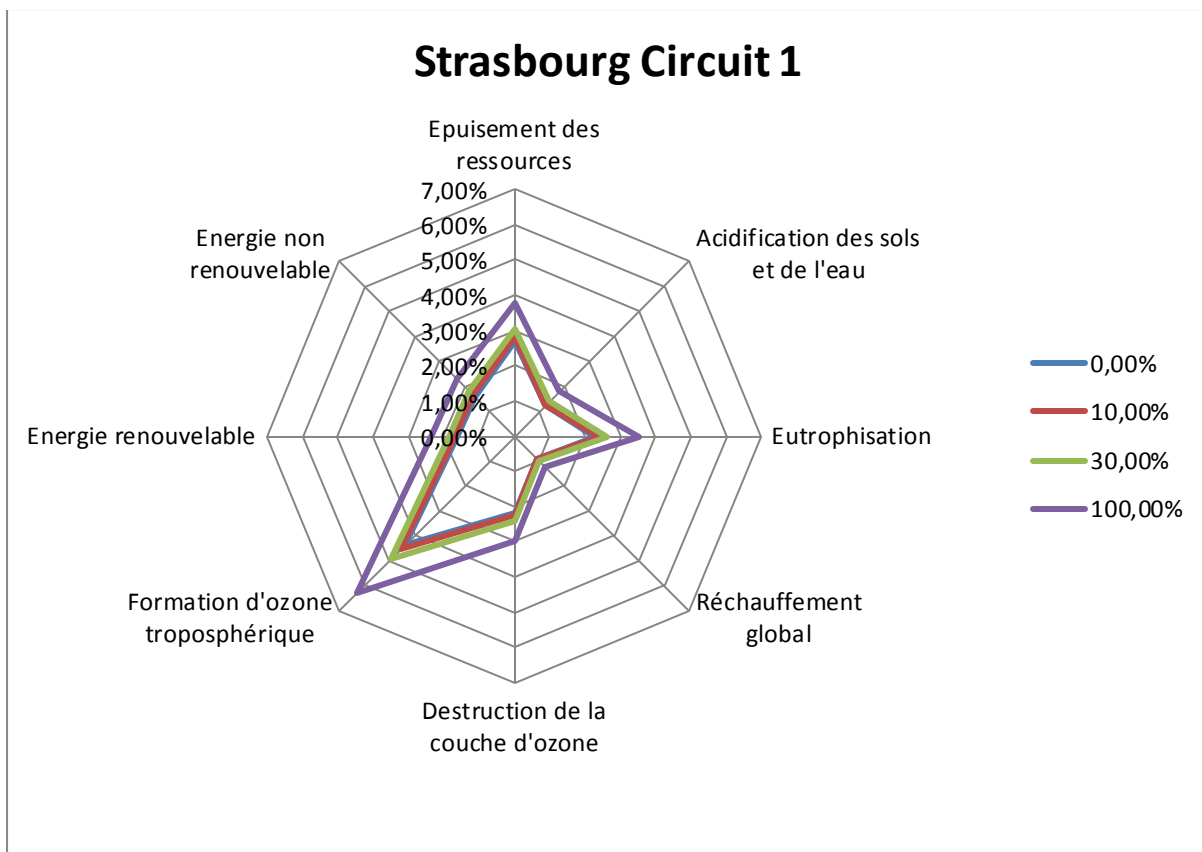
Une première approche de la détermination des ACV (indicateurs calculés selon le format DEP) pour le seul transport des granulats et du béton a été faite et ces valeurs comparées à celle du ciment aux quantités introduite dans le béton Il reste maintenant à comparer ces ACV du transport par rapport aux ACV complètes ou aux valeurs témoins.

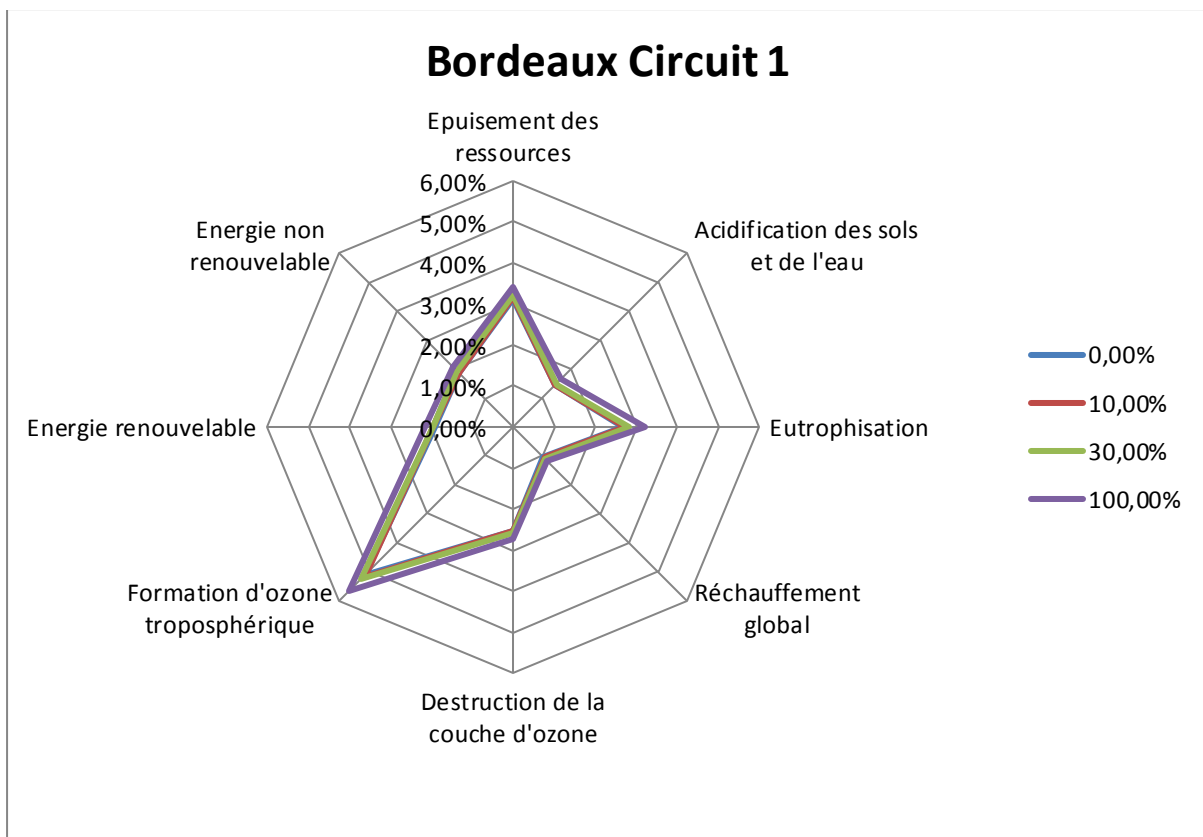
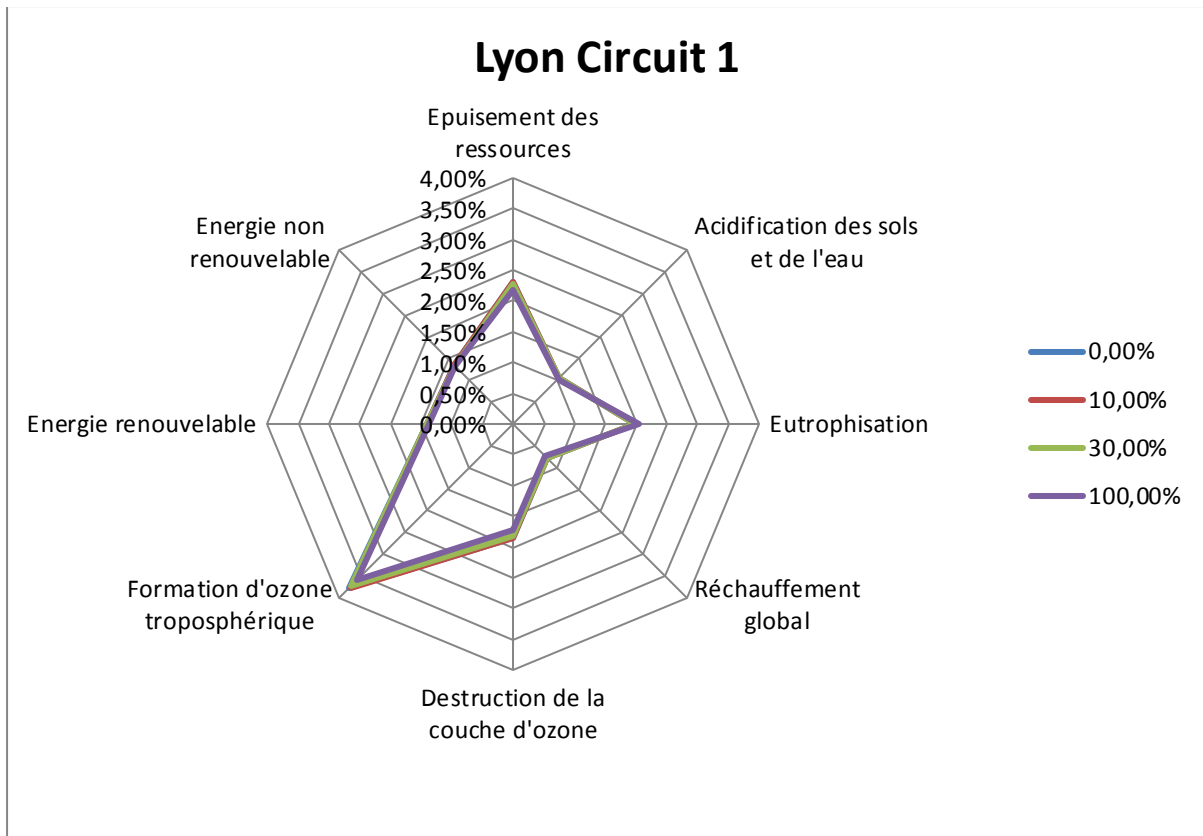
D.4 ACV des bétons sur les circuits sélectionnés : étude de la sensibilité au transport selon le taux de substitution

D.4.1 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du circuit 1 pratiqué à l'heure actuelle, comparaison pour chaque taux de substitution

Avant d'étudier les circuits les plus pénalisants, il semblait opportun d'étudier l'impact du transport pour la configuration actuelle d'utilisation de granulats recyclés à savoir le circuit 1 : le granulat est fabriqué sur plateforme de recyclage avant d'être conduit à la centrale BPE. Il n'y a pas de transit via le site de granulat naturel.

Ci-après est illustré l'impact du transport sur les indicateurs d'impact de l'ACV des bétons en fonction du dosage en granulat pour chacune des villes. Les indicateurs déchets sont traités à part, afin de rendre lisible le graphe. En effet, comme constaté lors de l'analyse de l'ACV du transport, l'impact du transport est élevé. Ces valeurs sont données ci-après.





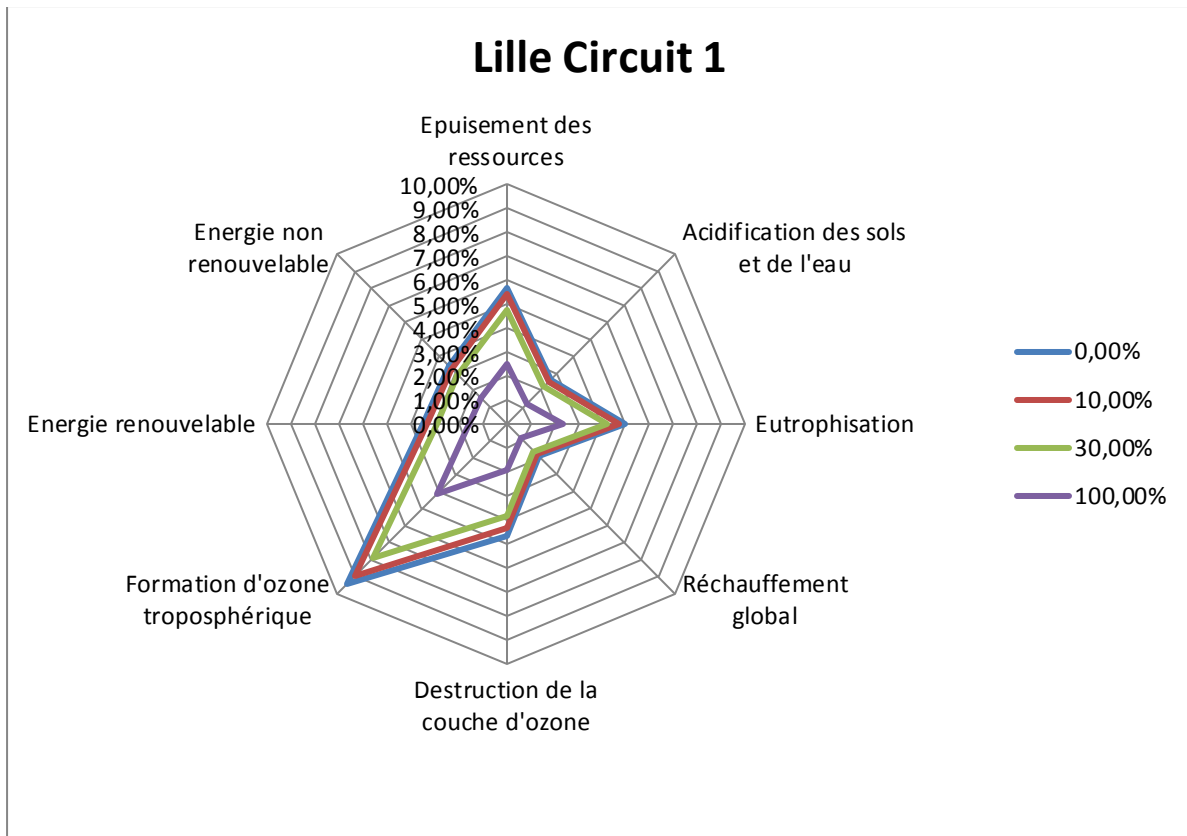
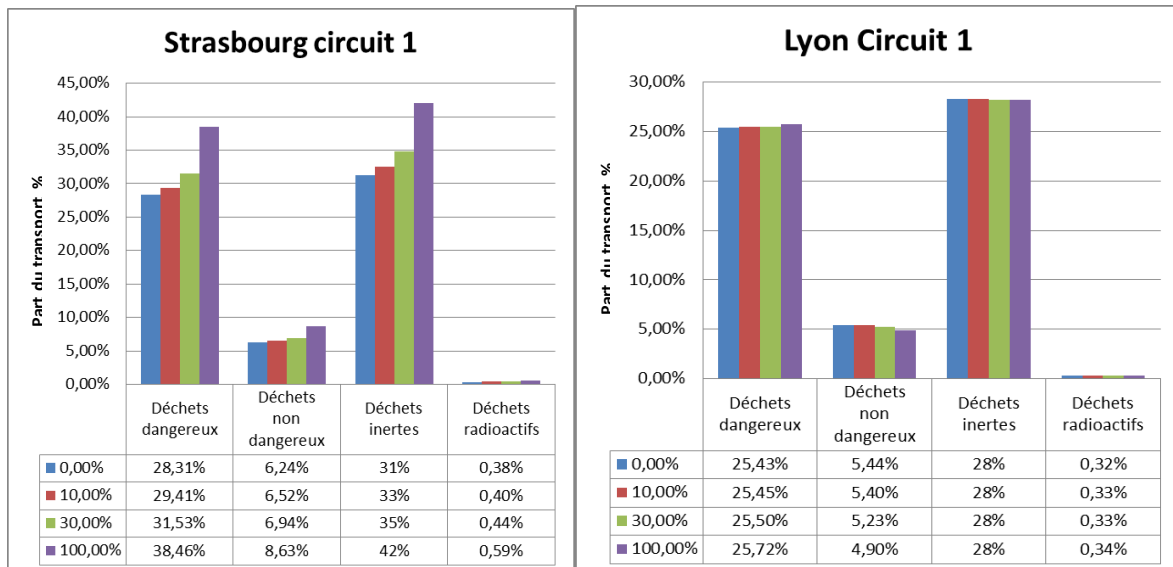


Figure 23 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du circuit 1- sauf indicateurs déchets

Indicateur déchets



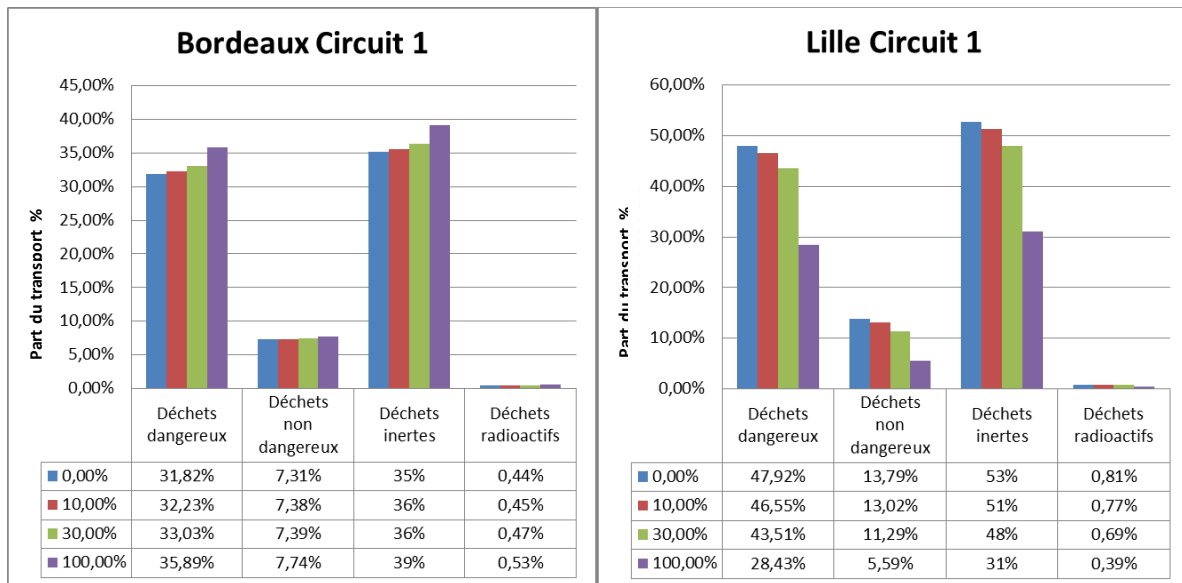


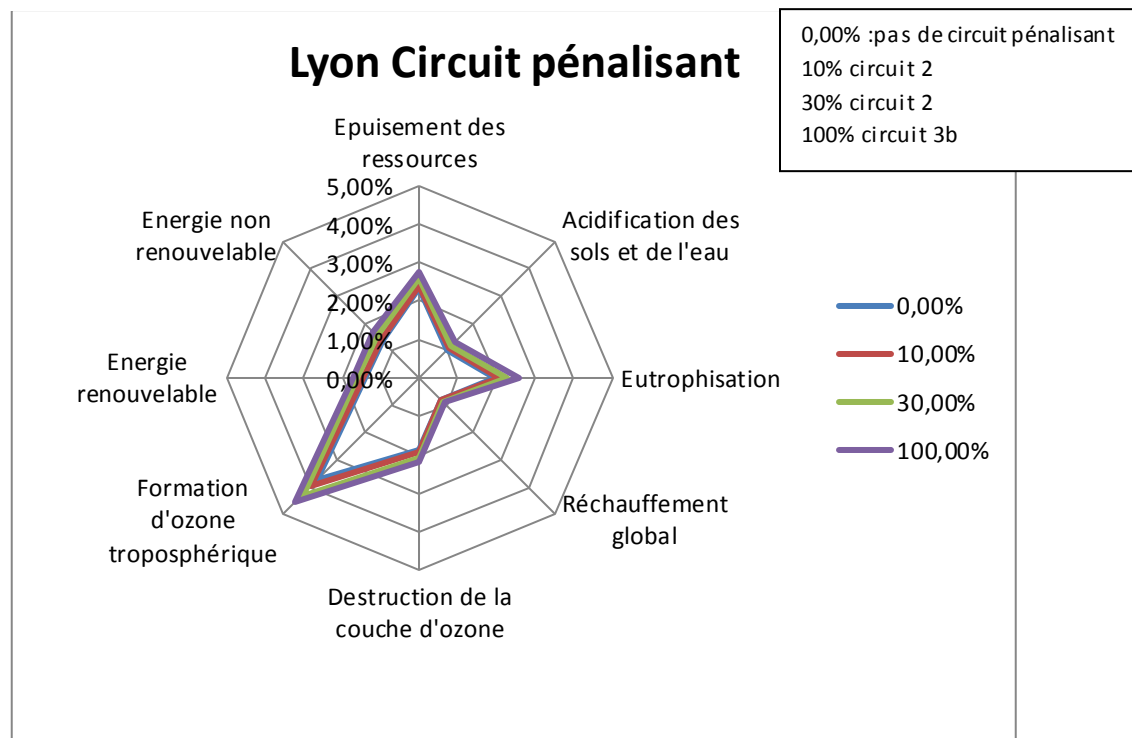
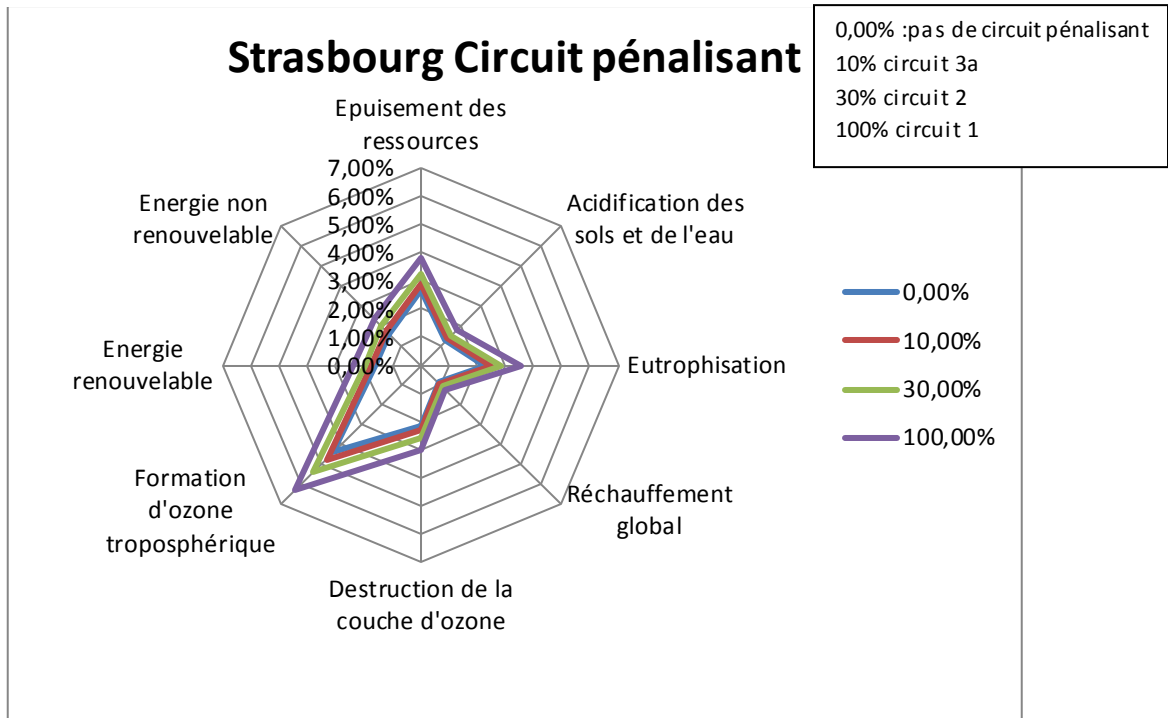
Figure 24 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du circuit 1- indicateurs déchets

Plusieurs informations sont confirmées à la lecture de ces graphes :

- Hormis les indicateurs déchets, l'influence du transport pour le circuit 1 reste modéré quel que soit le dosage en granulat recyclé, la ville étudiée ou l'indicateur analysé. Ces résultats sont à rapprocher de ceux de la Figure 21.
- Le transport est très influent pour les indicateurs déchets dangereux et déchets inertes, jusqu'à 50% dans le cas de Lille.
- Les configurations d'une ville à l'autre sont cependant différentes : Bordeaux et Lyon ont des configurations similaires à contrario de Strasbourg pour laquelle l'augmentation du taux de recyclés incrémente les indicateurs d'impact et de Lille pour laquelle c'est l'effet inverse qui est constaté. Une fois encore l'explication se trouve dans la territorialisation de différents sites (plateforme de recyclage, plateforme de naturels et centrale BPE).

D.4.2 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits les plus pénalisants pour chaque taux de substitution

Dans ce qui suit, l'influence du transport sur l'ACV des processus complets pour les circuits les plus pénalisants est comparée.



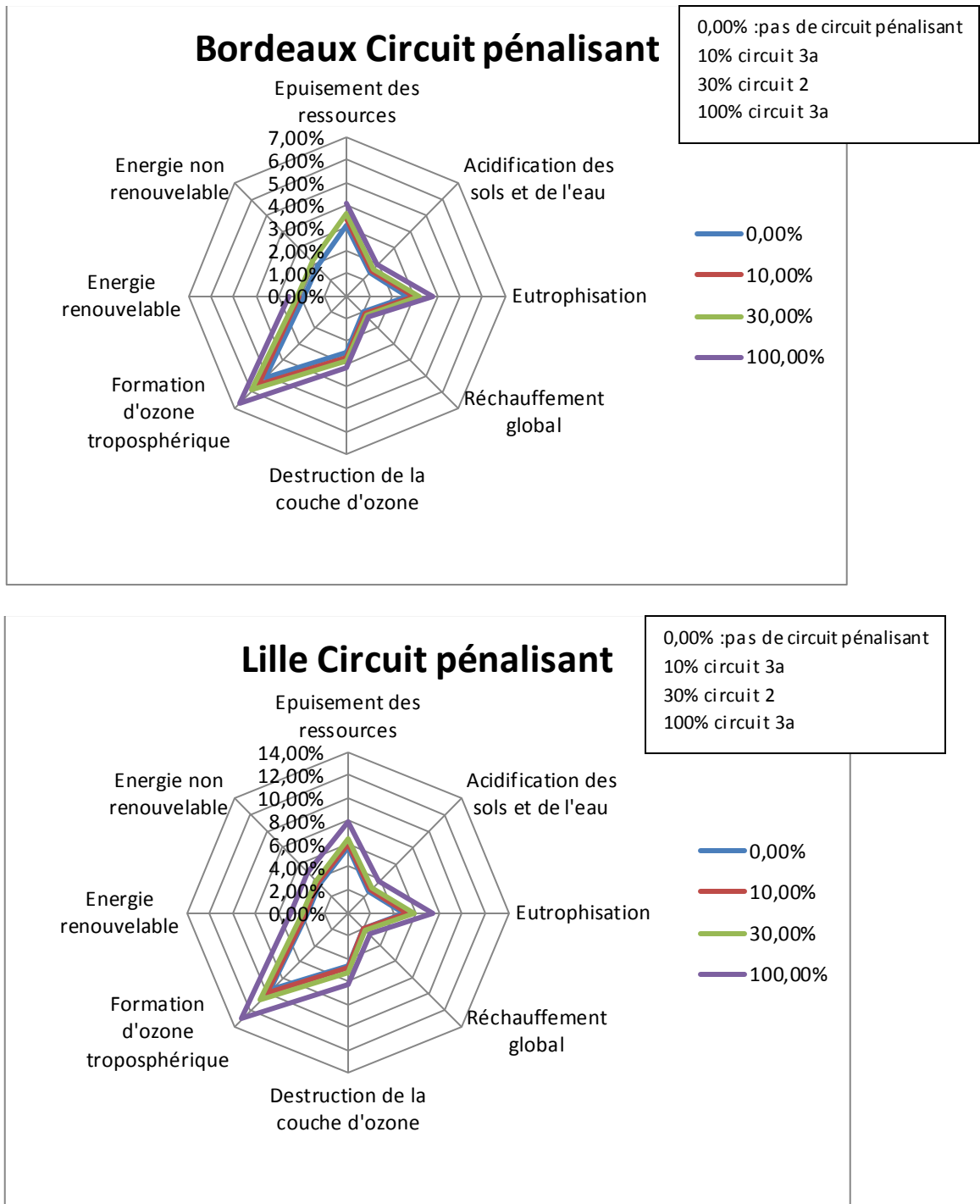


Figure 25 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits pénalisants – sauf indicateurs déchets

Par rapport à l'analyse précédente, deux observations sont faites :

- L'influence du transport sur l'ACV est modérément augmentée puisque dans le cas de Lille, ville pour laquelle les circuits pénalisants conduisent à des valeurs en t.km élevées, le transport contribue à hauteur de plus de 8% pour plusieurs indicateurs d'impact, dont l'épuisement des ressources.

- Une analyse par circuit pénalisant conduit à resserrer les écarts en fonction du taux de granulats recyclés et le taux à 100% est toujours le plus défavorable (pour le circuit pénalisant détecté).

Ci-dessous, le cas des indicateurs déchets :

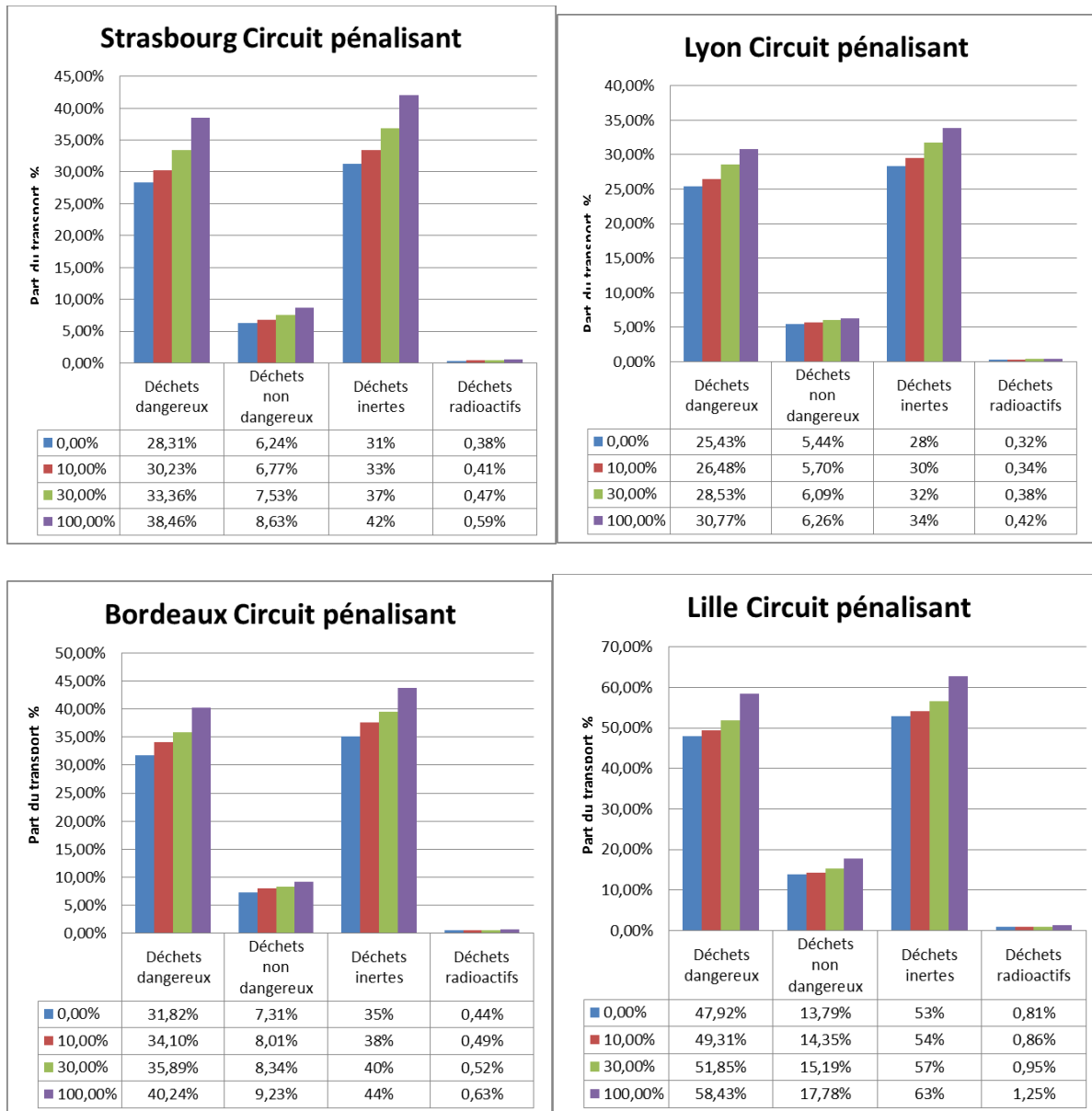


Figure 26 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits pénalisants – indicateurs déchets

Sur ces indicateurs fortement impactés par le transport, il ressort que le choix du circuit sera primordial. Cependant en comparant pour les villes de Lille, Bordeaux et Lyon, pour lesquelles le circuit minimisant était le circuit 1, (pour Strasbourg il s'agit du circuit 3b), on remarque que l'impact du transport reste important.

