

ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Contexte local Allongement du cycle de la matière



FONDATION
BÂTIMENT
ÉNERGIE

CONTEXTE LOCAL

ALLONGEMENT DU CYCLE DE LA MATIÈRE



ÉCONOMIE CIRCULAIRE

DES BÂTIMENTS

Coordination de l'enjeu

Léa BRACHET, Elodie MACE / Artelia

Contributeurs groupe recherche

Vincent AUGISEAU / Unilasalle et CitéSource

Léa BRACHET / Artelia

Gérard DEROUBAIX / FCBA

Pyrène LARREY-LASSALLE / Nobatek – INEF4

Mathilde LOUERAT / CSTB

Daniel MONFORT-CLIMENT / BRGM

Contributeurs groupe utilisateurs

Alliance HQE-GBC

Bruxelles Environnement

Espaces Ferroviaires

Est Ensemble

Nantes Métropole Aménagement

Sinteo

Coordination générale de l'atelier sur l'Économie Circulaire

Sylvain LAURENCEAU / CSTB

Décembre 2020

Créée à l'initiative de l'ADEME et du CSTB, la Fondation Bâtiment Énergie est financée par les partenaires fondateurs suivants :



Cadre général	4		
1. Introduction	5		
2. Prise en compte du contexte local	7		
2.1 Les ressources pour la construction et leur localisation : définitions et enjeux	8		
2.1.1 Les ressources et leur localisation : définitions	8		
2.1.2 Ressources matérielles pour la construction et chaîne de circulation des matières	10		
2.1.3 Un choix de ressources pouvant contribuer à une réduction des impacts environnementaux d'un ouvrage bâti ou d'un territoire	11		
2.1.4 Ressources pour la construction en France : la persistance de proximités spatiales mais une tendance à l'éloignement	13		
2.1.5 Des échelles d'approvisionnement très diverses selon les matériaux	14		
2.1.6 Freins à une proximité spatiale et rôle de l'évaluation	19		
2.2 Rechercher un approvisionnement local en matériaux : analyse de démarches, méthodes et outils	22		
2.2.1 Présentation des trois démarches étudiées	22		
2.2.2 Analyse croisée des trois démarches	28		
2.3 Préconisations pour l'évaluation des ressources locales	36		
2.3.1 Quatre temporalités et objectifs pour l'évaluation	36		
2.3.2 Une clé de succès préalable à l'évaluation : la définition d'objectifs et critères de décision clairs sur les ressources	36		
2.3.3 Planification : lier planification urbaine et planification des ressources	37		
2.3.4 Programmation : situer l'opération dans son contexte territorial	41		
2.3.5 Conception : contextualiser l'évaluation environnementale et s'appuyer sur des FDES locales	44		
2.3.6 Chantier : utiliser des indicateurs de suivi	44		
2.4 Conclusions	45		
3. Évaluation environnementale de l'allongement du cycle de la matière	46		
3.1 Les enjeux	47		
3.2 méthodologie de l'ACV en rénovation	47		
a. Notion d'amortissement	48		
b. Prise en compte des différents éléments par les trois méthodes	49		
i. Prise en compte des éléments réemployés ex-situ par les différentes méthodes	50		
		ii. Avantages et inconvénients des différentes méthodes	50
		1. Méthode A	50
		2. Méthode B	51
		3. Méthode C	51
		4. Remarque générale sur l'amortissement	52
		5. Remarque générale sur les durées de vie et les scénarios de fin de vie	52
		3.2.2 Test de la méthode sur les projets R1 et R2	52
		3.2.3 Proposition méthodologique pour l'ACV en rénovation	54
		Synthèse des travaux sur les différentes méthodes d'ACV rénovation et manques identifiés	54
		Mise en œuvre de la méthode	56
		Avantages de cette approche	56
		Inconvénients de l'approche et pistes de solution	56
		Perspectives pour étudier les flux de matières	57
		Perspectives pour traiter le cas de rénovations esthétiques nécessaires	57
		Remarques sur l'indicateur de performance	57
		3.2.4 Synthèse des analyses portant sur l'évaluation environnementale de la rénovation	58
		3.3. Modélisation de l'approvisionnement d'un composant issu du réemploi	60
		3.3.1 Les différentes méthodologies	60
		3.3.2 Détail de modélisation des méthodologies	61
		3.3.3 Focus sur la préparation au réemploi	61
		3.3.4 Avantages et inconvénients des différentes méthodes	62
		6. Méthode A	62
		7. Méthode B	62
		8. Méthode C	62
		1. Méthode D	63
		3.3.5 Application au projet C	63
		3.3.6 Application au projet Gagarine (Est Ensemble)	64
		3.3.7 Proposition méthodologique pour la modélisation du réemploi	66
		4. Conclusions	68
		6. Glossaire	70
		5. Bibliographie	72
		7. Annexes	79
		A. Questionnaire transmis aux utilisateurs (critère local)	80
		B. Réponses de Nantes Métropole Aménagement	81
		C. Rénovation vs. déconstruction/reconstruction	87
		D. Autre schéma sur les différentes méthodologie d'ACV rénovation	88
		E. Cohérence avec la méthode ACV appliquée à des bâtiments neufs : exemple détaille	89
		F. Analyse résultats projet R1	91
		G. Analyse résultats projet R2	98
		H. Analyse résultats projet R3	102
		I. Analyse résultats projet GAGARINE – production de pavés en béton	106

Cadre général

Le secteur du bâtiment est à la fois un important producteur de déchets, un important consommateur de ressources, un des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre, et un important pourvoyeur d'emplois. Dans ce contexte, un consensus se dégage autour du fait que l'économie circulaire s'imposera progressivement comme alternative durable au modèle économique linéaire dans ce secteur et qu'elle sera créatrice de valeur. Cependant, si le concept général est bien établi, de nombreuses zones d'ombres existent encore à ce jour sur son périmètre, sa déclinaison précise, les indicateurs associés, les moyens de la mettre en œuvre et de la déployer dans des modèles économiques performants.

La Fondation Bâtiment Energie (FBE), reconnue d'utilité publique en 2005, a été créée par quatre acteurs majeurs du secteur du bâtiment et de l'énergie, ArcelorMittal, EDF, GRDF et LafargeHolcim, avec le soutien financier des pouvoirs publics et le support technique de l'ADEME et du CSTB. Elle se mobilise en soutenant des travaux de recherche sur les enjeux environnementaux actuels pour le secteur du bâtiment.

C'est donc tout naturellement que la Fondation Bâtiment Energie a souhaité soutenir des travaux de recherche sur le développement de bases scientifiques à la caractérisation de l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment. Ces travaux, coordonnés par le CSTB et menés sur une durée de deux ans -jusqu'en octobre 2020-, ont impliqué de manière transnationale 40 acteurs issus d'horizons très divers : acteurs du monde de la recherche et acteurs opérationnels, acteurs de l'offre et acteurs de la demande, acteurs publics et acteurs privés.

La méthodologie innovante déployée ici -déjà mise en place sur d'autres ateliers soutenus par la FBE- structure les travaux autour de l'articulation entre un « groupe recherche », qui a vocation à développer de nouvelles méthodes ou de nouveaux outils, et un « groupe utilisateurs », qui a vocation à apporter un retour de terrain sur l'applicabilité et l'opérationnalité des connaissances développées. Ce croisement des approches et des compétences est au cœur de la méthodologie que nous avons voulu déployer ici.

Les travaux de recherche sur l'économie circulaire ont porté sur cinq enjeux différents :

- L'évaluation des performances en vue d'un réemploi pour huit familles de produits, afin de proposer un cadre à la sécurisation de ces pratiques qui émergent à nouveau ;
- La caractérisation du contexte local et les méthodologies d'analyse de l'allongement du cycle de la matière, afin de valoriser la conservation de l'existant et d'activer les ressources humaines et matérielles des territoires ;
- La conception pour des bâtiments transformables et réversibles, afin de limiter les déconstructions futures ;
- La conception pour la démontabilité, afin de mieux valoriser les composants après leur future dépose ;
- La capitalisation de la donnée, et en particulier l'identification des données à conserver sur l'ensemble du premier cycle afin de favoriser un réemploi ou un recyclage ultérieur, ainsi que les modalités de conservation et de transfert de ces informations.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

1.

Introduction



Pour répondre aux objectifs de la transition écologique dans le secteur du bâtiment, la Fondation Bâtiment-Energie a souhaité favoriser le développement de stratégies d'économie circulaire. La question des critères et indicateurs de l'économie circulaire est au cœur des réflexions afin d'évaluer et d'encadrer la mise en place de ces stratégies. La première question concerne le choix d'un indicateur environnemental : lequel étudier et sur quelles méthodologies se baser pour évaluer une opération de construction ou d'aménagement ? A quelle échelle peut-on réaliser l'étude ?

Nous avons distingué deux grands enjeux dans ce livrable : dans un premier temps la caractérisation du contexte « local » d'une opération de construction ou d'aménagement, et dans un second temps la question méthodologique de la modélisation de démarches d'allongement du cycle de la matière au regard de l'Analyse de Cycle de Vie à l'échelle d'un bâtiment.

La réflexion du groupe recherche s'est déroulée en parallèle sur ces deux thématiques, avec cependant plusieurs enjeux communs ressortant de l'étude : 1. l'identification des limites de la méthodologie d'étude d'Analyse de Cycle de Vie telle que décrite dans l'expérimentation E+C- et dans la future réglementation environnementale 2020 pour une application à la prise en compte du contexte local, réemploi et à la rénovation; 2. L'importance des données sur lesquelles nous basons nos études et leur accessibilité ; et 3. l'importance du jeu d'acteurs à mobiliser dans une démarche d'économie circulaire. Les échanges avec les membres du groupe utilisateurs ont fait ressortir un enjeu complémentaire : le caractère « réalisable » de l'étude, et ont également mis en avant l'organisation de l'équipe et l'accès aux données nécessaires à la réalisation de l'étude.

Dans ce livrable, sont d'abord présentés des éléments de méthodologie d'évaluation permettant dans un premier temps de mieux connaître la disponibilité de ressources primaires et secondaires situées à proximité spatiale de chantiers (diagnostic), et dans un second temps d'assurer une conduite de projet permettant d'atteindre des objectifs concernant le choix de ressources.

Deux cas d'application de l'Analyse de Cycle de Vie sont ensuite étudiés en détail, avec une approche comparative. D'abord, la question de l'ACV en rénovation est abordée et en particulier la modélisation des produits et équipements conservés. Par la suite, la question de la modélisation des composants issus du réemploi dans l'ACV d'un projet est étudiée. Pour chacune de ces deux thématiques, une proposition méthodologique est faite au regard des résultats des expérimentations sur projets.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Prise en compte du contexte local



Vincent Augiseau (Unilasalle et CitéSource), Daniel Monfort-Climent (BRGM), Gérard Deroubaix

Introduction

La Fondation Bâtiment-Energie a organisé des ateliers de travail sur les critères et indicateurs pouvant être mobilisés lors de démarches d'évaluation accompagnant des stratégies d'économie circulaire. Nous cherchons ici à proposer des éléments pouvant contribuer à une méthodologie d'évaluation en vue de mieux prendre en compte le contexte dit « local » d'une opération de construction ou d'aménagement. Il s'agit plus précisément de contribuer à l'atteinte d'objectifs concernant la localisation des ressources matérielles utilisées lors d'une opération.

L'objet de notre travail a été de préconiser des éléments de méthodologie d'évaluation permettant de mieux connaître la disponibilité de ressources primaires et secondaires situées à proximité spatiale de chantiers, ainsi que d'assurer une conduite de projet permettant d'atteindre des objectifs concernant le choix de ressources. Pour formuler ces préconisations, nous nous sommes appuyés sur une enquête auprès de deux aménageurs et d'une collectivité ayant réalisé des évaluations concernant les ressources matérielles locales.

Dans un premier temps nous ferons un état des définitions liées au sujet de cette étude et chercherons à montrer le rôle que peut jouer l'évaluation pour contribuer à une démarche d'approvisionnement local en matériaux. Dans un second temps seront présentés les résultats de l'enquête en introduisant tout d'abord chaque démarche étudiée puis en en faisant une analyse croisée. Enfin dans un troisième temps sont exposées des préconisations visant à aider des porteurs de projets de construction, d'aménagement et leurs équipes de maîtrise d'œuvre, ainsi que des collectivités territoriales.

1.1. Les ressources pour la construction et leur localisation : définitions et enjeux

1.1.1. LES RESSOURCES ET LEUR LOCALISATION : DÉFINITIONS

La notion de ressource peut être définie selon deux principales conceptions. En effet, selon Kebir et Crevoisier (2004), deux approches peuvent être distinguées au sein des écoles de pensée économique. Selon les auteurs, une première « que l'on retrouve par exemple dans les approches néoclassiques [...] considère que les ressources existent indépendamment de la production, qu'elles sont données [...] et sont perçues comme un stock fini, statique » (p. 5). Une seconde « de type constructiviste, pose les ressources comme construites, résultant de processus. Elles ne sont pas données une fois pour toutes mais sont relatives et évolutives » (ibid.). Les auteurs adoptent cette seconde approche et en se référant à Raffestin (1980) et Bourellier et Dietrich (1989), définissent une ressource comme « une relation entre un acteur, une pratique (médiatisée par le travail) et une matière » ou encore « l'ensemble des moyens dont dispose l'homme pour son usage », c'est-à-dire « tous les éléments qui, potentiellement, peuvent servir, être utiles dans un processus de production, c'est-à-dire l'ensemble des objets identifiés comme pouvant s'inscrire dans un processus de production de biens ou de services » (ibid., p. 4 et p. 7).

C'est également dans une conception dynamique de la notion de ressource que se situent Blot et Milian (2004, p. 2) pour qui « les discours des politiques environnementales contemporaines identifient et valorisent des fonctions aux composantes naturelles jusqu'alors négligées ou minimisées.



Ils véhiculent des représentations nouvelles et peuvent ainsi remettre en cause certaines pratiques et en légitimer d'autres ». Aussi les auteurs font l'hypothèse que « ces discours suscitent l'émergence de nouvelles ressources » (ibid.). Lajarge *et al.* (2012), membres du projet Ressources Territoriales, Politiques Publiques et Gouvernance dirigé par le laboratoire PACTE de Grenoble adoptent également une approche constructiviste. Ce projet de recherche a engendré la rédaction d'un guide visant à accompagner les acteurs d'un territoire dans leur démarche de valorisation des ressources territoriales. Les auteurs y définissent la ressource comme « objet matériel (un produit par exemple) ou immatériel (un savoir-faire, un patrimoine culturel, etc.) dont la valeur est reconnue localement, et qui peut de ce fait faire l'objet d'une valorisation individuelle ou collective » (Perron et Janin, 2014, p. 9).

Selon les auteurs, les ressources revêtent un caractère territorial car « chaque territoire peut se caractériser par un ensemble de ressources « spécifiques », en lien étroit avec son histoire, son contexte socio-spatial particulier : des produits, des paysages, des savoir-faire, des patrimoines culturels, etc., qui distinguent le territoire d'un autre » (ibid., p. 10). De plus, « la ressource territoriale ne préexiste pas au territoire, mais se construit dans et par le territoire » (Lajarge *et al.*, 2012, p. 32). Il s'agit donc de s'interroger sur les « procédés, procédures et processus qui permettent à la fois la territorialisation des ressources et la mise en ressource des territoires » (Perron et Janin, 2014, p. 14). La valorisation de ces ressources permet de différencier le territoire, de contribuer à une identité collective et est un levier de développement économique.

Cette recherche d'une valorisation des ressources d'un territoire rejoint des questions posées dans les champs de recherche de l'écologie industrielle et plus particulièrement de l'écologie territoriale. Cette dernière s'inscrit selon Beaurain et Brulot (2011) dans « une démarche de construction d'un territoire productif en vue de renforcer la soutenabilité des processus de production ». De plus, l'écologie territoriale, selon le Collectif des chercheurs d'Aussois (2015), a une vocation « participative de co-construction d'une stratégie territoriale locale de gestion des ressources ».

Le degré d'indépendance pouvant être atteint par l'utilisation de ressources dites locales a fait l'objet de débats au sein des champs de recherche de l'écologie industrielle et écologie territoriale. En effet, selon Emelianoff (2007), les premiers travaux de recherche sur la ville durable en observant la dépendance des espaces urbanisés envers leur environnement ou hinterland ont cherché à « stimuler la capacité à satisfaire localement les besoins fondamentaux » allant pour certains auteurs jusqu'à la recherche d'une autosuffisance territoriale. Cependant, des travaux ultérieurs portant notamment sur le cas des matériaux de construction ont montré qu'il était très difficile voire impossible d'atteindre une autosuffisance, ainsi que le présente la synthèse de travaux sur la substitution de ressources primaires par des ressources secondaires figurant dans Augiseau et Barles (2017).

Par ailleurs, le caractère « local » des activités humaines peut être entendu de diverses manières. Les travaux réalisés au sein de l'école de la proximité française, par exemple Gilly et Torre (2000) et Torre et Beuret (2012), permettent de préciser cette notion. Se référant à ces travaux, Bahers *et al.* (2017), en cherchant à mieux comprendre les facteurs influençant les modes de gestion des déchets, ont proposé une typologie de la notion de proximité. Cette dernière comprend tout d'abord la proximité spatiale qui repose sur une mesure de la distance. Notons que si cette définition est simple, elle reste insuffisante pour caractériser le caractère local de ressources, la question de la distance maximale « faisant local » restant ouverte. Dans le cas des ressources pour la construction, cette distance ne fait pas l'objet d'un consensus actuellement et nous verrons par la suite qu'elle peut être appréhendée différemment selon les matériaux et territoires.

En outre, le concept de proximité peut être défini selon d'autres approches : la proximité environnementale (optimisation des transports et du traitement final, en lien avec des méthodes d'évaluation environnementale), mais aussi la proximité relationnelle (appartenance à un réseau d'interconnaissance), la proximité industrielle (structuration des filières industrielles et entrepreneuriales et filière technico-industrielle spécifique), la proximité politico-administrative (résultant de politiques publiques locales) et la proximité socio-économique (volonté de développer le territoire local).

Afin de répondre aux attentes opérationnelles formulées dans le cahier des charges du présent projet de recherche, nous nous focaliserons sur une approche très majoritairement matérielle des ressources pour la construction. De plus nous mettrons l'accent sur une forme de proximité, la proximité spatiale.



Cependant, nous chercherons à préciser dans quelle mesure cette dernière peut être associée à une proximité environnementale afin de contribuer à des stratégies d'économie circulaire. De plus, nous considérons que la recherche d'une proximité spatiale peut être favorisée par la mobilisation d'autres types de proximité faisant notamment appel à des questions de jeux d'acteurs.

1.1.2. RESSOURCES MATÉRIELLES POUR LA CONSTRUCTION ET CHAÎNE DE CIRCULATION DES MATIÈRES

Les ressources matérielles pour la construction sont définies ici comme l'ensemble des matières utilisées pour la construction et le renouvellement d'ouvrages bâtis, c'est-à-dire de bâtiments, réseaux et autres ouvrages de génie civil tels que les digues. Ces ressources incluent les produits de construction tels que définis par le *Règlement Produit de Construction* de l'Union Européenne (règlement n°305/2011) comme « un produit ou un kit qui est fabriqué et mis sur le marché pour être incorporé de manière permanente dans des ouvrages de construction (bâtiments ou ouvrages de génie civil) ou des parties d'ouvrages dont la performance influe sur la performance des ouvrages de construction dans le respect des exigences de base pour les ouvrages de construction ». Un kit selon ce règlement est « un ensemble d'au moins deux éléments séparés qui doivent être mis ensemble pour être incorporés dans un ouvrage de construction ». Les matériaux peuvent être distingués selon leur utilisation. Pour le bâtiment, deux grandes familles de matériaux sont généralement différenciées : les matériaux pour le gros œuvre ou de structure tels que le béton, et les matériaux pour le second œuvre tels que les menuiseries.

Les matériaux peuvent être issus de ressources naturelles dites primaires ou de ressources anthropiques dites secondaires. Les matériaux issus de ressources primaires peuvent être différenciés selon la possibilité de renouveler ces dernières. Minéraux non métalliques, minéraux métalliques et matériaux issus du pétrole sont issus de ressources non renouvelables (selon une temporalité humaine) à la différence des ressources issues de la biomasse qui sont renouvelables. Par ailleurs, le bois et les autres matériaux produits partiellement ou totalement à partir de biomasse, tels que des isolants en chanvre ou en laine de mouton, sont dits biosourcés. Le terme matériaux géosourcés peut en outre être utilisé pour désigner les matériaux issus de ressources d'origine minérale, tels que la terre crue ou la pierre sèche (Ministère de la transition écologique et solidaire et Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales, 2019).