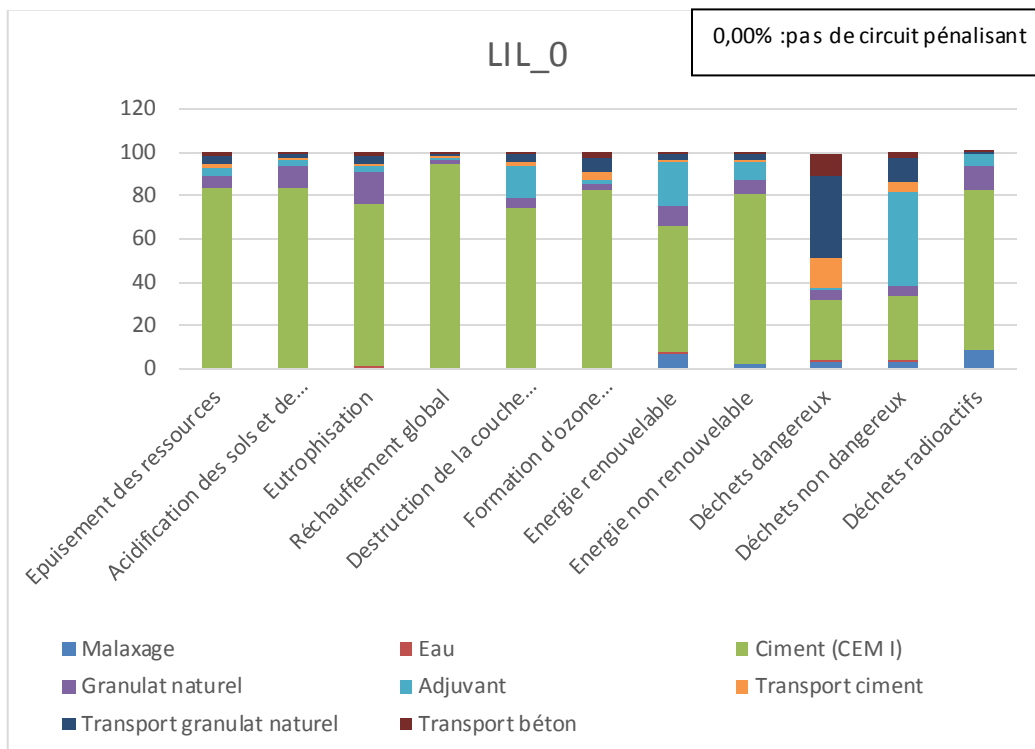
D.4.3 Comparaison des ACV transport et témoins

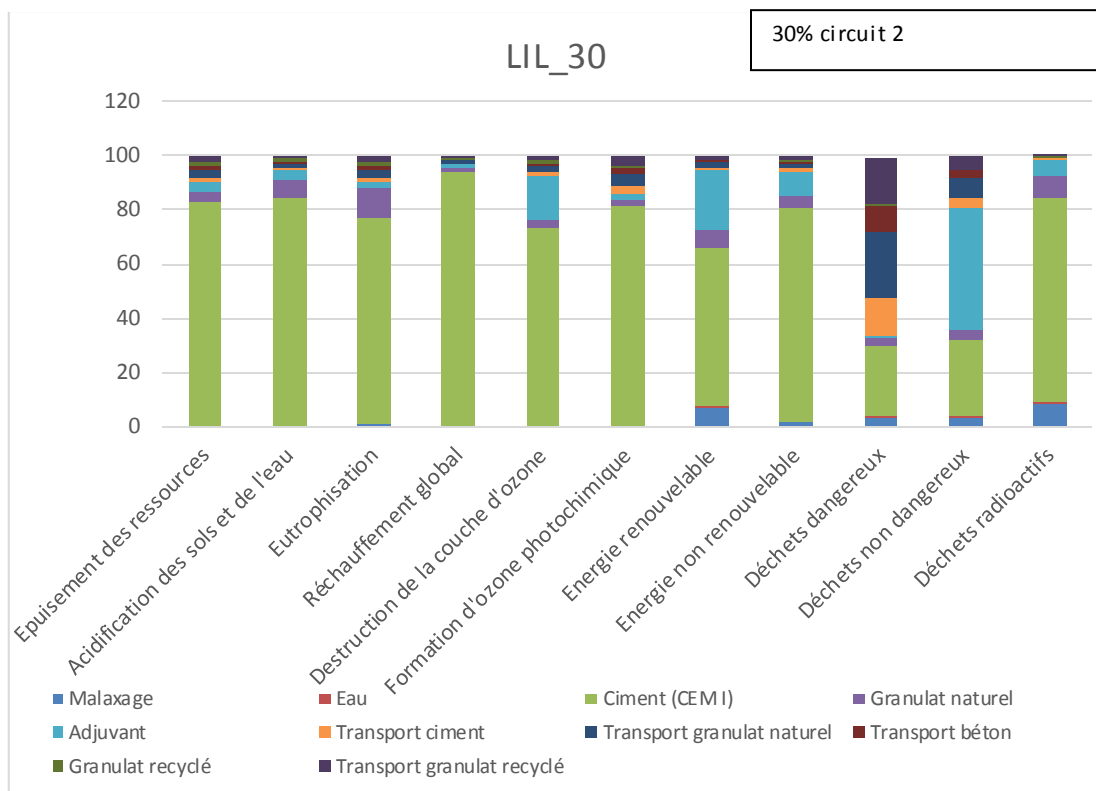
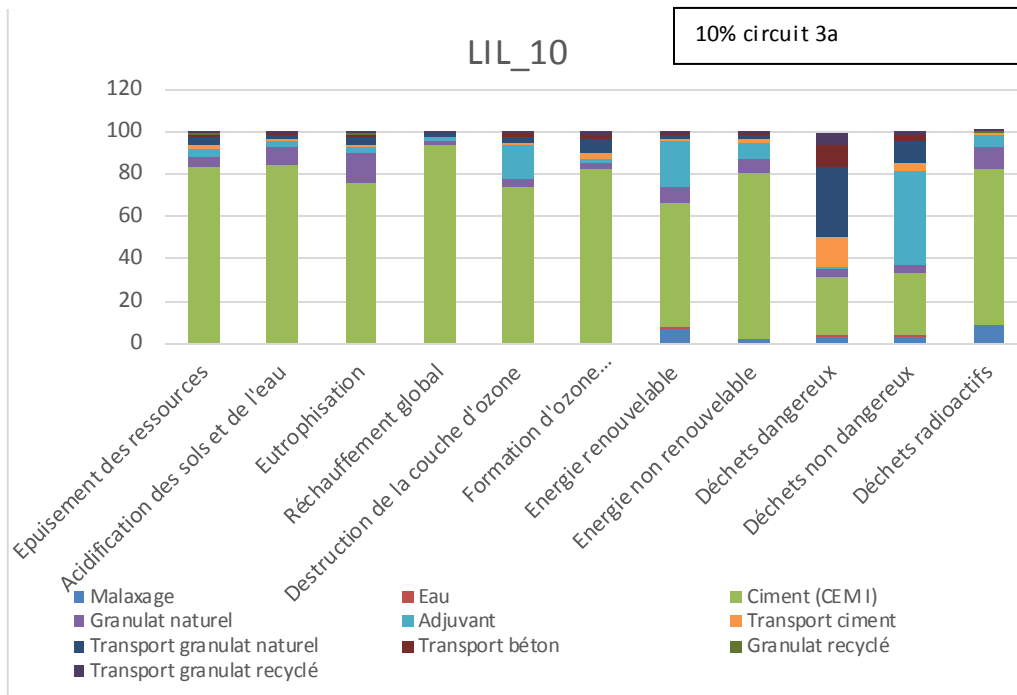
Une comparaison des ACV du transport et des compositions témoins n'apportera rien de plus à l'étude précédente : les rapports ne seront pas les mêmes mais les conclusions seront identiques.

D.4.4 Étude d'impact sur les ACV d'un processus complet : influence de chacun des paramètres de composition et de transport des constituants, dans le cas des circuits les plus pénalisants pour chaque taux de substitution

Dans le but d'élargir l'étude de sensibilité à d'autres paramètres que le transport seul, une analyse en impact a été faite pour quelques circuits. Il a été choisi de travailler sur la ville de Lille pour laquelle les circuits quels que soit les choix restent plus pénalisants que ceux des autres villes (Tableau 19). L'indicateur déchet inerte présente des tendances égales à celle de l'indicateur déchet dangereux (voir analyses précédentes) ainsi seul l'indicateur d'impact déchets dangereux est présenté.

L'impact du transport des adjuvants, inférieur à 1% n'est pas représenté car négligeable.





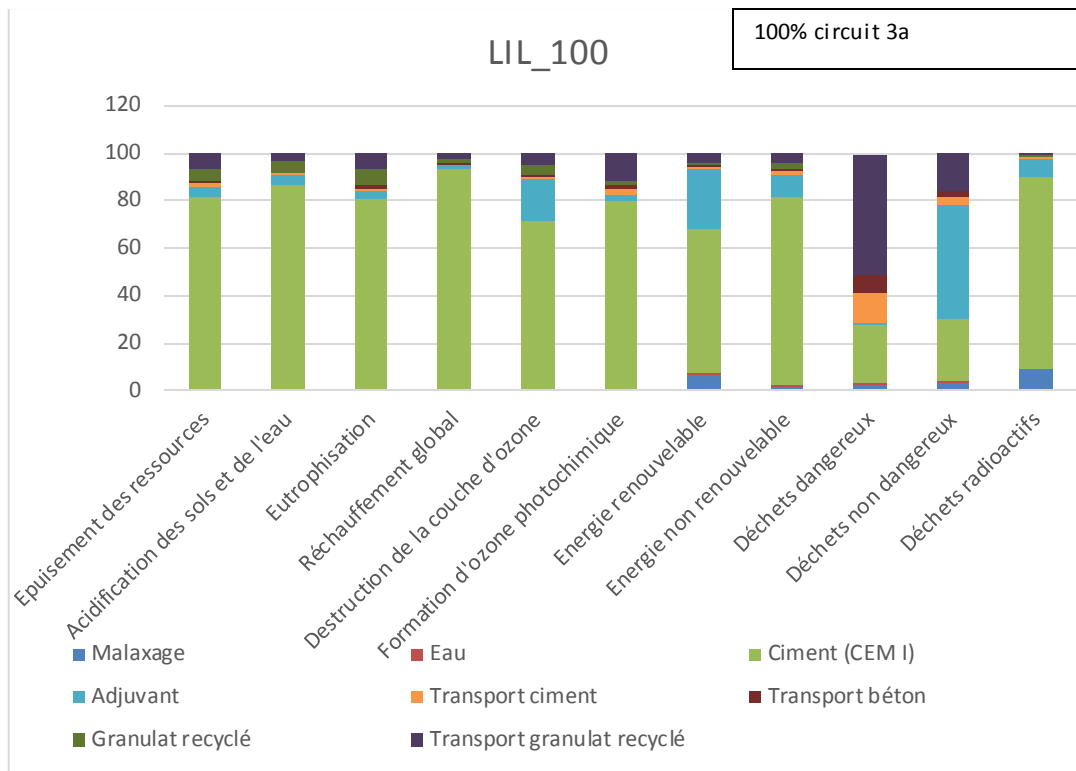


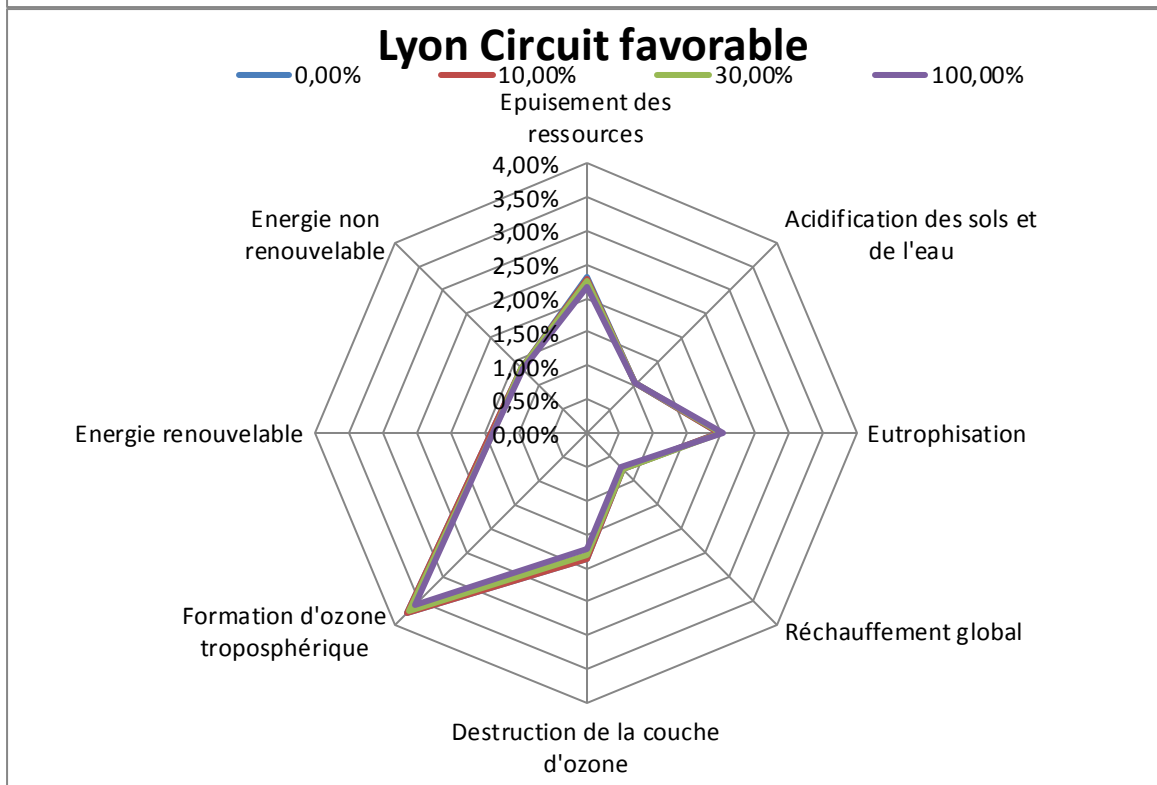
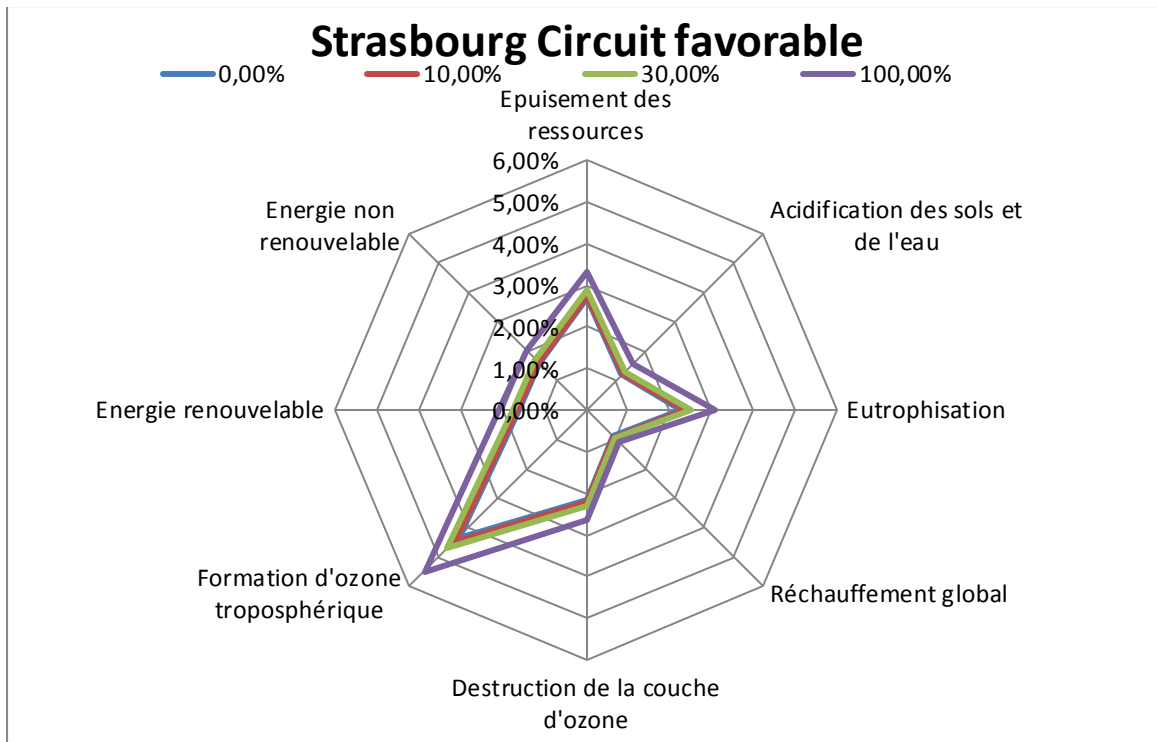
Figure 27 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants

Cette analyse d'impact confirme les résultats précédents : le transport a un impact non négligeable sur les déchets, mais beaucoup plus réduit sur les autres. Pour ces compositions, l'impact du ciment reste prédominant. L'impact de l'utilisation d'adjuvant doit être considéré avec attention (nécessaire à l'obtention des propriétés des bétons à l'état frais). Son impact est non négligeable sur certains indicateurs.

D.4.5 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits les moins pénalisants pour chaque taux de substitution

Les mêmes analyses que dans le paragraphe D.4.2. sont menées pour les circuits les moins pénalisants (hors circuit court).

Les résultats sont présentés ci-après.



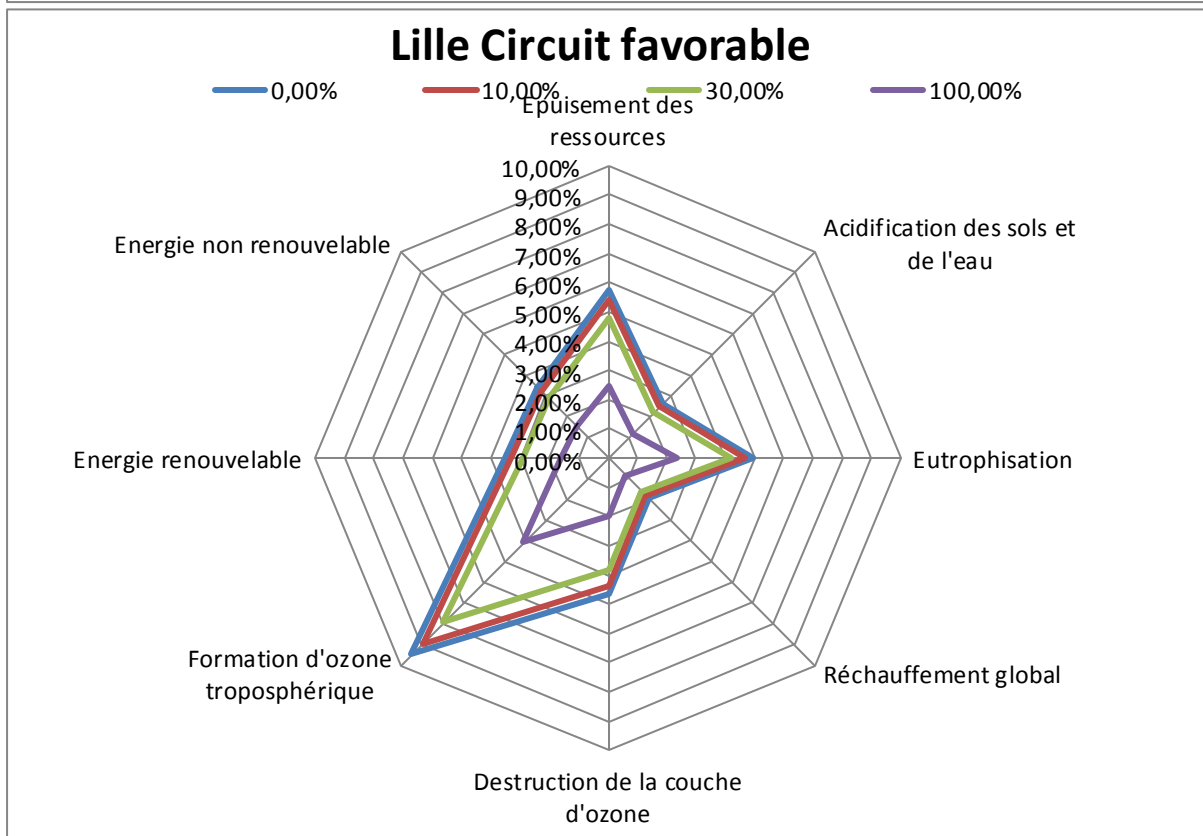
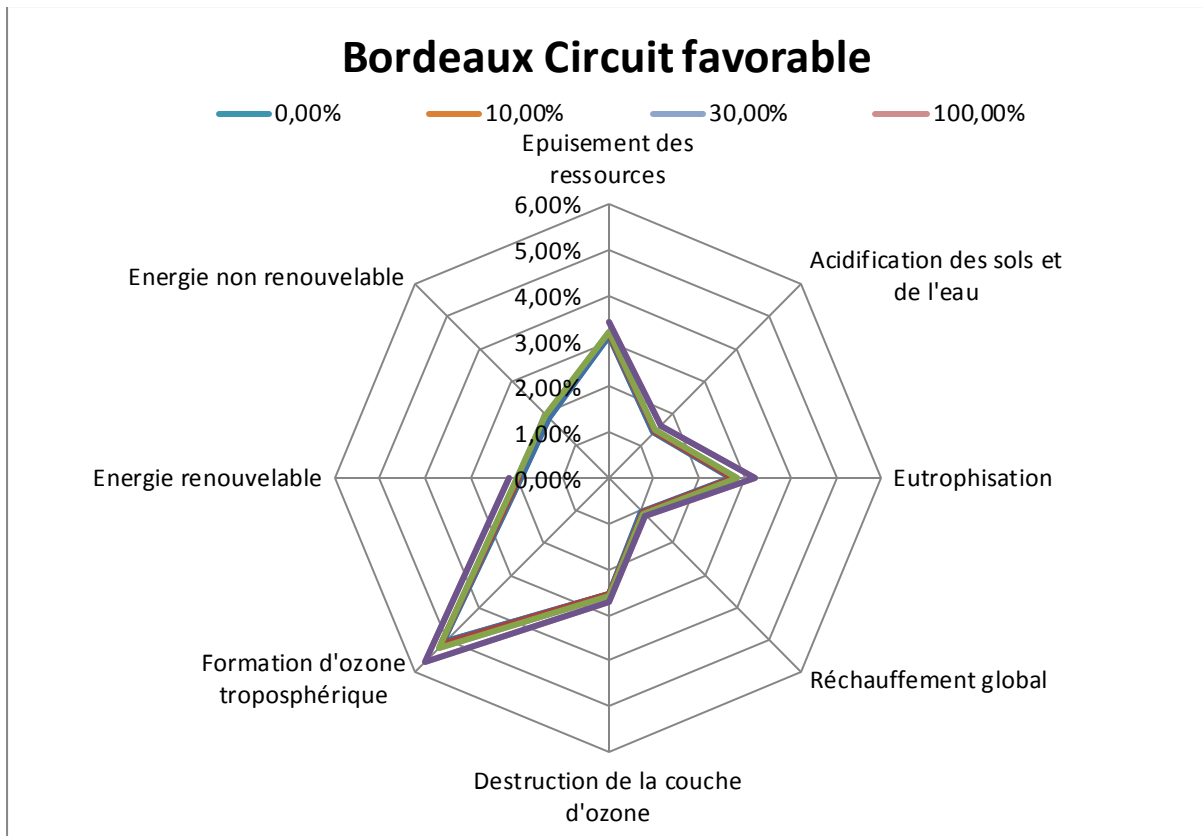


Figure 28 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits favorables – sauf indicateurs déchets

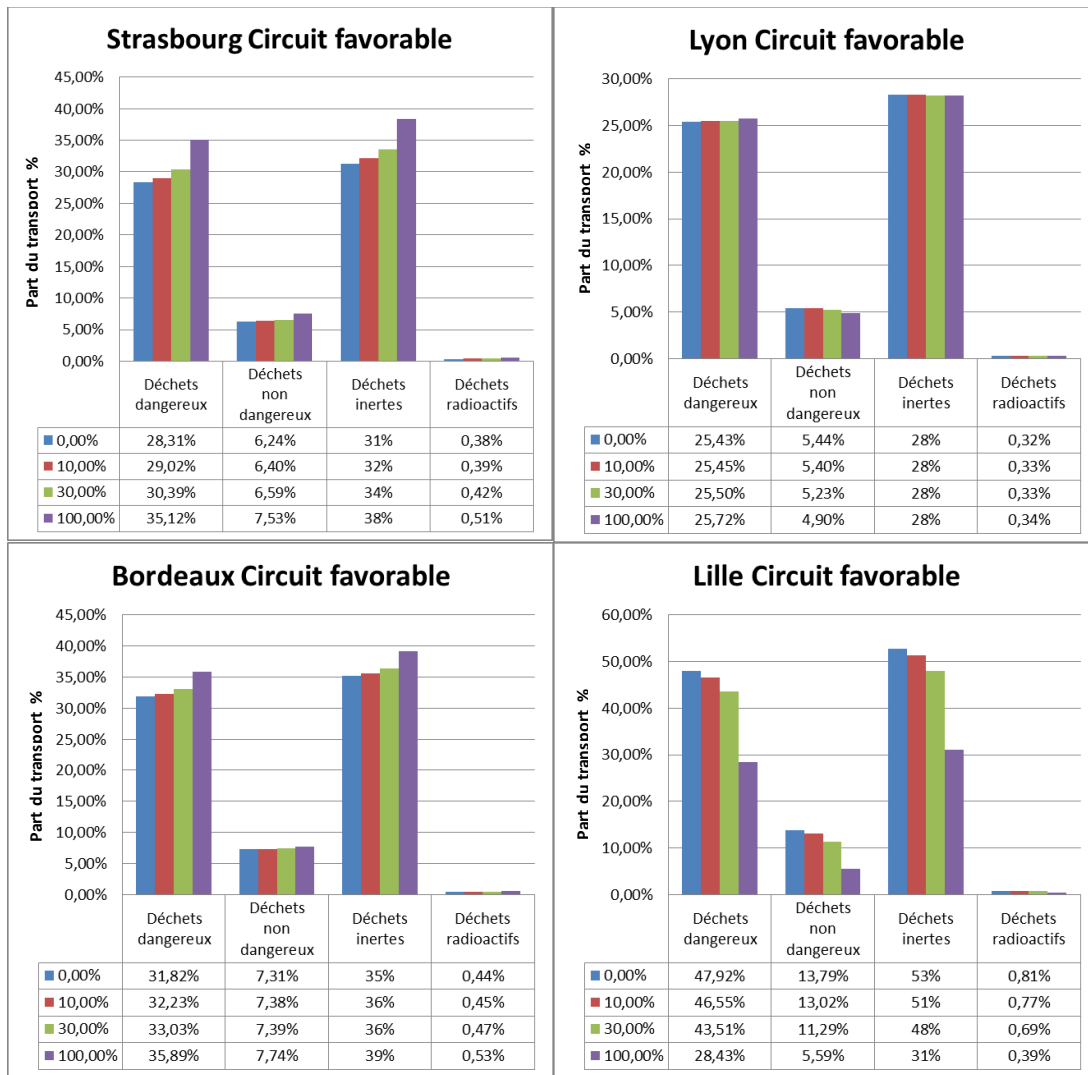


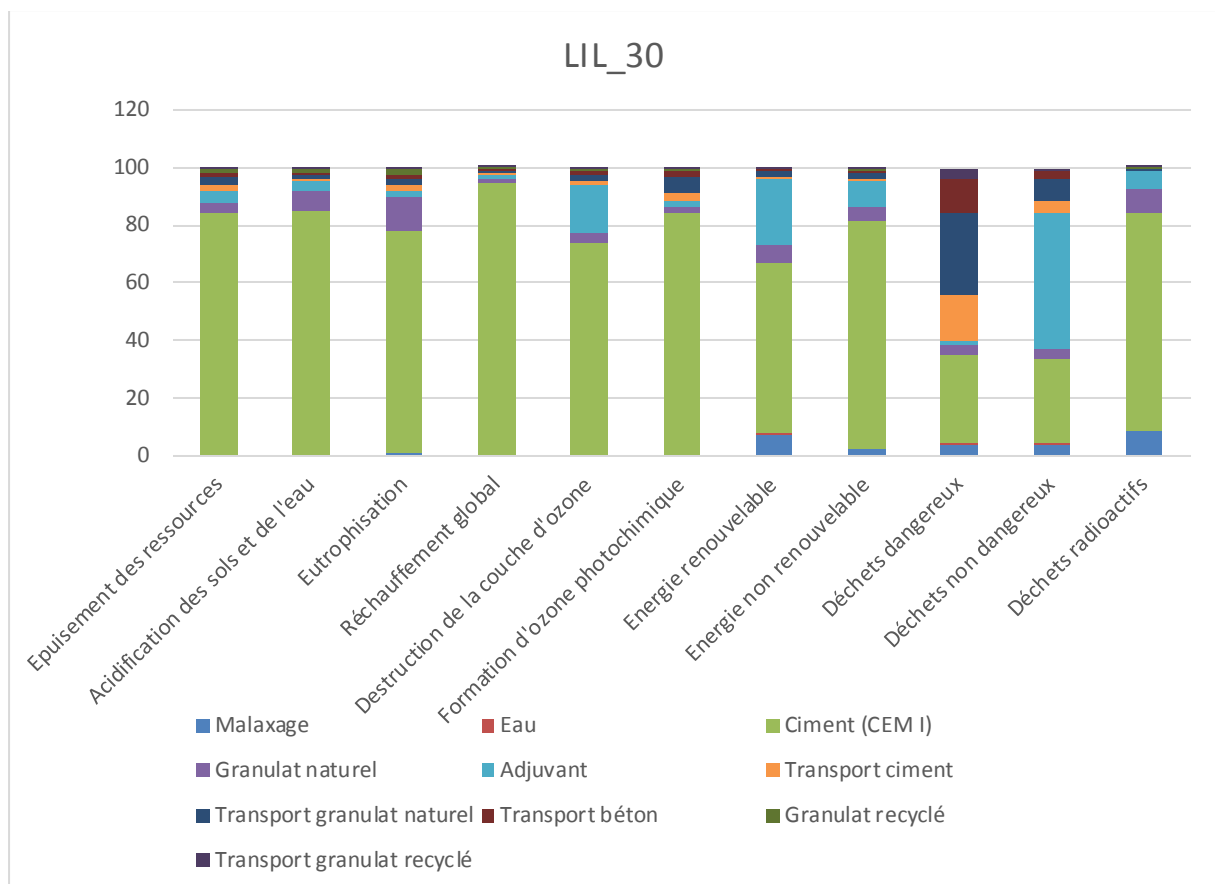
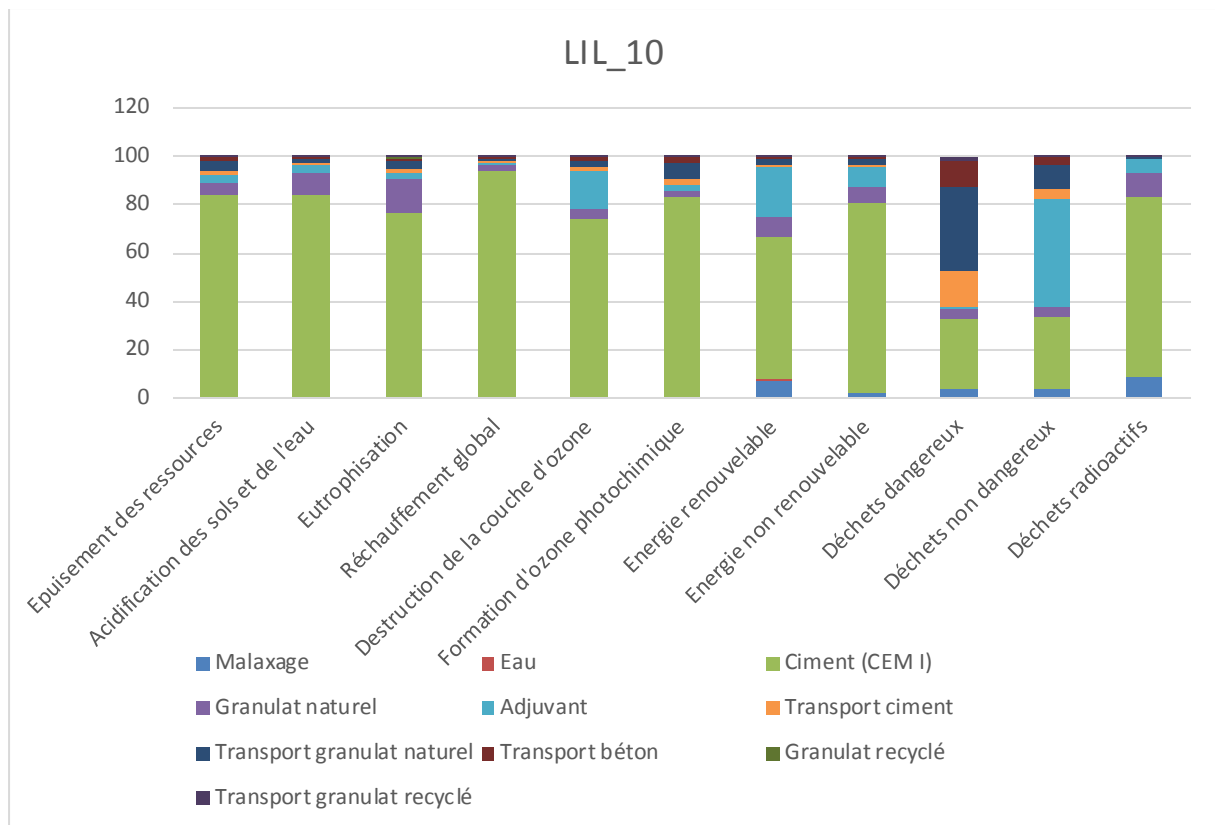
Figure 29 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas des circuits favorables – indicateurs déchets

Dans le cas des circuits favorables, les part du transport dans l'ACV sont du même ordre de grandeurs que pour les circuits défavorables, cependant l'influence du taux de substitution en granulats recyclés n'est pas le même pour la ville de Lille, ce qui correspond à l'analyse en t. km qui avait été faite.

Ces résultats sont identiques à ceux de l'analyse pour le circuit « habituel »- circuit 1, pour toutes les villes sauf Strasbourg, puisque pour Lille, Bordeaux et Lyon, le circuit favorable est justement ce circuit 1.

D.4.6 Étude d'impact sur les ACV d'un processus complet : influence de chacun des paramètres de composition et de transport des constituants, dans le cas des circuits les moins pénalisants pour chaque taux de substitution

Les mêmes analyses que dans le paragraphe D.4.4. sont menées pour les circuits les moins pénalisants (hors circuit court) pour la ville de Lille, il s'agit des études d'impact du circuit 1.



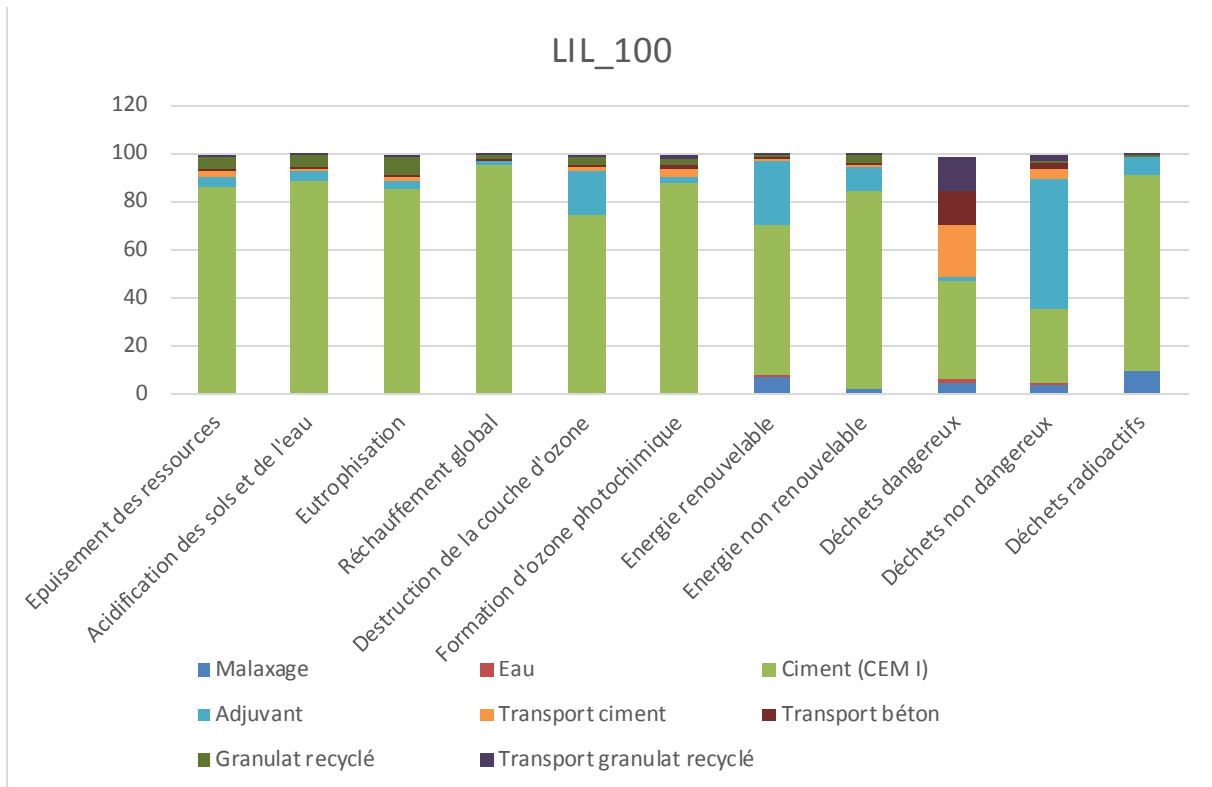


Figure 30 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits favorables – circuit 1

D.4.7 Conclusion sur l'analyse comparative des circuits pénalisants et non pénalisants

Dans le cas des circuits les plus pénalisants, même si la part du transport peut atteindre plus de 10% pour certains indicateurs et 50% pour deux indicateurs déchets, le fait d'augmenter le taux de granulats recyclés ne modifie que de quelques pourcents cette part de transport (10% au maximum pour certains indicateurs déchets). Les valeurs élevées de la part du transport pour quelques indicateurs déchets sont dues au mode de calcul et à l'utilisation de la base de données pour le type de transport (prise en compte des infrastructures évoquées précédemment).

De plus, en ce qui concerne ces indicateurs déchets pour lesquels la part du transport est importante, il faut remarquer que les valeurs des indicateurs d'impact dans l'absolu (en kg) des indicateurs déchets dangereux et déchets inertes sont 10 à 100 fois inférieures à celles de l'indicateur déchet non dangereux. Cela permet de relativiser l'importance de cette part du transport. Les valeurs étant basses, même 50% de part de transport ne représente qu'une faible valeur dans l'absolu (en kg). C'est toute la difficulté des analyses comparatives : il faut prendre en compte non seulement les valeurs relatives mais aussi les valeurs absolues.

L'analyse sur les circuits favorables conduit aux mêmes conclusions en ce qui concerne la part du transport avec des amplitudes inférieures.

D.4.8 Discussion : impact de la nature du ciment sur les résultats de l'étude de sensibilité aux transports

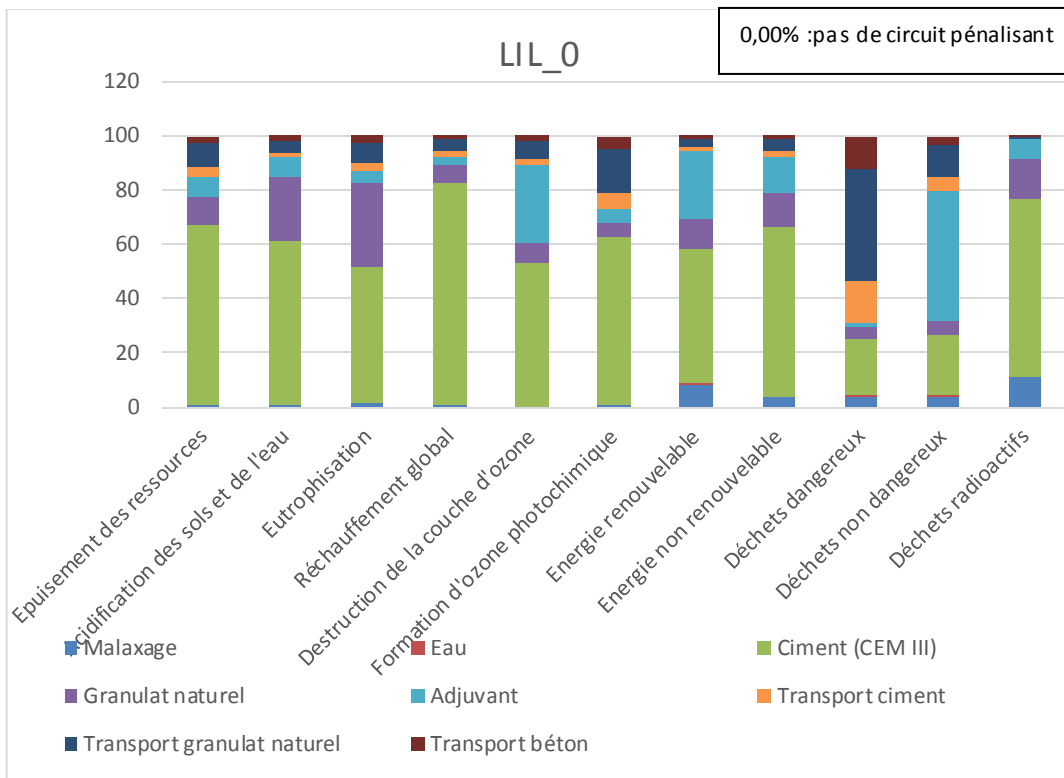
Afin de compléter cette étude et de confirmer les résultats de l'analyse de sensibilité aux transports, de sensibilité précédente, des compositions « simulées » ont été proposées. Pour celles-ci, le ciment

CEM I a été remplacé par du CEM III ou du CEM V pour lesquels les FDES indiquaient des impacts environnementaux réduits.

Ci-après une comparaison entre le CEM I, CEM III et le CEM V pour chacun des dosages.

Ces analyses d'impacts réalisés avec les ciments CEM III et CEM V confirment l'effet de dilution du ciment lorsque celui-ci contient beaucoup de clinker ce qui génère des indicateurs d'impacts environnementaux élevés. Avec l'utilisation de CEM III, le transport devient non négligeable, y compris pour d'autres indicateurs d'impacts que les seuls déchets. Son effet peut représenter 10 à 20%. Il est le premier indicateur pour les déchets dangereux et inertes. L'utilisation d'un ciment à teneur en clinker réduit serait une préconisation à indiquer pour l'utilisation de bétons de granulats recyclés, à condition de réussir à atteindre les résistances mécaniques voulues sans augmenter le dosage en ciment.

Résultats sur le CEM III



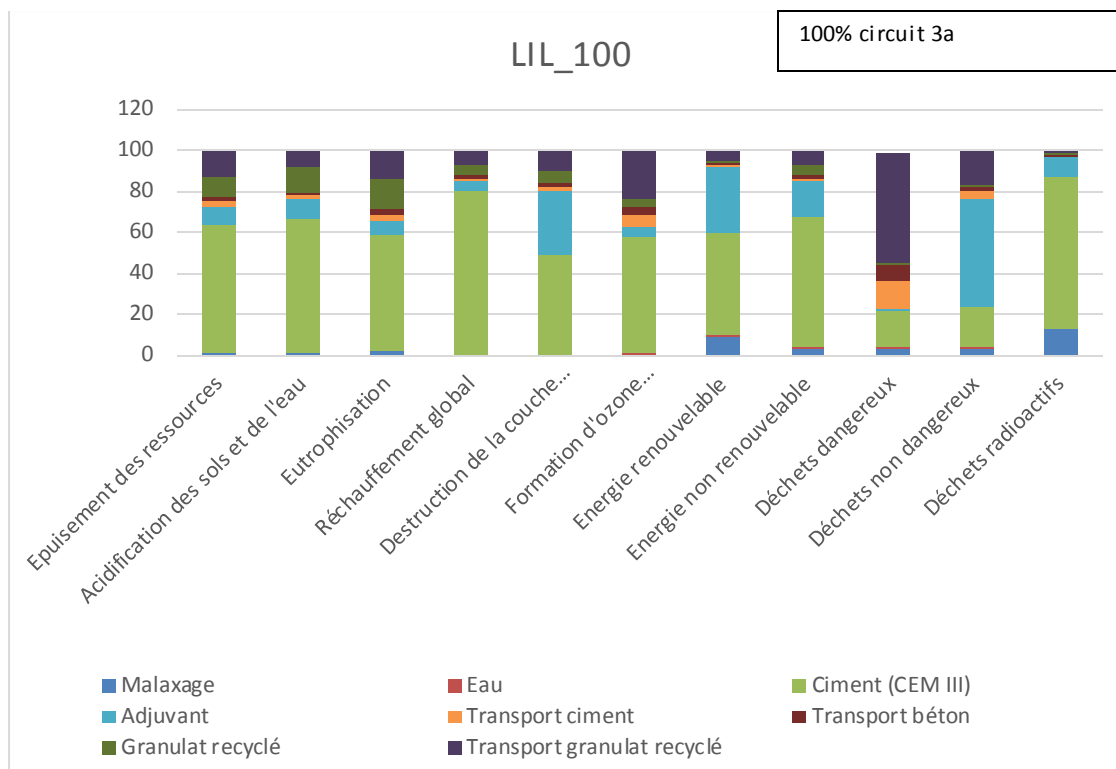
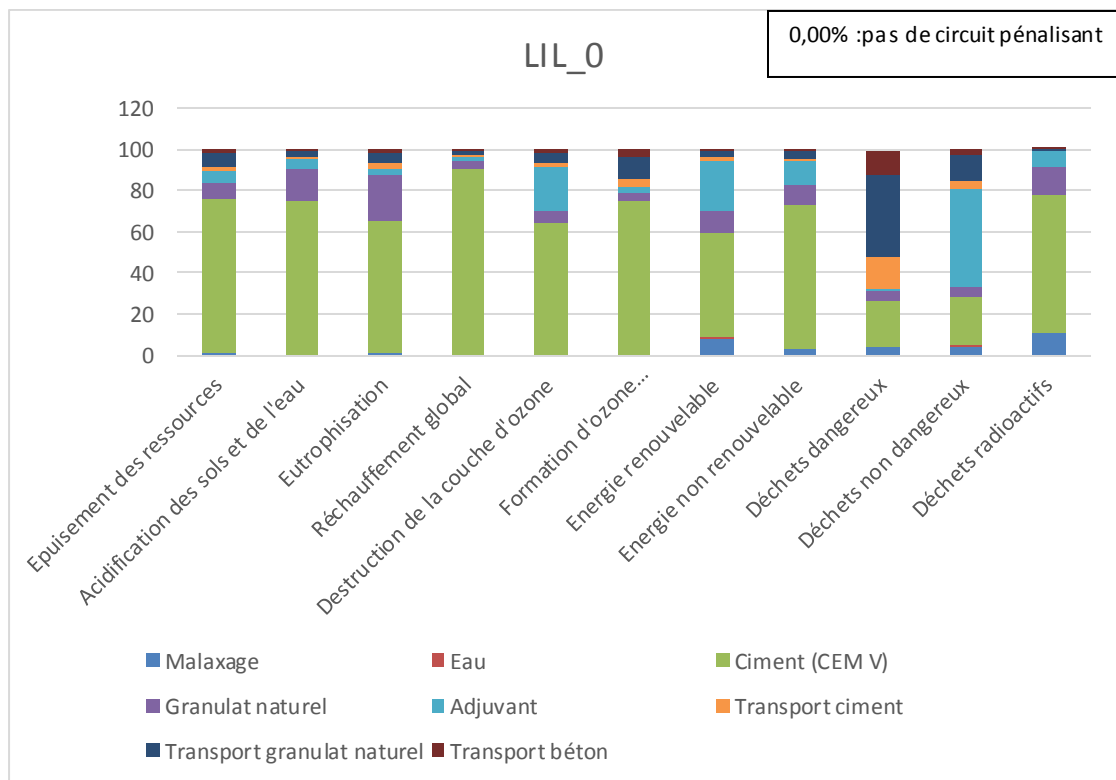
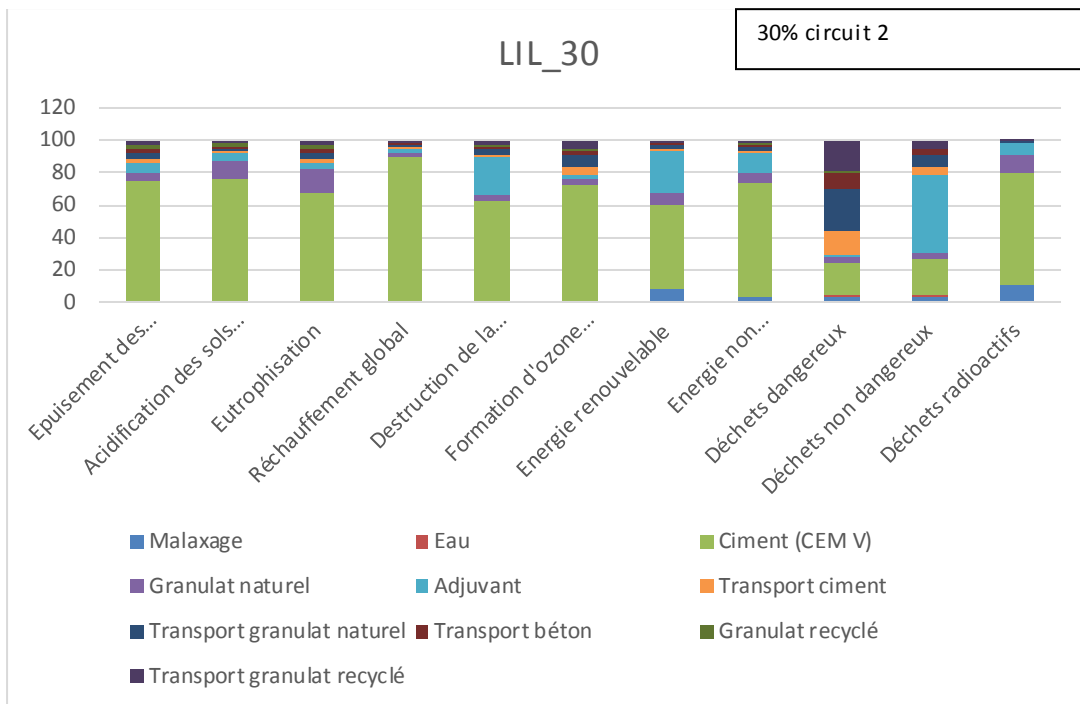
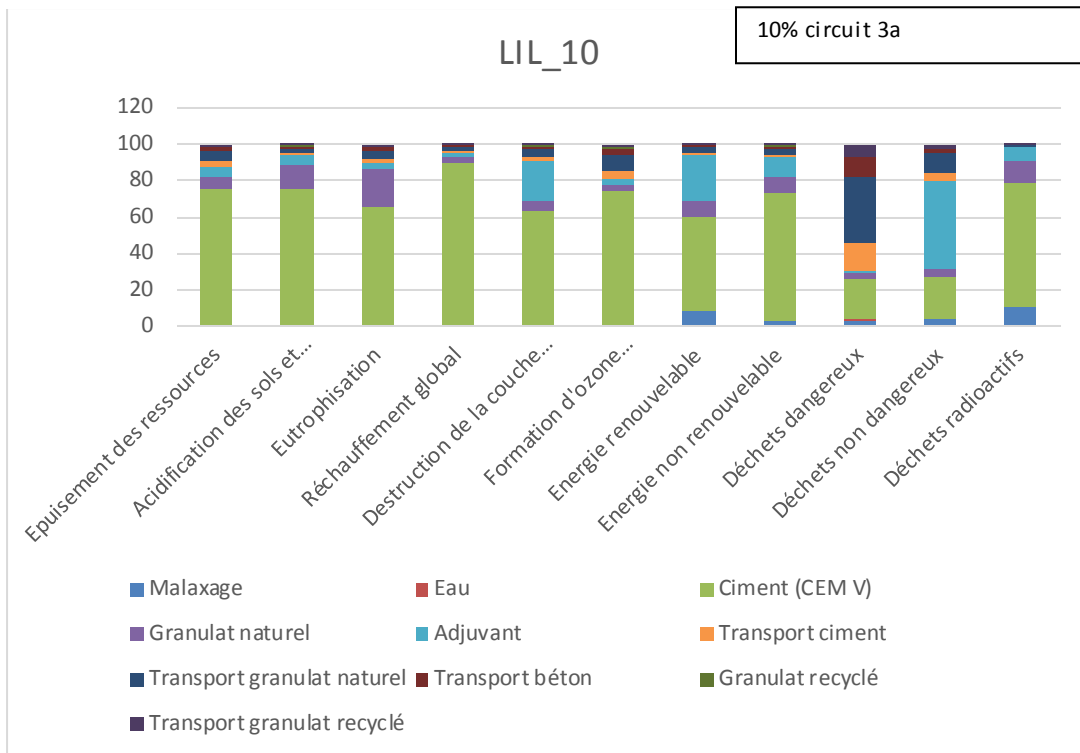


Figure 31 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants – CEM III

Résultats sur le CEM V





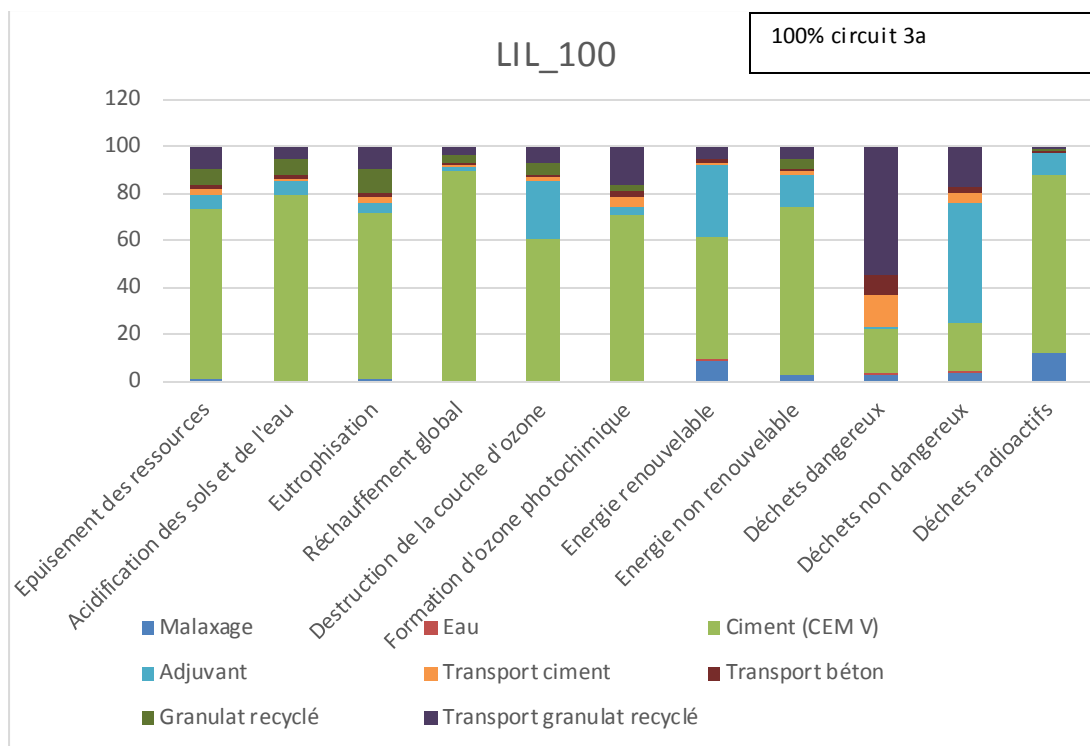


Figure 32 Étude d'impact – constituants et transports – cas de Lille circuits pénalisants – CEM V

D.5 ACV des bétons sur le circuit 4 : circuit court avec recyclage in situ

L'étude des ACV conduit à des résultats dont les tendances sont similaires à l'étude des circuits en t.km faite précédemment aux paragraphes C.2 et C.3 en ce qui concerne la sensibilité au transport. Pour mémoire, ceci s'explique par le peu de différence observé entre les ACV des bétons témoins.

Ce circuit reste le moins pénalisant et l'impact du transport sur les ACV est moindre, puisque le transport est moindre comme rappelé dans le tableau ci-après.

Tableau 25 – Circuits* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportée sur une distance, ville par ville, composition par composition. Hors circuit 4

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	CIRCUITS 1-2-3b			
	16,033	13,925	40,574	19,107
10%	CIRCUIT 3b			
	16,577	13,867	38,047	19,989
30%	CIRCUIT 3b			
	17,665	13,754	33,007	22,049
100%	CIRCUIT 3b			
	21,477	13,357	15,362	40,574

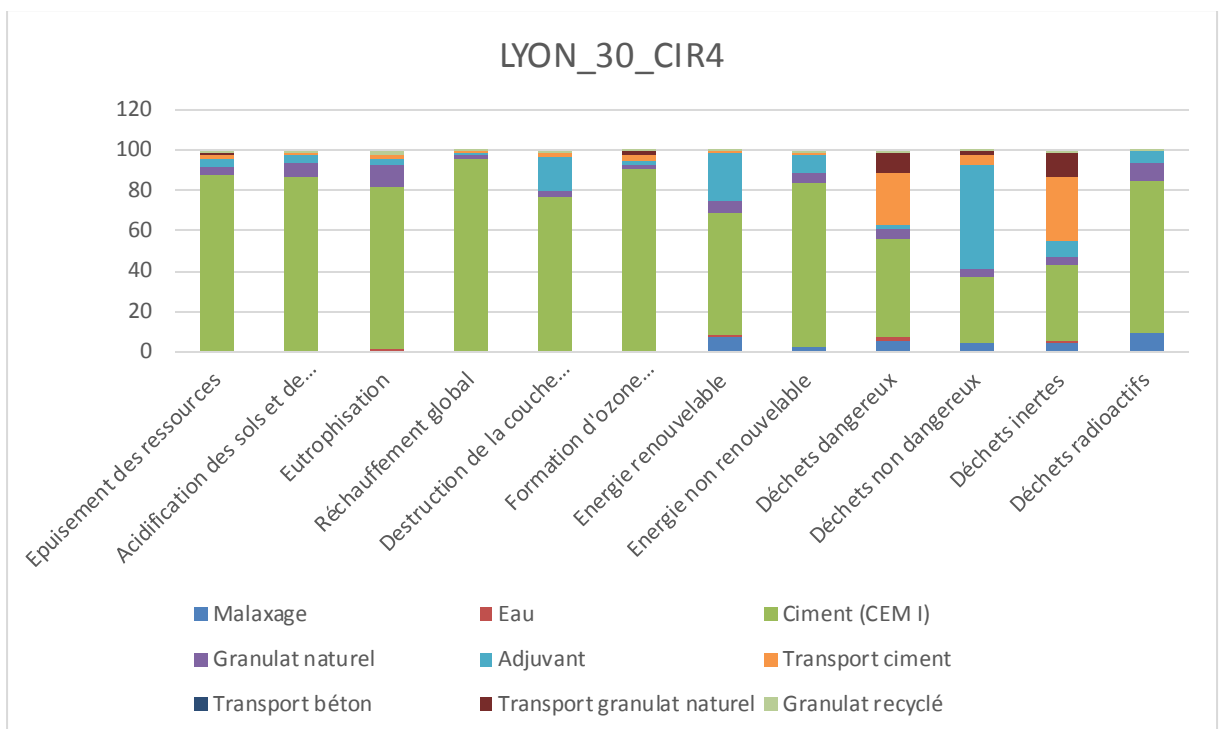
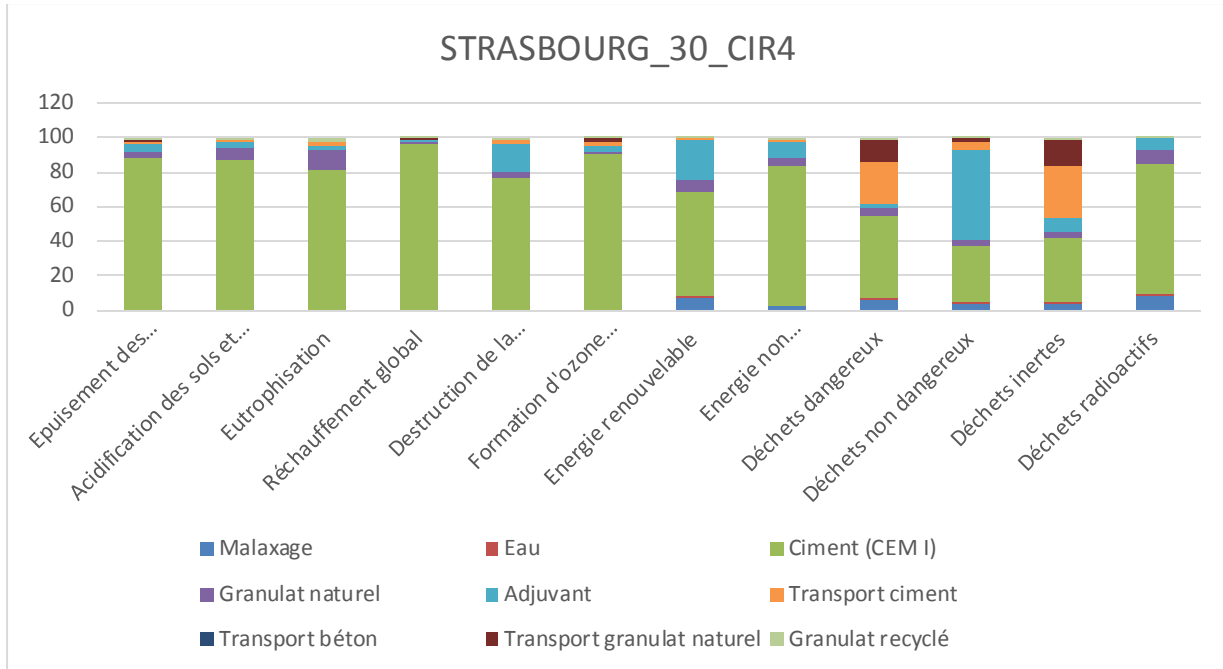
Tableau 26 – Circuits 4* les moins pénalisants selon la quantité de granulat recyclé ou naturel et de béton transportés sur une distance, ville par ville, composition par composition.

t.km	Strasbourg	Lyon	Lille	Bordeaux
0%	9,347	7,401	32,15	12,076
10%	8,41	6,659	28,929	10,866
30%	6,542	5,18	22,502	8,452
100%	0			

* Les circuits non significatifs évoqués ci-avant ont été retirés de cette analyse.

Il est plus intéressant de présenter une étude d'impact comme précédemment pour identifier l'impact de chaque étape du processus.