Les matières accumulées au sein des stocks anthropiques, qui résultent d'activités humaines passées, peuvent constituer après leur retrait de ces stocks¹ des matières utiles à de nouvelles activités. Se substituant à des ressources primaires extraites du milieu naturel, elles représentent ainsi des ressources secondaires. L'utilisation des ressources secondaires est souvent dénommée extraction urbaine (en anglais *urban mining*), concept défini comme la « valorisation systématique des matériaux anthropiques depuis les espaces urbanisés » (Brunner, 2011, p.339). Au sein d'un processus de valorisation des déchets, quatre temps peuvent être distingués : collecte, séparation, tri, et traitement (*processing*) ou production de matériaux (Graedel, 2011). Ce processus prend des formes très variées, selon les matériaux secondaires et déchets concernés, les chantiers et les formes de valorisation. Collecte, séparation, tri, et production de matériaux peuvent être réalisés sur le chantier même ou dans des sites dédiés. La transformation des ressources secondaires peut être réalisée au sein des mêmes sites que celle des ressources primaires (cas de certaines usines de plâtre en Ile-de-France par exemple) ou au sein de sites spécifiques. De plus des termes différents sont utilisés selon les formes de valorisation : le réemploi par exemple (utilisation d'un produit de construction pour le même usage) ne donne pas lieu à l'acquisition du statut réglementaire de déchet.

Ainsi les ressources se situent en amont et en aval de la chaîne de circulation des matières (ou chaîne de valeur) de la construction. Quatre principales étapes sont souvent distinguées au sein

¹ Les flux de déchets sont souvent dénommés gisements. Cependant, ce terme se rapproche plutôt de la notion de stock. Par exemple, le terme « gisement est synonyme du terme accumulation ou réservoir lorsqu'il s'applique au pétrole (Commission économique pour l'Europe, 2010, p. 10). Aussi, ce terme ne sera pas adopté ici.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

d'une chaîne : l'extraction des ressources naturelles, la production de matériaux (ou transformation des ressources), leur utilisation et la gestion des déchets. Cette gestion peut donner lieu à une nouvelle production de matériaux et utilisation (voir notamment : Ayres, Simonis, 1994 ; Bringezu, 2002). Notons que ces étapes s'apparentent à celles définies dans la norme EN 15804+A1 sur les fiches de déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction qui distingue : production (approvisionnement en matières premières dont extraction et traitement, transport, fabrication), processus de construction (transport, processus de construction - installation), utilisation (utilisation, maintenance, réparation, remplacement, réhabilitation, utilisation de l'énergie et de l'eau) et fin de vie (démolition - déconstruction, transport, traitement des déchets, élimination)². La figure 1 ci-dessous présente les processus et flux de matières et énergie associés.

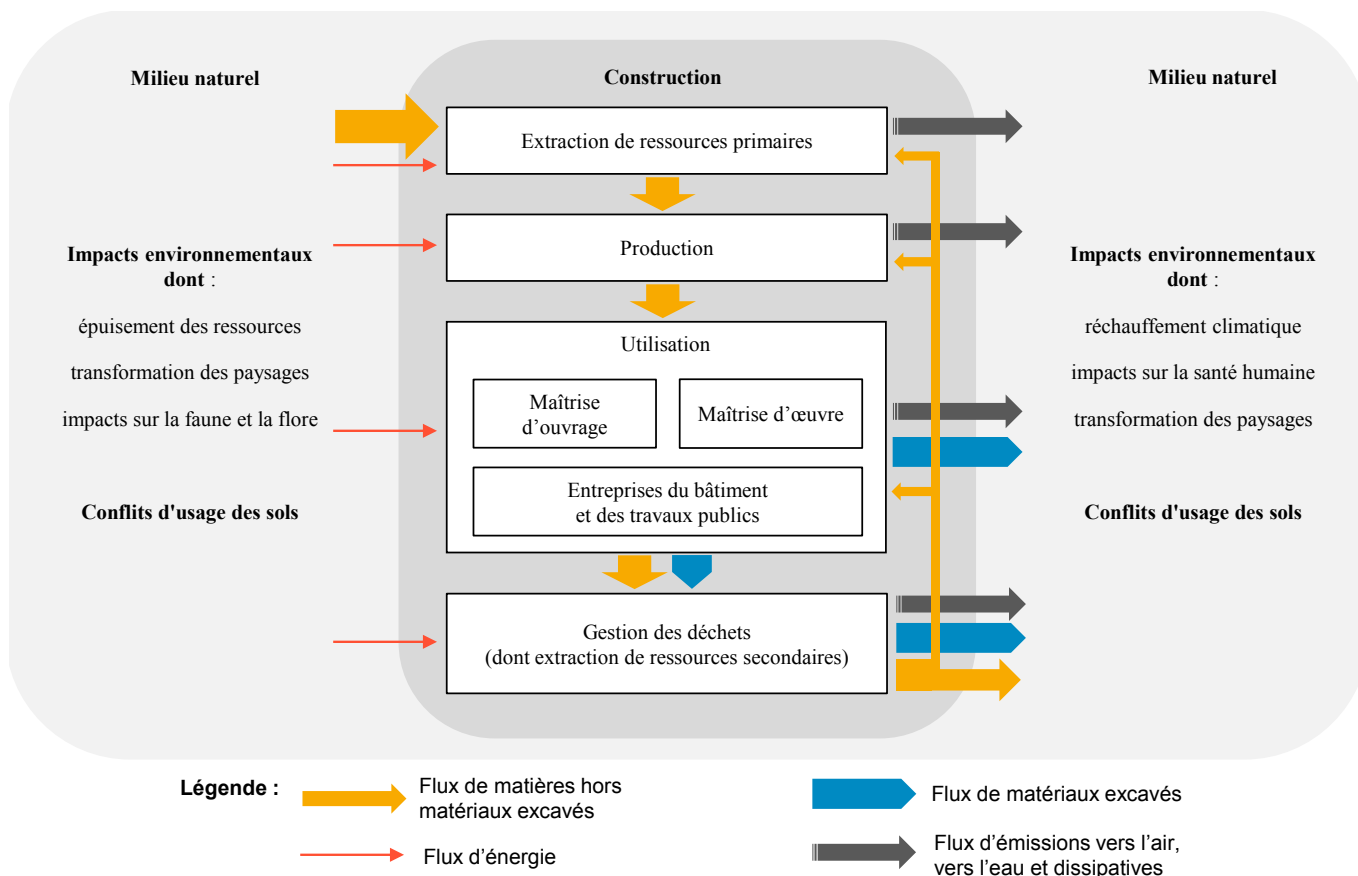


Figure 1. Etapes de circulation des matières liées à la construction et flux associés. Source : d'après Augiseau (2020)

1.1.3. UN CHOIX DE RESSOURCES POUVANT CONTRIBUER À UNE RÉDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN OUVRAGE BÂTI OU D'UN TERRITOIRE

Chaque étape de circulation des matières génère des flux entrants et sortants de matières et énergie qui interagissent avec le milieu naturel et peuvent engendrer des impacts. A ces impacts sont associés

2 Notons que la notion de chaîne de circulation des matières ou chaîne de valeur est proche de la notion de filière économique qui comprend pour la construction selon Vincent (1985) cinq principaux segments : matériaux de construction, distribution-négoce, bâtiment et travaux publics, concepteurs-maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage. L'INSEE (2009) distingue 17 ensembles de fournisseurs de matériaux pour le bâtiment : filière béton, travail de la pierre, mortiers et bétons secs, constructions métalliques, tuiles et briques, panneaux et charpentes, matériel électrique, produits d'isolation minéraux, robinetterie pour le bâtiment, appareils sanitaires, radiateurs et chauffe-eau, ascenseurs, plâtre, verre, menuiseries, revêtements sols et murs, peinture, enduits et colles.



des conflits d'usage des sols. L'extraction de ressources primaires (minéraux, bois d'œuvre, etc.) génère des ressources qui sont utilisées, les matériaux primaires, ainsi que des matières inutilisées telles que les morts-terrains des carrières (couche de terre dégagée pour extraire les minéraux). La production permet de produire des matériaux transformés, prêts pour être mis en œuvre, et également des ressources inutilisées, les déchets des procédés de transformation. A l'issue de la gestion des déchets, une partie des ressources secondaires est utilisée et l'autre partie est inutilisée (déchets mis en installation de stockage notamment).

Les impacts environnementaux engendrés par le choix de ressources pour la construction peuvent être analysés à différentes échelles. Ils peuvent être étudiés à l'échelle des matériaux en approche cycle de vie. Ceci montre par exemple que des matériaux produits à partir de ressources secondaires et locales sont généralement moins impactants (Bribián *et al.*, 2011).

Les impacts peuvent être étudiés à l'échelle de l'ouvrage bâti. Sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, les matériaux ne représentent généralement pas la première source d'impacts environnementaux et le choix des ressources peut ne pas avoir d'effet marqué. En effet, deux études comparant des bâtiments construits en conformité avec la réglementation thermique 2012 ou la label BBC en France en bloc béton, brique de terre cuite et ossature bois montrent que les impacts environnementaux de ces bâtiments sont très proches bien que des ressources différentes soient utilisées (Lebert *et al.*, 2013 ; Stephan, 2016).

Par ailleurs, la proximité spatiale des matériaux peut ne pas engendrer une réduction significative des impacts environnementaux durant le cycle de vie d'un ouvrage. En effet, les impacts environnementaux associés au transport uniquement des matériaux pour la construction d'un bâtiment font l'objet d'études montrant que ce dernier est relativement faible au regard des autres contributeurs sur la durée de vie d'un bâtiment. Selon Esin (2007) le transport des matières depuis leur extraction jusqu'au chantier représente 2,2 % de la consommation d'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment. Selon Lawrence (2015) la production de matériaux engendre 15 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur de la construction au Royaume-Uni en 2008 et leur distribution seulement 1 %. Cependant, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments pourrait engendrer une augmentation de ces parts. En 2050 si l'objectif de réduction de 80 % des consommations d'énergie durant l'utilisation des bâtiments est atteint, les matériaux engendreraient 43 % des émissions du secteur de la construction au Royaume-Uni et leur distribution 2,5 % (Lawrence, 2015).

De plus, outre la distance parcourue, le mode de transport des matériaux influe sur les impacts environnementaux. Selon l'ARENE Ile-de-France et l'ICEB (2015, p. 34) « une ardoise venant de Chine par camion jusqu'au bateau puis par bateau jusqu'en France puis par péniche jusqu'au chantier pourra avoir un supplément d'énergie grise plus faible qu'une ardoise d'Espagne si le chantier est desservi par un port fluvial ». Aussi, les auteurs recommandent « pour des bâtiments à proximité d'un port [de] ne pas exclure le recours à des matériaux lointains s'ils sont approvisionnés par bateau » (p. 35). Selon cette étude « en complément de l'énergie nécessaire par km transporté, il faut aussi regarder le taux de remplissage des véhicules, le retour à vide ou plein, les éventuelles transformations complémentaires des matériaux » (p. 35). Les auteurs citent un exemple observé de « fenêtres fabriquées sur place avec du bois de pays pour un chantier dans les Vosges [faisant] un aller et retour en camion jusqu'en Espagne pour y être lazurées » (*ibid.*).

De même, l'utilisation de ressources secondaires situées à faible distance d'un chantier, notamment de granulats recyclés dans le béton, peut permettre dans certains cas de réduire les impacts environnementaux d'un ouvrage bâti. Cependant cette réduction dépend de la formulation des bétons et des distances parcourues par les granulats (de Larrard et Colina (*dir.*), 2018). Aussi, le choix de ressources proches spatialement d'un chantier ne permet pas toujours de réduire les impacts environnementaux de cet ouvrage. Par conséquent il n'est pas toujours associé à une proximité environnementale selon la typologie de Bahers *et al.* (2017).

Les impacts environnementaux peuvent par ailleurs être analysés à une troisième échelle : le territoire d'implantation du projet de construction ou d'aménagement. Il s'agit d'étudier en quoi le choix de ressources contribue à une réduction des impacts environnementaux de ce territoire. Le choix de ressources locales renouvelables contribue par exemple à un moindre épuisement des ressources du territoire. Le choix de matériaux secondaires peut en outre contribuer à réduire les impacts associés à l'extraction de ressources primaires d'une part, et à la gestion des déchets d'autre part.



Cette réduction n'est pas systématique et Bahers *et al.* (2017) remarquent qu'une valorisation de déchets au sein du territoire de production des déchets ne contribue pas toujours à la réduction des impacts environnementaux.

Enfin, d'autres bénéfices peuvent être attendus d'une proximité spatiale. Selon l'ARENE Ile-de-France et l'ICEB (2015, p. 35), elle permet de « développer les filières locales (savoir-faire et emplois) et de s'inscrire dans une esthétique contemporaine en harmonie avec le paysage et l'architecture vernaculaire ». Selon le réseau des professionnels du bois en Bretagne Abibois (2015), un recours à des bois dits locaux permet d'une part de mobiliser une ressource durablement gérée, lutter contre les coupes illégales et réduire les émissions de GES liées au transport, mais aussi d'autre part de pérenniser et créer des emplois locaux et de contribuer à l'équilibre de la balance commerciale française.

1.1.4. RESSOURCES POUR LA CONSTRUCTION EN FRANCE : LA PERSISTANCE DE PROXIMITÉS SPATIALES MAIS UNE TENDANCE À L'ÉLOIGNEMENT

Les stocks de ressources pour la construction en France sont divers. Parmi les ressources utilisées, les minéraux et en particulier les granulats, représentent les flux les plus pondéreux. En effet, les granulats représentent en masse la première consommation de matières du pays, de même que de matériaux de construction (CGDD-SOES, 2013). Selon les statistiques publiées par les producteurs de granulats (UNPG, 2013), la majorité des granulats est utilisée en travaux routiers, remblais ou pour d'autres travaux publics et environ le cinquième de la consommation entre dans la structure de bâtiments. 75 % des ressources utilisées par la construction de bâtiments en France sont des granulats (dont sable) selon une étude récente du CSTB (Laurenceau *et al.*, 2019)³.

Le béton (bloc ou banché) est le matériau le plus couramment employé en structure pour des logements selon une étude menée par la société Bâti-Etudes pour l'année 2008. Cette domination est confirmée en 2018 dans un document de synthèse sur 163 opérations Effnergie+ et Bepos Effnergie 2013 de l'Observatoire BBC (2018) où le béton (banché) représente 55 % des matériaux de structure pour les logements collectif et le bloc béton 58 % pour les logements individuels. Selon les résultats d'une étude menée par le même observatoire et citée par le CSTB (Lebert *et al.*, 2013), le béton domine également dans la construction de bâtiments de bureaux, avec 48 % des opérations recensées. Brique, ossature bois et ossature métallique représentent respectivement 12, 13, et 17 % des opérations.

Malgré une tendance à l'homogénéisation des modes constructifs, des variations régionales sont encore notables. Une étude de l'AQC de 2009 sur les parts de marché des types de couverture sur toiture en pente pour les maisons individuelles montre que la tuile de terre cuite représente entre 19 et 100 % du marché selon les régions. De même pour l'utilisation des briques pleines, très dominante dans des territoires tels que le Nord, la Sologne, ou Toulouse où sa production à partir de ressources locales en argile et son utilisation sont anciennes.

Les ressources secondaires sont également diverses et riches. En effet, les déchets issus des chantiers du BTP sont le principal déchet en volume en France. Selon une étude réalisée par le Service de la donnée et des études statistiques du Ministère de la transition écologique pour l'année 2014 (CGDD-SDES, 2018), les matériaux excavés (terres et minéraux) représentent la majorité des déchets de chantiers, suivis par des matériaux minéraux non métalliques dont le béton. Notons que ces valeurs proviennent d'estimations ne permettant pas de distinguer certains déchets mélangés à l'issue des travaux, notamment certains bétons. Une étude du CSTB (Bergogne *et al.*, 2019), à partir d'une base de données de 240 diagnostics déchets d'opérations de déconstruction montre que les bétons et les pierres sont les principaux flux.

En termes d'approvisionnement, selon une étude du SESSI de 2007, au début du XXI^e siècle en France « les marchés des matériaux de construction affichent de manière générale un caractère



régional, voire local » (p. 39). En effet, selon cette source, « pour le transport routier national et la partie française de l'international, la distance moyenne s'établit à 35 kilomètres en 2003, soit un peu moins du tiers de la moyenne de l'ensemble des marchandises » (ibid.). La production de matériaux minéraux s'appuie sur une extraction très majoritairement réalisée en France, 94 % des minéraux utilisés en 2012 ayant été extraits sur le territoire (CGDD, 2013). Les échanges commerciaux de la France avec d'autres pays sont faibles : les exportations ne représentant en 2012 que 4 % de la production intérieure et les importations 6 % de la consommation intérieure selon une étude réalisée par le Pôle interministériel de prospective et de mutation des activités économiques en 2016 sur la filière minérale de la construction⁴.

Un approvisionnement local, c'est-à-dire une proximité physique des chantiers, a historiquement été recherché lors de la construction d'ouvrages. En effet, selon Paul Vidal de La Blache (2015, n. p.) « l'homme a fait son nid, dès qu'il a senti la nécessité de se fixer, avec les matériaux qu'il avait sous la main ». Jusqu'au XIXe siècle, si de nombreuses exceptions à cette proximité peuvent être observées⁵, elles relèvent selon Gély (2014) d'ouvrages dont les commanditaires disposent d'un fort pouvoir politique ou d'une puissance financière. A partir du XIXe siècle, une production industrielle de matériaux tels que la brique, rendue possible par la diffusion de l'utilisation de l'énergie fossile, et associée au développement des réseaux de transport, a permis de généraliser un approvisionnement distant. Simonetti (1977, p. 345) observe qu'« avant l'industrialisation le marché de la construction était spatialement constitué par une collection de petits marchés locaux, parfois régionaux, mettant en présence un nombre faible de producteurs et de consommateurs. Aujourd'hui, ces aires de marché ont grandi ».

Au début du XXIe siècle, une orientation à la hausse des importations est observée. L'étude du SESSI (2007)⁶ observe ainsi que « sur longue période, la distance moyenne de livraison des matériaux de construction s'inscrit [...] en hausse » (p. 1987). De plus, des matériaux pour lesquels les importations étaient très faibles ont vu durant les années 2000 la part des importations dans la consommation en France augmenter. C'est le cas du ciment pour lequel cette part a doublé depuis 2000 et atteint 16 % en 2013 (ibid.). Aussi, parmi les enjeux de la filière minérale identifiés dans PIPAME (2016, p. 13) figurent la « substitution des produits français par des produits de construction majoritairement importés » ainsi que des « difficultés croissantes d'accès aux ressources minérales existantes » (ibid., p. 13). Les échelles d'approvisionnement varient fortement selon les matériaux. En effet, les statistiques de l'INSEE (2009) montrent que la pierre pour la construction, les ossatures métalliques et panneaux en bois et charpentes sont parmi les matériaux les plus exposés à la concurrence internationale.

1.1.5. DES ÉCHELLES D'APPROVISIONNEMENT TRÈS DIVERSES SELON LES MATÉRIAUX

Afin de mieux comprendre les différences entre matériaux, la densité d'implantation de sites d'extraction ou production de matériaux en France, la distance moyenne de transport des matériaux du site d'extraction ou production jusqu'au chantier et la part des importations internationales dans la consommation sont étudiées à partir d'une revue de la littérature. Notons que cette revue n'est pas exhaustive et serait à poursuivre. Des informations complémentaires apportées par le FCBA sur la filière bois sont présentées dans un paragraphe distinct en fin de section. Par ailleurs, les métaux (aciers, cuivre et aluminium) intégrés dans le tableau ne relèvent pas d'une ressource primaire extraite localement (le fer et la bauxite sont extraits dans d'autres pays)⁷.

4 Cette filière inclut selon cette étude l'extraction des principaux minéraux de construction (granulats, argile, calcaire, pierres naturelles, roches, gypse et sables) et la transformation de ces minéraux (production de tuiles et briques, ciments et chaux, plâtre, éléments préfabriqués en béton, béton prêt à l'emploi et roches ornementales).

5 Tels que l'approvisionnement en chênes depuis la côte est de la mer Baltique pour produire les lambris du logis du roi dans le donjon du Château de Vincennes au XIVe siècle (Chapelot, 1994).

6 Les séries de publications du SESSI puis de l'INSEE dédiés aux fournisseurs de matériaux de construction ont cessées en 2009 (sauf erreur de notre part). Si les données ne sont pas les plus récentes que l'on peut trouver, ces études apportent des informations homogènes pour l'ensemble ou presque des matériaux de construction et sont pour cela particulièrement intéressantes.

7 <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/retour-normale-marche-lalumine-apres-annee-2018-turbulente>. Le site mineralinfo présente également des fiches de criticité de certains métaux stratégiques. Ces fiches sont régulièrement mises à jour.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

A partir de ces 3 critères, nous proposons de différencier les matériaux selon 5 échelles d'approvisionnement :

- échelle intercommunale/départementale : le maillage des sites de production couvre presque l'ensemble du territoire national (un site de production par bassin de consommation, plusieurs par département) et la distance moyenne entre le site de production et le chantier est inférieure à 100 km;
- échelle régionale : en moyenne un site de production par région et distance moyenne entre le site de production et le chantier comprise entre 100 et 300 km;
- échelle nationale : quelques sites de production sur toute la France et distance moyenne entre le site de production et le chantier comprise entre 300 et 500 km;
- échelle européenne : importation depuis des pays européens importante et distance moyenne supérieure à 800 km;
- échelle extra-européenne : importation majoritairement depuis des pays extra-européens.