Nous présentons ci-après cette étude d'impact pour les ACV à 30% de granulats recyclés pour le circuit 4 pour chacune des villes.



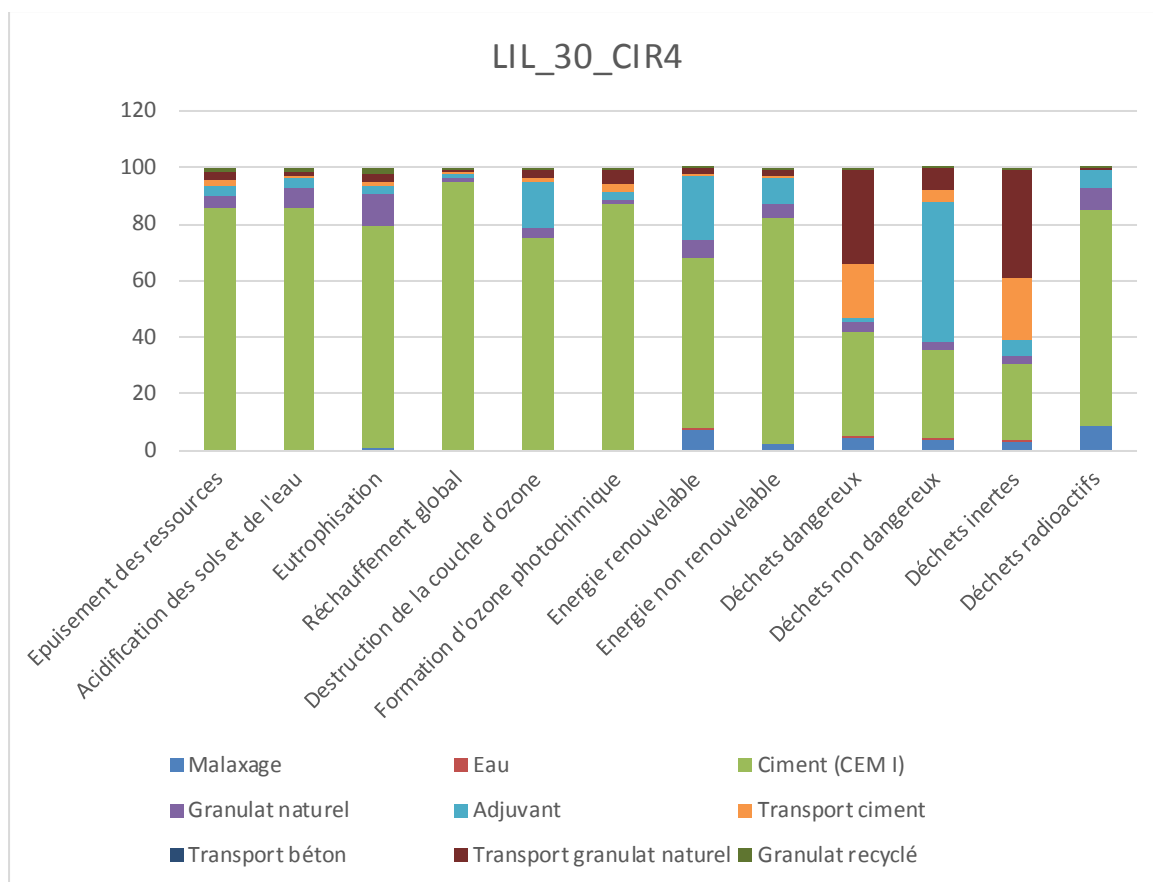
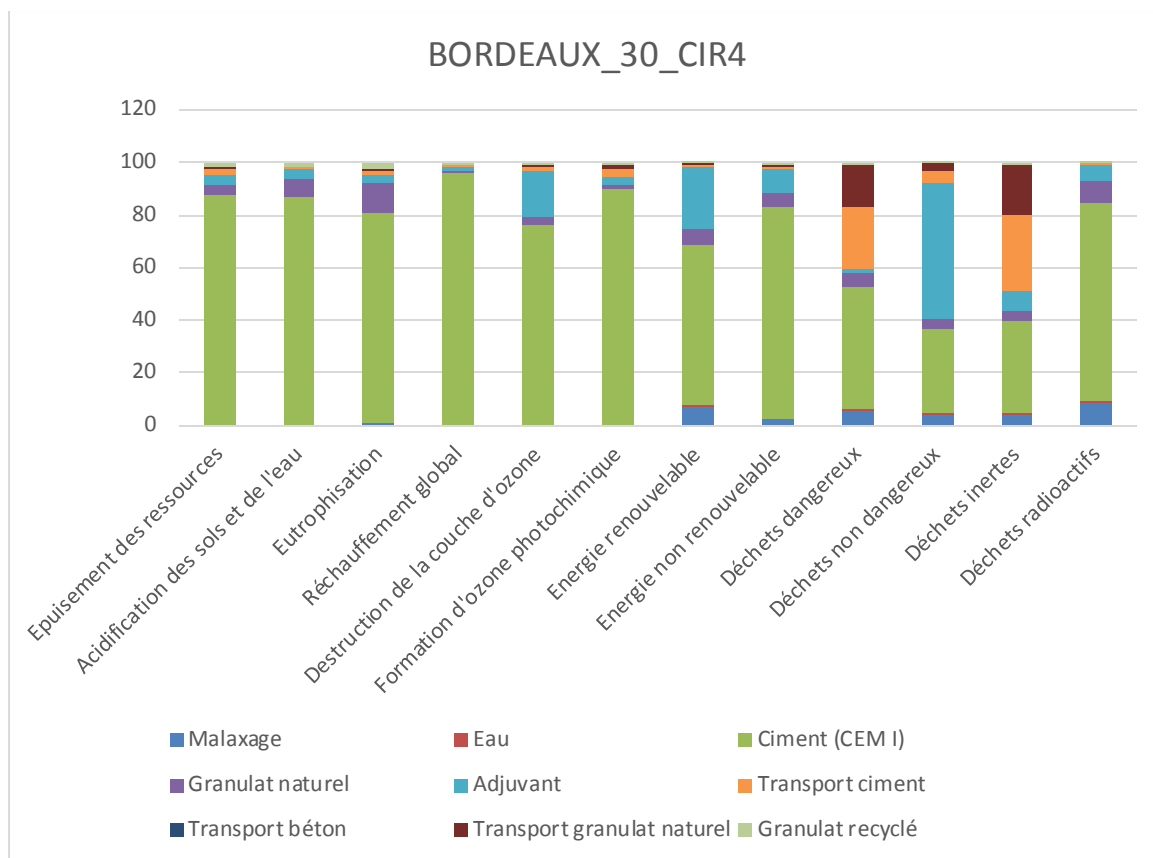


Figure 33 Étude d'impact pour le circuit 4 composition à 30% de granulats recyclés

Pour les 3 villes de Strasbourg, Lyon et Bordeaux, les analyses d'impact sont proches. En ce qui concerne Lille, ce n'est pas tout à fait la même chose, l'impact du transport des granulats naturels est non négligeable sur les indicateurs déchets. Cette observation est logique au regard de la territorialisation de cette ville pour laquelle les plateformes de naturels sont éloignées.

Pour comparaison, la même analyse d'impact faite pour le béton témoin à 30%.

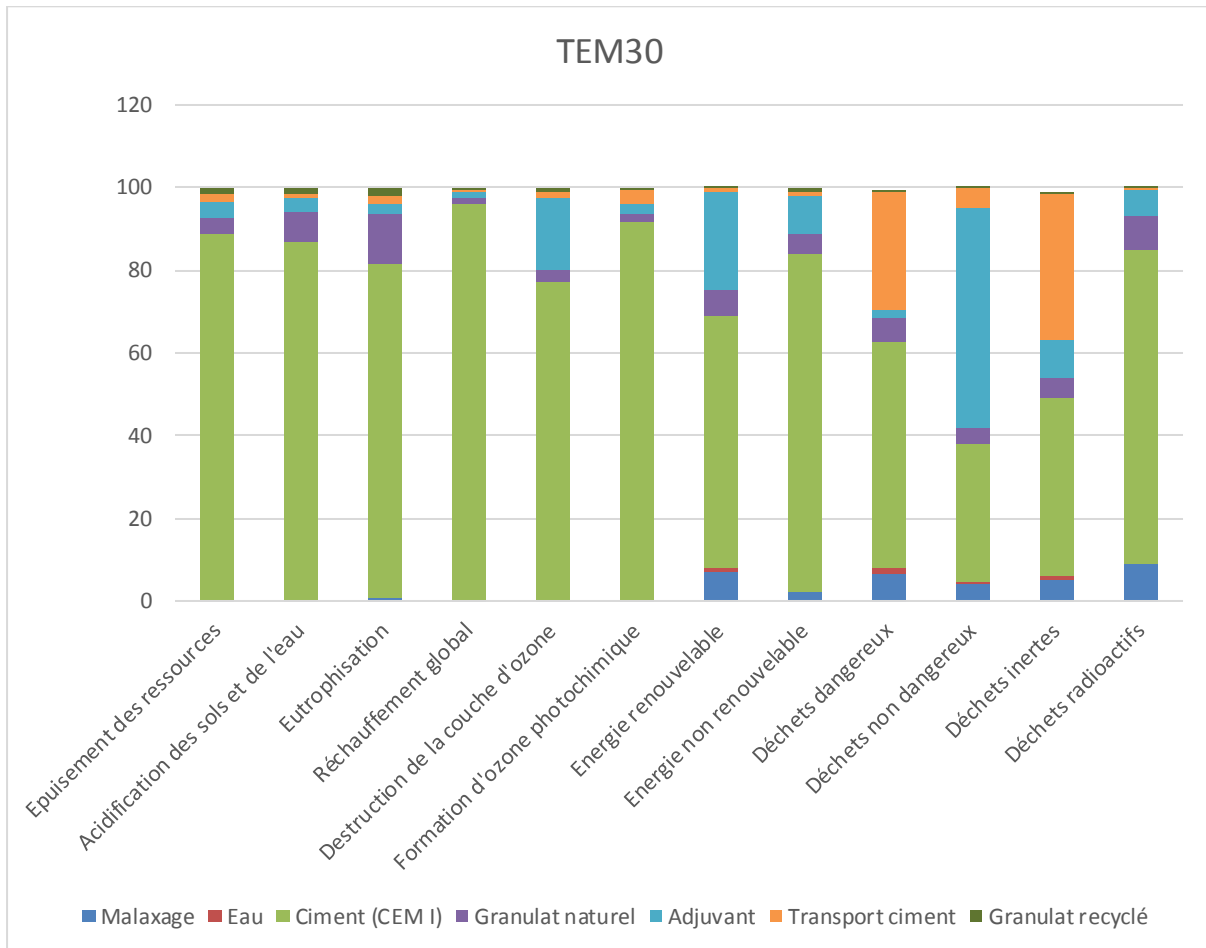


Figure 34 Étude d'impact pour le béton témoin, composition à 30% de granulats recyclés

Les distances étant fortement réduites pour ce circuit 4, l'étude d'impact du béton témoin est très proche de celles des bétons avec l'acheminement du circuit 4 (sauf pour la ville de Lille).

D.6 Analyse comparative de la part du transport entre le circuit 4 et les autres circuits.

Afin de voir la différence entre le circuit le plus pénalisant, le moins pénalisant et le circuit court-circuit 4. Une analyse comparative de la part du transport entre tous les circuits pour les bétons à 30% de granulats recyclés est présentée ci-après.

Afin de ne pas multiplier les graphes seules deux villes sont présentées : celle qui présente le plus d'écart entre les circuits et celle qui en présente le moins. Il s'agit de Lille et de Lyon

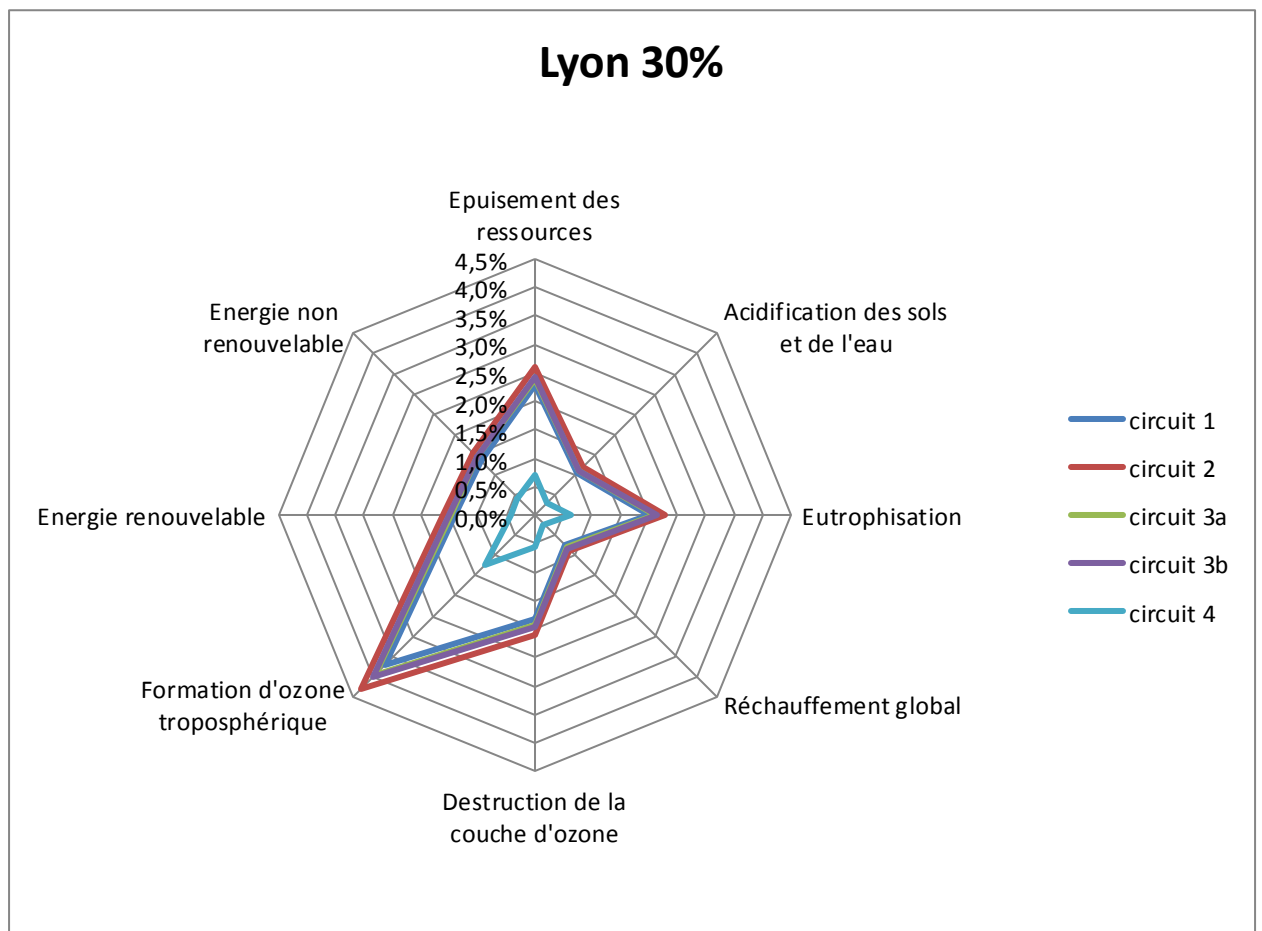
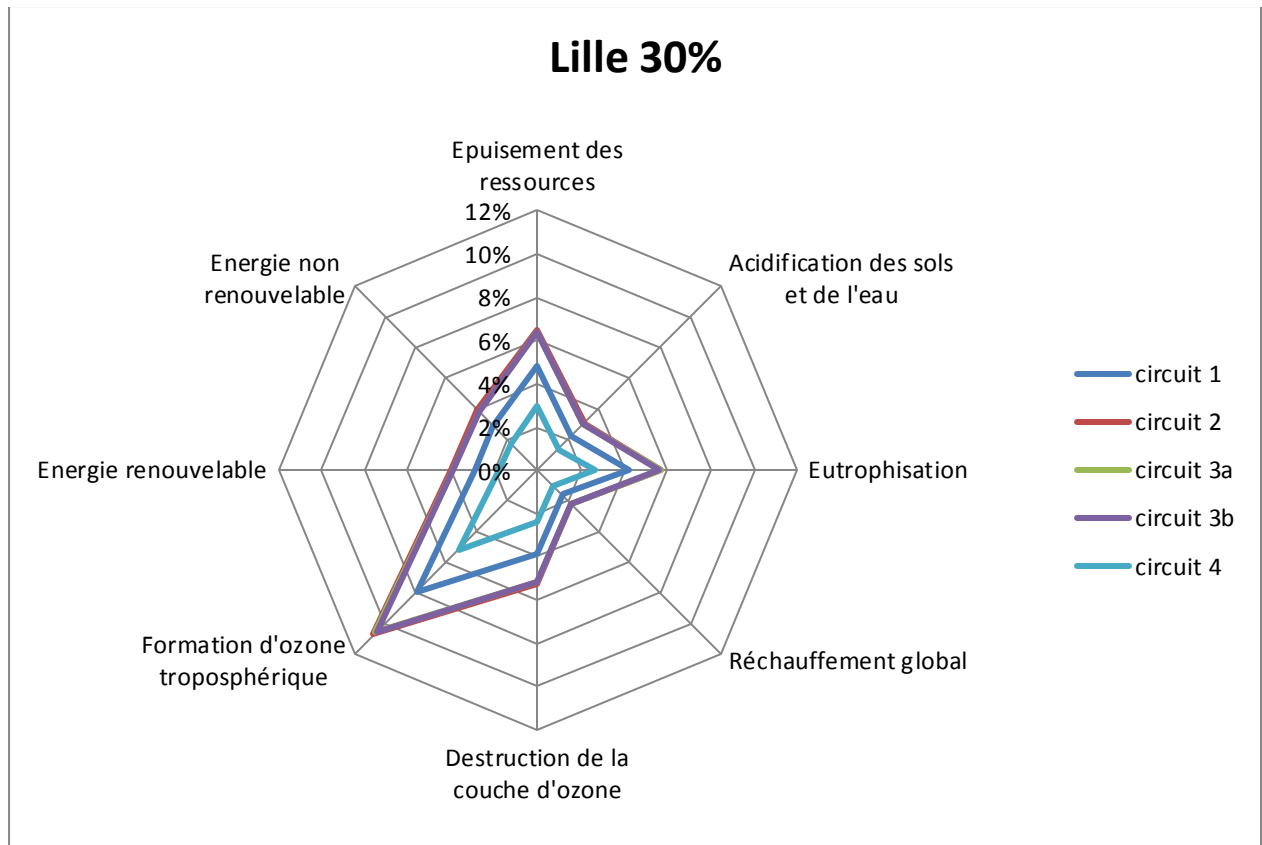


Figure 35 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du béton à 30% – sauf indicateurs déchets

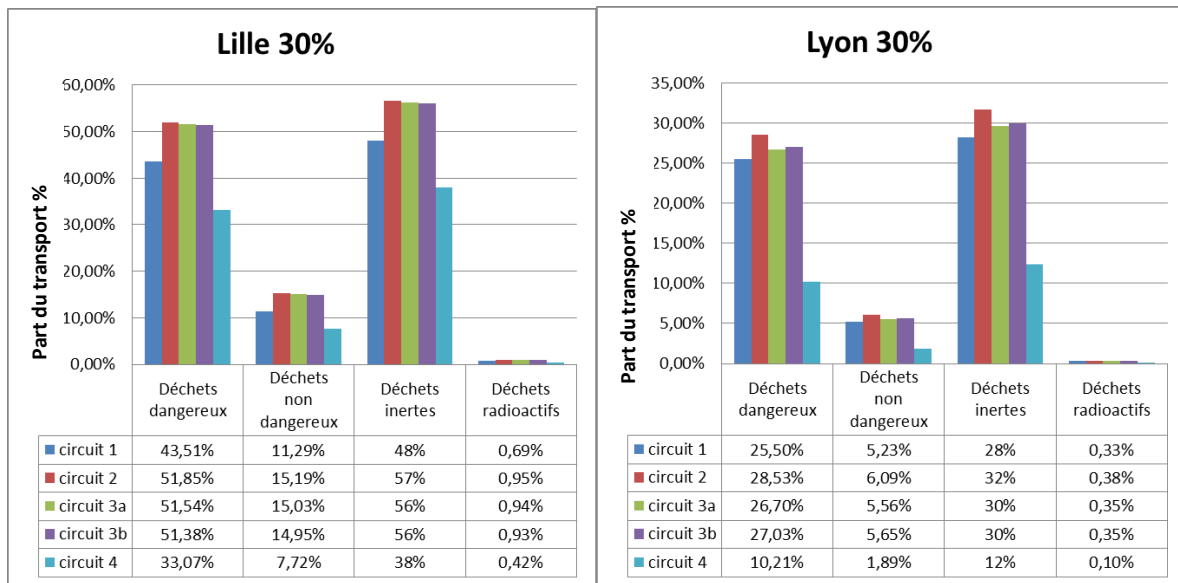


Figure 36 Impact du transport sur l'ACV des processus complets dans le cas du béton à 30% – indicateurs déchets

D.7 Conclusion sur l'analyse de la sensibilité aux transports

La méthode ACV utilisée ici s'appuie sur l'utilisation de données d'inventaires existantes ce qui réduit le nombre de flux calculés (tous ne sont pas disponibles dans les données fournies) et conduit à une ACV dont la modélisation n'est pas parfaitement maîtrisée, ainsi il subsiste des écarts (réduits mais existants) lorsque deux logiciels sont utilisés. La consolidation des méthodes qui a été faite au cours d'un lourd travail préliminaire à cette étude a eu pour but de réduire ces écarts.

L'ACV des compositions témoins sans transport de granulats ni de béton ne met pas en exergue des écarts significatifs entre les compositions (+/-10% selon le taux de recyclés). Ce résultat confirme l'effet de dilution dû à l'impact du ciment qui « écrase » les écarts entre la nature des granulats, seul paramètre (proportion de recyclé) avec la quantité d'eau et d'adjuvant qui varie entre les compositions. Il s'explique aussi par le peu d'écart sur les valeurs d'indicateurs d'impact entre les granulats recyclés et les granulats naturels. Sur un critère d'analyse ACV de bétons, lorsque la composition est formulée à dosage volumique constant, l'utilisation de granulats recyclés n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impact.

L'analyse des ACV du transport seul pour les différents circuits et les différentes villes conduit aux mêmes conclusions que celles sur les valeurs en t.km sur la sélection des circuits pénalisants. L'étude la sensibilité aux transports indique que son influence (écart entre les scénarios les plus et les moins pénalisants) rapporté au scénario le plus pénalisant, reste faible (inférieur à 10%), comparé aux indicateurs d'impact du ciment au dosage utilisé dans le béton. Seuls les indicateurs déchets (hors radioactif) peuvent être impactés par le choix du circuit d'une valeur supérieure à 1,6 fois celle des indicateurs du ciment. La ville de Lille présente des écarts supérieurs à ceux obtenus pour les autres

villes. Les écarts obtenus entre les différents scénarios sont de manière logique encore moins influents.

L'étude des ACV complètes indique que l'influence du transport pour le circuit 1 (circuit actuellement pratiqué) reste modéré quel que soit le dosage en granulats recyclés, la ville étudiée ou l'indicateur analysé, sauf en ce qui concerne les indicateurs déchets pour lesquels le transport est influent (+ de 45%). Les configurations d'une ville à l'autre sont cependant différentes, l'augmentation du taux de recyclés n'incrémente pas de la même façon les indicateurs. Une fois encore l'explication se trouve dans la territorialisation de différents sites (plateforme de recyclage, plateforme de naturels et centrale BPE).

L'étude des ACV complètes sur les circuits les plus pénalisants augmente légèrement cette influence du transport (contribution à hauteur de + de 8% pour plusieurs indicateurs hors déchets). Pour les indicateurs déchets, l'influence peut aller jusqu'à 60% selon les villes.

Une analyse par circuit pénalisant conduit à resserrer les écarts en fonction du taux de granulats recyclés et le taux à 100% est toujours le plus défavorable (pour le circuit pénalisant détecté).

Les études d'impact réalisées confirment cette analyse de sensibilité : le transport a un impact non négligeable sur les déchets, mais beaucoup plus réduit sur les autres. Ces études font aussi ressortir l'influence toujours prédominante du ciment dans le cas de cette étude. Une analyse comparative avec du ciment CEM III ou CEM V confirme que le choix du type de ciment a une influence du premier ordre sur les résultats des ACV. Avec l'utilisation de CEM III, le transport devient non négligeable, y compris pour d'autres indicateurs d'impacts que les seuls déchets. Son effet peut représenter 10 à 20%. Il est le premier indicateur pour les déchets dangereux et inertes. L'utilisation d'un ciment à teneur en clinker réduit serait une préconisation à indiquer pour l'utilisation de bétons de granulats recyclés, à condition de réussir à atteindre les résistances mécaniques voulues sans augmenter le dosage en ciment.

L'impact de l'utilisation d'adjuvant doit être considéré avec attention (nécessaire à l'obtention des propriétés des bétons à l'état frais). Son impact est non négligeable sur certains indicateurs.

Le circuit 4 qui préconise le recyclage et la réutilisation sur place reste le moins pénalisant et l'impact du transport sur les ACV est alors réduit. Ce circuit pourrait être envisagé dans les années à venir.

E Analyse à l'échelle de l'ouvrage : application de l'ACV aux chantiers expérimentaux du PN

L'étude ACV complète de deux ouvrages réalisés dans le cadre des chantiers expérimentaux du PN est proposée. Ces chantiers ont été réalisés avec des bétons de granulats recyclés et des bétons de granulats naturels. Le choix des chantiers a été fait en fonction des données disponibles, l'ACV nécessitant un grand nombre de données les plus précises possibles (quantités de matériaux et de leurs transports et mise en œuvre ...). Les chantiers étudiés sont ceux de Chaponost et du CG77. Les données transport ne sont pas forcément représentatives de ce que l'on ferait dans un chantier « réel » puisque dans ces deux cas le choix ne s'est pas porté sur la distance de travail la plus courte mais bien sur le fait d'utiliser des granulats recyclés.

Dans chacun des chantiers la comparaison est faite entre le chantier réalisé avec granulats recyclés et le même chantier réalisé avec granulats naturels, alors appelé chantier de référence.

Rappel : Pour cette étude l'ACV sera réalisée à l'échelle de l'ouvrage soit pour une dalle ou un mur.

E.1 Données d'étude et éléments étudiés

E.1.1 Chaponost : étude d'un ouvrage dalle

L'ensemble des éléments constituant la dalle sont illustrés sur le schéma ci-dessous (réf. « De Larrard, Dao, Mialot, Rogat - Le recyclage du béton dans le béton – RGRA n°924 – déc 2014/jan 2015 »).

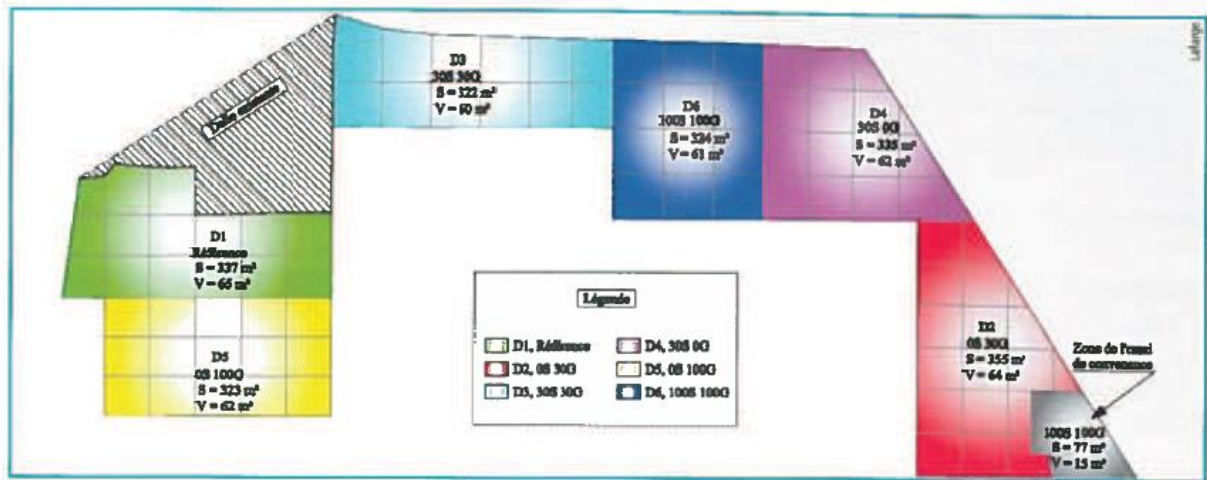


Figure 1
Plan de masse du chantier
General layout of project

Figure 37 – Plan de masse du chantier.

Matériaux et quantités mises en œuvre

Composition des bétons :

Tableau 27 : Composition des bétons coulés sur le chantier de Chaponost

Constituant (kg/m3)	REF	305-0G	05-30G	305-30G	05-100G	1005-100G
Granulat	1796	1467	1437	1151	772	
Granulat recyclé		235	282	514	778	1379
Ciment	302	306	305	308	346	390
Plastifiant	2,57	3,65	2,6	2,62	2,94	3,32
Retardateur		1,54	0,88	1,54	1,04	1,95
Eau	173	188	178	205	205	260

Les volumes de chaque élément sont pris en compte à partir des données de la publication.

Désignation	Surface (m ²)	Volume (m ³)
D1 Réf	337	65
D2 0S30G	355	64
D3 30S30G	322	60
D4 30S0G	335	62
D5 0S100G	323	62
D6 100S100G	324	61

Hypothèses de transport :

La centrale à béton est située à Sérézín, La cimenterie à Val d’Azergues, les granulats recyclés viennent de Pierre Benite et les granulats naturels Petite Craz de St Laurent de Mure.

Ainsi les distances de transport sont les suivantes, les transports sont effectués par camion :

Val d'Azergues -> Sérézín	55km
Pierre Benite -> Serezin	15km
St Bonnet -> Sérézín	20km
Petite Craz -> Sérézín	20km
Sérézín -> Chaponost	22km

Afin de calculer les impacts liés au transport du béton depuis la centrale jusqu’au chantier, les masses volumiques théoriques conduisent pour chaque élément aux masses transportées suivantes :

Désignation	Masse volumique théorique (kg/m ³)	Masse transportée (kg)
D1 Réf	2274	137 930
D2 0S30G	2206	131200
D3 30S30G	2183	121740
D4 30S0G	2202	125798
D5 0S100G	2105	123752
D6 100S100G	2035	113887

Les compositions sont données en granulats humides et donc seule l’eau d’ajout est prise en compte pour le calcul des masses volumiques

E.1.2 CG 77 : étude d'un élément mur

Composition des bétons :

Tableau 28 : Composition des bétons coulés sur le chantier du CG 77

Matériaux		Témoin	Formule recyclés
Granulats			
0/4 Calcaire	kg	826	543
0/4 Recyclé	kg		233
4/20 Clacaire	kg	1041	489
4/20 Recyclé	kg		489
Liants			
CEM II/A-L 42,5 R CP2	kg	243	255
CV	kg	61	61
Adjuvants			
Entraîneur d'air	%	0,15	
Plastifiant	%	0,60	
Agent de viscosité	%		0,33
Superplastifiant	%		0,80
<hr style="border: 1px solid red;"/>			
Eau efficace	L	166	155
Liant équivalent	kg	280	292
Eeff/Liant équivalent		0,59	0,53
G/S Massique		1,26	1,26

Faute de données nous n'avons pas pu prendre en compte les cendres volantes ainsi que l'entraîneur d'air et l'agent de viscosité. En effet certaines DEP sont disponibles pour l'entraîneur d'air mais seuls les indicateurs d'impact sont référencés ; Après avoir contacté le SYNAD nous n'avons pas obtenu pour ce type d'adjuvant les données d'inventaires. Le plastifiant et superplastifiant ont été modélisés à partir de données d'inventaires anciennes (2005) mais existantes. En ce qui concerne les cendres volantes, il n'y a pas d'ACV réalisées à ce jour (selon les informations du site OFRIR d'IFSTTAR⁵

Hypothèses sur les transports :

Distance entre centrale de malaxage et chantier : 20 km.

Les granulats naturels proviennent de la carrière d'Élinghen (260 km par train puis 25 km de Goussainville par camion). Les granulats recyclés font 100km en camion. Les ciments proviennent de Villeneuve St Georges (42 km en camion). Le superplastifiant provient de Limay (70 km par camion).

⁵.<http://ofrir2.ifsttar.fr/>

E.2 Résultats : ACV à l'échelle des éléments des chantiers expérimentaux

E.2.1 Chaponost : étude d'un ouvrage dalle

E.2.1.1 Étude de l'ouvrage complet

La figure suivante montre la comparaison entre le chantier de Chaponost et le chantier dit de référence fait sans granulats recyclés avec uniquement le béton de référence, sur les 11 indicateurs calculés. Il est à noter que les différences entre les deux chantiers sont très faibles (cf échelle de la Figure 38 très resserrée).

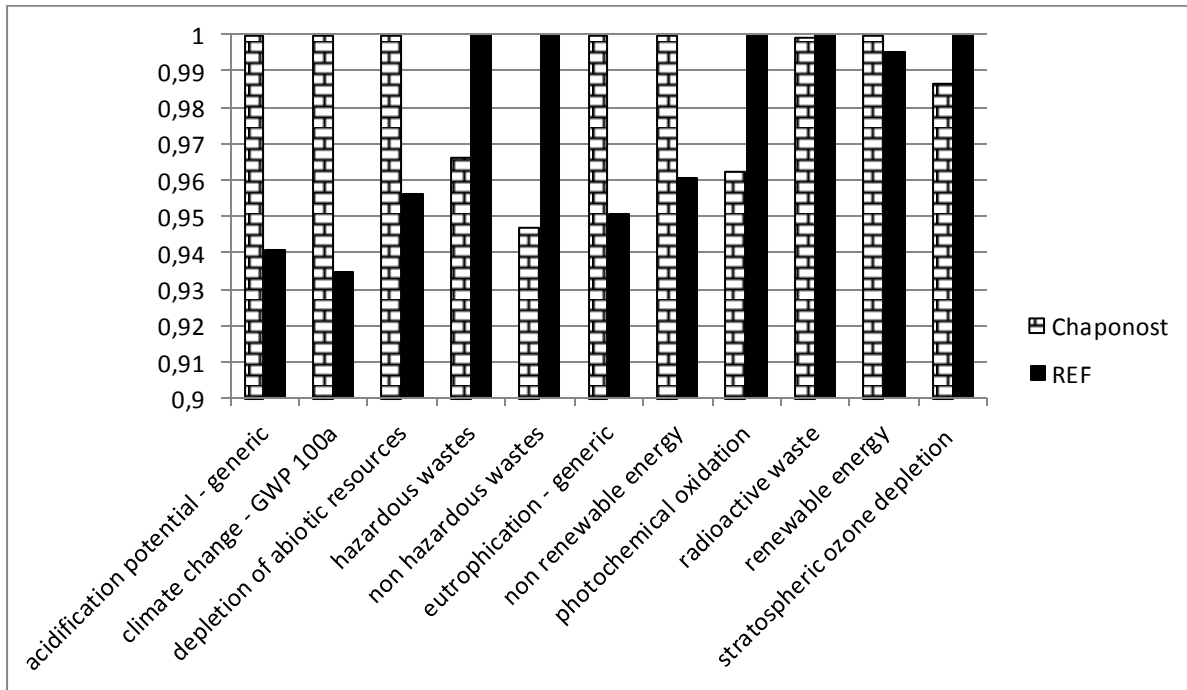


Figure 38 : : Comparaison environnementale entre le chantier de Chaponost tel qu'il a été réalisé (avec des granulats recyclés) et tel qu'il aurait pu l'être (REF : sans granulats recyclés)

L'ACV ne montre pas l'intérêt du granulat recyclé, notamment sur l'épuisement des ressources puisque l'indicateur actuel ne prend pas en compte les effets territoriaux.

Les Figure 39 et Figure 40 montrent la part de chaque procédé respectivement pour le chantier de référence et pour le chantier réalisé avec des granulats recyclés.

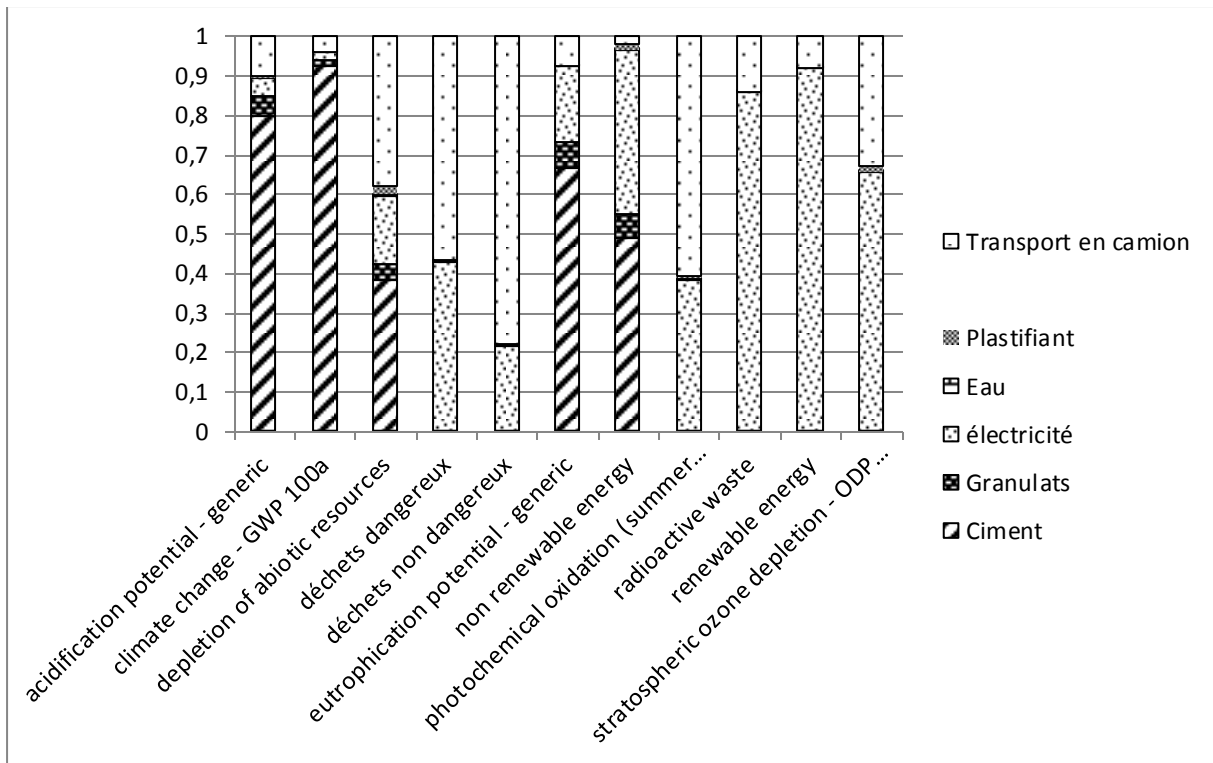


Figure 39 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec un béton de référence (sans granulats recyclés)

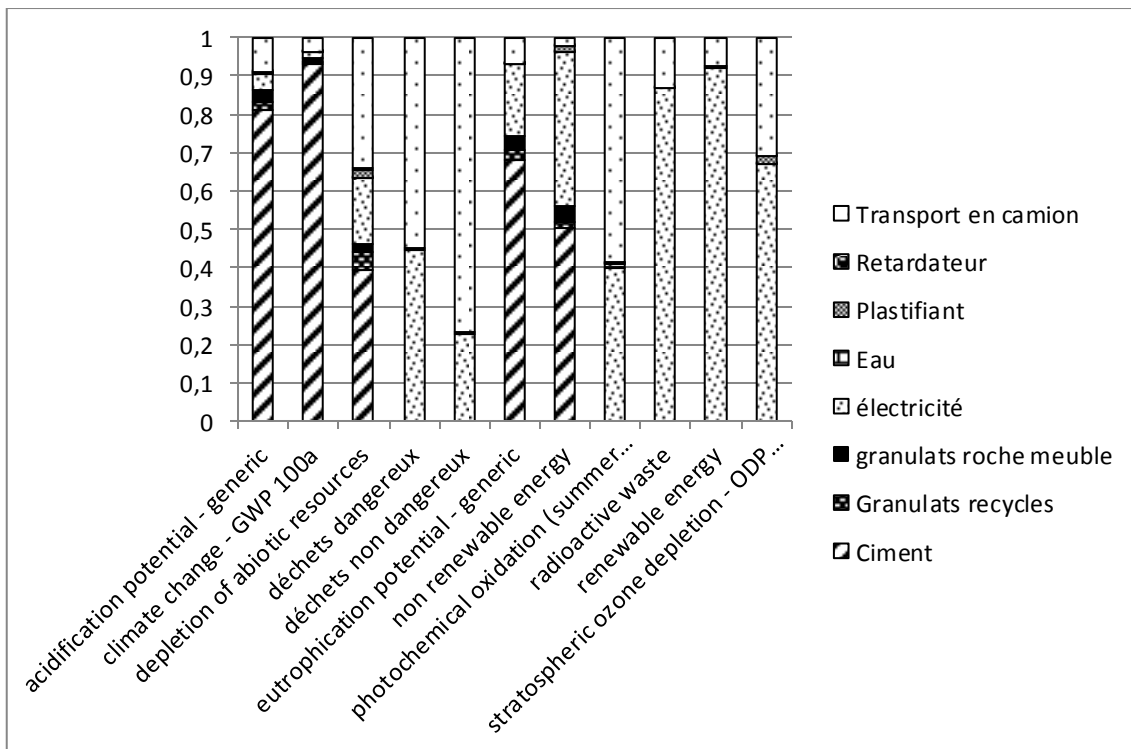


Figure 40 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec le béton avec granulats recyclés

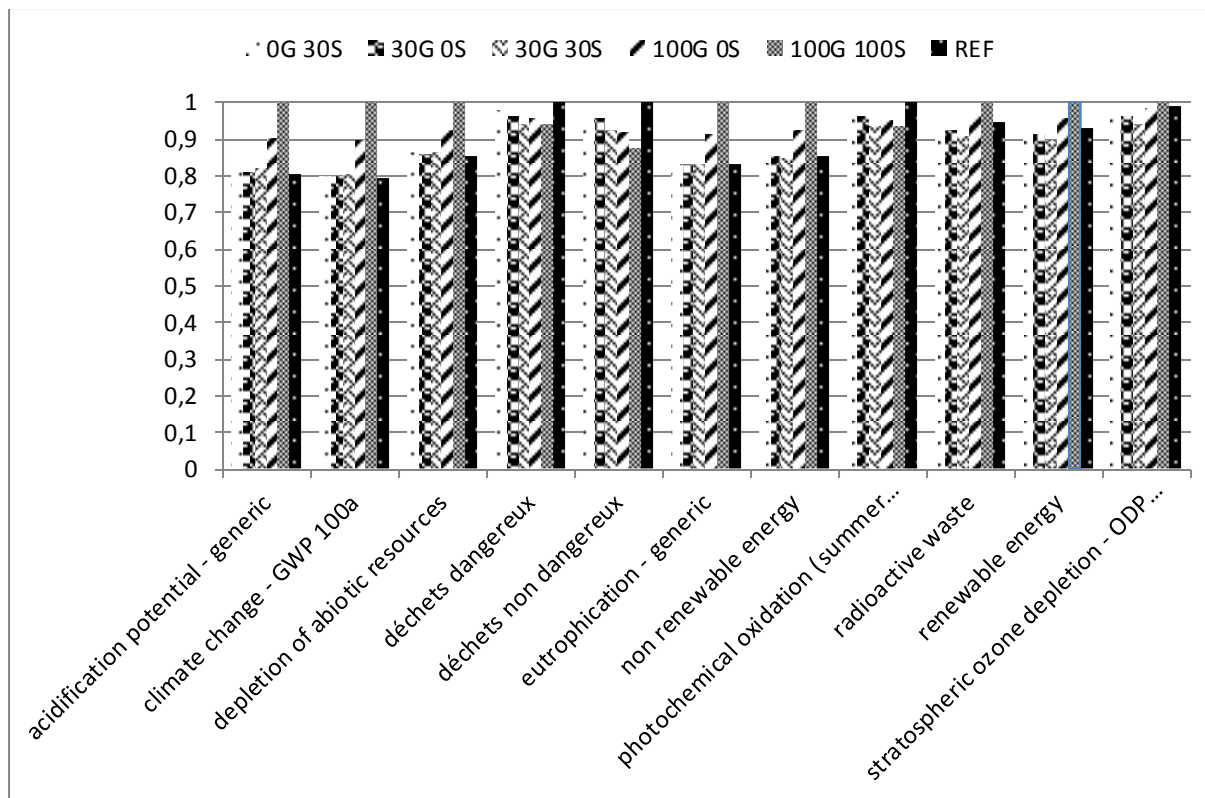


Figure 41 Étude d'impact sur les bétons utilisés pour le chantier de Chaponost

Comme attendu une augmentation est observée en fonction du dosage en ciment. Cette augmentation ne se retrouve pas dans la comparaison de l'élément complet car en se référant aux volumes respectifs de chaque morceau de dalle il n'y a qu'une faible partie des compositions à 100% pour lesquelles cet écart est sensible.

E.2.2 CG 77 : étude d'un élément mur

La Figure 42 montre la comparaison entre le chantier réalisé avec du béton recyclé et le chantier réalisé avec un béton avec des granulats non recyclés. Les mêmes 11 indicateurs sont comparés. On remarque que les différences entre les deux chantiers sont relativement faibles. Elles sont significatives sur deux indicateurs : les déchets dangereux et l'énergie renouvelable.

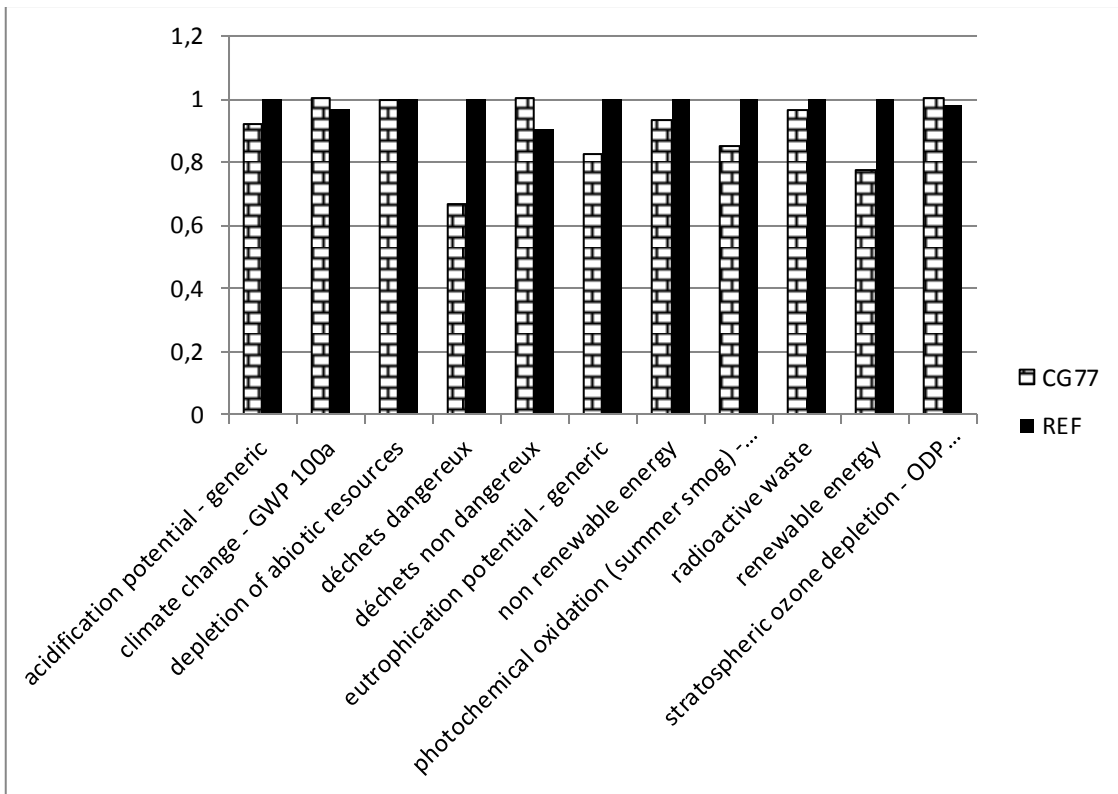


Figure 42 : Comparaison environnementale entre le chantier du CG 77 tel qu'il a été réalisé (avec des granulats recyclés) et tel qu'il aurait pu l'être (REF : sans granulats recyclés)

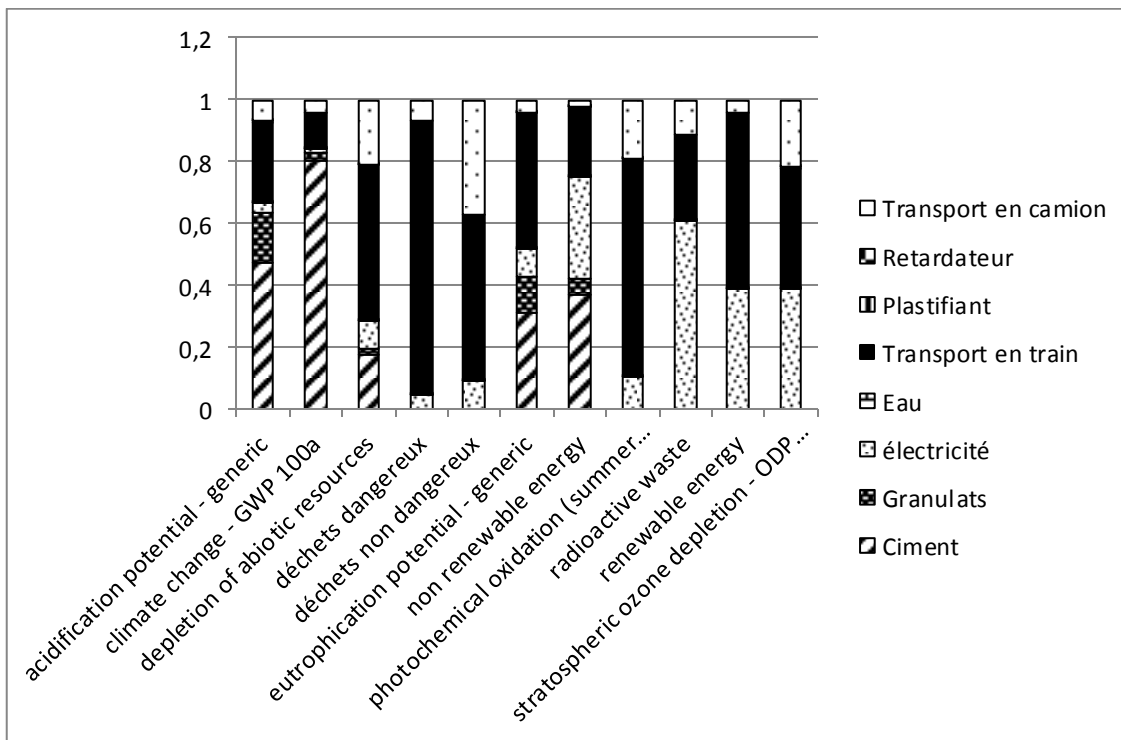


Figure 43 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec un béton de référence (sans granulats recyclés)

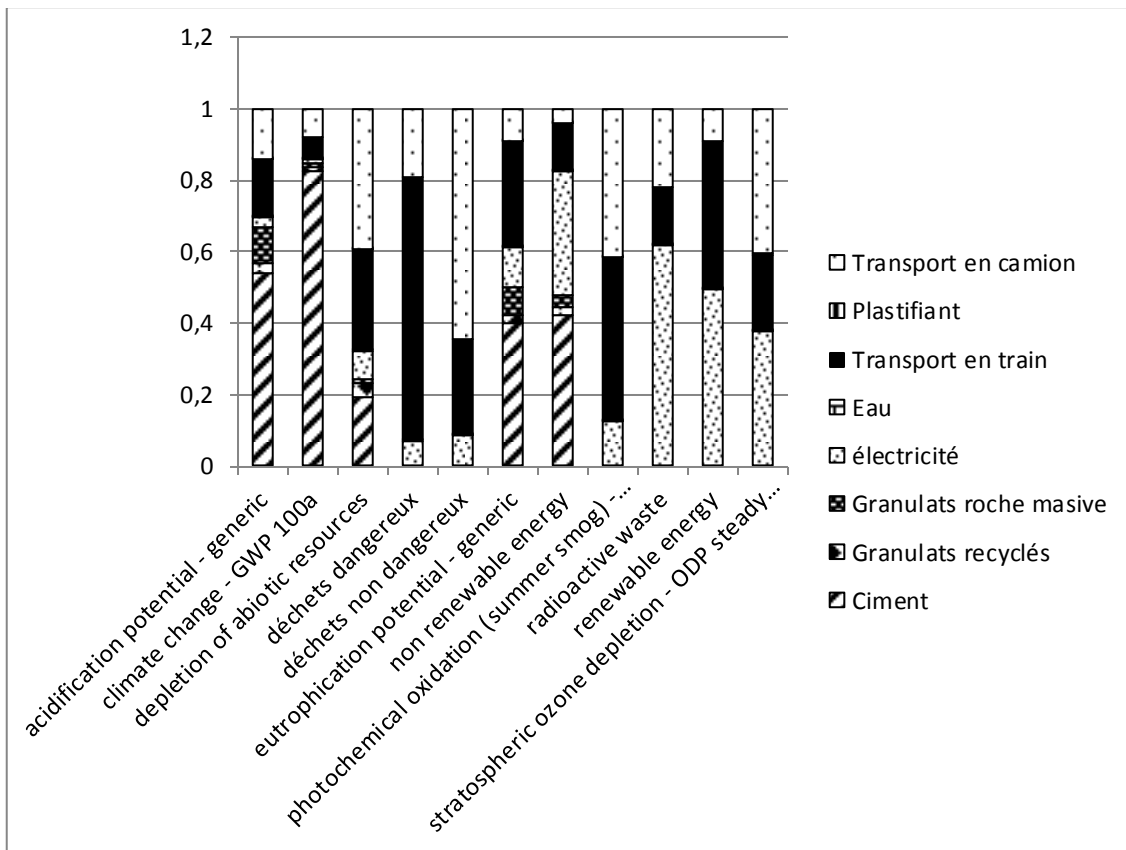


Figure 44 : Part de chaque procédé dans le cas du chantier réalisé avec le béton avec granulats recyclés

De même que pour le chantier de Chaponost, la part importante du ciment se retrouve pour les indicateurs acidification atmosphérique et changement climatique et la part importante de l'électricité dans les indicateurs déchets radioactifs, énergie renouvelable et destruction de la couche d'ozone, Figure 43. Les granulats jouent un rôle plus important que pour le chantier précédent. Le transport en train prend également une part très importante sur quasiment tous les indicateurs d'impact. Ceci s'explique par le fait que l'on ait d'importantes distances de transport pas forcément représentatives de ce qui se passerait dans un cas « réel ». Les mêmes tendances s'observent sur le chantier réalisé avec des granulats recyclés, **Figure 44**.

Remarque en ce qui concerne le process électricité :

Pour information, le process électricité identifié pour cette partie de l'étude dans les études d'impact rassemble toutes les étapes du procédé qui génère une consommation d'électricité. Pour les études des paragraphes précédents (sur bétons : étude tranche 2 et tranche 4 : bétons à composition constante), l'influence de l'électricité est ventilée sur chacun des process : granulats, ciment,.... Seul le malaxage est calculé à part. Pour cette raison la présentation des études d'impact n'est pas tout à fait identique entre les études, elle est liée au logiciel utilisé

F Discussion et Perspectives

F.1 Eco-respectabilité des bétons de granulats recyclés et ACV : comment prendre en compte les impacts évités

Selon l'annexe nationale de la norme NFEN 15804, pour calculer les indicateurs relatifs à l'épuisement des ressources des granulats, il faut se conformer au tableau suivant

Tableau C.10 — Facteur de caractérisation pour l'ADP de l'argile, de la bentonite, du calcaire, du gravier, du gypse, de la silice et du sable

Substance	Unité	Compartiment initial de prélèvement ou d'émission	Facteur de caractérisation kg éq. antimoine	Commentaire
Argile	kg	ressources	1,4 E-11	Assimilé au Silicium
Bentonite	kg	ressources	1,4 E-11	Assimilée à l'argile
Calcaire	kg	ressources	0	Assimilé au Calcium
Gravier	kg	ressources	1,4 E-11	Assimilé au Silicium
Gypse	kg	ressources	3,93 E-08	
Silice (SiO ₂)	kg	ressources	1,4 E-11	Assimilé au Silicium
Sable	kg	ressources	1,4 E-11	Assimilé au Silicium

Ainsi, en analysant l'inventaire, on peut retrouver les éléments silicium et calcium. Ci-dessous les valeurs pour les bétons témoins.

Substance	Compartiment	Unité	TEM_0_CIRO	TEM_10_CIRO	TEM_30_CIRO	TEM_100_CIRO
Silicon	Eau	g	31,16	30,87	30,29	28,26
Silicon	Sol	mg	24,26	24,00	23,49	21,70
Calcium	Sol	mg	143,49	142,41	140,40	132,95

Ces valeurs ne sont pas suffisamment diminuées pour justifier de l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons.

Pour comparaison, voici ces valeurs extraites des DEP des granulats après re-calcul par SimaPro.

Substance	Compartiment	Unité	Granulat issu de roches massives	Granulat issu de roches meubles	Granulat recyclé
Silicon	Eau	g	1,59	1,94	0,12
Silicon	Sol	mg	1,34	1,63	0,10
Calcium	Sol	mg	6,02	7,34	0,48

Pour les granulats, l'intérêt est beaucoup plus marqué, surtout pour le calcium qui représente la ressource calcaire selon l'annexe nationale de la norme. On voit que la diminution de cette consommation de ressource est bien plus importante pour un granulats recyclé que pour un granulats naturel. Cet effet de diminution de l'indicateur épuisement des ressources ne se retrouve pas dans les bétons témoins, une fois encore parce que l'utilisation de ciment dilue les effets.

Le critère non épuisement de la ressource granulats devra être évalué avec d'autres outils que l'ACV pour favoriser l'utilisation des granulats recyclés.

Ci-dessous, les mêmes valeurs extraites pour la ville de Lille, les circuits pénalisants à 0% et 100% de GR.

Substance		Unité	LIL_0_CEMII	LIL_0_CEMIII	LIL_0_CEMIV	LIL_100_CEM	LIL_100_CEMIII	LIL_100_CEMV
Silicon	Eau	g	45	38	39	43	36	37
Silicon	Sol	mg	27	21	22	28	22	23
Calcium	Sol	mg	265	239	244	304	278	283

Ainsi l'impact évité « épuisement de la ressource en granulats naturel » peut être estimé en suivant la méthodologie ACV mais le résultat obtenu n'est pas très représentatif de la réalité car d'une part une modélisation de la ressource granulats naturel est faite par une assimilation au calcium ou au silicium et d'autre part, aucune territorialisation n'est prise en compte. La méthodologie ACV, qui conserve l'intérêt d'être une méthodologie de référence, n'est pas un vecteur de promotion pour l'utilisation des granulats recyclés à ce niveau.

En ce qui concerne l'impact évité diminution de la quantité de déchets stockés, il n'y a aucun moyen par la réalisation d'une ACV d'identifier cet impact évité. Il pourrait être évalué par l'étude d'un processus complet : fabrication d'un béton, vie dans l'ouvrage, démolition, réutilisation en tant que granulats à béton.

La réalisation d'un chantier expérimental démolition-reconstruction sur place illustré par le circuit court n°4 tel que celui de Bâle pourrait faire ressortir cet impact évité.

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés vis-à-vis de ces deux impacts évités est évident tel qu'illustré Figure 45. On peut également relever que l'utilisation des granulats dans le béton est contributeur d'un non dépôt en décharge sauvage des déchets de démolition, facteur supplémentaire d'éco-respectabilité non qualifiable mais réel. Mais cet éco-respectabilité ne sera confirmée que si les analyses ACV présentées au cours de ce rapport ne contredisent pas le bénéfice mis en évidence par ces deux de ces critères. Pour être complète ces valeurs devraient être comparées à la réserve de granulats naturels disponibles et à la ressource en recyclés disponibles

selon les régions. Nous ne disposons pas de ces données pour ce rapport. On peut remarquer que le critère économie en granulat naturel est utilisé par l'éco comparateur Sève⁶.

Remarque : l'impact évité « non stockage de déchets » peut aussi être intitulée « Tonne de gravats évités »

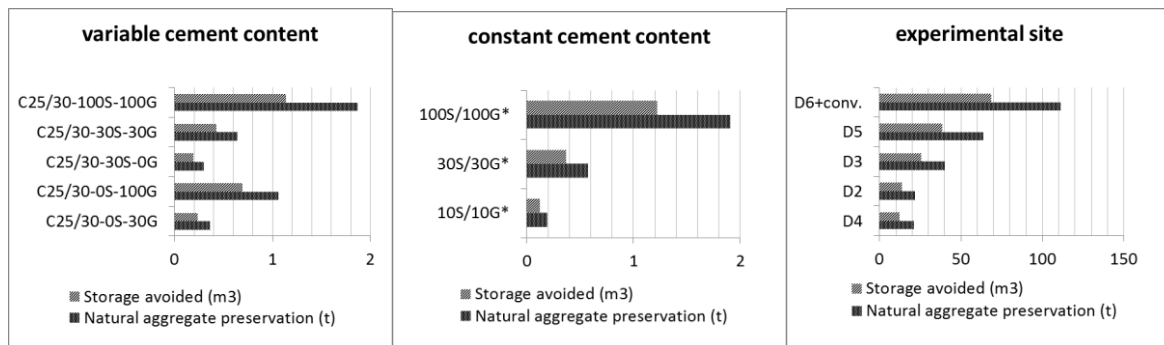


Figure 45 Impacts évités : épaissement de la ressource en granulat naturel et stockage de déchet

La méthodologie d'étude pour faire cette analyse « bénéfiques-pertes » lors de l'utilisation des granulats recyclés peut être illustrées sur les schémas présentés en conclusion..

F.2 Bétons de granulats recyclés et économie circulaire – Conférence DESIRE –Brussels janvier 2016

Dans le cadre du GT3 et dans un esprit d'ouverture des travaux de ce groupe de travail, nous avons assisté à une conférence en janvier 2016 sur le thème de l'économie circulaire. Il s'agissait d'une journée d'information sur le bilan du projet européen DESIRE dont le but est de développer et de mettre en application un ensemble d'indicateurs de suivi de progrès de l'Europe concernant une utilisation efficace des ressources. Le projet visait à élaborer une base de données unique permettant une construction cohérente d'indicateurs d'utilisation efficace des ressources, et que cette base de données soit applicable au niveau de l'UE, du pays, pour tout secteur et groupe de produits, pour une application en production et consommation.

Après une présentation du déroulement du projet, de la définition de ces indicateurs et de la méthodologie de calcul associée qui a conduit à la création d'une base appelée EXIOBASE, plusieurs discussions ont été proposées. Les thèmes de ces discussions étaient les suivants :

- Le dilemme entre simplicité et complexité de la base de données des indicateurs
- Niveau de détail et échelle pour la mise en œuvre des indicateurs
- Quels sont les utilisateurs potentiels de la base de données
- De quoi ont besoin les différents acteurs pour implémenter les indicateurs élaborés

Il ressort de cette journée que la méthodologie générale (input/output) et les problématiques posées sont très proches de celles souvent évoquées dans l'analyse ACV :

⁶ <http://www.usirf.com/les-actions-de-la-profession/developpement-durable/eco-comparateurseve/>

Comment avoir une base de données unique ?

Comment faire simple pour une utilisation aisée pour non simpliste ? A ce niveau, les décideurs au niveau européen souhaiteraient un minimum d'indicateurs pour faciliter l'affichage et la compréhension. Comme pour les ACV n'étudier que quelques indicateurs ou les regrouper conduit à une simplification qui risque de fausser les conclusions des analyses.