Ce classement par échelle apporte des éléments pour une analyse moyenne en France et ne prend pas compte de cas particuliers. En effet, un matériau dont l'approvisionnement relève généralement d'une échelle nationale peut être utilisé sur un chantier à proximité d'un site de production.

Les résultats, présentés dans le tableau 2, montrent tout d'abord que des matériaux ne relèvent généralement pas en France d'une échelle d'approvisionnement locale mais s'inscrivent dans des flux nationaux ou internationaux. Pour certains matériaux et territoires, rechercher un approvisionnement local, c'est-à-dire une échelle d'approvisionnement intercommunale/départementale ou régionale, est par conséquent impossible. La recherche de ressources locales peut néanmoins impliquer la sélection des matériaux les plus disponibles dans un périmètre restreint.

Par ailleurs, les différences en termes de distances sont moins marquées que l'on pourrait présumer entre matériaux minéraux et biosourcés. Ainsi, granulats et paille pour la construction ont des distances d'approvisionnement identiques. Certains matériaux en béton, et en particulier le béton prêt à l'emploi composé pour environ deux-tiers de granulats et un dixième de ciment (Eurostat, 2012), peuvent avoir une distance d'approvisionnement inférieure à des matériaux biosourcés comme le bois de charpentes⁸. De plus, tandis que 6 % seulement des minéraux utilisés en 2012 en France sont importés (CGDD, 2013), selon une étude du PIPAME de 2012 sur les produits issus du bois et notamment le bois construction, « l'offre étrangère domine donc le marché français, la majorité des bois utilisés pour la construction de maisons ossature bois par exemple provenant de l'étranger » (p. 54).

En outre, on peut observer un fort maillage de sites de recyclage de débris de démolition pour la production de granulats, avec une densité d'implantation supérieure à la plupart de celles des sites de production de matériaux issus majoritairement de ressources primaires. Notons toutefois que cette production de granulats issus du recyclage s'effectue en partie au sein même de carrières (Treize Développement et Pöyry, 2011).

Enfin, deux critères semblent différencier les matériaux. Tout d'abord leur densité volumique, les matériaux minéraux tels que les granulats étant transportés sur des distances plus faibles que des matériaux de moindre densité tels que le bois de structure (charpente). La transformation du matériau est également un facteur important et l'on observe une moindre densité d'implantation et des distances d'approvisionnement plus fortes pour des matériaux comme le ciment ou le plâtre. L'INSEE (2009) montre en effet que certaines activités de transformation ont une intensité capitalistique élevée. C'est le cas du ciment, avec un ratio immobilisations/effectifs de 569 k€ en 2007, ou encore du plâtre (237 k€/effectifs) et des tuiles et briques (203 k€/effectifs). Selon cette étude, « en regard, l'extraction de sables et granulats et la fabrication d'éléments en béton sont des secteurs beaucoup plus atomisés et qui ressortent de la catégorie des activités de main d'œuvre » (p. 6).

8 La distance particulièrement faible entre production de béton prêt à l'emploi et chantier est liée à la spécificité de ce matériau, produit frais qui doit être livré moins d'une heure trente après sa fabrication.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Tableau 1. Caractéristiques de l’approvisionnement en matériaux (recensement non exhaustif), France, valeur absolue et km

Matériau	Nombre de sites	Distance moyenne entre production ou extraction et utilisation	Part des importations internationales dans la consommation	Echelle d’approvisionnement (hors exceptions)
Granulats	Environ 2 500 (PIPAME, 2016)	Toutes utilisations : 42 km (UNPG, 2012) avec 33 km par la route, 106 km par voie fluviale, 194 km par voie ferrée Production de béton prêt à l’emploi : 18,5 km	Faible part et bilan exportations-importations à l’équilibre (UNICEM-UNPG, 2018).	Intercommunale/ départementale
Ciment	43 (PIPAME, 2016) (au moins 1 cimenterie par région sauf Corse et Bretagne)	Environ 200 km (d’après SFIC-Infociments, 2018) (cimenteries à proximité des carrières de calcaire (Alizert et al., 2009), mais développement depuis les années 2010 de centres de broyage de clinker dans des territoires portuaires avec importations internationales)	15% du ciment consommé importé en 2016 (PIPAME, 2016)	Régionale
Béton prêt à l’emploi (centrales fixes)	1 800 (PIPAME, 2016)	17 km (PIPAME, 2016)	Importations négligeables	Intercommunale
Béton industriel (préfabriqué)	900 (PIPAME, 2016)	Bloc béton : 50 km ; poutrelle : 250 km ; poutres et charpentes en béton : 700 à 1 000 km (PIPAME, 2016) (approvisionnement en granulats/sable à partir des carrières proches)	Importations relativement faibles	Intercommunale/ départementale à régionale (concentration des sites autour des espaces urbanisés)
Enrobés bitumineux	474 centrales fixes et mobiles en 2019 (Routes de France, 2020)	Importations internationales pour bitume, 42 km pour granulats (UNPG, 2012)	Part des importations importante pour bitume et faible pour granulats	Départementale
Roches ornementales et de construction	3 500 (PIPAME, 2016)	110 km (FDES Pierre du Sud, 2019)	Importations beaucoup plus fortes qu’exportations (PIPAME, 2016)	Régionale (avec spécificités : granit extrait surtout en Bretagne et Midi-Pyrénées ; pierres calcaires en Bourgogne, Languedoc-Roussillon, Provence - Alpes-Côte d’Azur, Poitou-Charentes selon INSEE, 2009)
Plâtre et chaux	Fabrication de chaux ou de plâtre : 37 ; fabrication d’éléments en plâtre : 27 (PIPAME, 2016)	240 km à 600 km selon fabricant ou produit (FDES Placo Saint Gobain, 2016 ; Placo Saint Gobain, 2018 ; Knauf, 2017)	Bilan exportations-importations positif	Régionale à Nationale (production de produits en plâtre proche des carrières de gypse, Nord-Ouest non couvert par manque de ressource locale et production concentrée dont 54% en Ile-de-France)
Briques, tuiles et autres produits de construction en terre cuite	203 (PIPAME, 2016)	Brique creuse : 300 km à 400 km (FDES Wienerberger, 2017, Terreal, 2017). Tuile terre cuite : 275 km (FDES CTMNC, 2016)	/	Régionale (concentration au sein d’un arc allant de la région Poitou-Charentes à la région Rhône-Alpes et incluant Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon selon INSEE, 2009)
Ardoise	Quelques carrières très locales	En camion 1400 km (Espagne-France, selon FDES CUPA Pizarras, 2019)	Forte importation d’ardoises d’Espagne (94%) (Batirama 2011; Les Echos, 2014)	Régionale à Européenne



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Verre pour la construction	7 sites de production de verre plat (Elementarium, 2020)	Pour une fenêtre (cadre et verre, distance entre atelier, intermédiaire et chantier) : 200 à 500 km (FDES FCBA, 2020)	/	Régionale ou Nationale à Européenne (concentration dans la moitié Nord-Est du pays)
Carreau de céramique	/	1 350 km (FDES Saloni, 2018)	Fortes importations de carreaux de grès céramique d'Italie et d'Espagne	Européenne
Sanitaires	/	Distance moyenne usine – distributeur – chantier : 1 200 km (FDES AFISB, 2020)	Importations depuis Allemagne, Portugal, Espagne et Maroc	Nationale ou Européenne à Extra-européenne
Isolant minéral (laine de verre, laine de roche)	/	460 à 600 km (FDES Knauf insulation, 2017)	/	Nationale (concentration dans quelques régions)
Ossature acier	5 Hauts fourneaux et plus de 10 aciéries électriques (Elementarium, 2020)	Poutrelle en acier utilisée comme élément d'ossature : 272 km (FDES CTICM, 2016)	Importations de produits finis contenant de l'acier (et importations de fer primaire pour production de l'acier avec part des ressources primaires d'environ 50 %)	Nationale ou Européenne à Extra-européenne
Bois d'œuvre	1 870 scieries (PIPAME, 2012)	85 km de récolte en France à scierie (bois rond) (FCBA, 2014) Charpente traditionnelle 100% résineux fabriquée en France : 171 km de scierie au chantier (FDES FCBA, 2018) Exploitation – usine : selon origines du bois, 330 km (France), 500 km (Allemagne). Usine – chantier : 190 km	Variables selon utilisation Pour une charpente traditionnelle en résineux : pas d'importations. Pour une charpente industrielle en bois : 50 % de bois français, 47 % importés depuis Allemagne et 3 % depuis Scandinavie (FCBA, 2018)	Régionale/Nationale ou Européenne (plus d'un quart des effectifs en Poitou-Charentes et Aquitaine ; 2nde zone d'implantation : Est avec forêts vosgienne et jurassienne selon INSEE, 2009)
Paille pour la construction	/	/	/	Intercommunale/départementale
Chanvre pour la construction	/	/	/	Intercommunale/départementale à Régionale (6 grands bassins de production : Aube, Haute-Saône, Vendée, Manche, Seine-et-Marne et Essonne selon Nomadéis, 2017)
Ouate de cellulose	7 (Nomadéis, 2017)	350 km (FDES Ouatéco, 2019)	/	Régionale à Nationale
Recyclage des terres excavées en technosols	Plusieurs installations traitement des terres excavées par région. Recyclage en technosols proposé par certains industriels (Damas et al., 2016).	/	/	Intercommunale/départementale
Granulats issus du recyclage de débris de démolition	347 sites de recyclage (Bio by Deloitte, 2015)	/	/	Intercommunale/départementale
Fers à béton issus du recyclage de déchets métalliques	18 sites de fours électriques et 2 sites de hauts-fourneaux (utilisation des produits inconnue) (Bio by Deloitte, 2015)	/	/	Nationale ou Européenne à Extra-européenne

Source : voir dans le tableau

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES SUR LA FILIÈRE BOIS PAR LE FCBA

L'approvisionnement du bois pour les bâtiments est segmenté en plusieurs étapes :

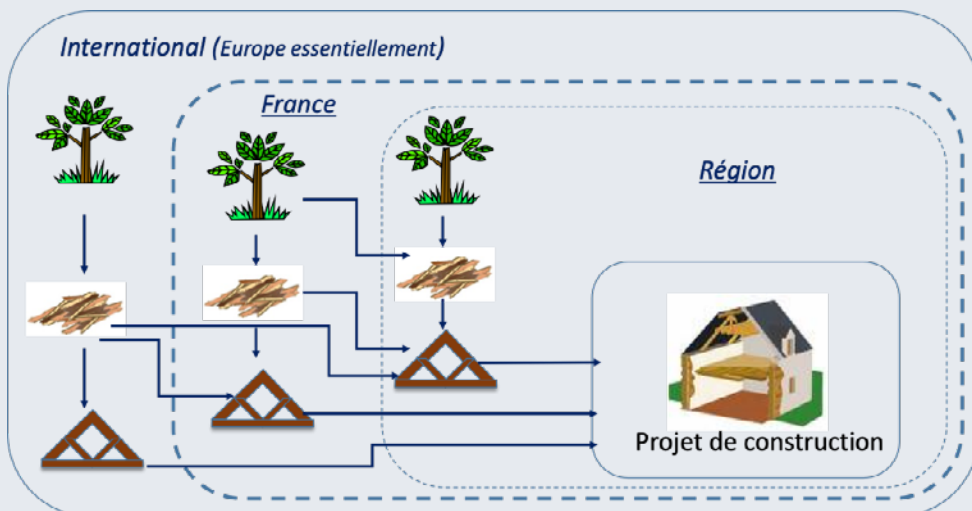
- De la ressource forestière à l'usine de première transformation du bois (scierie, fabricant de panneaux à base de bois) ;
- De l'usine de première transformation du bois à l'usine de deuxième transformation du bois (fabrication de charpente, mur ossature bois, plancher, poutre, portes, fenêtres, bardages, parquets...) ;
- De l'usine de deuxième transformation du bois au chantier de construction.

Pour chacune de ces étapes, l'approvisionnement peut être régional, national, européen voire mondial.

Ainsi pour un chantier de construction en France, les produits de construction bois issus des différentes usines de deuxième transformation du bois peuvent provenir soit de la même région que celle du chantier, soit d'une autre région française, soit d'un pays européen, soit d'un pays situé au-delà de l'Europe.

Il en va de même pour les autres étapes. L'usine de deuxième transformation du bois peut s'approvisionner auprès d'une scierie située dans la même région (mais pas forcément la même que celle du chantier), ou dans une autre région française, ou dans une scierie européenne voire située dans un pays hors Europe. Enfin, la ressource forestière utilisée peut provenir d'un massif forestier de la même région que l'usine de première transformation ou d'une autre région française, ou situé dans un autre pays européen voire hors Europe. Il peut ainsi y avoir plusieurs combinaisons possibles d'approvisionnement avec même des cas, par exemple, où la ressource forestière peut provenir de la même région que celle du chantier mais où l'usine de deuxième transformation est dans une autre région.

Afin de définir un approvisionnement durable du bois par rapport au chantier, chacun des lieux de prélèvement de la ressource forestière, de première transformation de cette ressource et de la deuxième transformation du bois doivent donc être pris en compte.



Pour ce qui concerne les produits de construction bois (issus de la seconde transformation), il existe une part de produits importés, assez variable selon les types de produits.

Ainsi, les charpentes sont très majoritairement fabriquées en France et c'est aussi le cas des menuiseries extérieures et intérieures (parts de marché des produits français supérieures à 80%). Pour des produits tels que le lamellé-collé, CLT, poutres en I et parquets contrecollés, les taux d'imports sont plutôt proches ou supérieurs à 50%.

Pour ce qui concerne le bois d'œuvre utilisé pour la fabrication de produits de construction en France (donc semi-produits issus de la première transformation), il y a une part significative des sciages de résineux qui sont importés (de l'ordre de 30 à 40%) mais avec une évolution favorable dans le sens du développement des parts des sciages français.

La Veille Economique Mutualisée de la filière forêt-Bois indique que 65% en volume du bois d'œuvre (bois massif et bois massif reconstitué, BLC-CLT) employé en France, est produit et récolté en France.

Concernant les panneaux à base de bois utilisés en France pour la fabrication de produits de construction, il y a également une proportion significative d'imports, pouvant aller au-delà de 50%.

Enfin, les sciages et panneaux de bois produits en France sont très majoritairement produits à partir de bois issus des forêts françaises.

Les éléments de description du taux de production nationale des produits bois pour la construction sont assez divers selon les produits et les essences de bois⁹. Ainsi, pour les sciages de résineux, les sciages de sapin-épicéa qui couvrent une majeure partie du marché des bois de structure sont à 60% de production nationale (les 40% d'import quasi totalement d'origine européenne, Allemagne et Pays scandinaves en majorité), alors que les sciages de pin maritime et de douglas sont très proches de 100% de production nationale.

Pour les feuillus, le chêne est également proche de 100% de production nationale, le hêtre de 80%. Pour les produits, les charpentes, menuiseries extérieures et intérieures sont à des taux de production nationale de 80 à 95%, les lames de terrasse et produits techniques (BLC, Poutres en I, ...) étant plutôt entre 30 et 55%.

1.1.6. FREINS À UNE PROXIMITÉ SPATIALE ET RÔLE DE L'ÉVALUATION

Nous cherchons ici à esquisser quelques éléments d'analyse permettant de comprendre l'éloignement de l'approvisionnement en matériaux depuis les années 2000 observé dans SESSI (2007), INSEE (2009) et PIPAME (2016) et le rôle que peut jouer le développement de méthodes et outils d'évaluation. Une revue récente de la littérature technique et scientifique a permis d'analyser les contraintes à la production et utilisation de matériaux issus de ressources secondaires locales en France et plus particulièrement en Île-de-France (Augiseau, 2019). Douze ensembles de facteurs ont été identifiés et situés selon leur place dans la chaîne de circulation des matières.

Nous proposons ici de prolonger cette analyse en intégrant les étapes amont de la chaîne de circulation telle que définie dans la section précédente. Notons qu'il s'agit d'étapes génériques, les processus prenant des formes très variées, selon les matériaux et chantiers. « Extraction » s'intéresse aux facteurs qui expliquent pourquoi les ressources qui peuvent être présentes à un niveau local ou régional ne sont pas exploitées. « Production » fait la même analyse mais du point de vue de l'existence de la filière industrielle de transformation et de production de produits semi-finis ou finis. « Utilisation » recherche des facteurs explicatifs du point de vue du client final. Des facteurs spécifiques aux ressources secondaires sont présentés ici comme relevant de l'étape « Gestion des déchets ». Cette analyse s'appuie sur une revue non exhaustive de la littérature comprenant des documents portant spécifiquement sur le cas de l'Île-de-France. 38 facteurs regroupés en 21 ensembles et non hiérarchisés, présentés dans le tableau 2, sont identifiés.

Tableau 2. Facteurs concourant à un éloignement de l’approvisionnement en matériaux en France depuis les années 2000

ÉTAPE DE LA CHAÎNE DE CIRCULATION DES MATIÈRES	ENSEMBLE DE FACTEURS	FACTEURS (SOURCES)
EXTRACTION	Faible connaissance des stocks et flux de ressources	Besoin de connaissances sur des ressources locales spécifiques (Conteville et den Hartigh, 2009 ; den Hartigh, 2010) Faible fréquence et qualité insuffisante des diagnostics préalables à la démolition (Bellastock, 2018 ; Vernus et de Cazenove, 2011)
	Épuisement, qualité inadaptée ou contraintes physiques limitant la disponibilité des ressources	Épuisement de ressources (Dupont, 1984 ; DRIRE Haute-Normandie, 1999) Qualité inadaptée des ressources au regard d’exigences liées aux étapes de production ou utilisation (DRIEE et al., 2017) Contraintes physiques limitant la disponibilité de ressources (contraintes dites de fait ; DRIEE et al., 2017)
	Contraintes réglementaires ou politiques et conflits d’usage des sols limitant la disponibilité des ressources	Contraintes réglementaires et politiques issues des schémas régionaux des carrières (DRIEE et al., 2017) ou des plans locaux d’urbanisme (IAURIF, 2003) Conflits d’usage des sols (Carré et Chartier, 2002 ; Omont, 2012)
	Foncier coûteux	Coût du foncier (Dupont, 1984 ; PIPAME, 2016 ; Omont, 2012)
	Intensité capitaliste, fort taux d’investissement et intégration verticale	Intensité capitaliste et fort taux d’investissement (SESSI, 2007 ; PIPAME, 2016) Intégration verticale de l’activité d’extraction au sein de groupes réalisant également production et distribution (INSEE, 2009)
PRODUCTION	Extraction locale absente ou faible	Extraction locale limitée et proximité des matières premières recherchée pour l’implantation de la production afin de limiter les coûts de transport (Lacoste, 1957 ; SESSI, 2007)
	Contraintes réglementaires liées aux nuisances et risques en France, conflits d’usage des sols	Contraintes liées aux nuisances (PIPAME, 2016) Complexité des procédures administratives (James, 2010 ; PIPAME, 2016) Conflits d’usage des sols (PIPAME, 2016)
	Foncier coûteux	Coût du foncier (Omont, 2012)
	Prix de l’énergie en hausse	Part croissante de l’énergie dans les coûts de production, concurrence internationale des coûts de l’énergie (PIPAME, 2016 ; James, 2010)
	Intensité capitaliste, fort taux d’investissement et intégration verticale	Intensité capitaliste et fort taux d’investissement (SESSI, 2007 ; PIPAME, 2016) Intégration verticale de l’activité de production au sein de groupes réalisant également extraction, production et distribution (SESSI, 2007)
	Concurrence internationale des coûts des matières et de la main d’œuvre et moins-disant (dumping) environnemental	Concurrence internationale des coûts des matières et de la main d’œuvre (SESSI, 2007 ; PIPAME, 2016) Moins-disant (dumping) environnemental : concurrence de pays ayant des réglementations environnementales moins strictes que la France (Batirama, 2012 ; James, 2010 ; Les Echos, 2019 ; PIPAME, 2016)
UTILISATION	Compétitivité de produits importés et coût de transport supportable	Compétitivité de produits importés et coût de transport supportable (INSEE, 2009 ; Royon, 1985 ; Simonetti, 1977)
	Difficulté d’accès au marché liée au système de distribution	Difficulté d’accès au marché liés aux relations entre producteurs, grossistes et grande distribution (Royon, 1985)
	Organisation des projets et chantiers défavorable	Manque d’anticipation lors du montage des projets (Bellastock, 2018 ; RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016) Manque de prescriptions, de critères de sélection des entreprises ou d’évaluation (Bellastock, 2018 ; RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016) Manque de suivi, contrôle sur le chantier (RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016)
	Cadre réglementaire et assurantiel sur les matériaux exigeant	Obligation de marquage CE des matériaux et produits (Ghyoot, 2014) Cadre assurantiel exigeant (Conteville et den Hartigh, 2009 ; den Hartigh, 2010) Autres contraintes réglementaires (RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016)
	Interprétation excessive du cadre réglementaire et assurantiel	Défiance des acteurs vis-à-vis des produits non issus d’une production industrialisée (Conteville et den Hartigh, 2009 ; den Hartigh, 2010)
	Obligation de mise en concurrence pour les marchés publics	den Hartigh (2010)

ÉTAPE DE LA CHAÎNE DE CIRCULATION DES MATIÈRES	ENSEMBLE DE FACTEURS	FACTEURS (SOURCES)
GESTION DES DÉCHETS (FACTEURS SPÉCIFIQUES AUX RESSOURCES SECONDAIRES)	Compétitivité de l'enfouissement	Faible coût de l'enfouissement en France (BIO by Deloitte, 2015 ; RDC Environment, AJ-Europe, 2014 ; Vernus, de Cazenove, 2011) Facilités offertes par l'enfouissement (maillage des installations, installations ne respectant pas les réglementations) (BIO by Deloitte, 2015)
	Maillage insuffisant des sites dédiés au stockage, tri, valorisation	Maillage insuffisant selon les entreprises de démolition (Vernus et de Cazenove, 2011) Difficulté d'ouvrir des plateformes de stockage, tri, valorisation (coûts, craintes de nuisances, conflits d'usage du sol) (Bellastock, 2018 ; RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016)
	Manque d'infrastructures industrielles régionales de production	Manque actuel d'infrastructures (suite à délocalisations) (Vernus et de Cazenove, 2011) Développement contraint de ces infrastructures (concurrence internationale des coûts des matières et de la main d'œuvre, difficultés d'approvisionnement en matériaux ou déchets liées à quantités ou qualités, manque de visibilité sur le modèle économique de filières émergentes, manque d'encouragement à l'investissement) (Bellastock, 2018 ; BIO by Deloitte, 2015 ; RDC Environment, AJ-Europe, 2014 ; RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016)
	Compétitivité des matériaux primaires	Faible compétitivité des matériaux issu du réemploi (RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult, 2016) Faible compétitivité des matériaux issus du recyclage (BIO by Deloitte, 2015 ; RDC Environment, AJ-Europe, 2014 ; Vernus et de Cazenove, 2011)

Source : voir dans le texte

Cette analyse appelle un prolongement qui sort du cadre de ce rapport. Cependant, elle montre que les freins à une proximité spatiale sont de différents types et notamment spatiaux, techniques, socio-économiques, réglementaires et assurantiels, organisationnels. Agir sur des facteurs techniques ou organisationnels uniquement est par conséquent insuffisant.