Pour avoir posé la question, il s'avère que les acteurs de ce projet ne connaissent pas ou que très peu la méthodologie ACV, les études présentées ici sont plus le fruit d'un travail d'économistes et de juristes. C'est donc une approche parallèle aux travaux réalisés dans le cadre des ACV qui conduit aux mêmes questionnements d'unicité des bases de données et des indicateurs d'une part et de difficultés de présentation d'approches multicritères d'autre part.

Une note de cette journée est donnée en annexes.

Conclusion générale

Le caractère éco-respectueux des bétons de granulats recyclés de bétons est souvent évoqué sans qu'il ne soit systématiquement démontré. L'objectif de cette étude est de vérifier si les bétons de granulats recyclés de bétons sont réellement plus éco-respectueux que les bétons de granulats naturels selon les critères normatifs de la méthodologie analyse du cycle de vie (ACV) appliquée aux matériaux de construction. Cette étude vise à comparer les impacts environnementaux par la réalisation d'Analyses de Cycles de Vie (ACV) de Bétons de Granulats Recyclés (BGR) et de Bétons de Granulats Naturels (BGN).

Lors d'une première phase de l'étude, le bilan environnemental de bétons avec différentes proportions de granulats recyclés et formulés selon le cadre du PN RECYBETON (GT1) avait été réalisé suivant la méthode ACV, en appliquant les éléments de la norme 15804+A1. Les conclusions de cette première phase indiquaient que l'utilisation de granulats recyclés dans les formulations des bétons du PN entraîne une augmentation de tous les impacts environnementaux, à différentes échelles. Une analyse de sensibilité avait 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. Les résultats mettent globalement l'accent sur la dégradation des indicateurs pour les formulations contenant 100% de granulats recyclés. Ces résultats ont été confirmés par des études d'impact qui font ressortir la prédominance de l'influence du ciment sur la plupart des indicateurs d'impacts environnementaux. Suite à cette première phase, il est ressorti que plusieurs points devaient être analysés. Ainsi, l'influence du processus de fabrication des bétons sur les distances de transport a été étudié ; en particulier l'influence du choix des scénarii de mélange granulats naturels/recyclés sur les distances de transport des granulats et du béton puis sur les indicateurs d'impacts environnementaux. En complément aux études ACV à l'échelle du matériau, la définition des frontières du système ACV à l'échelle élément ou ouvrage a été proposée par l'utilisation des données des méthodes effectives de réalisation des bétons à l'échelle des chantiers expérimentaux du PN. Enfin une discussion a été proposée sur la possibilité d'évaluer ou non, à l'aide d'une analyse du cycle de vie, l'influence de l'utilisation des granulats naturels d'une part sur une réduction de l'emploi des granulats naturels, et d'autre part sur la diminution de la quantité de déchets déposés dans les centres d'enfouissement techniques.

Afin de réduire autant que possible l'utilisation compensatrice de ciment, des formulations visant des objectifs raisonnables de résistance à dosage en ciment constant ont été proposées. Ainsi, des formulations optimisées de bétons (BGR et BGN) utilisant des superplastifiants ont été mises en œuvre avant de réaliser leurs ACV. L'optimisation des formulations a permis de conserver la même teneur en ciment pour des résistances mécaniques proches, avec une valeur minimale garantie, les compositions de bétons ont été réalisées à volumes égaux de constituants (hormis le dosage en adjuvant) et quatre taux de substitution ont été proposés : 0, 10%, 30% et 100%. Les résultats obtenus valident l'utilisation de ces compositions comme compositions référentes pour cette phase de l'étude d'ACV. Les résultats de résistance mécanique et de consistance sur les bétons à l'état frais et durci confirment que les objectifs visés sont atteints pour le béton de granulats naturels (0%GR). La substitution de GN par GR affecte le maintien de la consistance dans le temps. Les résistances mécaniques sont diminuées lorsque 100% de GR sont utilisés. Pour les autres dosages, il peut être

considéré que les résistances mécaniques sont identiques. L'objectif du PN est de développer des bétons à 10% ou 30% de GR, et pour ces formulations, les valeurs sont très proches.

Ensuite, une étude de la sensibilité aux transports a été réalisée par une analyse de la territorialisation et une discrimination des circuits d'acheminement des granulats. Le choix des circuits a été fait de façon prendre en compte la solution des pré-mélanges granulats recyclés-granulats naturels. Pour cela une analyse a été menée au niveau du territoire et les distances parcourues pour acheminer les granulats vers les centrales à béton sont évaluées et comparées pour plusieurs circuits d'acheminement. Cette étude a été réalisée à partir des cartographies des carrières, gravières, sablières et des centrales à béton. L'analyse comparative des circuits sur l'acheminement des granulats a conduit à identifier pour la majorité des villes le circuit 1 comme le circuit le moins pénalisant. Ce circuit est celui qui consiste à préparer séparément les GR et les GN sur leur plateforme respective puis à acheminer les granulats sur le site de la centrale BPE. Le choix d'un prémélange sur le site de production des GN pénalise le circuit, ce qui se traduit par une augmentation de la valeur t.km. Quelques villes ont des configurations particulières, ainsi pour Strasbourg le circuit 1 n'est pas le moins pénalisant alors que c'est celui qui envisage le moins d'étape. Ce constat est dû à un éloignement des plateformes de recyclage et des centrales BPE. Pour des villes à configuration équivalente à Lille, il pourra être intéressant de préconiser le circuit 1 et un dosage en granulat recyclé important pour diminuer cet impact du transport. Pour cette ville, très peu de sites de granulats naturels sont situés en périphérie proche du centre-ville.

Les circuits étudiés dans cette étude illustrent la possibilité de faire un pré-mélange sur le site de granulat naturel, il pourrait être intéressant d'envisager aussi le pré-mélange sur site de granulats recyclés.

L'augmentation du taux de recyclés nuit aux circuits d'acheminement des granulats (augmentation de la valeur t.km) sauf pour la ville de Lille du fait de l'éloignement des sites de GN. Par contre, lorsque l'acheminement de béton est intégré aux circuits, l'effet du taux de granulats recyclés sur les transports n'est pas le même. L'introduction du circuit court (circuit 4), pour lequel les granulats recyclés sont fabriqués in situ sur le chantier de démolition/reconstruction et le béton est fabriqué sur ce même chantier, conduit systématiquement à des valeurs inférieures (en t.km). Ce circuit court n'est pas irréaliste puisque quelques chantiers pilotes ont été réalisés avec cette approche. Le chantier de Bâle est donné ici en exemple.

Il n'est pas possible de donner une conclusion universelle quelle que soit la ville étudiée. Une étude du territoire est indispensable pour déterminer le circuit favorable/pénalisant au taux de substitution envisagé. Une recommandation pourrait être de rapprocher les plateformes de recyclage des centrales BPE lorsque le pré-mélange n'est pas envisagé. En outre, une étude complète des distances routières et à vol d'oiseau incite à la réserve quant aux conclusions de cette phase de l'étude puisque des écarts allant de 14 à 65% sont observés selon les villes et les sites entre les calculs de distance à vols d'oiseau ou routières.

Ensuite, les analyses de cycle de vie des bétons aux différents taux de substitution en granulats recyclés pour les circuits pénalisants identifiés précédemment pour chacune des 4 villes ont été comparées. Au préalable des ACV « témoins » de bétons sans prise en compte du transport ou des ACV témoins du seul transport « granulats et béton » ont été analysées dans le but de proposer une analyse de la sensibilité aux transports. Cette analyse de sensibilité a été complétée par des analyses

d'impacts sur la contribution des granulats, du ciment, de l'eau, des adjuvants et du transport de chacun des constituants pour quelques circuits particuliers.

L'ACV des compositions témoins sans transport de granulats ni de béton ne met pas en exergue des écarts significatifs entre les compositions (+/-10% selon le taux de recyclés). Ce résultat confirme l'effet de dilution dû à l'impact du ciment qui « écrase » les écarts entre la nature des granulats, seul paramètre (proportion de recyclé) avec la quantité d'eau et d'adjuvant qui varie entre les compositions. Il s'explique aussi par le peu d'écart sur les valeurs d'indicateurs d'impact entre les granulats recyclés et les granulats naturels. Sur un critère d'analyse ACV de bétons, lorsque la composition est formulée à dosage volumique constant, l'utilisation de granulats recyclés n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impact.

L'analyse des ACV du transport seul pour les différents circuits et les différentes villes conduit aux mêmes conclusions que celles sur les valeurs en t.km, les circuits identifiés pénalisants sont les mêmes puisque très peu d'écart est observé pour les compositions témoins, seuls la valeur en t.km conditionne les écarts sur les ACV. L'étude la sensibilité aux transports (traduite par l'influence des écarts observés entre les circuits, en particulier entre le circuit le plus pénalisant et le moins pénalisant) conclue à une faible sensibilité à celui-ci. L'évolution des indicateurs d'impacts environnementaux selon les circuits reste très modérée comparée aux indicateurs d'impact du ciment (au dosage utilisé dans le béton). Seuls les indicateurs déchets (hors radioactif) peuvent être augmentés, selon le choix du circuit, d'une valeur proche de 2 fois celle des indicateurs du ciment. L'étude des ACV complètes (matériaux + transport) et les études d'impact associées confirment l'impact modérée du transport pour le circuit 1 (circuit actuellement pratiqué), et ce, quel que soit le dosage en granulats recyclés, la ville étudiée ou l'indicateur analysé, sauf en ce qui concerne les indicateurs déchets pour lesquels ce transport est influent, il peut représenter jusqu'à 45% de la valeur de l'indicateur. Les configurations d'une ville à l'autre sont cependant différentes, l'augmentation du taux de recyclés n'incrémente pas de la même façon les indicateurs. Une fois encore l'explication se trouve dans la territorialisation de différents sites (plateforme de recyclage, plateforme de naturels et centrale BPE). L'étude d'impact des ACV complètes sur les circuits les plus pénalisants conduit aux mêmes conclusions avec un effet amplificateur selon le circuit mais resserre les écarts en fonction du taux de recyclé. Pour cette analyse sur circuits pénalisants, le taux à 100% est toujours le plus défavorable.

Ces études font aussi ressortir l'influence toujours prédominante du ciment dans le cas de cette étude. Une analyse comparative avec du ciment CEM III ou CEM V confirme que le choix du type de ciment a une influence du premier ordre sur les résultats des ACV. Avec l'utilisation de CEM III, le transport devient non négligeable, y compris pour d'autres indicateurs d'impacts que les seuls déchets. Son effet peut représenter 10 à 20%. Il est le premier indicateur pour les déchets dangereux et inertes. L'utilisation d'un ciment à teneur en clinker réduit serait une préconisation à indiquer pour l'utilisation de bétons de granulats recyclés, à condition de réussir à atteindre les résistances mécaniques voulues sans augmenter le dosage en ciment. L'impact de l'utilisation d'adjuvant doit être considéré avec attention (nécessaire à l'obtention des propriétés des bétons à l'état frais). Son impact est non négligeable sur certains indicateurs.

Le circuit 4 qui préconise le recyclage et la réutilisation sur place reste le moins pénalisant et l'impact du transport sur les ACV est alors réduit. Ce circuit pourrait être envisagé dans les années à venir.

Enfin, l'étude ACV complète de deux ouvrages réalisés dans le cadre des chantiers expérimentaux du PN a été proposée. Ces chantiers ont été réalisés avec des bétons de granulats recyclés et des bétons de granulats naturels. Le choix des chantiers a été fait en fonction des données disponibles (de Chaponost et CG77). Les données transport n'étaient pas forcément représentatives de ce que l'on ferait dans un chantier « réel » puisque dans ces deux cas le choix ne s'est pas porté sur la distance de travail la plus courte mais bien sur le fait d'utiliser des granulats recyclés. Dans chacun des chantiers la comparaison a été faite entre le chantier réalisé avec granulats recyclés et le même chantier réalisé avec granulats naturels. Pour les 2 études (Chaponost et CG77), les différences entre les deux chantiers (recyclés ou naturels) sont très faibles, ou faibles (significatives pour 2 indicateurs dans le cas de l'étude du CG77). L'ACV ne montre pas l'intérêt du granulat recyclé, notamment sur l'épuisement des ressources puisque l'indicateur actuel ne prend pas en compte les effets territoriaux. Ceci s'explique aussi par le fait que les granulats qu'ils soient naturels ou recyclés représentent une part faible des contributions aux différents indicateurs d'impact environnementaux et au fait que les distances de transport sont similaires. Les granulats (qu'ils soient recyclés ou naturels) jouent un rôle plus important pour le CG77 que pour le Chaponost. Le transport en train prend également une part très importante sur quasiment tous les indicateurs d'impact pour le chantier du CG77 ; l'explication réside dans les distances utilisées pour ce chantier expérimentales qui sont élevées et non représentatives d'un cas « réel » hors chantier expérimental.

Il restait à répondre aux deux questions suivantes : Est-il possible de déterminer un point de basculement à partir duquel l'utilisation des granulats recyclés devient prohibitif ? Et l'outil ACV peut-il être un vecteur pour favoriser l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons ?

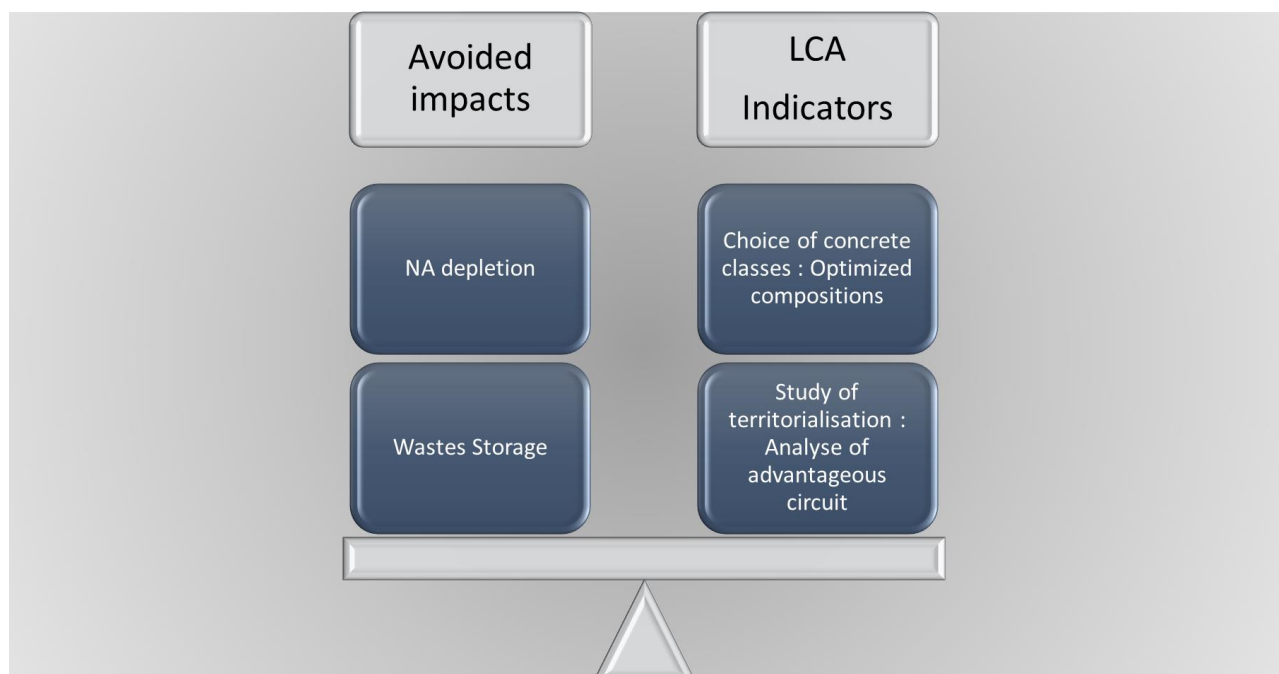
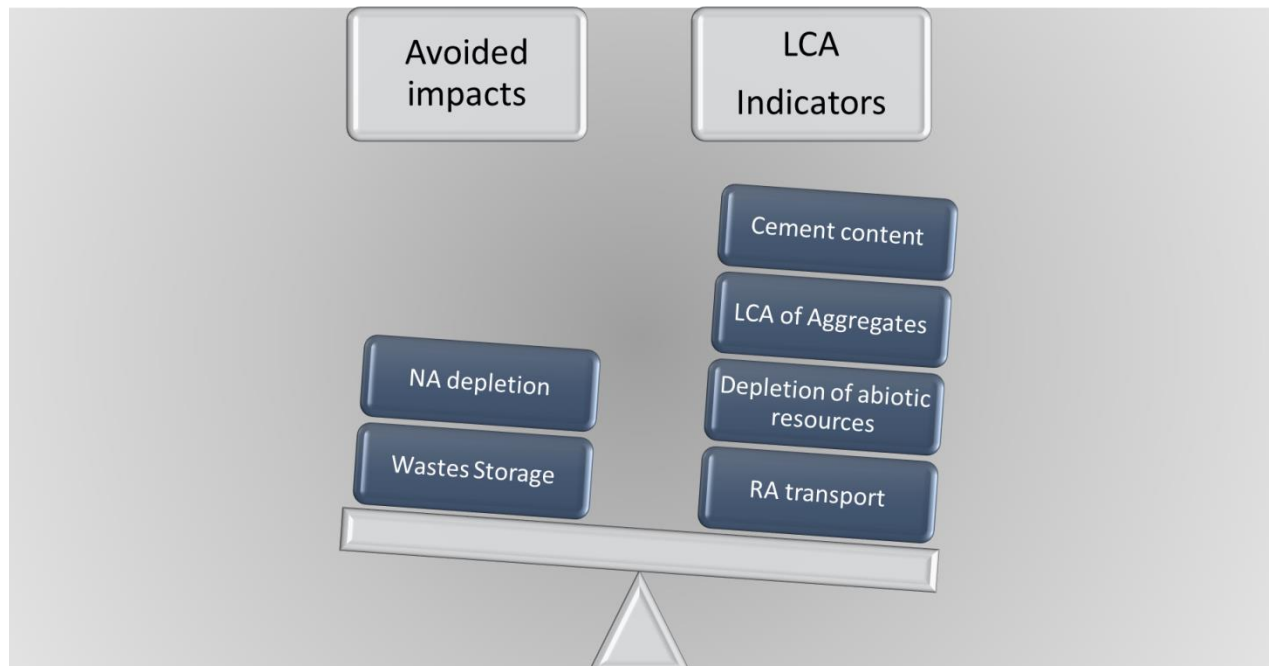
La réponse à la première question est oui sous réserve de procéder à une étude de territorialisation minutieuse pour la ville envisagée (ceci inclue une prise en compte des distances routières). Ensuite sous réserve de proposer des formulations de bétons pour lequel le dosage en ciment n'est pas « prohibitif » au regard des indicateurs d'impact, il est possible de trouver soit le circuit optimal pour un dosage en granulat recyclé donné, soit le dosage en granulats recyclés maximal au-delà duquel l'utilisation des granulats recyclés impacte trop fortement les indicateurs (valeur t.km maximale). Mais ces valeurs optimales sont fonction des compositions de bétons et de la territorialisation et aucune réponse universelle ne peut être formulée pour tout le territoire. Un croisement des résultats de cette étude avec celle réalisée par Lafarge France, en incluant les typologies et volumes de déchets en stock serait à envisager. (Mongéard - Lafarge France, 2016)

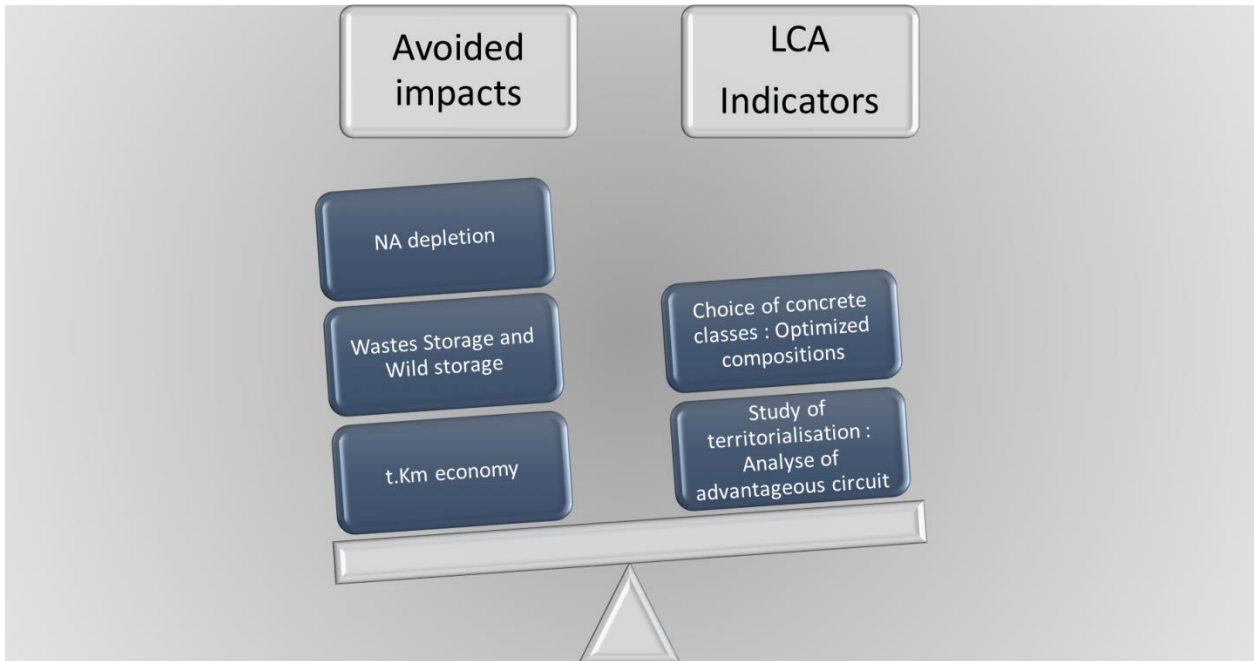
La réponse à la deuxième question est partiellement non, l'ACV n'est pas l'outil méthodologique qui incite à l'utilisation de granulats recyclés, notamment sur l'épuisement des ressources puisque l'indicateur actuel ne prend pas en compte les effets territoriaux et que l'épuisement de la ressource granulats est évaluée à partir de la ressource calcium ou silicium uniquement. Concernant l'impact évité stockage de déchets, il ne peut être estimé sur un procédé de fabrication de béton mais pourrait l'être sur un chantier expérimental intégrant une déconstruction et une reconstruction.

En fait, l'ACV n'a pas pour but de mettre en avant la vertu du recyclage des granulats recyclés dans le béton. Une ACV doit permettre d'identifier les dommages créés par un processus. Le caractère éco-

respectueux des bétons de granulats recyclés est évident lorsque l'on considère le non épuisement de la ressource en granulats naturels ou le non stockage de déchets (évitement de la production de gravats et/ou de décharge sauvage). Cet bénéfice lié à l'utilisation des granulats recyclés ne sera confirmé que si l'ACV ne met pas en avant des dommages trop importants liés soit à une augmentation du transport, soit à une augmentation du dosage en ciment.

Cette équilibre « bénéfices-pertes » peut être illustré sur les schémas ci-dessous.





Bibliographie

- AFNOR. (2014). NFEN 15804. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction.*
- Deodonne. (2015). Thèse de doctorat Université de Starsbourg. *Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental* - . Strasbourg.
- Idir, F. S. (2015). *Evaluation environnementale du béton de granulats recyclés, rapport PN recybeton.*
- Jolliet. (2005). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan.* PPUR presses polytechniques.
- Mongeard - Lafarge France. (2016). *La ressource en matériaux inertes recyclables dans le béton en france- Rapport PN recybeton.*

Annexes

Synthèse des résultats ACV obtenus en tranche 2

Tableau 30 : Quantification des indicateurs d'impacts environnementaux avec les 3 logiciels

	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 (MJ)	5,72	5,77	5,77	5,79	5,77	6,24	6,04	6,35	6,29	6,87	Betie
	1,53.10 ³	1,80.10 ³	2,28.10 ³	1,80.10 ³	2,04.10 ³	3,01.10 ³	1,69.10 ³	2,50.10 ³	2,23.10 ³	3,33.10 ³	Simapro
	8,08.10 ²	8,20.10 ²	8,33.10 ²	8,30.10 ²	8,31.10 ²	9,85.10 ²	9,03.10 ²	9,97.10 ²	9,64.10 ²	1,17.10 ³	Gabie
Épuisement des ressources (kg éq. Sb)	2,26.10 ⁻³	2,28.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	2,29.10 ⁻³	2,28.10 ⁻³	2,47.10 ⁻³	2,38.10 ⁻³	2,51.10 ⁻³	2,48.10 ⁻³	2,70.10 ⁻³	Betie
	7,12.10 ⁻¹	8,11.10 ⁻¹	9,92.10 ⁻¹	7,97.10 ⁻¹	8,91.10 ⁻¹	1,23	7,59.10 ⁻¹	1,06	9,53.10 ⁻¹	1,32	Simapro
	6,56.10 ⁻⁵	6,61.10 ⁻⁵	6,76.10 ⁻⁵	6,61.10 ⁻⁵	6,67.10 ⁻⁵	7,60.10 ⁻⁵	7,12.10 ⁻⁵	7,76.10 ⁻⁵	7,47.10 ⁻⁵	8,66.10 ⁻⁵	Gabie
Consommation d'eau (m ³)	3,26	3,32	3,43	3,32	3,32	3,57	3,32	3,55	3,42	3,67	Betie
	1,16	1,16	1,13	1,18	1,16	1,27	1,24	1,27	1,28	1,43	Simapro
	5,09.10 ²	4,26.10 ²	4,29.10 ²	4,21.10 ²	4,21.10 ²	4,22.10 ²	6,06.10 ²	5,26.10 ²	4,80.10 ²	4,97.10 ²	Gabie
Déchets valorisés	3,57	3,44	3,35	3,49	3,44	3,22	3,59	3,38	3,47	3,21	Betie
											Simapro
											Gabie
Déchets dangereux (kg)	1,89.10 ⁻⁴	1,99.10 ⁻⁴	2,06.10 ⁻⁴	1,92.10 ⁻⁴	1,99.10 ⁻⁴	2,31.10 ⁻⁴	2,05.10 ⁻⁴	2,38.10 ⁻⁴	2,23.10 ⁻⁴	2,60.10 ⁻⁴	Betie
	1,75.10 ⁻²	2,01.10 ⁻²	2,50.10 ⁻²	2,02.10 ⁻²	2,28.10 ⁻²	3,06.10 ⁻²	1,77.10 ⁻²	2,48.10 ⁻²	2,29.10 ⁻²	3,13.10 ⁻²	Simapro
											Gabie
Déchets non dangereux (× 10 ⁻³)	1,09	1,36	1,23	1,25	1,36	1,71	1,14	1,35	1,41	1,86	Betie
											Simapro
											Gabie
Déchets inertes (kg)	1,19	1,15	1,12	1,17	1,15	1,08	1,20	1,13	1,16	1,08	Betie
	3,35	3,86	4,82	3,87	4,36	6,35	3,64	5,27	4,76	6,91	Simapro
											Gabie
Changement climatique (kg éq. CO ₂)	0,650	0,662	0,667	0,661	0,662	0,741	0,698	0,755	0,738	0,832	Betie
	1,98.10 ²	2,35.10 ²	3,01.10 ²	2,29.10 ²	2,63.10 ²	3,98.10 ²	2,19.10 ²	3,38.10 ²	2,94.10 ²	4,38.10 ²	Simapro
	2,07.10 ²	2,11.10 ²	2,15.10 ²	2,13.10 ²	2,13.10 ²	2,51.10 ²	2,29.10 ²	2,55.10 ²	2,46.10 ²	2,93.10 ²	Gabie
Acidification atmosphérique (kg éq. SO ₂)	2,20.10 ⁻³	2,19.10 ⁻³	2,16.10 ⁻³	2,21.10 ⁻³	2,19.10 ⁻³	2,32.10 ⁻³	2,34.10 ⁻³	2,39.10 ⁻³	2,41.10 ⁻³	2,58.10 ⁻³	Betie
	3,92.10 ⁻¹	4,94.10 ⁻¹	6,80.10 ⁻¹	4,76.10 ⁻¹	5,71.10 ⁻¹	9,10.10 ⁻¹	4,32.10 ⁻¹	7,37.10 ⁻¹	6,21.10 ⁻¹	9,82.10 ⁻¹	Simapro
	4,11.10 ⁻¹	4,06.10 ⁻¹	3,90.10 ⁻¹	4,08.10 ⁻¹	3,98.10 ⁻¹	4,18.10 ⁻¹	4,50.10 ⁻¹	4,56.10 ⁻¹	4,52.10 ⁻¹	4,95.10 ⁻¹	Gabie

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 (kg éq. C ₂ H ₄)	1,52.10 ⁻⁴	1,51.10 ⁻⁴	1,52.10 ⁻⁴	1,53.10 ⁻⁴	1,51.10 ⁻⁴	1,58.10 ⁻⁴	1,59.10 ⁻⁴	1,64.10 ⁻⁴	1,64.10 ⁻⁴	1,70.10 ⁻⁴	
	1,15.10 ⁻²	1,78.10 ⁻²	3,01.10 ⁻²	1,66.10 ⁻²	2,28.10 ⁻²	4,31.10 ⁻²	1,24.10 ⁻²	3,13.10 ⁻²	2,41.10 ⁻²	4,41.10 ⁻²	
	4,71.10 ⁻²	4,64.10 ⁻²	4,50.10 ⁻²	4,72.10 ⁻²	4,62.10 ⁻²	4,95.10 ⁻²	5,11.10 ⁻²	5,22.10 ⁻²	5,22.10 ⁻²	5,75.10 ⁻²	

Compositions des bétons étudiés : méthode de formulation utilisée

Un ciment CEM I 52,5 N de l'usine Lafarge de Saint Pierre la Cour a été utilisé.

Un ciment Portland, non composé, a été privilégié afin de ne pas induire de paramètre supplémentaire dans l'analyse des résultats obtenus sur bétons frais et durcis au cours de la thèse (interactions entre les composés du ciment et les granulats recyclés). Les caractéristiques de ce ciment sont données en annexes.

Composition du béton 100% granulat naturel : BGNC

Dosages en eau et en ciment

Ils ont été déterminés à partir des objectifs du béton fixés :

- Classe de résistance visée : C25/30
- Consistance visée : S4 (obtenue par ajout d'adjuvant)
- Classe d'exposition : XC1

Remarque : cette classe d'exposition conduit à une valeur limite acceptable C20/25 selon la norme NF EN 206-1 ; comme nous utilisons un CEM I 52,5, nous conservons un objectif C25/30.

Selon la norme NF EN 206-1, ces objectifs conduisent à :

- Type de vibration : normale
- Dosage en ciment : 260 kg/m³

Afin de n'étudier que l'influence de la substitution du granulat naturel par le granulat recyclé, le rapport E/C et le dosage en ciment seront gardés constant pour tous les bétons.

Les classes granulaires 0/4 mm, 4/10 mm et 6,3/20 mm de granulat naturel concassé ont été utilisées telles que livrées.

La constitution du squelette granulaire théorique du béton de granulat naturel de référence a été réalisée en utilisant la méthode CES Dreux Gorisse (Détermination d'une courbe idéale appelée courbe OAB). En effet, il a été montré dans la thèse de Kunwufine Deodonne que le malaxage des granulats recyclés même saturés conduit à une modification du squelette granulaire et, de fait, du module de finesse. Ainsi il n'a pas été choisi de construire le squelette granulaire à partir des méthodes d'empilement granulaire optimal.

Le squelette granulaire obtenu est donné ci-dessous (méthode Dreux Gorisse).

Tableau 31 : squelette granulaire du béton de référence de granulats naturels

Fractions	Proportions massiques	proportions volumiques
0/4 mm	38,0%	39,3%
4/10 mm	9,0%	8,8%
6,3/20 mm	53,0%	52,0%

Afin de déterminer la composition volumique de la phase solide (ciment + granulats), une compacité prévisionnelle a été estimée. Pour cela des hypothèses sur les conditions de mise en œuvre et sur la consistance prévisionnelle du béton ont été avancées. Les caractéristiques des granulats ont également été prises en compte. Une compacité prévisionnelle de 0,8 a ainsi été supposée. La composition théorique de béton obtenue est donnée **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Tableau 32 : Composition théorique de bétons de granulats naturels concassés pour 1 m³

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	6,3/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	724,36	171,56	1010,29	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2580	2730	2720	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,281	0,063	0,371	0,169

BGR_100

Dans le but d'obtenir des compositions de bétons de granulats naturels et de bétons de granulats recyclés proches, les paramètres de composition ont été conservés : dosage en ciment, en eau, proportion volumique totale des granulats, compacité prévisionnelle.

Dans le même but, un squelette granulaire identique à celui du béton de granulats naturels a été recherché dans un premier temps pour le béton de granulats recyclés. Ainsi un « fitage » (voir Figure 46) du squelette granulaire du béton recyclé sur le squelette granulaire du béton naturel a été effectué par la méthode des moindres carrés à partir des courbes granulaires des sables, gravillons et graviers.

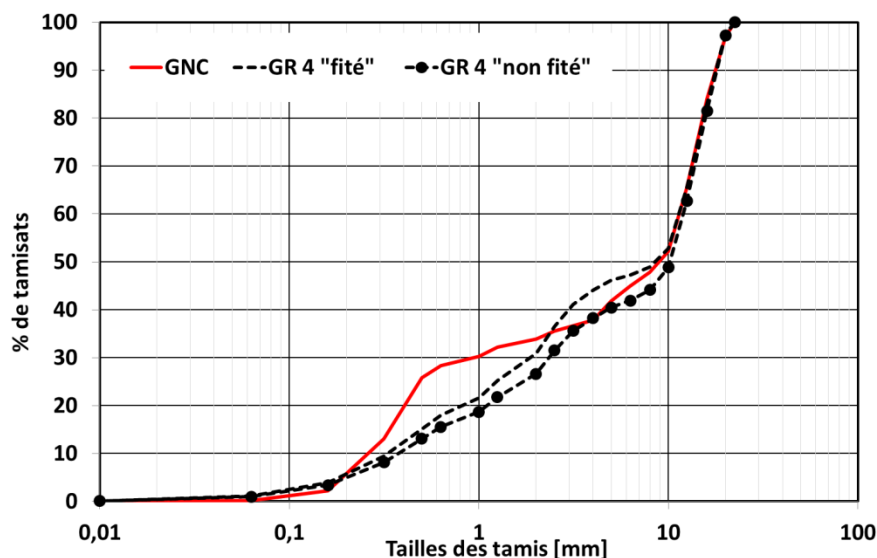


Figure 46: Fitage du squelette granulaire du béton de granulats recyclés sur celui de granulats naturels concassés

Le squelette granulaire ainsi obtenu est donné Tableau 33 et la composition théorique obtenue pour le béton de granulats recyclés est donnée Tableau 33.

Tableau 33: Résultats du squelette granulaire superposé

Fractions	Proportions massiques
0/4 mm	45,1%

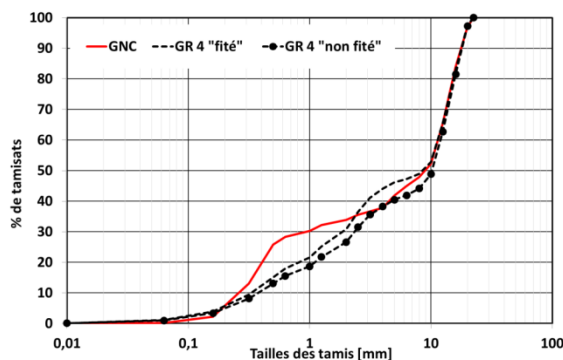
4/10 mm	5%
10/20 mm	49,9%

Tableau 34: Composition théoriques de bétons de granulats recyclés en kg pour 1 m3

	Ciment	Fractions granulaires			Eau
		0/4 mm	4/10 mm	10/20 mm	
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	689,06	76,39	762,40	169
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,345	0,033	0,337	0,169

Les compositions de bétons théoriques sont ensuite corrigées pour garantir une formulation à Eeff/C constant en fonction :

1. Du coefficient d'absorption des granulats
2. De la teneur en eau des granulats
3. De l'extrait sec des adjuvants



BGR_10 ET BGR_30

	Ciment	Fractions granulaires			Eau		
		0/4 mm	4/10 mm	6,3/20 mm			
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	724,36	171,56	1010,29	169		GNC
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,281	0,063	0,371	0,169	X 0.9	GNC
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2580	2730	2720	1000		GNC
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,0765	0,2529	0,0567	0,3339	0,1521		90%GNC
Composition béton massique (kg/ m ³)	234,09	652,482	154,791	908,208	152,1		90%GNC
Composition béton massique (kg/ m ³)	260	689,06	76,39	762,4	169		GR
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,085	0,345	0,033	0,337	0,169	X 0.1	GR
Masse volumique (kg/m ³)	3060	2000	2290	2260	1000		GR
Composition béton volumique (m ³ /m ³)	0,0085	0,0345	0,0033	0,0337	0,0169		10%GR
Composition béton massique (kg/ m ³)	26,01	69	7,557	76,162	16,9		10%GR

	Ciment	Fractions granulaires			Eau		
		0/4 mm	4/10 mm	6,3/20 mm			
<i>Composition béton massique (kg/m³)</i>	260	724,36	171,56	1010,29	169		GNC
<i>Composition béton volumique (m³/m³)</i>	0,085	0,281	0,063	0,371	0,169	X 0.9	GNC
<i>Masse volumique (kg/m³)</i>	3060	2580	2730	2720	1000		GNC
<i>Composition béton volumique (m³/m³)</i>	0,0595	0,1967	0,0441	0,2597	0,1183		70%GNC
<i>Composition béton massique (kg/m³)</i>	182,07	507,486	120,393	706,384	118,3		70%GNC
<i>Composition béton massique (kg/m³)</i>	260	689,06	76,39	762,4	169		GR
<i>Composition béton volumique (m³/m³)</i>	0,085	0,345	0,033	0,337	0,169	X 0.1	GR
<i>Masse volumique (kg/m³)</i>	3060	2000	2290	2260	1000		GR
<i>Composition béton volumique (m³/m³)</i>	0,0255	0,1035	0,0099	0,1011	0,0507		30%GR
<i>Composition béton massique (kg/m³)</i>	78,03	207	22,671	228,486	50,7		30%GR

Calcul des distances selon les circuits

CALCUL DES DISTANCES						
	A-B	E-D	D-C	B-C	B-D	A-C
Scénario 1	Distance1	4691	Distance1 1411	Distance1 1240		Distance1 5819
	Distance2	5490	Distance2 3993	Distance2 894		Distance2 7419
	Distance3	7316	Distance3 4773	Distance3 11585		Distance3 9027
	Moyenne	5832	Moyenne 3392	Distance4 1240		Distance4 4720
				Distance5 894		Distance5 5672
				Distance6 11585		Distance6 2437
				Distance7 1240		Distance7 6070
				Distance8 894		Distance8 3347
				Distance9 8502		Distance9 9532
				Moyenne 4230		Moyenne 6005
Scénario 2	Distance1	4691	Distance1 1411	Distance1 1240	Distance1 7059	
	Distance2	5490	Distance2 3993	Distance2 894	Distance2 7575	
	Distance3	7316	Distance3 4773	Distance3 11585	Distance3 7707	
	Moyenne	5832	Moyenne 3392	Distance4 1240	Distance4	
				Distance5 894	Distance5	
				Distance6 11585	Distance6	
				Distance7 1240	Distance7	
				Distance8 894	Distance8	
				Distance9 8502	Distance9	
				Moyenne 4230	Distance10	
					Distance11	
					Distance12	
					Distance13 3725	
					Distance14 6080	
					Distance15 6485	
					Distance16	
					Distance17	
					Distance18	
					Distance19	
					Distance20	
					Distance21	
					Distance22	
					Distance23	
					Distance24	
					Distance25 2621	
				Distance26 5019		
				Distance27 5613		
				Moyenne 5765		
Scénario 3a			Distance1 1411	Distance1 1240		Distance1 2549
			Distance2 3993	Distance2 2441		Distance2 4710
			Distance3 4773	Distance3 4220		Distance3 7453
			Moyenne 3392	Distance4 3528		Moyenne 4904
				Distance5 894		
				Distance6 7516		
				Distance7 6974		
				Distance8 5351		
				Distance9 11585		
			Moyenne 4861			
Scénario 3b			Distance1 1411	Distance1 1240		Distance1 2549
			Distance2 3993	Distance2 894		Distance2 4710
			Distance3 4773	Distance3 11585		Distance3 7453
			Moyenne 3392	Distance4 1240		Distance4 2549
				Distance5 894		Distance5 4710
				Distance6 11585		Distance6 7453
				Distance7 1240		Distance7 2549
				Distance8 894		Distance8 4710
				Distance9 8502		Distance9 10380
			Moyenne 4230		Moyenne 5229	
Scénario 4						Distance1 2549
						Distance2 4710
						Distance3 7453
						Moyenne 4904

Figure 47 Distances de travail - Strasbourg

CALCUL DES DISTANCES									
	A-B	E-D	D-C	B-C	B-D	A-C			
Scénario 1	Distance1	2073	Distance1	2157	Distance1	1165	Distance1	804	
	Distance2	3435	Distance2	2946	Distance2	6588	Distance2	1126	
	Distance3	3734	Distance3	3305	Distance3	3797	Distance3	2158	
	Moyenne	3081	Moyenne	2803	Distance4	1165	Distance4	1444	
					Distance5	6588	Distance5	1418	
					Distance6	3797	Distance6	2700	
					Distance7	1165	Distance7	1591	
					Distance8	6588	Distance8	2105	
					Distance9	3797	Distance9	3393	
					Moyenne	3850	Moyenne	1860	
Scénario 2	Distance1	2073	Distance1	2157	Distance1	1165	Distance1	365	
	Distance2	3435	Distance2	2946	Distance2	6588	Distance2	6013	
	Distance3	3734	Distance3	3305	Distance3	3797	Distance3	3454	
	Moyenne	3081	Moyenne	2803	Distance4	1165	Distance4		
					Distance5	6588	Distance5		
					Distance6	3797	Distance6		
					Distance7	1165	Distance7		
					Distance8	6588	Distance8		
					Distance9	3797	Distance9		
					Moyenne	3850	Distance10		
							Distance11		
							Distance12		
							Distance13	1592	
							Distance14	7418	
							Distance15	2121	
							Distance16		
							Distance17		
							Distance18		
							Distance19		
							Distance20		
							Distance21		
							Distance22		
							Distance23		
							Distance24		
							Distance25	2132	
							Distance26	7779	
							Distance27	2143	
						Moyenne	3668		
Scénario 3a			Distance1	2157	Distance1	1165		Distance1	2071
			Distance2	2946	Distance2	918		Distance2	4055
			Distance3	3305	Distance3	1815		Distance3	5523
			Moyenne	2803	Distance4	6211		Moyenne	3883
					Distance5	6588			
					Distance6	6284			
					Distance7	3555			
					Distance8	2909			
					Distance9	3797			
					Moyenne	3694			
Scénario 3b			Distance1	2157	Distance1	1165		Distance1	2071
			Distance2	2946	Distance2	6588		Distance2	4055
			Distance3	3305	Distance3	3797		Distance3	5523
			Moyenne	2803	Distance4	1165		Distance4	2071
					Distance5	6588		Distance5	4055
					Distance6	3797		Distance6	5523
					Distance7	1165		Distance7	2071
					Distance8	6588		Distance8	4055
					Distance9	3797		Distance9	5523
					Moyenne	3850		Moyenne	3883
Scénario 4								Distance1	2071
								Distance2	4055
								Distance3	5523
								Moyenne	3883

Figure 48 Distances de travail - Lyon

CALCUL DES DISTANCES						
	A-B	E-D	D-C	B-C	B-D	A-C
Scénario 1	Distance1	425	Distance1 1230	Distance1 2561		Distance1 1017
	Distance2	3500	Distance2 3691	Distance2 18969		Distance2 3388
	Distance3	3513	Distance3 4555	Distance3 30650		Distance3 4976
	Moyenne	2480	Moyenne 3159	Distance4 2561		Distance4 2399
				Distance5 18969		Distance5 1894
				Distance6 30650		Distance6 6169
				Distance7 2561		Distance7 2303
				Distance8 18969		Distance8 184
				Distance9 30650		Distance9 7290
				Moyenne 17393		Moyenne 3291
Scénario 2	Distance1	425	Distance1 1230	Distance1 2561	Distance1 1647	
	Distance2	3500	Distance2 3691	Distance2 18969	Distance2 21825	
	Distance3	3513	Distance3 4555	Distance3 30650	Distance3 26681	
	Moyenne	2480	Moyenne 3159	Distance4 2561	Distance4	
				Distance5 18969	Distance5	
				Distance6 30650	Distance6	
				Distance7 2561	Distance7	
				Distance8 18969	Distance8	
				Distance9 30650	Distance9	
				Moyenne 17393	Distance10	
					Distance11	
					Distance12	
					Distance13 4745	
					Distance14 20479	
					Distance15 24482	
					Distance16	
					Distance17	
					Distance18	
					Distance19	
					Distance20	
					Distance21	
					Distance22	
					Distance23	
					Distance24	
					Distance25 4841	
					Distance26 19146	
					Distance27 23598	
					Moyenne 16383	
Scénario 3a			Distance1 1230	Distance1 2561		Distance1 1332
			Distance2 3691	Distance2 5018		Distance2 22232
			Distance3 4555	Distance3 3976		Distance3 27040
			Moyenne 3159	Distance4 21230		Moyenne 16868
				Distance5 18969		
				Distance6 26433		
				Distance7 25880		
				Distance8 23414		
				Distance9 30650		
				Moyenne 17570		
Scénario 3b			Distance1 1230	Distance1 2561		Distance1 1332
			Distance2 3691	Distance2 18969		Distance2 22232
			Distance3 4555	Distance3 30650		Distance3 27040
			Moyenne 3159	Distance4 2561		Distance4 1332
				Distance5 18969		Distance5 22232
				Distance6 30650		Distance6 27040
				Distance7 2561		Distance7 1332
				Distance8 18969		Distance8 22232
				Distance9 30650		Distance9 27040
				Moyenne 17393		Moyenne 16868
Scénario 4						Distance1 1332
						Distance2 22232
						Distance3 27040
						Moyenne 16868

Figure 49 Distances de travail – Lille

CALCUL DES DISTANCES						
	A-B	E-D	D-C	B-C	B-D	A-C
Scénario 1	Distance1	3670	Distance1 2420	Distance1 1723		Distance1 1973
	Distance2	4292	Distance2 3609	Distance2 10208		Distance2 4745
	Distance3	4579	Distance3 5289	Distance3 6783		Distance3 4948
	Moyenne	4180	Moyenne 3773	Distance4 1723		Distance4 3450
				Distance5 6046		Distance5 6286
				Distance6 7055		Distance6 6685
				Distance7 1723		Distance7 6264
				Distance8 6046		Distance8 4899
				Distance9 7055		Distance9 6975
				Moyenne 5373		Moyenne 5136
Scénario 2	Distance1	3670	Distance1 2420	Distance1 1723	Distance1 3691	
	Distance2	4292	Distance2 3609	Distance2 10208	Distance2 5483	
	Distance3	4579	Distance3 5289	Distance3 6783	Distance3 10784	
	Moyenne	4180	Moyenne 3773	Distance4 1723	Distance4	
				Distance5 6046	Distance5	
				Distance6 7055	Distance6	
				Distance7 1723	Distance7	
				Distance8 6046	Distance8	
				Distance9 7055	Distance9	
				Moyenne 5373	Distance10	
					Distance11	
					Distance12	
					Distance13 5051	
					Distance14 3978	
					Distance15 12260	
					Distance16	
					Distance17	
					Distance18	
					Distance19	
					Distance20	
					Distance21	
					Distance22	
					Distance23	
					Distance24	
					Distance25 4742	
					Distance26 5834	
					Distance27 5719	
					Moyenne 6394	
Scénario 3a			Distance1 2420	Distance1 1723		Distance1 2194
			Distance2 3609	Distance2 1471		Distance2 8127
			Distance3 5289	Distance3 3142		Distance3 8688
			Moyenne 3773	Distance4 7381		Moyenne 6336
				Distance5 10208		
				Distance6 10302		
				Distance7 8843		
				Distance8 6046		
				Distance9 6783		
				Moyenne 6211		
Scénario 3b			Distance1 2420	Distance1 1723		Distance1 2194
			Distance2 3609	Distance2 10208		Distance2 8127
			Distance3 5289	Distance3 6783		Distance3 8688
			Moyenne 3773	Distance4 1723		Distance4 2194
				Distance5 6046		Distance5 8688
				Distance6 7055		Distance6 10341
				Distance7 1723		Distance7 2194
				Distance8 6046		Distance8 8688
				Distance9 7055		Distance9 10341
				Moyenne 5373		Moyenne 6828
Scénario 4						Distance1 2194
						Distance2 8127
						Distance3 8688
						Moyenne 6336

Figure 50 Distances de travail – Bordeaux

Traitement des distances selon la masse transportée

	Granulat recyclé			Granulat naturel			Béton			total t.km	différence min/max hors circuit 4 t.km	Tkm granulats	Max	Max hors circ 4	Min hors circ 4	T km granulat + béton	Max	Min
	km	T	t.km	km	T	t.km	km	T	t.km									
STG_0_CIR1				4,23	1,906	8,062	3,392	2,35	7,971	16,033		8,062				16,033		
STG_0_CIR2				4,23	1,906	8,062	3,392	2,35	7,971	16,033		8,062		8,062		16,033	16,033	
STG_0_CIR3a				4,861	1,906	9,265	3,392	2,35	7,971	17,236		9,265				17,236		
STG_0_CIR3b				4,23	1,906	8,062	3,392	2,35	7,971	16,033		8,062				16,033		
STG_0_CIR4				4,904	1,906	9,347				9,347	0	9,347	9,347	9,265	8,062	9,347	17,236	9,347
STG_10_CIR1	11,837	0,153	1,811	4,23	1,715	7,254	3,392	2,322	7,876	16,941		9,065				16,941		
STG_10_CIR2	15,827	0,153	2,422	4,23	1,715	7,254	3,392	2,322	7,876	17,552		9,676				17,552		
STG_10_CIR3a	9,765	0,153	1,494	4,861	1,715	8,337	3,392	2,322	7,876	17,707		9,831				17,707		
STG_10_CIR3b	9,459	0,153	1,447	4,23	1,715	7,254	3,392	2,322	7,876	16,577		8,701				16,577		
STG_10_CIR4				4,904	1,715	8,41				8,41	1,13	8,41	9,831	9,831	8,701	8,41	17,707	8,41
STG_30_CIR1	11,837	0,458	5,421	4,23	1,334	5,643	3,392	2,267	7,69	18,754		11,064				18,754		
STG_30_CIR2	15,827	0,458	7,249	4,23	1,334	5,643	3,392	2,267	7,69	20,582		12,892				20,582		
STG_30_CIR3a	9,765	0,458	4,472	4,861	1,334	6,485	3,392	2,267	7,69	18,647		10,957				18,647		
STG_30_CIR3b	9,459	0,458	4,332	4,23	1,334	5,643		2,267	7,69	17,665		9,975				17,665		
STG_30_CIR4				4,904	1,334	6,542				6,542	2,917	6,542	12,892	12,892	9,975	6,542	20,582	6,542
STG_100_CIR1	11,837	1,527	18,075				3,392	2,073	7,033	25,108		18,075				25,108		
STG_100_CIR2	15,827	1,527	24,168				3,392	2,073	7,033	31,201		24,168				31,201		
STG_100_CIR3a	9,765	1,527	14,911				3,392	2,073	7,033	21,944		14,911				21,944		
STG_100_CIR3b	9,459	1,527	14,444				3,392	2,073	7,033	21,477		14,444				21,477		
STG_100_CIR4										0	3,631	0	24,168	24,168	14,444	0	31,201	0
LYO_0_CIR1				3,85	1,906	7,338	2,803	2,35	6,587	13,925		7,338				13,925		
LYO_0_CIR2				3,85	1,906	7,338	2,803	2,35	6,587	13,925		7,338		7,338		13,925		
LYO_0_CIR3a				3,694	1,906	7,041	2,803	2,35	6,587	13,628		7,041				13,628		
LYO_0_CIR3b				3,85	1,906	7,338	2,803	2,35	6,587	13,925		7,338				13,925		
LYO_0_CIR4				3,883	1,906	7,401				7,401	0	7,401	7,401	7,338	7,041	7,401	13,925	7,401
LYO_10_CIR1	4,941	0,153	0,756	3,85	1,715	6,603	2,803	2,322	6,508	13,867		7,359				13,867		
LYO_10_CIR2	10,599	0,153	1,622	3,85	1,715	6,603	2,803	2,322	6,508	14,733		8,225				14,733		
LYO_10_CIR3a	7,577	0,153	1,159	3,694	1,715	6,335	2,803	2,322	6,508	14,002		7,494				14,002		
LYO_10_CIR3b	7,733	0,153	1,183	3,85	1,715	6,603	2,803	2,322	6,508	14,294		7,786				14,294		
LYO_10_CIR4				3,883	1,715	6,659				6,659	0,866	6,659	8,225	8,225	7,359	6,659	14,733	6,659
LYO_30_CIR1	4,941	0,458	2,263	3,85	1,334	5,136	2,803	2,267	6,355	13,754		7,399				13,754		
LYO_30_CIR2	10,599	0,458	4,854	3,85	1,334	5,136	2,803	2,267	6,355	16,345		9,99				16,345		
LYO_30_CIR3a	7,577	0,458	3,47	3,694	1,334	4,928	2,803	2,267	6,355	14,753		8,398				14,753		
LYO_30_CIR3b	7,733	0,458	3,542	3,85	1,334	5,136	2,803	2,267	6,355	15,033		8,678				15,033		
LYO_30_CIR4				3,883	1,334	5,18				5,18	2,591	5,18	9,99	9,99	7,399	5,18	16,345	5,18
LYO_100_CIR1	4,941	1,527	7,545				2,803	2,073	5,812	13,357		7,545				13,357		
LYO_100_CIR2	10,599	1,527	16,185				2,803	2,073	5,812	21,997		16,185				21,997		
LYO_100_CIR3a	7,577	1,527	11,57				2,803	2,073	5,812	17,382		11,57				17,382		
LYO_100_CIR3b	7,733	1,527	11,808				2,803	2,073	5,812	17,62		11,808				17,62		
LYO_100_CIR4										0	8,64	0	16,185	16,185	7,545	0	21,997	0
BDX_0_CIR1				5,373	1,906	10,241	3,773	2,35	8,866	19,107		10,241				19,107		
BDX_0_CIR2				5,373	1,906	10,241	3,773	2,35	8,866	19,107		10,241		10,241		19,107		
BDX_0_CIR3a				6,211	1,906	11,838	3,773	2,35	8,866	20,704		11,838				20,704		
BDX_0_CIR3b				5,373	1,906	10,241	3,773	2,35	8,866	19,107		10,241				19,107		
BDX_0_CIR4				6,336	1,906	12,076				12,076	1,597	12,076	12,076	11,838	10,241	12,076	20,704	12,076
BDX_10_CIR1	9,316	0,153	1,425	5,373	1,715	9,215	3,773	2,322	8,761	19,401		10,64				19,401		
BDX_10_CIR2	15,947	0,153	2,44	5,373	1,715	9,215	3,773	2,322	8,761	20,416		11,655				20,416		
BDX_10_CIR3a	12,547	0,153	1,92	6,211	1,715	10,652	3,773	2,322	8,761	21,333		12,572				21,333		
BDX_10_CIR3b	12,201	0,153	1,867	5,373	1,715	9,215	3,773	2,322	8,761	19,843		11,082				19,843		
BDX_10_CIR4				6,336	1,715	10,866				10,866	1,932	10,866	12,572	12,572	10,64	10,866	21,333	10,866
BDX_30_CIR1	9,316	0,458	4,267	5,373	1,334	7,168	3,773	2,267	8,554	19,989		11,435				19,989		
BDX_30_CIR2	15,947	0,458	7,304	5,373	1,334	7,168	3,773	2,267	8,554	23,026		14,472				23,026		
BDX_30_CIR3a	12,547	0,458	5,747	6,211	1,334	8,285	3,773	2,267	8,554	22,586		14,032				22,586		
BDX_30_CIR3b	12,201	0,458	5,588	5,373	1,334	7,168	3,773	2,267	8,554	21,31		12,756				21,31		
BDX_30_CIR4				6,336	1,334	8,452				8,452	3,037	8,452	14,472	14,472	11,435	8,452	23,026	8,452
BDX_100_CIR1	9,316	1,527	14,226				3,773	2,073	7,823	22,049		14,226				22,049		
BDX_100_CIR2	15,947	1,527	24,351				3,773	2,073	7,823	32,174		24,351				32,174		
BDX_100_CIR3a	12,547	1,527	19,159				3,773	2,073	7,823	26,982		19,159				26,982		
BDX_100_CIR3b	12,201	1,527	18,631				3,773	2,073	7,823	26,454		18,631				26,454		
BDX_100_CIR4										0	10,125	0	24,351	24,351	14,226	0	32,174	0
LIL_0_CIR1				17,393	1,906	33,151	3,159	2,35	7,423	40,574		33,151				40,574		
LIL_0_CIR2				17,393	1,906	33,151	3,159	2,35	7,423	40,574		33,151		33,151		40,574		
LIL_0_CIR3a				17,57	1,906	33,488	3,159	2,35	7,423	40,911		33,488				40,911		
LIL_0_CIR3b				17,393	1,906	33,151	3,159	2,35	7,423	40,574		33,151				40,574		
LIL_0_CIR4				16,868	1,906	32,15				32,15	0,337	32,15	33,488	33,488	33,151	32,15	40,911	32,15
LIL_10_CIR1	5,771	0,153	0,883	17,393	1,715	29,829	3,159	2,322	7,335	38,047		30,712				38,047		
LIL_10_CIR2	36,256	0,153	5,547	17,393	1,715	29,829	3,159	2,322	7,335	42,711		35,376				42,711		
LIL_10_CIR3a	34,438	0,153	5,269	17,57	1,715	30,133	3,159	2,322	7,335	42,737		35,402				42,737		
LIL_10_CIR3b	34,261	0,153	5,242	17,393	1,715	29,829	3,159	2,322	7,335	42,406		35,071				42,406		
LIL_10_CIR4				16,868</														

ACV des constituants et du transport

Tableau 35 ACV transport pour 1 t.km selon le camion

Catégorie d'impact	Unité	Transport, 1 t.km (granulats et ciment) >32T		Transport, 1 t.km (béton) 16-32T		Transport, 1 t.km (adjuvant) 7-16T	
		SimaPro	Open LCA	SimaPro	Open LCA	SimaPro	Open LCA
Epuisement des ressources	kg éq Sb	7,82E-04	6,34E-04	1,17E-03	1,22E-03	1,55E-03	1,56E-03
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	4,19E-04	3,90E-04	6,35E-04	7,80E-04	8,30E-04	9,69E-04
Eutrophisation	kg éq PO4--	1,13E-04	6,67E-05	1,68E-04	1,33E-04	2,17E-04	1,65E-04
Réchauffement global	kg éq CO2	1,05E-01	8,40E-02	1,65E-01	1,69E-01	2,21E-01	2,18E-01
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,54E-08	1,60E-08	2,31E-08	3,11E-08	3,06E-08	3,91E-08
Formation d'ozone photochimique	kg éq C2H4	1,36E-04	1,44E-05	1,80E-04	2,84E-05	2,31E-04	3,71E-05
Energie renouvelable	MJ	2,26E-02	1,17E-02	3,53E-02	1,83E-02	5,20E-02	2,46E-02
Energie non renouvelable	MJ	1,80E+00	2,17E-01	2,73E+00	3,96E-01	3,63E+00	5,41E-01
Déchets dangereux	kg	1,39E-03	9,41E-04	1,79E-03	1,63E-03	2,08E-03	2,31E-03
Déchets non dangereux	kg	1,78E-02	1,29E-01	2,08E-02	1,33E-01	2,53E-02	1,45E-01
Déchets inertes	kg	1,30E-02		1,43E-02		1,74E-02	
Déchets radioactifs	kg	1,34E-06	9,05E-06	2,16E-06	1,75E-05	3,29E-06	2,20E-05

Tableau 36 ACV pour les 1 T de granulats : FDES retraités par les logiciels

Catégorie d'impact	Unité	Granulat issu de roches meubles		Granulat issu de roches massives		Granulat recyclé	
		SimaPro	Open LCA	SimaPro	Open LCA	SimaPro	Open LCA
Epuisement des ressources	kg éq Sb	1,60E-02	7,12E-03	1,71E-02	5,89E-03	1,89E-02	1,86E-02
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	1,63E-02	1,43E-02	4,94E-02	5,81E-02	2,16E-02	2,17E-02
Eutrophisation	kg éq PO4--	3,09E-03	5,37E-03	1,13E-02	1,29E-02	4,42E-03	5,42E-03
Réchauffement global	kg éq CO2	2,57E+00	2,55E+00	2,80E+00	2,78E+00	3,01E+00	2,92E+00
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	3,75E-07	2,92E-07	3,13E-07	2,39E-07	3,39E-07	1,74E-08
Formation d'ozone photochimique	kg éq C2H4	5,70E-04	8,39E-05	9,88E-04	6,87E-05	7,50E-04	5,01E-06
Energie renouvelable	MJ	1,49E+00	3,90E-01	1,22E+00	3,20E-01	8,92E-02	2,33E-02
Energie non renouvelable	MJ	9,26E+01	7,69E+01	8,43E+01	6,36E+01	4,32E+01	4,92E+01
Déchets dangereux	kg	2,65E-03	5,75E-03	2,17E-03	4,71E-03	1,58E-04	3,43E-04
Déchets non dangereux	kg	1,35E-01	1,72E-01	1,11E-01	1,41E-01	8,08E-03	1,03E-02
Déchets radioactifs	kg	4,85E-04	4,98E-04	3,98E-04	4,08E-04	2,90E-05	2,97E-05

SimaPro surévalue les indicateurs par rapport à open LCA sauf en ce qui concerne les déchets, on observe une sous-évaluation.