Par ailleurs, elle montre que les facteurs se situent à toutes les étapes de la chaîne de circulation des matières. De plus, ces facteurs relèvent d'échelles d'action très variables, depuis le chantier jusqu'à l'international. Aussi, une action au sein d'un projet de construction ou d'aménagement ne pourra lever seule l'ensemble des contraintes rencontrées lors de la recherche d'une proximité spatiale aujourd'hui en France.

Pour généraliser un tel approvisionnement, une action articulant différentes échelles d'action est nécessaire. Des travaux précédents (Augiseau 2019) ont montré que les acteurs territoriaux, collectivités et services déconcentrés de l'État, ne sont pas dépourvus de moyens d'action pour favoriser l'utilisation des ressources secondaires locales. Les DREAL, Régions et intercommunalités ont les moyens pour déployer une action concertée avec les acteurs privés de la construction qui peut permettre de définir un cadre favorable au développement d'activités économiques liées à l'utilisation de ressources secondaires dans la construction et de mettre à disposition des acteurs de la construction l'information utile à une telle utilisation.

Le développement de méthodes et outils d'évaluation, comprenant notamment des indicateurs, peut contribuer à favoriser un approvisionnement en matériaux issus de ressources locales, en produisant et partageant une information sur ces ressources. Selon Perron et Janin (2014), pour un acteur souhaitant favoriser l'utilisation de ressources territoriales, « la question est alors de savoir comment reconnaître ces ressources, puis initier, développer, coordonner des modes de valorisations nouveaux associant une diversité d'acteurs. Cette mise en œuvre nécessite une approche renouvelée des méthodes de diagnostic, de participation des acteurs, et d'accompagnement des actions collectives » (p. 10).



1.2. Rechercher un approvisionnement local en matériaux : analyse de démarches, méthodes et outils

Afin de mieux comprendre les motivations, les méthodes et outils d'évaluation mis en œuvre, ainsi que les difficultés rencontrées lors de démarches portées par des acteurs de la construction souhaitant favoriser un approvisionnement local en matériaux, une enquête auprès de trois collectivités et aménageurs a été réalisée. Elle s'est étalée durant une année entre septembre 2019 et septembre 2020 et a mobilisé des entretiens semi-directifs et des questionnaires écrits. Les acteurs enquêtés ont été identifiés dès le lancement du projet notamment car ils avaient manifesté leur intérêt pour les travaux qui seraient réalisés au sein de ce projet de recherche. Bien que l'échantillon soit très limité, les trois démarches apportent un éclairage sur différentes ressources, approches et échelles pour leur évaluation. Chacune des démarches est introduite dans un premier temps puis les résultats de l'enquête sont croisés.

1.2.1. PRÉSENTATION DES TROIS DÉMARCHES ÉTUDIÉES

a. Diagnostic ressources pour le projet d'aménagement du site Hébert à Paris - MOA Espaces Ferroviaires

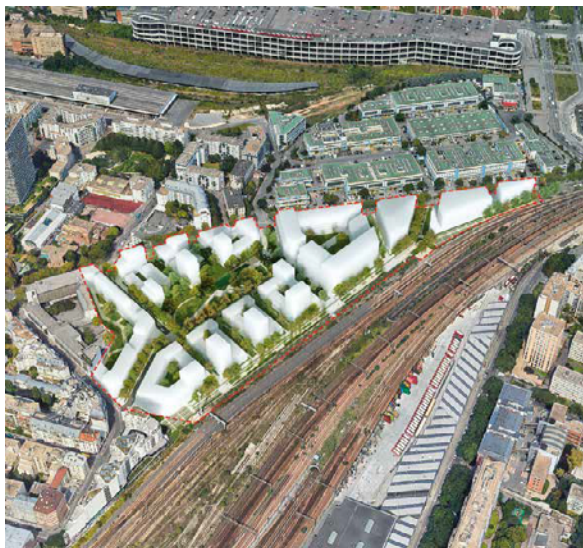


Figure 2. Vue du projet Hébert. Source : Espaces Ferroviaires (2020)

Le projet Hébert situé au nord du quartier La Chapelle à Paris est porté par l'aménageur Espaces Ferroviaires. Il s'agit d'une ancienne installation ferroviaire de 5,2 hectares propriété du Groupe SNCF.

Le projet d'aménagement comprend 49 000 m² de logements, 39 500 m² de bureaux, une crèche de 800 m², environ 10 000 m² de locaux dédiés aux commerces, activités et à la logistique, un équipement à vocation d'enseignement d'environ 4 000 m² ainsi que des espaces verts dont un square d'environ 4 000 m². La photo ci-après issue du rapport réalisé par Neo-Eco présente le périmètre des bâtiments démolis.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
 DES BÂTIMENTS

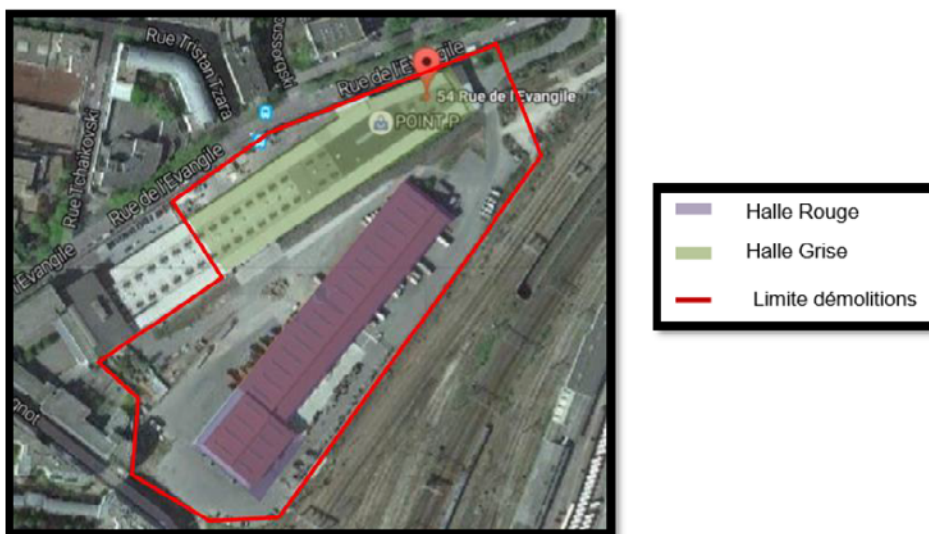


Figure 3. Périmètre des démolitions sur le site Hébert. Source : Neo-Eco (2019)

Le projet comprend la déconstruction de halles logistiques ainsi que des excavations de terres. Espaces Ferroviaires a mandaté un groupement d'AMO composé des bureaux d'études Up-Cyclea et Neo-Eco pour l'accompagner dans sa démarche d'économie circulaire. Dans ce cadre, Neo-Eco a réalisé un inventaire des ressources préalable à l'opération de déconstruction et estimé les déchets potentiels qui seront générés par grands types de déchets (terres, bétons, métaux, bois...) et par types de valorisation envisageables. Le bureau d'études s'est appuyé sur une enquête de terrain et une analyse des plans des bâtiments.

La figure suivante présente la répartition des ressources potentielles identifiées sur le site en tonnes.

Elle montre que les ressources minérales sont majoritaires dans ce diagnostic. Ces ressources secondaires inertes (terres excavées, béton et pierre) peuvent constituer une ressource locale dans un milieu urbain comme le territoire francilien où les flux de déchets de chantiers hors matériaux excavés sont comparables aux flux de minéraux et bois d'œuvre extraits de milieu naturel régional. Le territoire francilien est importateur net de ressources minérales (granulats) et l'utilisation de ressources secondaires peut permettre de réduire la tension exercée sur les ressources primaires régionales. Espaces Ferroviaires souhaite s'appuyer sur ce diagnostic pour valoriser une partie des déchets, notamment les terres excavées et une partie des débris de béton. L'aménageur souhaite par la suite mettre en œuvre une démarche d'évaluation continue tout au long du projet.

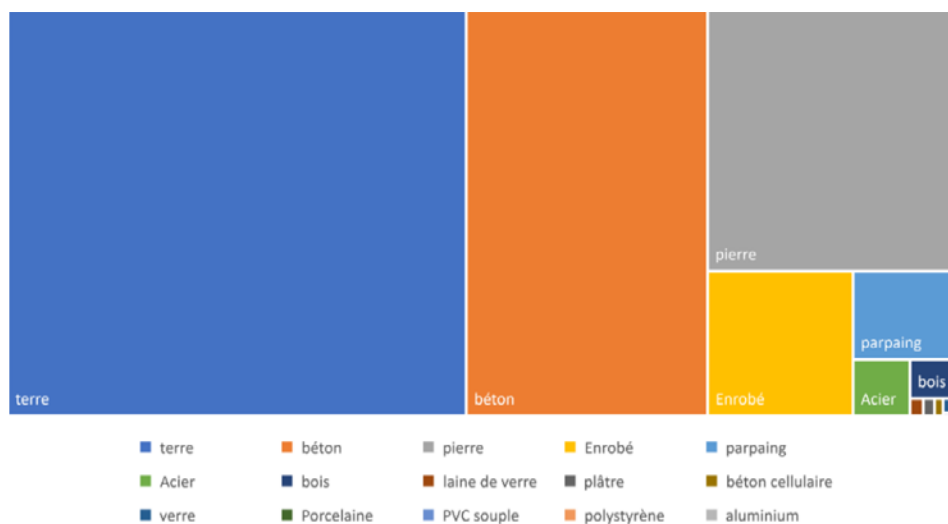


Figure 4. Ressources potentielles identifiées par Neo-Eco, tonnes. Source : Neo-Eco (2019)



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

b. Etude pour l'identification des gisements de matériaux et de filières de valorisation des déchets du BTP sur Est Ensemble

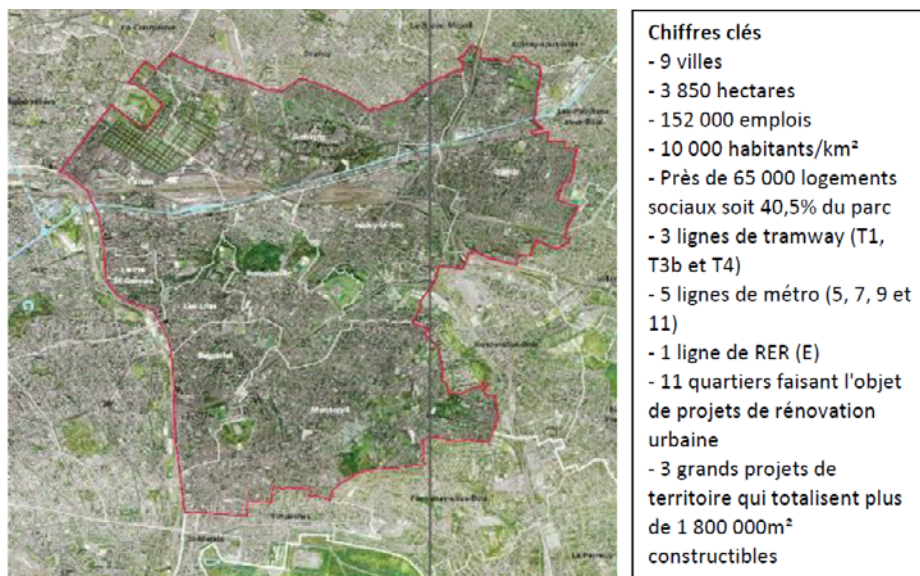


Figure 5. Présentation synthétique d'Est Ensemble. Source : Est Ensemble (2018)

Est Ensemble est un établissement public territorial de la Métropole du Grand Paris. Le territoire fait l'objet de fortes mutations et une grande part du parc bâti sera renouvelée d'ici 2030. Sont définis des objectifs de construction de 2 800 logements par an, de nombreuses opérations d'aménagement et opérations de traitement de l'habitat dégradé ou indigne, des infrastructures de transport, et plus particulièrement le renouvellement urbain des quartiers en politique de la ville qui générera entre autres la démolition de 2 000 à 3 000 logements dans les années à venir. Ces chantiers vont générer de fortes consommations de matériaux, ainsi qu'une production importante de déchets de chantiers.

Souhaitant « être un territoire résilient moins dépendant des ressources extérieures et moins générateur de nuisances et de déchets » (Est Ensemble, 2018), la collectivité a adopté en 2017 un référentiel aménagement durable qui préconise notamment une augmentation du réemploi et l'utilisation de « matériaux à impact moindre, sains et à teneur en carbone faible voire négative » (Est Ensemble, 2017). La collectivité souhaite décliner ce référentiel sur l'ensemble des projets de renouvellement urbain et a amorcé en 2017 l'élaboration d'une politique dédiée à l'économie circulaire. Cette dernière comprend un axe sur le développement économique qui vise à « développer une filière économique de réemploi, pourvoyeuse de nouvelles créations d'entreprises spécialisées ou de changement d'échelle d'entreprises existantes » (ibid.). Dans le cadre de l'Appel à manifestation d'intérêt de l'ANRU +, Est ensemble a proposé un projet de construction d'une filière d'économie circulaire ciblée sur le réemploi des matériaux, en lien avec les autres projets d'aménagement du territoire. Les quartiers en renouvellement urbain de Gagarine (Romainville) et Quatre Chemins (Pantin) ont été proposés pour jouer le rôle de sites expérimentaux pour la mise en œuvre de ce projet.

Pour atteindre cet objectif, une étude a été lancée en 2018 afin de quantifier et qualifier les gisements de matériaux (offre disponible et demande potentielle), de cibler le foncier temporaire disponible, et de recenser les installations de collecte et traitement des déchets du BTP existantes sur le territoire et à proximité, en rendant ces éléments visibles à l'échelle territoriale. Cette étude comprenait 3 volets : 1 : identification des gisements de matériaux et foncier temporaire sur les NPNRU ; 2 : identification des gisements de matériaux et foncier temporaire sur le territoire et production d'outils de suivi cartographiques ; 3 : identification des acteurs économiques sur les filières de valorisation des déchets du BTP sur le territoire.

Le périmètre des lots 1 et 2 comprenait 12 NPNRU dont 7 quartiers (ou projets) d'intérêt national et 5 quartiers (ou projets) d'intérêt régional, ainsi que 6 ZAC et 2 autres opérations d'aménagement privées. Les flux étudiés étaient les déchets de chantiers issus de la démolition et de la réhabilitation des bâtiments et les besoins en matériaux de construction pour les chantiers de reconstruction et de réhabilitation et excluaient les terres excavées. CitéSource et Neo-Eco ont réalisé les lots 1 et 2 et Recovering et Le Phares le lot 3.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Les résultats de l'étude qui s'est achevée fin 2019 ont montré qu'environ 1 Mt (+10 à 20%) de déchets seront générés d'ici 2025 dont 52 % issus des NPNRU et 48 % issus des ZAC. Les flux moyens annuels sont estimés à 150 000 t/an (+10 à 20%) de déchets sortants et 500 000 t/an (+10 à 20%) de matériaux entrants.

Si un équilibre relatif (rapport de 1,5) est observé entre les déchets de chantiers générés et les matériaux nécessaires pour la construction sur les PRU, pour les ZAC et autres projets les besoins en matériaux de construction sont 5 fois plus importants que les déchets générés. Le béton est le matériau le plus présent dans les déchets de chantiers, représentant 86 % des flux totaux. Au regard de leurs capacités d'absorption déclarées à la Préfecture, les installations de collecte et de tri de déchets de chantiers présentes sur le territoire et dans un périmètre de 15 km pourraient a priori absorber ces flux, si l'on ne tient pas compte des autres projets et flux sortant du périmètre de l'étude.

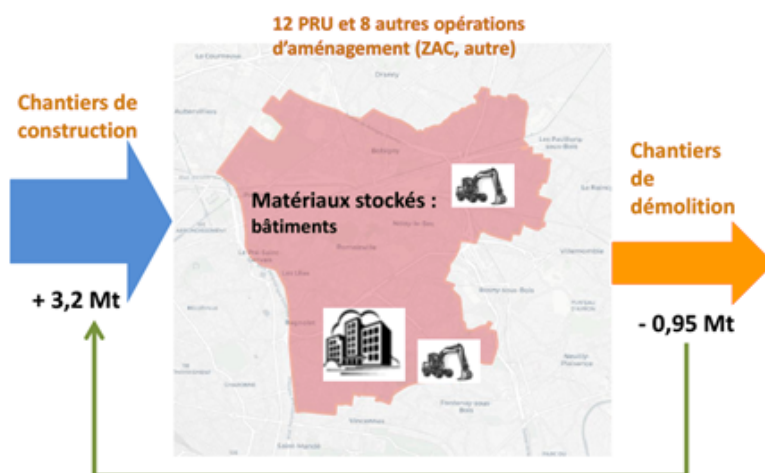


Figure 6. Gisements déchets et besoins en matériaux : flux totaux entre 2020 et 2025. Source : CitéSource et Neo-Eco (2019)

Ces résultats ont été partagés avec les porteurs d'opérations sur le territoire et au sein des services de la collectivité, notamment au travers de cartographies en ligne, et ont contribué à une prise de conscience des enjeux soulevés par les flux. Quatre projets visant à expérimenter l'utilisation de ressources secondaires locales sont en cours, notamment le projet du PRU Gagarine (sur la commune de Romainville) où est visée notamment une valorisation de débris de béton sur le patrimoine du bailleur social Seine-Saint-Denis Habitat pour le pavage d'espaces extérieurs dont Est Ensemble est maître d'ouvrage. Est Ensemble lance en 2020 une étude de faisabilité technico-économique pour la création de plateformes physiques sur son territoire pour la valorisation des déchets de chantiers.

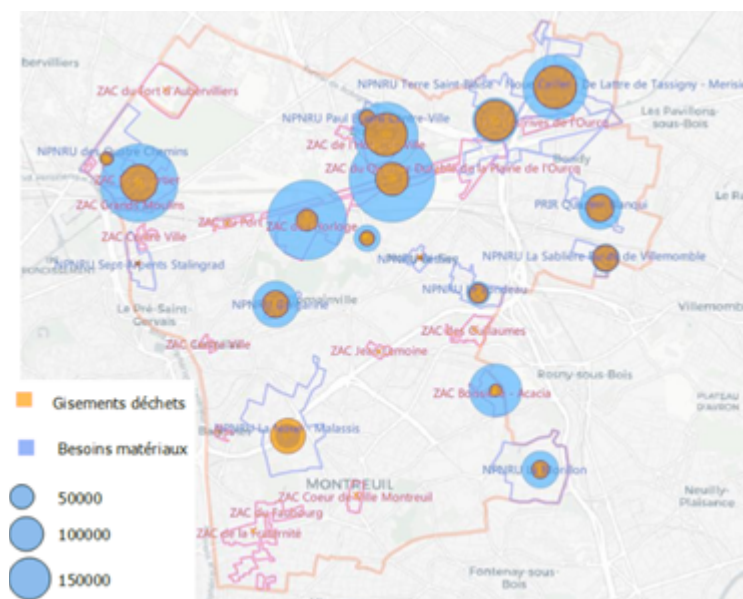


Figure 7. Flux de déchets de chantiers comparés aux besoins en matériaux par opération à Est Ensemble entre 2019 et 2025. Source : CitéSource et Neo-Eco (2019)



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

c. Sourçage pour le projet d'aménagement de Pirmil - Les Isles - MOA Nantes Métropole Aménagement

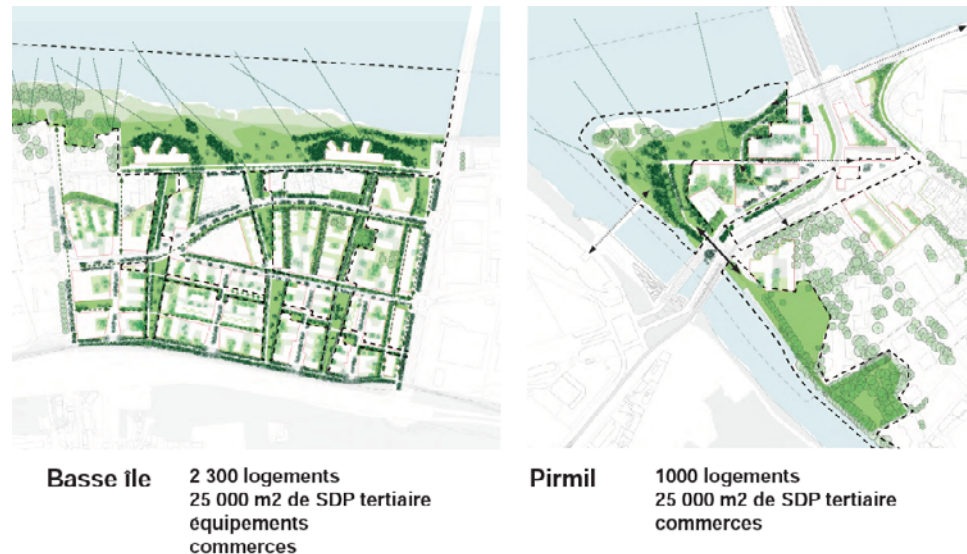


Figure 8. Projet d'aménagement de Pirmil - Les Isles. Source : Obras et al. (2019)

Pirmil-Les Isles est un projet urbain porté par Nantes Métropole Aménagement (NMA) qui vise à contribuer à redessiner la métropole nantaise autour de la Loire à l'horizon 2030. A cheval sur les communes de Nantes, Rezé et Bouguenais, le projet se dessine autour de deux secteurs : Pirmil Saint-Jacques à l'est, et Basse Île à l'ouest. D'ici 15 ans, un nouveau quartier sera réalisé et comprendra des logements diversifiés (environ 3 300), des programmes d'activités et des équipements publics (environ 100 000 m²), associés à de nouvelles lignes de tramway, la création d'un parc fluvial et la plantation d'une canopée. L'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine pilotée par Frédéric Bonnet (OBRAS) et comprenant notamment le bureau d'études ZEFACO a défini un projet des intentions, associé à un projet de transition. L'objectif majeur du projet Pirmil – Les Isles pour NMA est de « construire une ville responsable en matière de transition écologique » et vise en particulier à développer une stratégie transversale de sobriété carbone (NMA, 2020).

L'aménageur se donne notamment comme objectif de faire progresser les filières du territoire en vue de massifier le recours aux matériaux bas carbone tant dans les phases ultérieures du projet que sur d'autres projets sur le territoire. Les ressources primaires biosourcées locales, dont paille, chanvre et bois, sont particulièrement ciblées par l'opération. L'aménageur prévoit de réaliser une étude d'opportunités pour un approvisionnement en matériaux originaires d'autres opérations sous maîtrise d'ouvrage de NMA (opérations de démolition, terres excavées sur d'autres opérations) pour la réalisation d'édicules sur espaces publics (cabane de projet, locaux vélos, etc.).

Pour atteindre cet objectif, une méthodologie dite de « sourçage amont » auprès d'acteurs clés des chaînes de valeur de l'aménagement et de l'immobilier est mise en œuvre. Cette méthodologie consiste en la mise en place d'un groupe local, d'une démarche de sourçage individuel auprès d'une centaine d'acteurs de l'aménagement et de l'immobilier, ainsi que d'une démarche de sourçage collectif organisée en partenariat avec Novabuild via 2 réunions plénières (environ 400 participants) et 4 ateliers thématiques (60 à 80 participants chacun) croisant tous les métiers. Il s'agit de développer des processus coordonnés où les parties prenantes identifient et partagent de nouveaux processus opérationnels qui réduisent la consommation de ressources et les déchets, tout en protégeant les ressources naturelles.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Figure 9. Photographie prise lors du premier atelier collectif de sourçage. Source : ZEFCO (2020)

Il s'agit également de définir des objectifs de résultats coordonnés, les parties prenantes travaillant ensemble pour définir les résultats souhaités, créer des indicateurs standardisés pour mesurer les impacts environnementaux et comparer les performances. Le projet vise par ailleurs la construction de nouveaux indicateurs et modalités de calculs, qualitatifs et quantitatifs, permettant de fédérer les acteurs autour d'objectifs communs. La réflexion sur la mise au point de FDES locales pour le projet fait partie de cet enjeu de méthode.

La démarche est en cours. A partir du premier semestre 2020, les filières font l'objet d'un sourçage et d'un travail spécifique portant sur le détail des futures consultations. A partir du second semestre 2020, la question d'une évolution de l'organisation de ce réseau d'action collective est envisagée. NMA et ses équipes et partenaires considèrent qu'ils ont obtenus au travers du sourçage suffisamment d'éléments pour a minima prédimensionner les premières consultations dans leurs principaux paramètres, objectifs et résultats mais qu'un travail de formalisation et de test reste à faire fin 2020-début 2021.

Le sourçage a néanmoins permis de faire remonter ce que chaque filière est en mesure de réaliser chaque année, ce qui permettra de calibrer les consultations au regard des moyens disponibles de chaque filière et d'éviter de les mettre en trop grande tension tout en contribuant à pérenniser les éventuels investissements que ces filières pourraient réaliser. Le sourçage a également permis de faire remonter les enjeux à considérer par les équipes de conception, les freins et levier pour favoriser le recours aux matériaux bas carbone. La mise à disposition de ces informations pour les équipes de conception et les opérateurs immobiliers devrait permettre d'améliorer l'efficacité économique des projets.



Figure 10. Photographie prise lors du premier atelier collectif de sourçage. Source : ZEFCO (2020)



1.2.2. ANALYSE CROISÉE DES TROIS DÉMARCHES

a. Une recherche partielle de proximité spatiale des ressources et des objectifs croisant préoccupations environnementales et socio-économiques

Les cadres pour l'étude des ressources locales définis par les aménageurs et la collectivité enquêtés résultent des objectifs que se sont donnés ces acteurs en termes d'approvisionnement local en matériaux de leurs projets. Aussi, avant d'analyser les évaluations nous observerons quelques points concernant les objectifs. On peut tout d'abord observer que si des objectifs sont définis dans les démarches étudiées en termes de choix ou de gestion des matériaux primaires et secondaires, ces objectifs ne sont pas explicitement formulés en termes d'approvisionnement local en matériaux des projets concernés. En effet, dans le projet Hébert, l'aménageur souhaite valoriser une partie des déchets générés et si possible sur le site, mais il n'a pas été défini d'objectifs concernant la provenance de l'ensemble des matériaux qui seront mis en œuvre. De plus, il n'y a pas d'objectif précis à ce jour concernant la part de substitution de matériaux issus de ressources primaires par des matériaux issus de ressources secondaires. C'est également le cas de l'étude pilotée par Est Ensemble dont le périmètre exclut les ressources primaires locales (par exemple le bois d'œuvre régional). La même observation peut être faite sur le projet de Pirmil - les Isles où le principal critère d'évaluation défini n'est pas un approvisionnement local mais la réduction des émissions de GES.

Deuxièmement, on peut noter que la proximité spatiale recherchée dans l'approvisionnement de certains matériaux n'est pas toujours définie en termes de distances et que lorsque c'est le cas, celles-ci varient. Dans le cas de Hébert, une valorisation sur le chantier même est recherchée. Cette dernière permet notamment d'échapper au statut de déchets lors de réemplois et de minimiser les flux sortants. Cependant aucun autre périmètre n'est défini à ce jour pour les autres modes de gestion des déchets ou le choix des matériaux primaires. Est Ensemble vise une valorisation des déchets au sein des chantiers où au sein du territoire via des échanges de flux ou synergies inter-chantiers. Concernant les opérations de transformation des déchets hors des chantiers avant leur utilisation (réemploi, réutilisation ou recyclage), des espaces vacants pouvant accueillir des installations temporaires sont recherchés au sein du territoire. Cependant, pour le traitement au sein d'installations du type plateformes de tri, un périmètre plus large est défini. Ce dernier comprend en effet l'espace situé à moins de 15 km autour du territoire. Si ce périmètre correspond à une distance et temps de transports généralement considérés comme acceptés par les entreprises de construction, le choix de cette distance n'a pas fait l'objet d'une évaluation préalable spécifique au territoire. Pour Pirmil - les Isles, aucun périmètre spatial stricte n'a été défini en amont de la démarche de sourçage mais la question est posée au cas par cas et au fur-et-à-mesure de l'avancement des études.

Par ailleurs, on peut observer que les objectifs de valorisation des déchets et en particulier leur réemploi sur les chantiers pour Hébert ou au sein du territoire pour Est Ensemble, de même que d'utilisation de matériaux biosourcés locaux pour Pirmil - les Isles, n'ont pas été définis à la suite d'une évaluation environnementale. En effet, lorsqu'une étude a été confiée à Neo-Eco pour Hébert ou lorsqu'une étude a été lancée par Est Ensemble, aucun élément d'évaluation ne permettait de valider qu'une valorisation des déchets de chantiers par réemploi engendrerait une réduction des impacts environnementaux pour ce chantier ou pour ce territoire. Les acteurs ont fait l'hypothèse que ce choix concourrait à réduire les impacts environnementaux. De même, la préférence accordée aux ressources primaires locales pour Pirmil - les Isles n'a pas été validée par une évaluation environnementale préalable et les acteurs font l'hypothèse que le choix de ces ressources permettra de réduire les émissions de GES. Notons que ces hypothèses sont pertinentes au regard d'évaluations réalisées pour d'autres projets et territoires et que des évaluations environnementales pourront être menées dans les prochaines phases des démarches.

Enfin, on observe que les collectivités et porteurs de projets d'aménagement se donnent des objectifs de développement économique local qui dépassent le périmètre strict des chantiers dont ils ont la maîtrise d'ouvrage. Ce constat est certes plus commun pour une collectivité dans le cas d'Est Ensemble. Cependant, lier de façon aussi poussée la gestion des flux de matériaux résultant de l'aménagement du territoire et une politique de développement économique locale n'est, il nous semble, pas si fréquent.



Un autre exemple peut être observé au sein de la collectivité voisine de Plaine Commune qui a porté le projet de recherche Métabolisme urbain. Dans le cas d'Est Ensemble il est également intéressant d'observer qu'une attention particulière a été accordée dans l'étude réalisée aux structures se situant dans l'économie sociale et solidaire. Pour Pirmil - les Isles, il est intéressant d'observer que l'aménageur cherche à lier ses choix d'aménagement au développement pérenne des filières de production de matériaux.

b. Cadre des évaluations

Périmètre en termes d'étapes de la chaîne de circulation des matières. En termes d'éléments étudiés, il est intéressant d'observer que les études d'Est Ensemble et Pirmil - les Isles portent sur plusieurs étapes de la chaîne de circulation des matières. En effet, la ressource est étudiée du point de vue de sa disponibilité dans les stocks primaires et secondaires, mais également du point de vue des capacités de transformation ou production de matériaux. Si l'on se réfère aux définitions présentées dans la première partie, on peut donc noter que ces évaluations se placent dans une approche constructiviste de la notion de ressource. De plus, les acteurs considèrent la ressource de façon dynamique et anticipent une évolution des capacités de production. Ils cherchent même à agir sur ces dernières, notamment via l'aide au développement de ces capacités par la mise à disposition de foncier vacant dans le cas d'Est Ensemble. La collectivité considère que matériaux, foncier et installations ne peuvent pas « être étudiées indépendamment s'agissant de structurer l'ensemble de la chaîne au niveau local » (Est Ensemble, 2018).

Périmètre en termes de ressources. En termes de ressources visées, ainsi que l'a montré le point précédent, les objectifs ne couvrent pas l'ensemble des ressources et le périmètre des évaluations est par conséquent également restreint. Il s'agit des ressources secondaires extraites sur le chantier pour Hébert. Pour Est Ensemble sont étudiées les ressources extraites sur une sélection des plus importantes opérations groupées ainsi que la consommation en matériaux de ces opérations. Pour des raisons liées aux moyens accordés à l'étude et par manque de données sur certaines opérations, ont été exclus du périmètre d'étude les terres excavées, les gisements de déchets pouvant être générés par la démolition et la rénovation des réseaux (routiers, ferroviaires, d'eau et d'assainissement et d'énergie) et les gisements de déchets pouvant être générés par la démolition et la rénovation des espaces extérieurs (espaces minéraux à l'intérieur des îlots et des résidences, par exemple). Pour Pirmil - les Isles, si les équipes de conception s'intéressent à l'ensemble des matériaux qui seront mis en œuvre, l'étude de sourçage a plus particulièrement étudié les ressources primaires et en particulier biosourcées.

Périmètre spatial. Par ailleurs, ainsi que l'a montré le point précédent, les objectifs de proximité spatiale sont définis à différentes échelles géographiques. Aussi les études portent prioritairement sur les flux générés sur les chantiers, puis considèrent les capacités de production ou transformation de ressources primaires ou secondaires à des distances variables. On peut observer qu'aucune évaluation ne prend en compte les flux générés par des opérations menées soit par d'autres MOA pour Hébert et Pirmil - les Isles, soit situées hors du territoire dans le cas d'Est Ensemble. Cette limite engendre une recommandation de précaution quant aux conclusions qui pourraient être tirées des évaluations. Pour Est Ensemble, si les auteurs de l'étude montrent que les installations enquêtées peuvent absorber les flux de déchets estimés, ils précisent qu'il serait nécessaire de valider cette observation par une estimation des flux générés hors des opérations étudiées au sein du territoire et hors de ce dernier et qui pourraient être accueillis par ces installations. Une telle précaution pourrait être à adopter pour Pirmil - Les Isles concernant la possibilité des producteurs de répondre à la demande en matériaux, car celle-ci dépend également des autres projets de construction et aménagement.

Périmètre temporel. Les périmètres temporels se situent à court et moyen termes. Il s'agit d'estimer les flux qui seront générés lors des démolitions pour Hébert. Pour Est Ensemble, une projection des flux a été réalisée sur un horizon relativement court de six ans (2019 à 2025). Un horizon identique est défini pour la démarche de sourçage de Pirmil - les Isles où il a été demandé aux producteurs de matériaux d'estimer d'ici six ans (2020 à 2026) leur capacité de production. On peut noter que les plans régionaux de prévention et gestion des déchets (PRPGD) qui incluent les déchets de chantiers ont également un horizon de six ans et comprennent une projection allant jusqu'à douze ans.

Temporalité de l'évaluation. Les évaluations réalisées pour Hébert et Pirmil - les Isles se situent en phase programmation des opérations. Il s'agit de diagnostics ou évaluations ex-ante. Les résultats des évaluations



devraient permettre d'améliorer la conception des projets en tenant compte des enjeux identifiés. Dans le cas d'Est Ensemble, l'étude des flux générés par les opérations se situe soit en phase de programmation soit en phase de conception de ces opérations. Dans le second cas, il peut être très difficile pour les MOA de revenir sur les choix déjà effectués. Par ailleurs, on peut observer que pour Hébert et Pirmil - les Isles, de même que pour le projet NPNRU Gargarine à Est Ensemble, des choix impactants en termes de flux générés ont été faits avant le lancement des études puisqu'il est prévu pour chacune de ces opérations de détruire une grande partie du bâti présent. L'évaluation ne peut donc permettre de déployer une stratégie d'économie circulaire complète de type 3R (réduction, réemploi et recyclage) en recherchant une réduction de tous les flux via la programmation urbaine. Enfin, on peut observer que les acteurs cherchent à prolonger les démarches d'évaluation afin de s'assurer que les objectifs seront tenus au-dur-et-à-mesure de l'avancement des projets.

Acteurs impliqués. Il est intéressant d'observer que chacune des évaluations a fait appel à des compétences spécifiques trouvées au sein de bureaux d'études spécialisés. Il s'agit pour la majorité de ces derniers de structures dont le cœur de métier est la gestion des déchets de chantiers et la production de matériaux recyclés. On peut par ailleurs observer que la réalisation des études et la diffusion des résultats impliquent un large périmètre d'acteurs : porteurs d'opérations et leurs équipes de MOE, mais aussi producteurs de matériaux ou gestionnaires de déchets. Pour Pirmil - les Isles, un « groupe local » d'acteurs clés a été créé et implique des expertises et réseaux professionnels tels que Novabuild (cluster écoconstruction), Atlanbois, Construire en chanvre, Collectif paille armoricain, CSTB. Pour cette opération comme pour Est Ensemble, ce périmètre large d'acteurs est mobilisé via l'organisation d'ateliers spécifiques animés par des prestataires et planifiée dès le lancement des études. On peut donc observer, qu'ainsi que dans le cas de projets d'éco-quartiers, les MOA associent dès les phases de programmation ou conception des projets des acteurs qui interviennent plutôt généralement en phases chantiers ou gestion du quartier (dans le cas d'opérateurs de gestion de l'énergie ou des eaux ou d'entretien des espaces extérieurs).

c. Méthodes

Trois principales méthodes ont été mobilisées par les évaluations : la comptabilité ou analyse des flux et stocks de matières (comptabilité massique), l'évaluation environnementale en cycle de vie (ACV), ainsi que l'enquête auprès des producteurs de matériaux.

Comptabilité des flux et stocks de matières

L'étude des stocks de matériaux secondaires s'appuie sur une comptabilité massique des matières les composant. Cette dernière implique généralement la constitution d'une typologie des ouvrages bâtis (approche ascendante d'analyse des stocks). Sur la base de modélisations ou d'études de terrain, une composition en matériaux est attribuée à chaque type. Puis, des données géolocalisées sur les ouvrages bâtis sont utilisées pour attribuer un type à chaque ouvrage. Ces données sont aussi utilisées pour connaître les dimensions des ouvrages (volumes, surfaces ou linéaires). Ces dernières sont ensuite converties en masse, par l'intermédiaire de densités (volumiques, surfaciques ou linéiques) propres à chaque type d'ouvrage. La figure 11 présente schématiquement cette approche.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

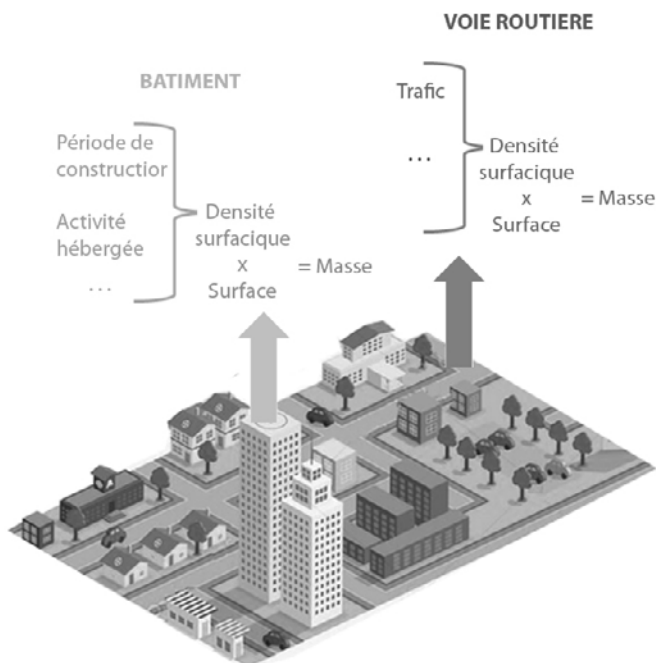


Figure 11. Approche ascendante d'estimation des stocks de ressources secondaires. Source : Augiseau (2017)

À cette étude statique des stocks, s'ajoute l'analyse des flux. Deux grandes approches pour l'étude des flux sont distinguées. L'approche dite descendante considère les entrées et sorties de matières d'un système socio-économique. Elle s'appuie sur des statistiques sur le transport de marchandises, l'extraction de minéraux et la récolte de bois et les déchets. Elle peut être croisée avec une approche dite ascendante qui consiste à étudier un système de l'intérieur, en analysant les flux que ce système mobilise processus par processus. Cette approche est la plus utilisée pour projeter les flux. L'analyse ascendante des flux peut s'appuyer sur une modélisation de l'activité de construction d'un territoire à partir de sources de données statistiques. Elle peut par ailleurs s'appuyer sur des données sur les opérations de construction et d'aménagement en cours et projetées : leurs surfaces ou linéaires, les structures porteuses et matériaux mis en œuvre, les plannings des opérations. Une présentation détaillée de ces méthodes figure dans Augiseau et Barles (2017).