ACV complètes

Catégorie d'impact	Unité	BDX_0_ CIR1	BDX_0_ CIR2	BDX_0_ CIR3a	BDX_0_ CIR3b	BDX_0_ CIR4	BDX_10_ _CIR1	BDX_10_ _CIR2	BDX_10_ CIR3a	BDX_10_ CIR3b	BDX_10_ _CIR4	BDX_30_ _CIR1	BDX_30_ _CIR2	BDX_30_ CIR3a	BDX_30_ CIR3b	BDX_30_ _CIR4	BDX_100_ _CIR1	BDX_100_ _CIR2	BDX_100_ CIR3a	BDX_100_ CIR3b	BDX_100_ _CIR4
Epuisement des ressources	kg éq Sb	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	6,0E-01	6,0E-01	6,0E-01	5,7E-01
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,8E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,6E-01
Eutrophisation	kg éq PO4---	9,9E-02	9,9E-02	9,9E-02	9,9E-02	9,7E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,7E-02	9,7E-02	9,6E-02	9,5E-02	9,1E-02	9,2E-02	9,1E-02	9,1E-02	8,8E-02
Réchauffement global	kg éq CO2	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,7E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,7E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,7E-02	5,9E-02	6,0E-02	6,0E-02	5,9E-02	5,6E-02
Energie primaire totale	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Energie renouvelable	MJ	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,7E+01
Energie non renouvelable	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Déchets valorisés	kg	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Déchets dangereux	kg	9,4E-02	9,4E-02	9,7E-02	9,4E-02	8,1E-02	9,4E-02	9,6E-02	9,7E-02	9,5E-02	7,9E-02	9,4E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,6E-02	7,5E-02	9,4E-02	1,1E-01	1,0E-01	1,0E-01	6,0E-02
Déchets non dangereux	kg	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	4,9E+00	5,0E+00	5,1E+00	5,1E+00	5,0E+00	4,9E+00	5,2E+00	5,2E+00	5,2E+00	5,2E+00	4,9E+00	5,4E+00	5,6E+00	5,5E+00	5,4E+00	5,0E+00
Déchets inertes	kg	7,4E-01	7,4E-01	7,6E-01	7,4E-01	6,4E-01	7,4E-01	7,5E-01	7,7E-01	7,5E-01	6,2E-01	7,5E-01	7,9E-01	7,8E-01	7,6E-01	5,8E-01	7,6E-01	8,9E-01	8,2E-01	8,2E-01	4,6E-01
Déchets radioactifs	kg	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,3E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	6,7E-03	6,8E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03
Consommation d'eau totale	L	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05

Catégorie d'impact	Unité	LIL_0_CI R1	LIL_0_CI R2	LIL_0_CI R3a	LIL_0_CI R3b	LIL_0_CI R4	LIL_10_C IR1	LIL_10_C IR2	LIL_10_CI R3a	LIL_10_CI R3b	LIL_10_C IR4	LIL_30_C IR1	LIL_30_C IR2	LIL_30_CI R3a	LIL_30_CI R3b	LIL_30_C IR4	LIL_100_C IR1	LIL_100_C IR2	LIL_100_CI R3a	LIL_100_C IR4
Épuisement des ressources	kg éq Sb	6,0E-01	6,0E-01	6,0E-01	6,0E-01	5,9E-01	6,0E-01	6,1E-01	6,1E-01	6,1E-01	5,9E-01	6,0E-01	6,1E-01	6,1E-01	6,1E-01	5,9E-01	5,9E-01	6,2E-01	6,2E-01	5,7E-01
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	7,1E-01	7,1E-01	7,1E-01	7,1E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	6,6E-01	6,8E-01	6,8E-01	6,6E-01
Eutrophisation	PO4--- kg éq	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	1,0E-01	9,8E-02	9,8E-02	9,9E-02	9,9E-02	9,9E-02	9,6E-02	9,0E-02	9,5E-02	9,5E-02	8,8E-02
Réchauffement global	CO2	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,5E+02	2,5E+02	2,4E+02
Destruction de la couche d'ozone	CFC-11	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	6,1E-02	6,1E-02	6,2E-02	6,1E-02	6,0E-02	6,1E-02	6,2E-02	6,2E-02	6,2E-02	6,0E-02	6,0E-02	6,2E-02	6,2E-02	6,2E-02	5,9E-02	5,8E-02	6,4E-02	6,4E-02	5,6E-02
Energie primaire totale	MJ	2,4E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,3E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,4E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Energie renouvelable	MJ	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,8E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,9E+01	2,8E+01	2,7E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,7E+01
Energie non renouvelable	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Déchets valorisés	kg	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Déchets dangereux	kg	1,2E-01	1,2E-01	1,2E-01	1,2E-01	1,1E-01	1,2E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,0E-01	1,1E-01	1,3E-01	1,3E-01	1,3E-01	9,4E-02	8,4E-02	1,5E-01	1,4E-01	6,0E-02
Déchets non dangereux	kg	5,4E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,2E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,2E+00	5,4E+00	5,6E+00	5,6E+00	5,6E+00	5,2E+00	5,2E+00	6,1E+00	6,0E+00	5,0E+00
Déchets inertes	kg	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	9,0E-01	9,8E-01	1,0E+00	1,0E+00	1,0E+00	8,5E-01	9,1E-01	1,1E+00	1,1E+00	1,1E+00	7,7E-01	6,7E-01	1,3E+00	1,2E+00	4,6E-01
Déchets radioactifs	kg	7,5E-03	7,5E-03	7,5E-03	7,5E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,2E-03	7,3E-03	7,3E-03	7,3E-03	7,2E-03	6,7E-03	6,8E-03	6,8E-03	6,7E-03
Consommation d'eau totale	L	2,0E+05	2,0E+05	2,0E+05	2,0E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,7E+05	1,8E+05	1,8E+05	1,7E+05

Catégorie d'impact	Unité	LYO_0_ CIR1	LYO_0_ CIR2	LYO_0_C IR3a	LYO_0_C IR3b	LYO_0_ CIR4	LYO_10_ CIR1	LYO_10_ CIR2	LYO_10_ CIR3a	LYO_10_ CIR3b	LYO_10_ CIR4	LYO_30_ CIR1	LYO_30_ CIR2	LYO_30_ CIR3a	LYO_30_ CIR3b	LYO_30_ CIR4	LYO_100_ CIR1	LYO_100_ CIR2	LYO_100_ CIR3a	LYO_100_ CIR3b	LYO_100_ CIR4
Epuisement des ressources	kg éq Sb	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,7E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,8E-01	5,7E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,7E-01
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,8E-01	6,6E-01	6,7E-01	6,6E-01	6,6E-01	6,6E-01
Eutrophisation	kg éq PO4---	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,7E-02	9,7E-02	9,7E-02	9,7E-02	9,7E-02	9,6E-02	9,5E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,4E-02	9,0E-02	9,1E-02	9,0E-02	9,0E-02	8,8E-02
Réchauffement global	kg éq CO2	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,6E-02	5,8E-02	5,9E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,6E-02
Energie primaire totale	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Energie renouvelable	MJ	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01
Energie non renouvelable	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03	2,2E+03	2,2E+03	2,2E+03	2,2E+03
Déchets dangereux	kg	8,6E-02	8,6E-02	8,6E-02	8,6E-02	7,5E-02	8,6E-02	8,7E-02	8,6E-02	8,6E-02	7,3E-02	8,5E-02	8,8E-02	8,6E-02	8,6E-02	7,0E-02	8,1E-02	9,3E-02	8,7E-02	8,7E-02	6,0E-02
Déchets non dangereux	kg	4,9E+00	4,9E+00	4,9E+00	4,9E+00	4,8E+00	4,9E+00	4,9E+00	4,9E+00	4,9E+00	4,8E+00	5,0E+00	5,1E+00	5,1E+00	5,1E+00	4,9E+00	5,2E+00	5,4E+00	5,3E+00	5,3E+00	5,0E+00
Déchets inertes	kg	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	5,8E-01	6,7E-01	6,8E-01	6,7E-01	6,7E-01	5,6E-01	6,6E-01	7,0E-01	6,8E-01	6,8E-01	5,4E-01	6,4E-01	7,5E-01	7,0E-01	7,0E-01	4,6E-01
Déchets radioactifs	kg	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,3E-03	7,4E-03	7,3E-03	7,3E-03	7,3E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03
Consommation d'eau totale	L	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,8E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05

Catégorie d'impact	Unité	STG_0_ CIR1	STG_0_ CIR2	STG_0_C IR3a	STG_0_C IR3b	STG_0_ CIR4	STG_10_ CIR1	STG_10_ CIR2	STG_10_ CIR3a	STG_10_ CIR3b	STG_10_ CIR4	STG_30_ CIR1	STG_30_ CIR2	STG_30_ CIR3a	STG_30_ CIR3b	STG_30_ CIR4	STG_100_ _CIR1	STG_100_ _CIR2	STG_100_ CIR3a	STG_100_ CIR3b	STG_100_ _CIR4
Épuisement des ressources	kg éq Sb	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,8E-01	5,9E-01	6,0E-01	5,9E-01	5,9E-01	5,7E-01
Acidification des sols et de l'eau	kg éq SO2	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	7,0E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,9E-01	6,8E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,7E-01	6,6E-01
Eutrophisation	kg éq PO4---	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,7E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,8E-02	9,7E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,6E-02	9,4E-02	9,1E-02	9,2E-02	9,1E-02	9,1E-02	8,8E-02
Réchauffement global	kg éq CO2	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02	2,4E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg éq CFC-11	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,5E-05	1,4E-05
Formation d'ozone troposphérique	kg éq C2H4	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,8E-02	5,8E-02	5,7E-02	5,9E-02	6,0E-02	5,9E-02	5,9E-02	5,6E-02
Energie primaire totale	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03
Energie renouvelable	MJ	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,8E+01	2,7E+01	2,7E+01
Energie non renouvelable	MJ	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,3E+03	2,2E+03	2,3E+03	2,2E+03	2,2E+03	2,2E+03
Déchets valorisés	kg	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Déchets dangereux	kg	9,0E-02	9,0E-02	9,1E-02	9,0E-02	7,7E-02	9,1E-02	9,1E-02	9,2E-02	9,0E-02	7,6E-02	9,2E-02	9,5E-02	9,2E-02	9,1E-02	7,2E-02	9,8E-02	1,1E-01	9,3E-02	9,3E-02	6,0E-02
Déchets non dangereux	kg	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	4,8E+00	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	5,0E+00	4,8E+00	5,1E+00	5,2E+00	5,1E+00	5,1E+00	4,9E+00	5,4E+00	5,5E+00	5,4E+00	5,4E+00	5,0E+00
Déchets inertes	kg	7,0E-01	7,0E-01	7,1E-01	7,0E-01	6,0E-01	7,1E-01	7,2E-01	7,2E-01	7,0E-01	5,9E-01	7,3E-01	7,5E-01	7,3E-01	7,1E-01	5,6E-01	8,0E-01	8,8E-01	7,6E-01	7,5E-01	4,6E-01
Déchets radioactifs	kg	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,4E-03	7,3E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	7,2E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03	6,7E-03
Consommation d'eau totale	L	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,9E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05

Données utilisées

Plastifiants et retardateurs (fiches Synad)



DECLARATION ENVIRONNEMENTALE PLASTIFIANTS NORMAUX - Mars 2006

PLASTIFIANTS NORMAUX

Les adjuvants sont des composants importants du béton, ainsi que le ciment, l'eau, les agrégats et, dans le cas de béton armé, l'acier. Les plastifiants normaux constituent environ 40% de tous les adjuvants vendus en Europe. Les superplastifiants constituent 38% de plus et font l'objet d'une Déclaration Environnementale de la part de l'EFCA séparée. Des Déclarations Environnementales de la part de l'EFCA existent aussi pour les adjuvants Hydrofuges, les Accélérateurs, les Retardateurs de prise et les adjuvants Entraîneurs d'air.

Les plastifiants normaux, aussi appelés des Adjuvants Réducteurs d'Eau, sont, en règle générale, à base de lignosulfonate de calcium. C'est un polymère organique naturel soluble dans l'eau que l'on trouve dans le bois. Il est récupéré comme déchet dans le processus de fabrication de la pulpe à papier. Une fois raffiné, le lignosulfonate est ajouté au béton ; il disperse les particules de ciment, réduisant ainsi la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée dans le béton frais. Cet effet peut être mis à profit de trois façons :

- Pour réduire la quantité d'eau, pour augmenter des résistances mécaniques et pour réduire la perméabilité et améliorer la durabilité
- Comme dispersant de ciment à volume d'eau égal pour augmenter la consistance et la maniabilité
- Pour réduire la quantité de ciment nécessaire pour obtenir un béton d'une résistance mécanique et d'une durabilité spécifique.

Avec un dosage légèrement plus fort de cet adjuvant, deux ou plus de ces effets peuvent être obtenus en même temps.

Cet Eco-profil est valable pour les plastifiants normaux à base de lignosulfonate de calcium.

Le lignosulfonate de calcium peut être mélangé en usine avec d'autres produits chimiques pour lui donner des propriétés bien ciblées.

Les plastifiants normaux sont normalement dissous dans de l'eau et contiennent en règle générale de 30 à 45% de matière active.

L'ETENDU DE L'ECO-PROFILE

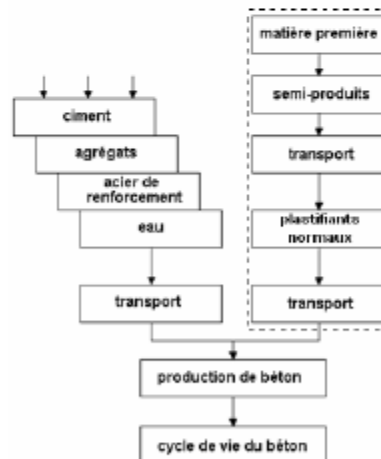
L'Eco-Profil couvre la production en Europe des plastifiants normaux depuis leur extraction à leur mise en application. Le transport des plastifiants normaux de chez le fabricant vers le consommateur/client n'est pas pris en compte.

Les membres de l'EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations) ont recueilli les données de fabrication pour la synthèse et le mélange des plastifiants normaux en 2005. Cette déclaration environnementale se base sur les chiffres des quatre plus gros fabricants de plastifiants normaux d'Europe et est une moyenne des types de plastifiants normaux décrits.

La variation entre ces types de plastifiants normaux et entre ces fabricants fait ressortir des différences relativement petites dans l'ECV (Evaluation de la Cycle de Vie) du béton. Cependant, les chiffres ne doivent pas être pris comme valeurs absolues pour quelconque fabricant ou quelconque type de plastifiant normal.

L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

Les chiffres ci-dessous montrent comment l'Eco-profil des plastifiants normaux s'intègre dans le cycle de vie du béton. Cet Eco-profil inclut des processus délimités par des lignes pointillées. Pour compléter le cycle de vie, des données environnementales d'autres matériaux et d'autres processus devraient être ajoutées.





DECLARATION ENVIRONNEMENTALE PLASTIFIANTS NORMAUX – Mars 2006

ECO-PROFILE PLASTIFIANTS NORMAUX

Eco-profile pour 1 kg de plastifiant 30-45% solides

Matière première consommée	Unité	Valeur
charbon, brun	g	8.2
charbon, dur	g	6.5
Pétrole brut	g	52
Gaz naturel	dm3	18
Rejetés à l'air		
CO ₂	kg	0.22
CO	g	0.11
NO _x	g	0.52
SO _x	g	0.85
Méthane	g	0.38
Butane	mg	3.5
Pentane	mg	4.4
Benzène	mg	1.0
Non-méthane VOC	g	0.17
Hydrocarbure Aromatique Polycyclique	µg	7.8
Arsenic (As)	µg	47
Chrome VI (Cr)	µg	0.68
Mercury (Hg)	µg	2.8
Nickel (Ni)	mg	0.93
Vanadium (V)	mg	1.9
Sodium dichromate	µg	2.0
Dioxines	ng	7.9
Halon-1211	µg	0.58
Halon-1301	µg	2.8
Rejetés à l'eau		
Demande d'oxygène chimique	g	0.34
Hydrocarbure Aromatique Polycyclique	µg	13
Huiles, non-spécifiées	mg	0.62
Phosphate	mg	0.94
Barytine	mg	4.0
Rejetés au sol		
Chrome VI (Cr)	mg	0.28
Huiles, non-spécifiées	mg	46

Indicateurs pour 1 kg de plastifiant 30-45% solides

Rejet solide	Unité	Valeur
Rejet non-toxique	g	3.4
Rejet toxique	g	0.17
Energie totale		
Energie totale	MJ	4.6

RESPONSABILITE

L'Eco-profile est tiré des données brutes fournies par EFCA et ses organismes membres. Une agence de conseil indépendant aux Pays Bas, INTRON, a vérifié les données brutes et a calculé cet Eco-profile. Informations supplémentaires sur ceux qui pratiquent l'ECV (Evaluation de la Cycle de Vie).

- L'Eco-profile sur cette fiche est valable pour des adjuvants dans une fourchette de pourcentages solides. Bien que ce pourcentage puisse varier considérablement, il n'a pas d'incident majeur sur le total. Des Eco-profiles et des adjuvants individuels seront dans une fourchette acceptable. La moyenne d'un profil ne devrait pas être associée au pourcentage solide d'un seul adjuvant.
- INTRON a utilisé des données brutes sur la production de matière première en s'appuyant principalement sur la base de données Eco-Invent (v1.2). La substitution par proximité reprochée était appliquée.
- Les données d'Eco-Invent incluent les biens d'équipement.
- Les données pour la production d'électricité s'appuient sur la politique européenne de panachage de combustibles.
- Les substances qui contribuent à plus de 1% à l'impact environnemental de quelconque des catégories suivantes ont été incluses dans cet Eco-profile: ADP, GWP, ODP, HTP, TETP, FAETP, POCP, AP and EP.
- Les substances dans cet Eco-profile totalisent au moins 90-95% de l'impact environnemental de quelconque catégorie.

QUESTIONS?

Pour davantage d'informations, contacter l'EFCA:

Le secrétaire de l'EFCA

tél. +44 (0) 1564 77 63 62

fax +44 (0) 1564 77 63 62

www.admixtures.org.uk ou www.efca.info

A l'heure actuelle, les associations nationales suivantes font partie de l'EFCA (European Federation of Concrete Admixture Associations) :

Belgique	FIPAH	Norvège	NOCA
France	SYNAD	Espagne	ANFAH
Allemagne	DB	Suède	SACA
Italie	ASSIAD	Suisse	FSH&Z
Pays bas	VHB	Royaume Uni	CAA

Ciment (données ATILH)⁷

⁷ Module d'informations environnementales de la production de ciments courants en France (CEM I, CEM II/A-S, CEM II/A-V, CEM II/A-L, CEM II/B-L, CEM II/B-M, CEM III/A, CEM III/B, CEM V/A)
Edition juin 2011 – version 2 ATILH

3. Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 § 6

Tous ces impacts sont renseignés ou calculés conformément aux indications du § 6.1 de la norme NF P01-010, à partir des données du § 2 et, pour l'unité fonctionnelle de référence, par annuité définie au § 1.1.

N°	Impact environnemental	Unité	Valeur de l'indicateur par tonne de granulats
Consommation de ressources énergétiques :			
1	énergie primaire totale	MJ	6,09E+01
	énergie renouvelable	MJ	7,11E-01
	énergie non renouvelable	MJ	6,02E+01
2	Epuisement des ressources	kg équivalent antimoine	1,68E-02
3	Consommation d'eau totale	litre	2,76E+01
Déchets solides :			
4	déchets valorisés total	kg	1,34E-01
	déchets éliminés :		
	déchets dangereux	kg	8,82E-03
	déchets non dangereux	kg	2,39E-01
	déchets inertes	kg	1,39E-01
	déchets radioactifs	kg	3,48E-04
5	Changement climatique	kg équivalent CO ₂	2,57E+00
6	Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	6,15E-02
7	Pollution de l'air	m ³	1,09E+03
8	Pollution de l'eau	m ³	2,30E+00
9	Destruction de la couche d'ozone	kg CFC équivalent R11	2,66E-07
10	Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène	4,00E-03
11	Eutrophisation	kg équivalent PO ₄ ³⁻	1,18E-02

3. Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 § 6

Tous ces impacts sont renseignés ou calculés conformément aux indications du § 6.1 de la norme NF P01-010, à partir des données du § 2 et, pour l'unité fonctionnelle de référence, par annuité définie au § 1.1.


N°	Impact environnemental	Unité	Valeur de l'indicateur par tonne de granulats
1	Consommation de ressources énergétiques :		
	énergie primaire totale	MJ	6,50E+01
	énergie renouvelable	MJ	5,48E-01
	énergie non renouvelable	MJ	6,44E+01
2	Epuisement des ressources	kg équivalent antimoine	1,62E-02
3	Consommation d'eau totale	litre	2,79E+02
4	Déchets solides :		
	déchets valorisés total	kg	2,84E-01
	déchets éliminés :		
	déchets dangereux	kg	8,21E-03
	déchets non dangereux	kg	4,53E-01
	déchets inertes	kg	2,44E-01
	déchets radioactifs	kg	4,23E-04
5	Changement climatique	kg équivalent CO ₂	2,30E+00
6	Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	1,73E-02
7	Pollution de l'air	m ³	8,04E+02
8	Pollution de l'eau	m ³	2,91E+00
9	Destruction de la couche d'ozone	kg CFC équivalent R11	2,19E-07
10	Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène	1,04E-03
11	Eutrophisation	kg équivalent PO ₄ ³⁻	3,97E-03

3. Impacts environnementaux représentatifs des produits de construction selon NF P 01-010 § 6

Tous ces impacts sont renseignés ou calculés conformément aux indications du § 6.1 de la norme NF P01-010, à partir des données du § 2 et, pour l'unité fonctionnelle de référence, par annuité définie au § 1.1.

N°	Impact environnemental	Unité	Valeur de l'indicateur par tonne de granulats
1	Consommation de ressources énergétiques :		
	énergie primaire totale	MJ	4,74E+01
	énergie renouvelable	MJ	5,39E-01
	énergie non renouvelable	MJ	4,68E+01
2	Epuisement des ressources	kg équivalent antimoine	2,04E-02
3	Consommation d'eau totale	litre	4,80E+01
4	Déchets solides :		
	déchets valorisés total	kg	1,79E+00
	déchets éliminés :		
	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
5	Changement climatique	kg équivalent CO ₂	2,96E+00
6	Acidification atmosphérique	kg équivalent SO ₂	2,67E-02
7	Pollution de l'air	m ³	8,07E+02
8	Pollution de l'eau	m ³	2,95E+00
9	Destruction de la couche d'ozone	kg CFC équivalent R11	3,41E-07
10	Formation d'ozone photochimique	kg équivalent éthylène	1,84E-03
11	Eutrophisation	kg équivalent PO ₄ ³⁻	5,66E-03

Conférence DESIRE janvier 2016

Development of a System of Indicators for a Resource efficient Europe	
 <p>Development of a System of Indicators for a Resource Efficient Europe</p>	
<p>Discussion note on the implementation of DESIRE indicators</p>	

Authors:
Thijmen van Bree, Adriaan Slob (TNO)

Introduction

This discussion note introduces several themes that are relevant for implementation of DESIRE indicators.

DESIRE will deliver several types of Resource Efficiency indicators. These indicators might differ in their level of maturity, depending on aspects like time series availability, scale, reliability, and therefore their implementation readiness.

What chances are there for the implementation of DESIRE indicators, what should still to be worked out in depth, what conditions should be fulfilled, who are the (potential) users of the indicators and what kind of requirements do they have for the implementation of DESIRE indicators?

These are typical questions that will be discussed during the final conference of DESIRE on the 21st of January 2016.



DESIRE is a collaborative project funded through the European Union's Seventh Program for research, technological development and demonstration under Grant agreement No 308552

DESIRE indicator framework

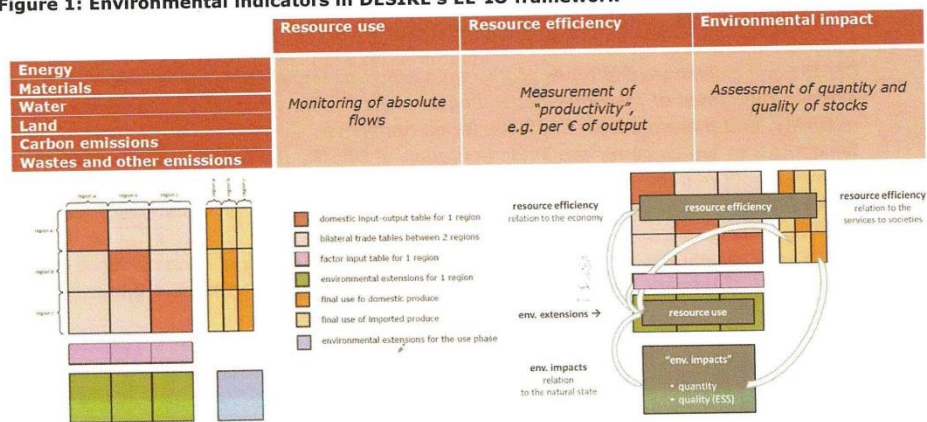
Socio-economic systems require resources (materials, energy, water) or land, in order to produce goods. In addition, production and consumption processes, as well as transportation, put a burden on the environment through their (metabolic) outputs such as wastes and emissions to air, water and soil. "Resources" thus address different categories and issues, all with different impacts to "environment", i.e. climate, biodiversity, ecosystems, health, etc. Resource [use] efficiency indicators therefore need to address – if possible all – complex interactions between society and the environment in order to empower political action; to set meaningful targets; and to adequately monitor the [global] use of resources.

The DESIRE indicator framework differentiates three main categories of indicators (resource use, resource efficiency and environmental impact) and six flows of resource inputs or (metabolic) outputs. These are provided in a time series of global Environmentally Extended [economic] Input-Output relations with production and consumption flows. This [EE-IO] framework is referred to as "EXIOBASE".

EXIOBASE exhibits a consistent sector classification of 200 products and 163 industries for 44 countries (EU28 and 16 major economies outside the EU, including five 'Rest of the World' regions), in a historic time series covering the years 1995-2012 and now casted data up to 2016.

With this framework it is possible to understand **drivers** for resource use; that put **pressure** on the environment; resulting in **impacts** on the **state** of the environment. These insights can eventually be a trigger for **responses** from relevant **actors**.

Figure 1: Environmental indicators in DESIRE's EE-IO framework



Examples of environmental indicators that can be calculated with EXIOBASE

Topic	Indicator name	Definition/Unit
Energy	Energy dependency	import/total use (%)
	Primary energy intensity	ktoe/euro
	Energy use (total net energy consumption) by fuel	tons of oil eq.
Materials	Material productivity	€ per kg Domestic Material Consumption € per kg Raw Material Consumption € per kg Total Material Consumption
	Import dependence	Imports/Domestic Material Consumption (%)
	Domestic Material Consumption	tonnes
	Raw Material Consumption	tonnes
Water	Total Material Consumption	tonnes
	Water productivity	€ per m ³
	Water abstraction	m ³
	Water consumption	m ³
Land	Water footprint	m ³
	Land productivity	€ per ha
	Artificial land / built-up area	hectares
Carbon	Land Footprint / Actual Land Demand	hectares
	CO ₂ emission intensity	kg of CO ₂ per €
	GHG emissions intensity	kg of CO ₂ equivalent per €
	CO ₂ emissions	tonnes of CO ₂
	GHG emissions	tonnes of CO ₂ equivalents
Waste and emissions	Carbon Footprint	tonnes of CO ₂ equivalents
	Air emission intensity	Kg emission per €
	Waste intensity	Kg waste per €
	Recycling rates	%
	Total recycling amounts	tonnes
	Total waste generation	tonnes
Emissions from landfills	tonnes	
Emissions of air pollutants	tonnes	

The dataset of DESIRE covers a long list of environmental extensions, comprising a multitude of materials and 28 different types of air emissions, Nitrogen and Phosphorous emissions to water and in water. The list of material extensions now covers 222 items, of which 193 are extensions related to biomass extraction (i.e. the full FAO product list), 12 refer to metal ore extraction, 8 categories related to industrial and construction minerals, and 9 categories cover the extraction of fossil fuels (i.e. the full IEA list of primary products). The database also covers various types of water extraction and water consumption, and different types of land use.

With EXIOBASE a plethora of environmental indicators can thus in principle directly be calculated. In addition, DESIRE's research efforts also focussed on development of novel indicators, relating to Critical Materials, Biodiversity and ecosystems, and novel reference indicators 'beyond GDP'. Some of these are more experimental and/or more difficult to fully align with the EE-IO framework. With Critical materials a challenge is to specify quantities of materials in specific products and accordingly to bridge these to the product classification of supply- and use- or Input-output tables. In case of Biodiversity it is for example challenging to determine causal relations of economic activity with habitat changes. Regarding novel reference indicators a complexity is that 'quality of life' or 'human well-being' aspects have no one-to-one relation with production and consumption. There are much more, and more complex, relations to take into account.

Themes for discussion in the afternoon

During the DESIRE final conference we particularly want to discuss what is still needed to be done for the implementation of the DESIRE indicators, and learn which indicators are *Relevant, Acceptable, Credible, and Easy* to be implemented by relevant stakeholders in the EU (e.g. the environmental knowledge community, policy and business) policy and businesses.

Discussion theme 1: *the dilemma of simplicity versus complexity of the indicator set*

Options to reduce and simplify the indicator set?

Policy makers prefer an indicator set with very few indicators. In some discussions it was even stated that DESIRE should strive towards one central indicator. A headline set with only a few indicators will probably raise understanding and attractiveness, but on the other hand will mean a loss of potentially relevant information.

The indicator set(s) that DESIRE produced are very extended. To avoid overflow, reduction of the number of indicators to a smaller set of relevant indicators is therefore preferred. What is the right balance between attractiveness and meaningfulness? How many indicators should then be shown?

Searching for this right balance, through a purely statistical exercise, DESIRE showed that reduction from about 100 to a few indicators (5-8) is possible without losing too much information.

- A statistical analysis on EXIOBASE product-sector combinations showed that the number of indicators can be reduced to eight indicators¹. The explained variance of the reduced indicator set was still 90% and includes environmental indicators related to global warming, toxicity, ozone formation, and water consumption.
- In addition, four resource indicators that are regularly used by policy makers (i.e. *Fossil energy, Water, Land and Materials*) were evaluated. This analysis showed that the explained variance was 60% for this resource indicator set. By adding one toxicity indicator to the resource indicator set, the explained variance increased to 80%.

However, these 'optimal' indicators are not necessarily the most preferred indicators when other criteria are applied regarding relevance, acceptance, credibility, easiness and robustness.

Some questions for discussion:

- What is the meaning of these 'optimal' indicators?
- Is it for example possible for policy makers to work with this set?
- What are (other) relevant, easy to understand, indicators that DESIRE preferably should deliver?

¹ 1.) *Global Warming Potential (20 year)*, 2.) *Freshwater sediment ecotoxicity*, 3.) *Marine aquatic ecotoxicity*, 4.) *Photochemical oxidation (high NOx)*, 5.) *Odour*, 6.) *Green water consumption (agriculture)*, 7.) *Blue water withdrawal*, 8.) *Material footprint*.

Discussion theme 2: level of detail and scale for indicator implementation

Indicator quality

In essence not all data needed for global multi-regional EE-IO analysis is available on the same level of detail. For some countries [outside Europe] it was difficult to obtain official IO-data (for multiple years of the DESIRE time series), or data was not available in the right format or disaggregation level.

To interpret the meaning of indicators that are calculated it is necessary to understand the limitations of the input data.

Some questions for discussion:

- What international coordination is needed to secure data quality and availability?
- How to secure regular updates? DESIRE was a very labour intensive project.

Scale of implementation

Resource use can vary considerably between economic sectors, between products within sectors, over time and over geographical areas. The framework developed and applied in DESIRE therefore has a high level of disaggregation. Where official input-output data did not yet provide the right level of detail it was broken down into more detail based on auxiliary data sources for this matter.

With EXIOBASE it is now possible to calculate resource efficiency indicators for a very large number of disaggregated environmental data (e.g. different materials, different types of land use) as well as for a large number of economic sectors. The primary scale of analysis possible with DESIRE is the country (or macro) level, and groupings thereof (e.g. EU or "rest of the World" regions), and the meso level (sectors) within countries. The business level is not explicitly addressed. However, the input-output framework applied in DESIRE differentiates between a large number of manufacturing sectors and will thus allow generating various resource efficiency indicators on the level of different manufacturing industries across a large number of countries.

On the other hand, the use and availability of resources (water is a good example) can sometimes vary considerably within a country. So certain unbalances in resource use will sometimes only be visible if one zooms-in to regions within a country. DESIRE indicators in principle cannot provide cross-sectional insights of regions within countries.

Some questions for discussion:

- For which type of environmental indicators does scale (international/global, national and regional) actually matter?
- On what problems or indicators should be the focus if DESIRE can address different levels of detail or scale?;
- Where are more research efforts needed beyond the DESIRE project?

Discussion theme 3: *Who are potential users of the DESIRE indicator set(s)?*

In an early stage of the DESIRE project several stakeholder groups were identified as (potential) user, supporter or group that need at least to be informed about the indicators:

- Policy makers
- Statistical services
- Civil society organisations
- Business associations

Each user will have specific requirements for the adoption of the indicator sets. Some type of indicators might primarily have a policy relevance to monitor progress towards resource efficiency, whereas indicators in the area of raw materials might also have a particular relevance for industries and innovation.

Taking into account the results of DESIRE and the level of detail and accuracy of the indicators, who are then the first actors to use the indicators?
Who are the first to implement the DESIRE indicator set(s)?

Discussion theme 4: *What is needed for indicator implementation by different actors?*

Each group of users will have specific requirements for the implementation of the indicator set(s).

Some questions for discussion:

- What are the requirements of the potential first users and what has still to be done in the future to meet these requirements?
- What are the requirements of the statistical offices?

Discussion theme 5: *Implementation actions and timeline*

With this last discussion theme we primarily want to raise the question how to move forward beyond the duration of the DESIRE project.

Some questions for discussion:

- Which actions are (still) needed?
- By whom and when?