Dans le cas de Hébert, la comptabilité des stocks de matériaux situés dans les bâtiments à démolir a été réalisée à partir d'un traitement de données sur les plans et compositions en matériaux des bâtiments ainsi qu'un diagnostic de visu sur site par Neo-Eco. Dans l'étude pour Est Ensemble, ce diagnostic à l'échelle de bâtiments a été croisé avec un traitement de données géolocalisées réalisé par CitéSource. La méthode utilisée pour estimer les flux à l'échelle des quartiers s'appuie sur les travaux de recherche menés sur le cas de l'Île-de-France dans Augiseau (2017). Les stocks de matériaux sur l'ensemble de la région situés dans les bâtiments, réseaux de transport (routier, ferré et pistes d'aérodromes) et réseaux d'énergie et d'eaux (électricité, gaz, chaleur et froid, eaux potable et non potable, assainissement) ont été estimés en s'appuyant sur une typologie et une modélisation d'ouvrages issues de travaux dirigés par le BRGM sur le cas d'Orléans. Deux principales sources de données géolocalisées ont été utilisées pour connaître les caractéristiques et dimensions des ouvrages : la BD Topo de l'IGN et les fichiers fonciers du Ministère des finances.

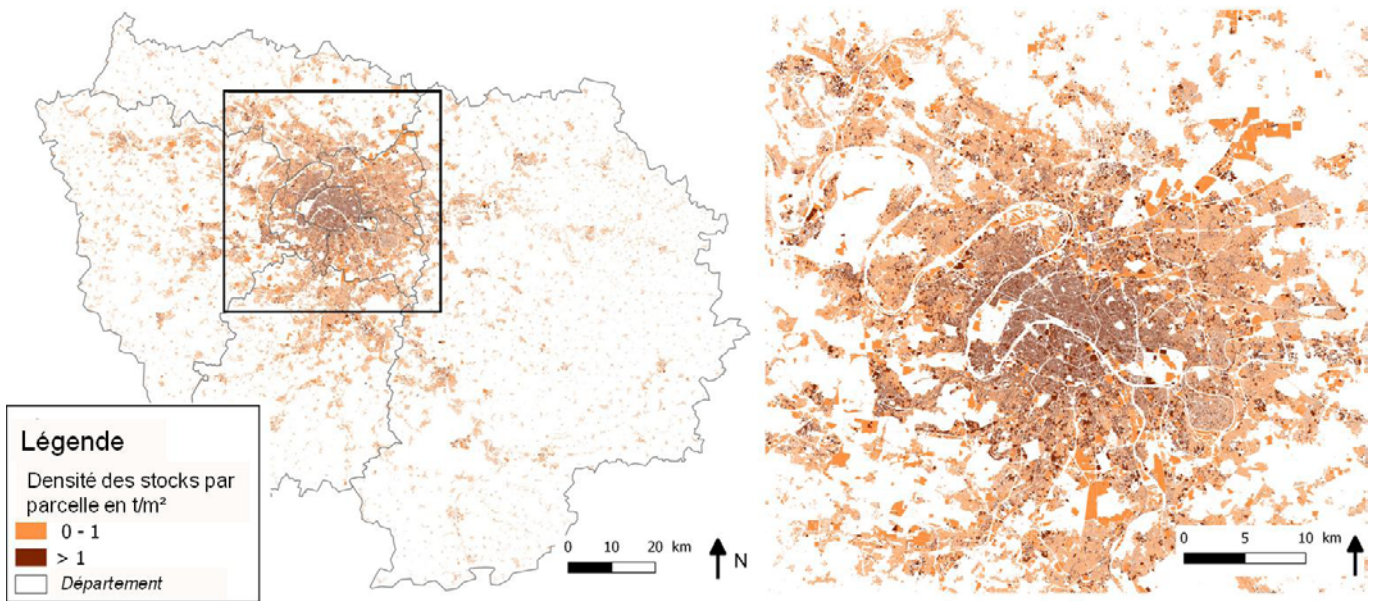


Figure 12. Densités des stocks par parcelle des matériaux situés dans les bâtiments hors sol, Île-de-France, 2013, t/m². Source : Augiseau (2017)

Les flux en 2013 ont été étudiés selon des approches descendante et ascendante. L'approche descendante s'appuie sur la méthode éditée par le CGDD/SDES (2014). La base SitraM sur le transport de marchandises est utilisée pour connaître les entrées et sorties de matériaux par département. L'extraction de minéraux dans les carrières et la récolte de bois d'œuvre sont connues respectivement par des statistiques produites par la DRIEE et l'UNICEM ainsi que par l'Agreste (Ministère de l'agriculture). Les flux de déchets sont renseignés par les estimations réalisées par le Conseil régional d'Île-de-France (2015) ainsi que par l'enquête auprès d'entreprises du bâtiment et des travaux publics menée par la Cellule économique régionale de la construction IdF (2013). Pour l'année 2013, une estimation selon une approche ascendante a permis de compléter l'analyse des flux en étudiant les types de chantiers qui génèrent ces derniers. Les flux ont également été projetés jusqu'en 2032 selon trois scénarios d'aménagement du territoire.

Une méthodologie pour l'analyse des flux et stocks de matériaux de construction et déchets à une échelle urbaine en France a précédemment été élaborée dans le cadre du projet ANR ASURET. Ce projet, achevé en 2013, a été coordonné par le BRGM en partenariat avec le CSTB, I3D, UTT et InsaValor. Il visait à définir les conditions d'amélioration du bilan des activités du BTP, en réduisant le recours aux ressources naturelles et en optimisant la valorisation de matériaux recyclés. Ceci suppose de reconsidérer globalement l'activité BTP dans une approche systémique, et d'explorer les voies qui permettraient de favoriser le développement de modèles de production et de consommation plus vertueux au travers de ce changement de paradigme (Rouvreau *et al.*, 2012).

Une des principales réalisations du projet a été l'évaluation des flux en matériaux et en déchets du BTP de la ville d'Orléans durant la période 2004-2006 et l'évaluation également du stock présent dans les bâtiments de la ville. Pour le stock, le travail s'est basé sur une identification des typologies constructives principales sur la ville, l'assignation de ces types aux différents quartiers et aux différents bâtiments de la ville (à l'aide d'outils SIG et de la base de données BD TOPO de l'IGN) et de l'estimation d'une composition en matériau par bâtiment type. La figure 13 montre un exemple sur un bâtiment collectif.

Les principaux gros travaux de la ville durant la période étudiée 2004-2006, en construction neuve, rénovation ou démolition, ont fait l'objet d'une analyse en détail et les partenaires du projet en collaboration avec les services techniques de la ville ont pu avoir accès à des données spécifiques de ces chantiers (CCTP notamment). Pour une série d'autres opérations plus petites un travail pour reconstituer les flux entrants et sortants a dû être fait.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
 DES BÂTIMENTS

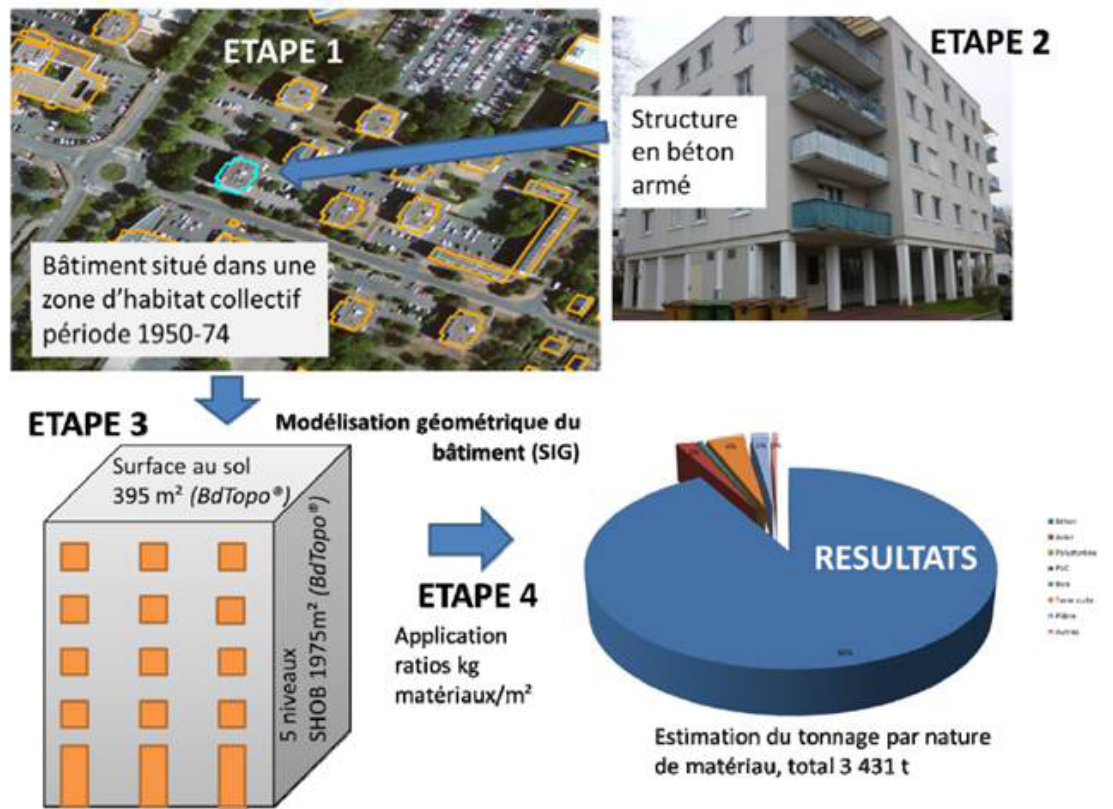


Figure 13. Exemple de la démarche du projet ASURET, évaluation de la composition en matériaux d'un bâtiment à partir d'une modélisation géométrique du bâtiment et d'une composition type. Source : Rouvreau et al. (2012)

La figure 14 montre les principaux résultats avec un incrément net des matériaux stockés de la ville, résultats cohérents avec d'autres études du même type faites en Europe (notamment Vienne).

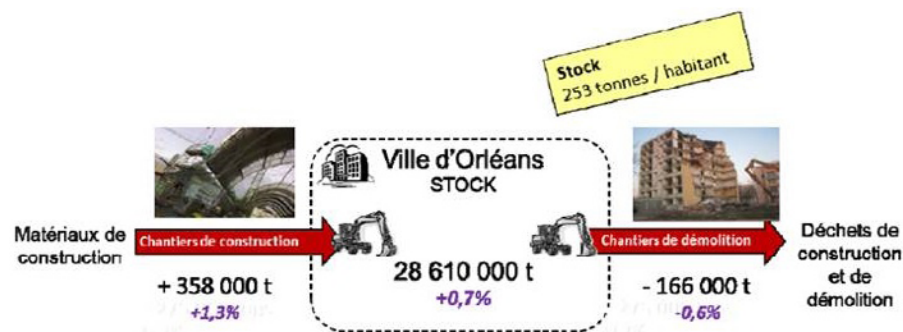


Figure 14. Résultats du projet ASURET sur la ville d'Orléans, flux entrants et sortants et stock cumulé. Source : Rouvreau et al. (2012)

Finalement le projet a comparé des scénarios d'évolution de la ville (objectifs de croissance selon le PLU, différents modes constructifs) et le besoin en granulat que cela représentait, et a adopté des hypothèses sur des taux d'incorporation des matériaux recyclés. Cet exercice prospectif a montré que, même si la ville était un stock de ressources secondaires potentiellement utilisable, l'exploitation des ressources primaires dans le département et les départements voisins devait se poursuivre.



Évaluation environnementale en cycle de vie

L'évaluation environnementale en cycle de vie ou ACV permet de compléter une comptabilité massique en étudiant un certain nombre d'impacts environnementaux. Une présentation détaillée de la méthodologie figure dans la partie de ce rapport traitant de l'allongement du cycle de la matière.

Deux principales limites sont observées dans la méthodologie standardisée d'ACV lorsque l'on souhaite étudier des ressources locales. La première est la difficulté à analyser l'impact d'un projet sur l'épuisement des ressources naturelles. En effet, si un indicateur existe, il est difficile à estimer et les résultats sont difficiles à interpréter. De plus l'épuisement est étudié à une échelle mondiale et il est difficile de relier les résultats à des problématiques locales. Cette difficulté a été observée par les équipes de MOE de Pirmil - les Isles.

Par ailleurs, les études cherchant à évaluer l'impact de matériaux locaux spécifiques tels que le chanvre, ou visant à mieux prendre en compte la réalité de la chaîne de circulation des matières notamment en termes de distances entre installations, se heurtent à un manque de données. En effet, les logiciels utilisés pour l'ACV utilisent généralement des bases de données nationales ou internationales telles que la base INIES pour le cas de la France. Cette dernière centralise les fiches de données environnementales et sanitaires (FDES) sur les matériaux et produits mis en œuvre en France. Ainsi, les données mobilisées correspondent à un chantier moyen réalisé en France, et ne prennent pas en compte les efforts qui peuvent être réalisés pour réduire les distances d'approvisionnement sur un chantier spécifique.

Pour répondre à cette difficulté, les équipes de Pirmil - les Isles s'interrogent sur la faisabilité de créer des FDES portant sur les ressources locales ciblées qui pourraient être utilisées dans un configurateur afin de pouvoir disposer de l'impact environnemental réel, contextualisé aux filières du territoire, pour chaque projet. Les équipes se heurtent à plusieurs freins. L'élaboration de FDES est coûteuse pour une petite structure, et, si elles sont faites à l'échelle de plusieurs entreprises (FDES collectives), elles peuvent mal représenter des efforts particuliers faits par une des entreprises du groupement. Sans configurateur, les fiches prennent mal en compte le fret. De plus, il est difficile de caractériser la fin de vie des matériaux biosourcés du fait que leur emploi est assez récent et qu'il y a encore peu de volume à retraiter donc pas de filière en place. Par ailleurs, il est difficile d'exiger de toutes les équipes de MOE de disposer d'une ACV précise de leur projet en tenant compte des remarques précédentes, des enjeux de délais pour réaliser les études et du fait que les entreprises de construction ne sont pas toujours connues en phase conception.

Une des pistes envisagées en réponse à ces freins est d'associer les entreprises de construction au processus de conception. De plus, NMA et ses MOE de conception souhaitent pouvoir utiliser le configurateur pour matériaux biosourcés qui est en cours de finalisation pour le projet. Le recours au configurateur pour les matériaux en disposant (bois, béton et acier) sera imposé pour les projets qui mettront en œuvre ces matériaux.

Enquête auprès des producteurs

Pour Est Ensemble et Pirmil - les Isles, l'étude des installations de production de matériaux a fait appel à des méthodes d'enquête auprès des acteurs. Dans le cas d'Est Ensemble, cette enquête est passée par une compilation et analyse des données disponibles, puis l'envoi d'un questionnaire aux acteurs industriels de la collecte et du traitement des déchets, la réalisation d'entretiens téléphoniques et physiques et l'élaboration d'une base de données par typologie d'acteurs. Les résultats ont ensuite été intégrés à la base de données géolocalisées en ligne. La méthodologie mise en œuvre pour Pirmil - les Isles a associé entretiens individuels et ateliers collectifs ainsi que présenté précédemment. Elle a également mobilisé une enquête par questionnaires écrits auprès d'acteurs ciblés. A titre d'illustration, voici les questions qui ont été posées au Collectif Paille Armoricaïn par NMA et ses partenaires en avril 2020 :

- *Quel volume de logement votre filière serait-elle en mesure de réaliser dans les années à venir (en nombre logement par an, jusqu'à 2026), en les différenciant selon que leur hauteur soit inférieure à R+2 ; entre R+3 et R+5 ; au-delà de R+5 ?*
- *Quels seraient les principaux freins pour augmenter ce volume (Profils des entreprises, techniques, réglementaires, formation ?*
- *Quels leviers pourrait-on activer pour réduire le coût de revient des modes constructifs liés à votre filière (à différencier selon les 3 hauteurs proposées si besoin) ?*



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

- *Identifiez-vous des leviers de mutualisation pertinents à mettre en œuvre en phase chantier relatif à votre filière (entrepôt de stockage, ligne d'assemblage, mutualisation des bases vie, etc.) ? Si oui, pouvez-vous donner quelques éléments de dimensionnement ? De montage ?*
- *Quels enjeux de dérogation ou de sécurisation identifiez-vous pour faire progresser votre filière (ATEX, ATEc, règles professionnelles, Essais, Ingénierie de la Sécurité Incendie...)?*
- *Quels enjeux de formation identifiez-vous pour votre filière ? Quels acteurs ? Quel volume de chacun de ces acteurs former ? En précisant si possible le volume annuel crédible de formés au regard des ressources actuellement disponible pour la formation ?*
- *Comment votre filière pourrait-elle être mise à contribution afin de sensibiliser les futurs habitants et leur donner envie de recourir à votre filière dans le choix de leur logement (logement démonstrateur, outil de communication) ?*
- *Quelles sont les attendus techniques précis que vous souhaiteriez voir apparaître dans les consultations (et dans quel ordre) pour que chaque concours soit une avancée pour votre filière ?*
- *Selon vous, quelles évolutions portant sur l'interface avec les autres lots que ceux que vous maîtrisez seraient nécessaire pour, de manière globale et transversale, optimiser l'ensemble du processus de production, afin de réduire les effets financiers notamment de dispositifs qui, pour porter sur d'autres lots associés à l'action de votre filière propre, ont tendance à complexifier ou à renchérir le coût de construction ?*
- *Selon vous, quelles évolutions sont nécessaires dans le processus de conception dans son ensemble pour optimiser le plus en amont possible la prise en compte des contraintes, mais aussi des potentiels offerts par le mode constructif que votre filière met en place (rôle de l'ingénierie, du contrôle, agglomération et/ou coordination des lots, ordre des opérations de conception, effets sur la fabrication, gestion du cash-flow pour préfinancer des études plus poussées en amont, etc.)?*
- *Selon vous, quelles évolutions sont nécessaires dans le processus de fabrication dans son ensemble pour optimiser le plus en amont possible la prise en compte des contraintes, mais aussi des potentiels offerts par le mode constructif que votre filière met en place (acompte pour prise en compte Plan d'Atelier et de Chantier (PAC) et préfabrication, gestion des VRD pour permettre les stockages transitoires tampon dans les meilleures conditions, etc.)?*

Le tableau suivant résume l'analyse synthétique croisée. Les démarches étudiées montrent des exemples riches d'enseignement et ouvrent de nombreuses pistes de réflexion pour le développement et l'application de nouvelles méthodologies.

Tableau 3. Résumé des caractéristiques des trois démarches d'évaluation étudiées

	HÉBERT (ESPACES FERROVIAIRES)	EST ENSEMBLE	PIRMIL - LES ISLES (NMA)
Périmètre en termes d'étapes de la chaîne de circulation des matières	Gestion des déchets	Gestion des déchets - production de matériaux secondaires	Production de matériaux (plus particulièrement primaires biosourcés) et gestion des déchets
Périmètre en termes de ressources	Ressources secondaires sur chantier	Ressources secondaires, hors terres excavées et flux liés aux réseaux et espaces extérieurs	Ressources secondaires sur chantier et ressources primaires (plus particulièrement biosourcés)
Périmètre spatial	Chantier	Principales opérations groupées sur le territoire pour flux et territoire élargi d'un rayon de 15 km pour production/installations	Chantier pour ressources secondaires et périmètres variables pour production
Périmètre temporel	Flux générés lors de démolitions	Projection à horizon de 6 ans	Projection à horizon de 6 ans
Temporalité de l'évaluation	Phase programmation après choix de démolition	Phases programmation à conception pour les opérations étudiées	Phase programmation après choix de démolition
Acteurs impliqués	BET spécialisé	BET spécialisés et large réseau d'acteurs	BET spécialisé et large réseau d'acteurs
Méthodes	Comptabilité des flux et stocks de matières (diagnostic des ressources avant travaux et démolition)	Comptabilité des flux et stocks de matières et enquête auprès des producteurs	Evaluation environnementale en cycle de vie (FDES locales) et enquête auprès des producteurs (sourcing)



1.3. Préconisations pour l'évaluation des ressources locales

1.3.1. QUATRE TEMPORALITÉS ET OBJECTIFS POUR L'ÉVALUATION

Nous proposons de distinguer quatre temporalités et objectifs pour une démarche d'évaluation complète visant un approvisionnement local en matériaux. Ces temporalités, objectifs et méthodes associées sont résumés dans le tableau ci-dessous et seront successivement présentés dans la suite de ce chapitre.

Tableau 4. Évaluations préconisées

TEMPORALITÉ DE L'ÉVALUATION	OBJECTIF	MÉTHODES
Planification	Planification territoriale adossée au Plan Local d'Urbanisme ou SCOT	Comptabilité des flux primaires et secondaires générés par l'aménagement du territoire Comparaison entre plusieurs scénarios de projection des flux
	Planification régionale	Schémas régionaux des carrières (SRC, valables 12 ans), plans régionaux des déchets. Évaluation des gisements potentiels, atlas d'installations, construction des scénarios
Programmation	Identification des matériaux disponibles sur un territoire	Comptabilité des flux générés par l'opération Enquête de type sourçage sur les installations de production Comparaison des ressources par rapport à un scénario de référence national
Conception	Incitation à l'utilisation de la ressource locale Choix architecturaux en relation avec les ressources locales	Choix des matériaux ou produits disponibles localement après une étude de sourçage Évaluation environnementale en cycle de vie via des FDES locales
Chantier et fin de chantier	Suivi d'une opération	Évaluation continue via des indicateurs de suivi tels que t.km ou ressource primaire évitée

1.3.2. UNE CLÉ DE SUCCÈS PRÉALABLE À L'ÉVALUATION : LA DÉFINITION D'OBJECTIFS ET CRITÈRES DE DÉCISION CLAIRS SUR LES RESSOURCES

Ainsi que l'a montré l'analyse des trois démarches d'évaluation, les objectifs définis à l'approvisionnement local impactent fortement la démarche d'évaluation. Aussi, la première clé de succès est la définition d'objectifs et critères de décision clairs sur les ressources : quels objectifs définit-on concernant le choix des ressources utilisées ; quels bénéfices sont attendus d'une gestion plus efficiente et locale des déchets, d'une utilisation de matériaux secondaires ou d'un approvisionnement local en matériaux ? Définir clairement ces objectifs permettra de définir un cadre clair à la démarche d'évaluation.



La revue de la littérature a montré que proximité spatiale et proximité environnementale ne sont pas systématiques. Aussi, la recherche d'une proximité spatiale des ressources utilisées dans un projet de construction ou aménagement est à inscrire au sein d'une stratégie d'économie circulaire cohérente au regard des enjeux du territoire et du projet. Une stratégie en quatre étapes hiérarchisées est par exemple préconisée pour la ville d'Amsterdam lors de la conception de bâtiments (Circle Economy *et al.*, 2018). Premièrement, réduire la demande de ressources, puis identifier et exploiter les synergies locales qui peuvent satisfaire ces demandes, et enfin couvrir les demandes restantes par des ressources à moindre impact et suivre les résultats.

1.3.3. PLANIFICATION : LIER PLANIFICATION URBAINE ET PLANIFICATION DES RESSOURCES

Chaque territoire soulève des enjeux spécifiques en termes de ressources pour la construction. Les territoires où les ressources primaires sont abondantes et les installations d'extraction et production et gestion de déchets nombreuses et non saturées se différencient par exemple de territoires où les ressources primaires sont faibles mais les installations de production de matériaux secondaires développées. Étudier la disponibilité des ressources et des capacités de production en différenciant les étapes de la chaîne de circulation des matières ou chaîne de valeur permet de mieux comprendre un territoire.

Une planification concernant l'extraction et la gestion des ressources primaires et secondaires est mise en œuvre aujourd'hui en France à l'échelle régionale. La planification régionale vise à maintenir une extraction et production locale de matériaux primaires via le schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), Schéma régional des carrières, Programme régional de la forêt et du bois et Stratégie régionale pour l'essor des filières de matériaux et produits biosourcés. Le Plan régional de prévention et gestion des déchets vise par ailleurs à développer l'utilisation de ressources secondaires. Cependant, l'application de ces documents se heurte à des politiques locales et des oppositions de riverains en particulier pour les ressources minérales (Augiseau, 2017).

Or les collectivités territoriales peuvent favoriser l'utilisation de ressources secondaires en liant mieux planification urbaine et planification des stocks et flux de matières. La création d'une base de données spatialisées ou cadastre des ressources secondaires (Brunner, 2011), constitue une piste d'action mise en œuvre par la Ville de Vienne en Autriche (Kleemann *et al.*, 2016). Ce cadastre des ressources peut constituer un socle pour mettre en relation les porteurs d'opérations afin de favoriser des échanges de flux entre chantiers. Il peut en outre intégrer les données sur les projets de réhabilitation ou construction issues de BIM (*building information models*) et constituer ainsi des passeports de matériaux (Debacker et Manshoven, 2016).

A cette information sur les ressources peut être associée une information technique permettant aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre de respecter le cadre réglementaire et assurantiel tout en utilisant des ressources secondaires. Les collectivités peuvent par ailleurs soutenir le développement d'infrastructures régionales de production et de sites dédiés au stockage, tri, valorisation, par leur politique économique et par la mise à disposition de foncier.

En outre, les ressources secondaires ne pouvant que partiellement se substituer aux ressources primaires, une réduction des flux en amont et en aval peut être visée. La planification urbaine peut veiller à favoriser une meilleure occupation et une densification douce du bâti afin de contribuer à réduire les flux. Les autorisations de construire, aménager et démolir constituent en outre un levier d'action important sur la génération des flux de matériaux et déchets de chantiers.

Ces démarches de planification territoriale des ressources pour la construction peuvent s'appuyer sur des méthodes de comptabilité de flux et stocks de matières. Les études réalisées sur une ville pour Orléans dans Rouvreau *et al.* (2012) et sur l'ensemble d'une région (à une échelle allant jusqu'au bâtiment) dans Augiseau (2017) constituent des exemples de méthodes pouvant être mobilisées. Des indicateurs tels que la densité de sites par étape de la chaîne de valeur (en rapport avec la moyenne nationale) ou la distance moyenne entre sites et chantiers peuvent être utilisés pour l'analyse des ressources. Dans une approche prospective, les masses de flux générés par différents scénarios d'aménagement du territoire peuvent être comparées et rapportées aux stocks primaires et secondaires



de ressources disponibles sur le territoire ou aux flux extraits de ces stocks annuellement.

Plusieurs sources de données statistiques peuvent être utilisées pour caractériser l'extraction et production de matériaux et en particulier le maillage des carrières et sites industriels :

- la base de données Carrières & Matériaux (site mineralinfo) : localisation des ressources géologiques exploitées ;
- les ressources biosourcées (voir paragraphe sur le bois) ;
- les informations des syndicats et fédérations professionnels publiées dans les chiffres clés de l'industrie :
 - o UNPG-UNICEM (granulats) ;
 - o Syndicat de l'industrie du plâtre ;
 - o Industrie de la Brique et la Tuile ;
 - o SFIC (industrie du ciment) ;
 - o FIB (Fédération de l'Industrie du Béton) ;
 - o CTMNC (pierre naturelle).

De plus, les FDES de certains produits identifient les principaux fabricants et les distances de transport moyennes proposées entre les sites de production et le chantier. Le tableau suivant présente des sources de données complémentaires.

Tableau 5. Sources de données pour l'étude des ressources locales. Source : cette étude

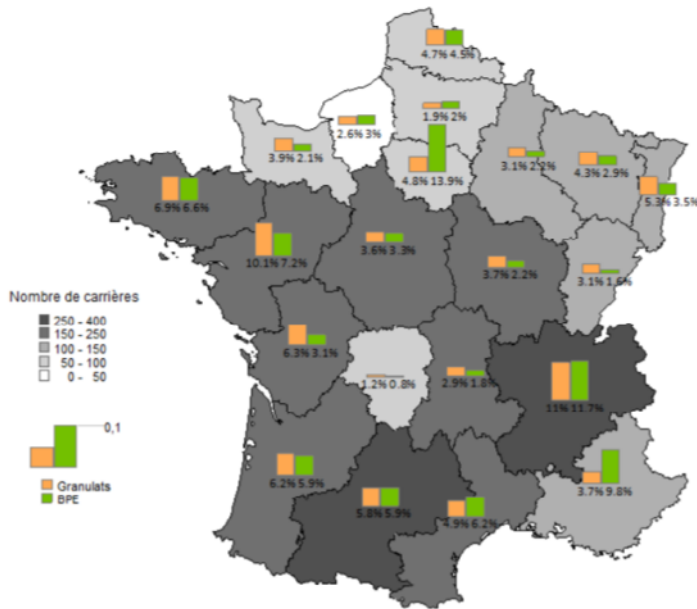
SOURCE	CONTENU ET NIVEAU D'AGRÉGATION DE L'INFORMATION	LIMITE	MISE À JOUR
Bilans annuels de l'UNICEM avec l'UNPG (granulat), le SNBPE (béton prêt à l'emploi) et la SNROC (roches ornementales)	Production par département ou région pour une année de référence.	Données sur la consommation agrégées France entière	Une fois par an
Observatoires Régionaux des Granulats	Production et consommation par département. Échanges entre départements et régions, consommation dans chaque territoire. Existant en Normandie		Une fois par an
Schémas Régionaux de Carrières	Document structurant la gestion des carrières sur une région, identification des gisements existants dans la région (primaire et secondaire). Validité 12 ans.	Schémas en cours de réalisation, les anciens schémas départementaux sont souvent très anciens.	Validité 12 ans
Schémas régionaux d'aménagement forestier	Document structurant la gestion des forêts sur une région		Validité 12 ans
Plans de prévention et gestion des déchets	Document structurant la gestion des déchets dont les déchets de chantiers sur une région. Prospective.	Plans en cours de réalisation.	Validité 12 ans
Base SitraM	Transports de marchandises par voie routière ou fluviale en France, importations et exportations internationales.	Grandes catégories de matériaux (agrégations pour confidentialité). Transports ferroviaire national exclu depuis 2007 (confidentiel). Échelle départementale.	Une fois par an

Des sources de données géolocalisées sur les carrières, les sites de production de matériaux ou les installations de stockage des déchets apportent des données plus fines.

Tableau 6. Sources de données géolocalisées . Source : cette étude

SOURCE	CONTENU ET NIVEAU D'AGRÉGATION DE L'INFORMATION	MISE À JOUR
Mineralinfo	Carrières en exploitation, par famille des matériaux exploitées. Arrêtés préfectoraux, capacité maximales autorisées	Une fois par an
ICPE	Base de données des Installations Classées. Localisation des installations de stockage des déchets, des centres de transit/tri de déchets, sites de valorisation des déchets et des carrières	Hebdomadaire
Site FFB déchets chantier	Annuaire cartographique de plusieurs sites/installations de traitement des déchets du BTP. Identification des sites à proximité du chantier	Inconnue

Des cartes réalisées par des fédérations professionnelles de producteurs de matériaux de construction peuvent permettre de compléter une analyse des ressources. A titre d'exemple, nous présentons ici la localisation de la production en France de 4 filières : granulats et centrales BPE, pierres ornementales, filière bois et filière chanvre.



Sources : SFIC, BRGM, UNICEM – traitement Crédoc.

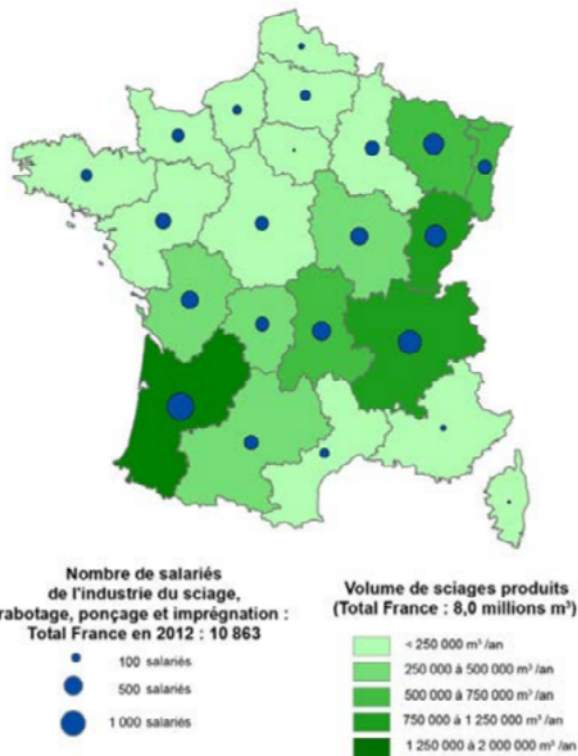


Figure 15. Localisation de la production en France de 4 filières de matériaux
 Source : Carrières de granulats et centrales BPE (PIPAME, 2016), pierres ornementales (BRGM - Dessandier et al., 2016), filière bois (FCBA, 2014), acteurs de la filière chanvre (Interchanvre, 2017)



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

L'analyse de l'échelle d'approvisionnement de chaque matériau peut être affinée en distinguant les différentes étapes de la chaîne de circulation des matières. Ainsi que le montre la figure 16, pour le cas des produits en plâtre, dont l'extraction et la production relèvent d'échelles régionale à nationale, avec une forte production en région francilienne. En revanche la collecte des déchets pour une valorisation mobilise un maillage d'installations départemental, de même que le stockage des déchets pour un enfouissement ultime de la portion non valorisée.

La figure 17 montre ce même type d'analyse pour les pierres ornementales, avec la particularité d'une ressource comme le granite qui est d'une échelle d'approvisionnement locale en Bretagne (plusieurs carrières par département) et le calcaire pour une région comme le Centre-Val-de-Loire, avec quelques carrières de calcaire, dans un contexte de fort développement des importations. Une utilisation des pierres calcaires en Bretagne ou celle de granites dans le Centre correspondraient à des échelles d'approvisionnement nationales. Ces représentations permettent de montrer la situation actuelle ou de référence pour l'ensemble de la France en termes d'échelles d'approvisionnement en matériaux.

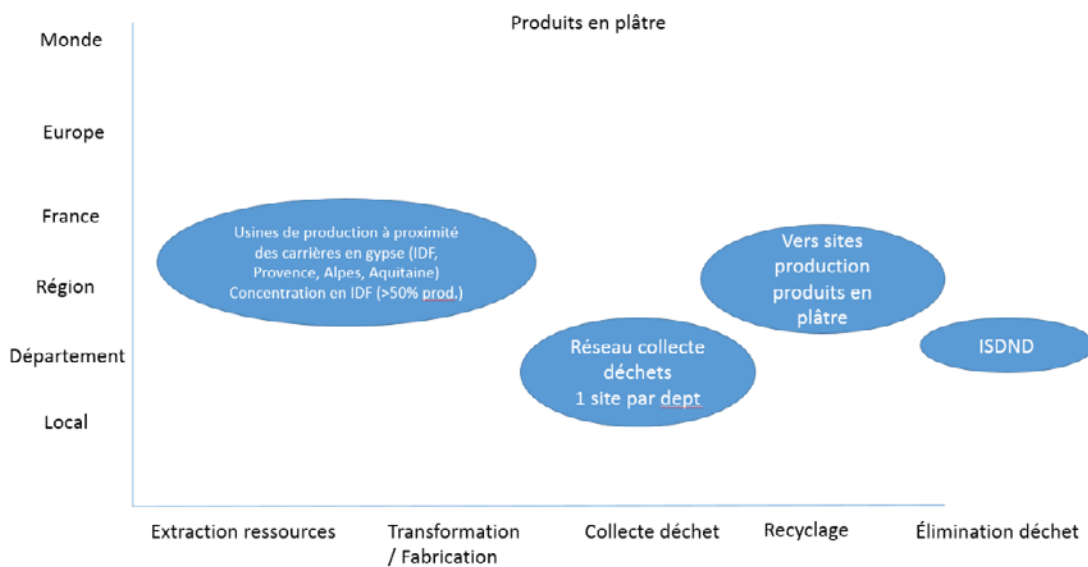


Figure 16. Exemple d'une représentation sur le cas des produits en plâtre des échelles d'approvisionnement pour différentes étapes de la chaîne de circulation des matières Source : cette étude

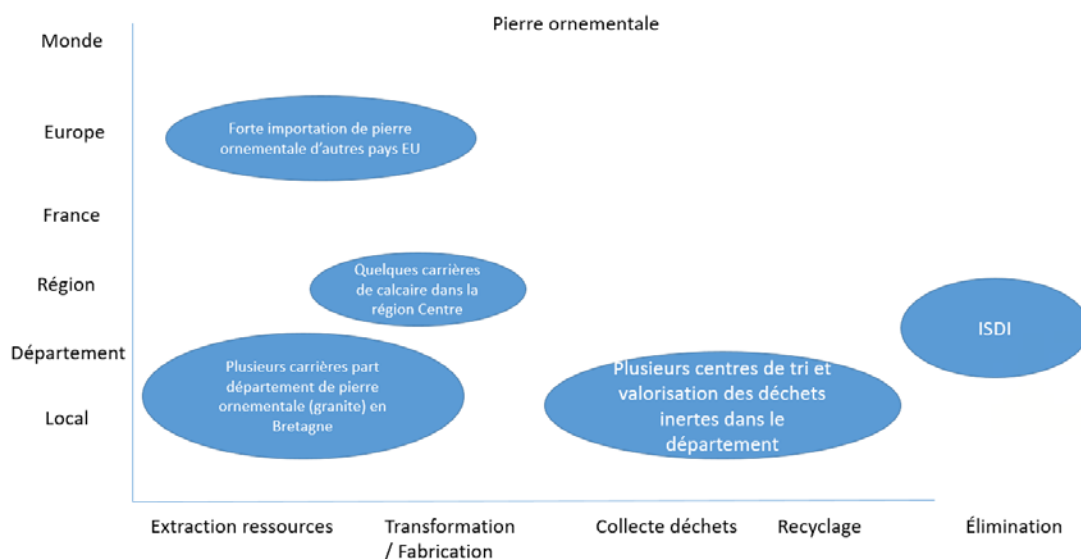


Figure 17 : Exemple d'une représentation sur le cas des pierres ornementales des échelles d'approvisionnement pour différentes étapes de la chaîne de circulation des matières avec distinction entre la Bretagne et la région Centre. Source : cette étude



1.3.4. PROGRAMMATION :

SITUER L'OPÉRATION DANS SON CONTEXTE TERRITORIAL

Définir, évaluer et atteindre des objectifs pertinents et cohérents d'approvisionnement local implique de replacer la connaissance des flux de matériaux et déchets générés par une opération à son contexte territorial. La bonne compréhension d'un territoire et en particulier des flux que ce territoire génère (matériaux entrants et déchets sortants) est la première étape pour la considération d'un critère de localité des matériaux de construction. Il est nécessaire de contextualiser la consommation matière d'une opération (rénovation, déconstruction ou construction neuve) par rapport à la consommation de ce territoire, ses capacités de production, ses dépendances envers des territoires voisins ou plus lointains, et de positionner les flux sortants par rapport au maillage des installations de gestion des déchets. L'objectif est d'éviter l'annonce d'objectifs trop ambitieux par rapport aux possibilités des territoires, de partir sur des modes constructifs inadéquats localement et, si l'opération est d'un grand volume, de générer la création d'une filière locale.

Le *sourçage* des matériaux, savoir d'où ils proviennent, permet de répondre à la question de la localité des produits. Ce *sourçage* peut se faire à partir des données nationales, statistiques, bilans annuels des filières ou bien en allant directement à l'encontre des filières locales. Le *sourçage* des produits avec une chaîne de valeur très complexe (équipements par exemple), avec des maillons de cette chaîne dans presque tous les continents, échappent logiquement à toute considération « locale ». Cependant, des initiatives existent pour la traçabilité de la chaîne d'approvisionnement des produits, comme SourceMap¹⁰.

De plus, la contribution de l'opération aux flux locaux peut être analysée en étudiant la part que représentent le chantier dans la consommation de matériaux du territoire ou dans la production de déchets de ce dernier. Les ressources secondaires (granulats recyclés notamment), ressources secondaire produites à proximité des agglomérations et des chantiers, ont de facto un fort caractère local et atténuent la tension sur le marché des ressources primaires. La connaissance de la disponibilité de ces ressources secondaires passe par la connaissance des flux et du maillage des installations. Leur bénéfice environnemental peut se mesurer avec des indicateurs de multiples formes comme par exemple « ressource primaire évitée ». La situation géographique du chantier au regard des sites locaux peut être analysée en estimant la distance minimale ou la distance moyenne entre chantier et installations.

Une importante clé de succès pour cette évaluation est de replacer la connaissance des déchets dans une perspective de réponse à des enjeux de ressources. Il s'agit de lier les données sur les déchets aux données sur les consommations de matériaux de l'opération. Pour cela, des indicateurs de type ratio entre production de déchets et consommation de matériaux ou part de la consommation de matériaux couverte par des matériaux secondaires peuvent être utilisés. L'intérêt de cette mise en perspective est d'interroger la programmation de l'opération dès le lancement pour limiter les flux sortants et entrants en considérant l'espace bâti présent sur le site de projet comme une ressource, au même titre que les matériaux qui le composent. Des indicateurs de type flux évités ou part de l'espace bâti conservée peuvent être utilisés.

Les résultats de deux projets d'étude et recherche récents proposent des exemples d'indicateurs complémentaires. Le projet OVALEC (CSTB, BRGM, Bouygues Construction et Alliance HQE) a proposé des indicateurs de type intensité de transport pour prendre en compte le contexte local. Ovalec propose également de considérer les distances entre la commune ou l'arrondissement du chantier évalué et la distance à l'installation la plus proche pour une série d'installations : la carrière de granulats et la centrale à béton, les installations de stockage de déchets, les plateformes de valorisation des déchets du BTP, etc. (Bazzana *et al.*, 2019).

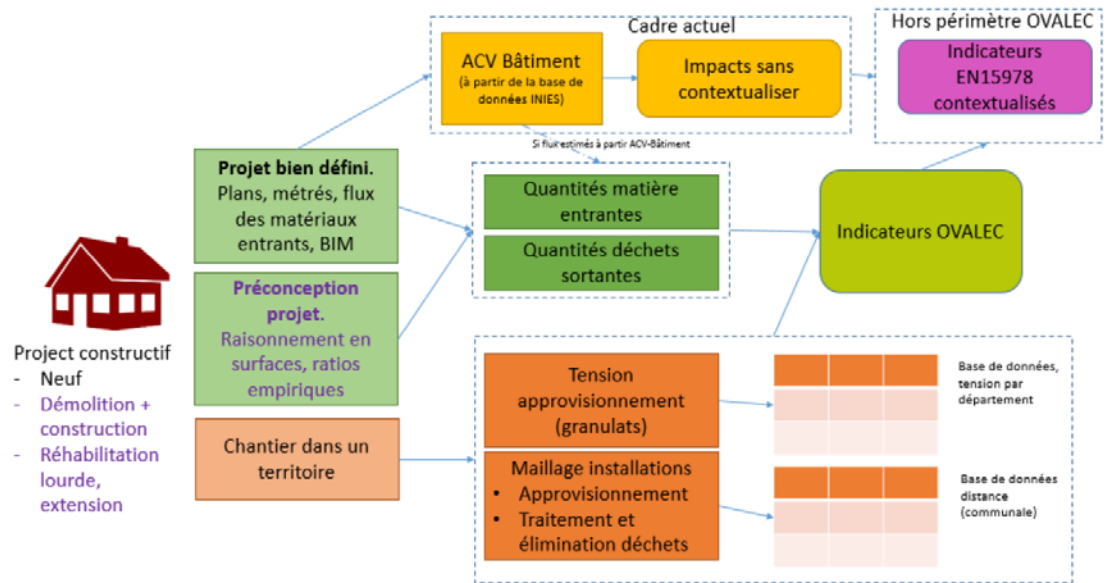


Figure 18. Schéma de la démarche proposée par le projet OVALEC. Source : Bazzana et al. (2019).

L'outil OVALEC permet une représentation en mode Sankey des déchets en fin de vie du bâtiment selon le type de déchets et la filière de valorisation ou élimination. Une autre famille d'indicateurs est spécifique à la problématique des ressources produites et consommées en général très localement, le granulats primaires et secondaires. Dans OVALEC est proposé un indicateur de type graphique qui représente l'intensité en granulat du projet évalué, dite tension chantier, et l'intensité matière dite d'équilibre pour un territoire (le département) dite *tension collective*. Cette tension collective s'évalue selon les capacités des carrières existantes dans le département, le rythme actuel de la production dans ce département et la durée possible d'exploitation. Le fait d'ajouter du granulat secondaire dans les bétons permet de baisser les tensions. Cet ajout est d'autant plus bénéfique si le projet était initialement dans des territoires sous très forte tension.



Figure 26. Mode de représentation des indicateurs tension chantier et tension collective, pour les ressources en granulat. Source : Bazzana et al. (2019).

Par ailleurs, le bureau d'études Evéa a publié en 2018 une étude pour proposer des indicateurs d'économie circulaire dans la construction. Elle repose sur les principes de l'analyse de flux de matières : mesurer les quantités entrantes et sortantes à partir des informations qui sont contenues dans les fiches FDES de produits de la construction (Figure 27). Ces indicateurs prennent la forme d'intensité matière (kg par m² de surface de plancher du bâtiment) ou d'intensité transport (t.km/m² SDP ou kg CO_{2eqs}/m² SDP). Ils sont conçus pour prendre en compte d'un point de vue massique les matériaux/ressources entrant issus du recyclage et ceux réemployés, et de même pour les déchets, ceux recyclés et ceux réemployés.

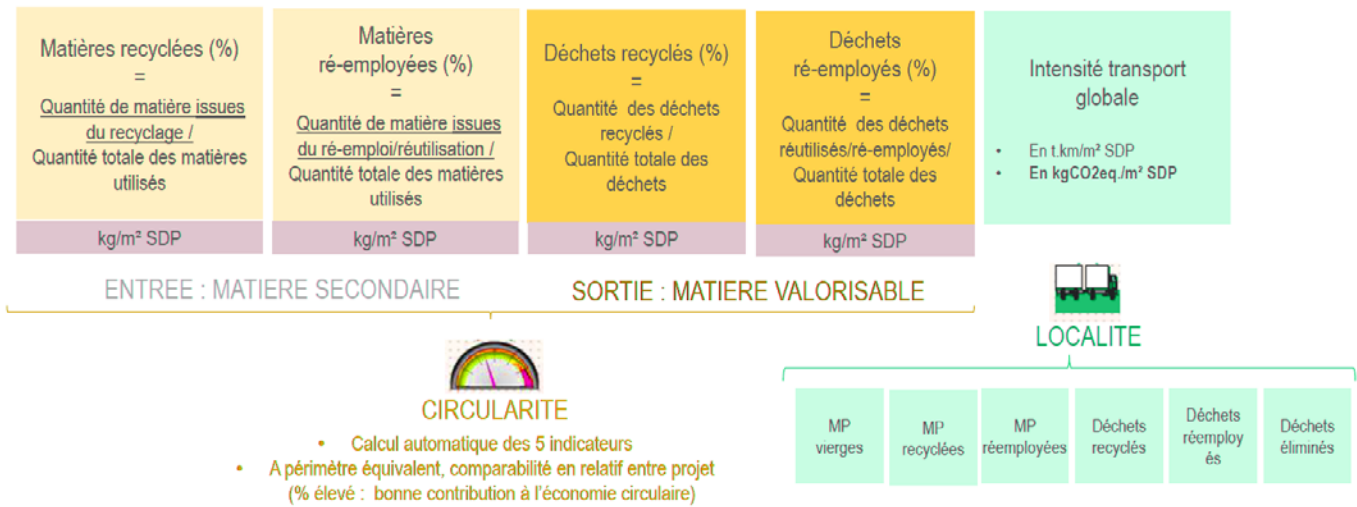


Figure 19. Indicateurs proposés par Evéa pour la prise en compte de l'économie circulaire dans la construction.
 Source : Alliance HQE-GBC (2020)

Le cas du projet Hébert permet d'apporter une illustration de l'utilisation de tels indicateurs. Il est en effet possible de contextualiser les flux de déchets qui ont été estimés lors de l'étude réalisée par Neo-Eco et de les localiser par rapport au maillage des installations de gestion de déchets du BTP. Il est en outre proposé d'associer à chaque flux sortant un exutoire et une distance site-exutoire. Ainsi il est possible par lot ou famille de déchets de calculer un flux en tonnes x km routier.

Pour localiser les installations de traitement des déchets du BTP en Île-de-France, il est proposé d'utiliser l'Atlas publié en 2019 par l'ORDIF¹¹, à partir des données de l'année 2016. Le calcul se complexifie lorsque les déchets vont circuler par des installations de tri ou collecte qui envoient vers d'autres sites, il se complexifie également en cas de transport intermodal (péniche, fret ferroviaire). Ces installations de traitement et de tri ont des taux de performance moyens et par lot (% recyclé, % de perte envoyé en valorisation matière, % envoyé en installation de stockage).

Pour aller plus loin, l'analyse devrait prendre en compte des taux de performance des procédés de recyclage, mais cela nécessite la forte implication des acteurs de la gestion des déchets. Une option est de considérer des valeurs moyennes régionales voir nationales de ces taux. Ce n'est pas le cas du chantier Hébert à l'heure actuelle, mais si les besoins en nouveaux matériaux des nouvelles constructions à venir étaient connus – ou estimés approximativement avec des ratios de surfaces de plancher à bâtir – il pourrait être possible de faire le même calcul pour les flux entrants : bétons (granulats + ciment), maçonneries, aciers, bois, équipement, etc. Et ainsi comparer les flux entrants et les flux sortants, comparer par exemple les besoins en granulats des nouveaux bétons et les graves générées par la démolition, évaluer la partie des terres qui serait réutilisées sur place, etc.

Tableau 7 : Matériaux identifiés sur le site Hébert par Neo-Eco et estimation a priori des exutoires (sites de traitement) le plus proches en fonction de la nature des déchets Source : résultats de Neo-Eco (2019) et calcul des distances et t*km par auteurs

VALORISATION	MATÉRIAU	MASSE (T)	% PERFORMANCE COLLECTE A PRIORI	SITE PREMIÈRE DESTINATION	DISTANCE HÉBERT – PREMIER EXUTOIRE (KM)	T*KM TRANSPORT ROUTIER
Granulats pour béton	Béton 4-20	3218.5	100%	Installation de concassage de Bobigny	6	19311
Granulats pour béton	Pierre	2143	100%		6	12858
Granulats pour béton	Parpaing	300.5	100%		6	1803
Granulats VRD	Béton 0-4 et >20	3218.5	100%		6	19311
Granulats VRD	Parpaing	2143	100%		6	12858
Granulats VRD	Pierre	300.5	100%		6	1803
Valorisation terre	Terre	12227	100%	Site traitement terres Bobigny	6	73362 ¹²

1.3.5. CONCEPTION : CONTEXTUALISER L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET S'APPUYER SUR DES FDES LOCALES

Comment prendre en compte des critères locaux dans les étapes de conception d'un projet ? La bonne prise en compte du contexte local d'une opération intervient plus en amont dans la réflexion que l'évaluation des performances environnementales du bâtiment (ACV). Lorsqu'un bureau d'études fait une ACV bâtiment, les principaux choix architecturaux, et choix des matériaux et d'aménagements paysagers pour valoriser les terres ont été faits. L'ACV permet d'évaluer les impacts de ce choix architectural. L'étude menée pour Pirmil - les Isles montre la pertinence de développer des FDES locales pour prendre en compte des produits locaux dans l'ACV bâtiment.

1.3.6. CHANTIER : UTILISER DES INDICATEURS DE SUIVI

Comment intégrer une démarche de mesure et traçabilité dans le déroulement d'un projet et dépasser le diagnostic à un instant t pour aller vers un suivi d'opération de type SMO ? Il s'agit de se donner les moyens pour que l'évaluation soit suivie de réalisations. La première étape, le diagnostic des ressources tel qu'il a été fait par Espaces Ferroviaires, doit s'accompagner par un suivi de l'opération par une AMO qui mesure ces flux. A la fin, la communication d'un taux de valorisation est d'autant plus crédible si les moyens de mesure et traçabilité ont été déployés.

Le suivi de l'opération vise à identifier les dérives par rapport au diagnostic initial. Dans le cas des bétons concassés sur le site Hébert un problème de qualité des granulats obtenus est apparu. Le problème est lié à une proportion trop importante de sulfates dans le béton, le rendant impropre à la sous-couche routière. En effet, au moment des analyses réalisées par l'AMO de Neo-Eco, avant démolition, qui ont validé le choix de réutilisation comme sous-couche routière, le niveau de sulfates mesuré était acceptable. Mais les tests réalisés après concassage laissent apparaître une concentration

12 Ce calcul devrait intégrer également les distances entre le site de traitement et les destinations finales des terres comme une carrière en réaménagement ou des installations de stockage. Mais cela nécessite de connaître la répartition de ce lot de terres une fois arrivé sur l'installation. Lorsqu'une évaluation est faite à priori, une option est d'estimer cela à partir de statistiques nationales ou régionales.



plus importante. Cela serait dû au procédé de concassage, qui augmente la proportion de fines et donc de sulfates dans les analyses. En fin de compte, l'opération devrait être en mesure d'utiliser la totalité des volumes concernés sur site, mais probablement plutôt pour des pistes de chantier provisoires que pour des aménagements définitifs. Le suivi de l'opération permet donc une évaluation des écarts par rapport à des évaluations ex ante.

1.4. Conclusions

La prise en compte d'un critère « local » pour le choix des matériaux de construction utilisés dans un chantier doit considérer la temporalité et l'échelle de l'opération. Ainsi dans le travail ici présenté sont proposées quatre étapes pour lesquelles les outils et les méthodes à mettre en place et les objectifs sont différents : la planification, la programmation, la conception, ainsi que le suivi du chantier. Des études de référence, des outils d'évaluation et des exemples d'indicateurs ont été présentés.

L'évaluation des flux, par une approche flux-stocks, aussi bien sur l'ensemble d'un territoire que pour un chantier, et le sourçage des matériaux et des filières de valorisation des déchets sont les principales méthodes qui apparaissent pour la prise en compte d'un critère local. Pour le sourçage, a été présenté un état de référence pour les principaux matériaux de construction : échelle géographique de l'approvisionnement de ces matériaux en France et disparités régionales actuelles.

La question du lien entre cette approche territoriale et l'origine des matériaux et les évaluations de type Analyse de Cycle de Vie, faites surtout à niveau des bâtiments, se pose. La démarche de Nantes Métropole Aménagement, qui consiste à pousser certaines filières de matériaux à l'élaboration des fiches FDES locales pour leurs produits de construction, semble être l'approche qui s'intègre le mieux dans le cadre de ces évaluations. Toutefois, l'intégration dans une ACV bâtiment de ces fiches FDES locales devrait s'accompagner d'une réflexion en amont en suivant les étapes évoquées : quelles sont les filières locales, quels sont les flux des matériaux de construction et des déchets du BTP dans le territoire, quelle est la valorisation qui en est faite, quel est le potentiel de cette dernière, et quelle est l'origine des matériaux consommés et leur poids dans l'opération finale.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

2.

Évaluation environnementale de l'allongement du cycle de la matière



Léa Brachet (Artelia), Pyrène Larrey-Lassalle (Nobatek – INEF4), Mathilde Louerat (CSTB)

2.1. Les enjeux

Plusieurs pratiques d'allongement du cycle de la matière au sein de la vie d'un bâtiment apparaissent dans le cadre des démarches d'économie circulaire. Parmi elles, nous nous focaliserons ici sur la rénovation, b.a.-ba de l'allongement du cycle de la matière dans un bâtiment et sur le réemploi (que ce soit dans le cas d'un projet de rénovation ou de construction neuve).

Les enjeux génériques autour de ces initiatives, sont multiples :

- S'il est pressenti que ces pratiques préservent les ressources, participent à la lutte contre l'urgence climatique et constituent un formidable potentiel de création d'emploi, il est encore difficile de le mesurer. Le premier enjeu est donc de proposer des méthodologies qui permettent de **mesurer l'impact environnemental**, qui soient compatibles entre elles dans le cas de rénovations ou de construction neuves, et applicables au quotidien par les équipes projet. Également, des premiers ordres de grandeur du nombre d'heures de travail créées grâce à ces activités d'économie circulaire deviennent indispensables.
- **Encourager et valoriser** les pratiques des projets pilotes, qui « ouvrent la voie »
- **Capitaliser** sur les données collectées dans le cadre des projets pilotes et utilisateurs
- **Sécuriser les performances résiduelles** des éléments issus de réemploi – traité dans l'enjeu A du présent projet de recherche Dans le cadre de ce projet de recherche nous nous focalisons sur l'enjeu de mesure de l'impact environnemental.

Dans un premier temps, nous décrivons et comparerons plusieurs méthodes d'évaluation adaptées à la modélisation de l'allongement du cycle de la matière dans deux cas particuliers : la rénovation ainsi que la modélisation de composants issus de réemploi. Dans un second temps, ces méthodes seront appliquées à deux projets de rénovation, ainsi qu'à un projet de construction neuve intégrant des composants de réemploi. Au-delà des résultats de l'analyse de cycle de vie, seront également pris en compte la facilité ou non de prise en main des méthodes par les modélisateurs. Enfin, nous ferons une proposition d'évolution méthodologique pour ces deux cas.

2.2. Méthodologie de l'ACV en rénovation

Une Analyse de Cycle Vie (ACV) de bâtiment existant peut être réalisée pour répondre à différentes problématiques, pouvant toutes être interdépendantes :

- Comparer deux scénarios distincts de rénovation. L'ACV est alors un outil d'éco-conception.
- Comparer un scénario de rénovation à un scénario de démolition/reconstruction. L'ACV peut être un outil d'aide à la décision pour un maître d'ouvrage qui hésite entre ces deux scénarios.
- Gérer un parc immobilier par une approche environnementale. Deux catégories d'impact sont à comptabiliser : l'exploitation et le « potentiel du bâti » (ce terme a été proposé par des acteurs mais sa définition n'est pas arrêtée).
- Assurer la « cohérence » de l'ACV d'un bâtiment pendant toute sa durée de vie, c'est-à-dire mettre à jour une ACV tout au long de la vie d'un bâtiment en actualisant les hypothèses par défaut initialement prises avec les données réelles de la vie en œuvre de ce bâtiment. Cet usage de l'ACV n'est pas majoritaire mais cette approche reste néanmoins à considérer.
- La dernière problématique listée ici, qui nous intéressera particulièrement dans cette étude, est la caractérisation de la performance environnementale d'une rénovation afin de pouvoir distinguer les bonnes pratiques des mauvaises et de s'inscrire dans des trajectoires ambitieuses de réduction de GES pour le bâtiment.



La problématique de gestion de parc est encore mal définie, et sera spécifique à un contexte donné. La comparaison de scénarios de rénovation ou d'un scénario de rénovation par rapport à un scénario de démolition et construction neuve est une question récurrente pour l'aide à la décision des maîtres d'ouvrage. La question de l'actualisation d'une ACV au cours du temps relève d'enjeux méthodologiques propres qui s'éloignent des enjeux du projet de recherche. Ces deux sujets sont abordés dans ce livrable via l'analyse méthodologique des différentes méthodes d'ACV.

La caractérisation d'une « bonne rénovation » est en revanche apparue comme un sujet encore peu exploré et très pertinent au vu des objectifs nationaux sur les performances énergétiques et environnementales du parc bâti. Nous souhaitons donc, dans ce rapport, faire émerger une méthodologie permettant de répondre à ce point.

Plusieurs méthodologies existent pour réaliser des ACV rénovation. Nous proposons ici de présenter, analyser et comparer les méthodologies connues des membres de l'enjeu B au vu de cet objectif, et d'en faire ressortir une approche consolidée pour la caractérisation de la performance environnementale d'une rénovation. La cohérence avec le réemploi d'un composant ex-situ est également étudiée.

2.2.1. COMPARAISON DES DIFFÉRENTES MÉTHODOLOGIES EXISTANTES D'ACV RÉNOVATION

Contrairement à une opération de construction neuve qui n'intègre que des composants neufs (ou éventuellement issus du réemploi), une opération de rénovation est plus complexe car elle comporte plusieurs catégories de composants :

- Les Produits de Construction et Équipements (PCE) conservés (à t=0)
- Les PCE déposés (à t=0)
- Les PCE neufs ajoutés (à t=0) + renouvellement des PCE conservés et ajoutés (= PCE neufs aussi)
- La fin de vie des PCE qui ont été conservés à t=0

Les différentes méthodes d'ACV rénovation ont généralement été définies en se référant aux ACV de bâtiments neufs et donc à la méthode E+C-. Elles intègrent donc les quatre contributeurs : PCE, Consommations d'énergie, Consommations et rejets d'eau et Chantier. Si les trois derniers contributeurs sont traités de la même façon, le contributeur PCE est propre à chacune des méthodes, les éléments neufs, déposés et conservés étant comptabilisés de différentes façons. Nous nous focaliserons donc sur ce contributeur PCE.

Les trois méthodes portées à la connaissance des membres de l'enjeu B sont les suivantes :

- La méthode A qui ne comptabilise aucun impact pour les composants réemployés et utilise la notion d'amortissement pour les éléments déposés. Cette méthode est portée par l'association BBKA ;
- La méthode B qui fait appel à la notion d'amortissement pour les composants conservés et déposés. Cette méthode est utilisée par l'Alliance HQE-GBC pour ses tests portant sur la rénovation ;
- La méthode C qui comptabilise les impacts « restants » des composants conservés et déposés. Cette méthode a été développée par le CSTB pour la 1^{ère} expérimentation HQE rénovation pour correspondre au mieux à la norme NF EN 15978.

a. Notion d'amortissement

Dans les méthodes A et B, les impacts du contributeur « Produits de construction et équipements » sont basés sur un calcul d'amortissement.

Dans ces méthodes, les impacts environnementaux des produits de construction et équipements sur leur cycle de vie ne sont pas instantanés ni phasés, mais sont lissés sur toute la durée de vie des produits et équipements, produisant un effet d'amortissement. Cet effet peut être linéaire (constant année après année, le plus simple) ou dégressif. Avec une hypothèse linéaire, si un produit a une durée de vie de X années, on amortira chaque année 1/X fois son impact environnemental sur le « total



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
 DES BÂTIMENTS

cycle de vie ». C'est une vision « comptable » de l'ACV : si les produits et équipements installés dans le bâtiment initial ont déjà été amortis sur la période d'étude prise en compte dans l'analyse de cycle de vie (fictive ou non) de ce bâtiment initial, ils ne doivent plus être comptabilisés. Dans la méthode B, l'amortissement est linéaire. La méthode A n'a pas été détaillée à ce point à notre connaissance.

Les impacts des produits et équipements conservés et déposés sont traités ainsi dans la méthode B :

- S'ils ont vécu dans le bâtiment initial plus que leur durée de vie de référence (DVR), leur impact est considéré comme nul pour le cycle de vie du bâtiment existant objet de l'étude ;
- S'ils ont été mis en œuvre ou installés dans le bâtiment à une date telle qu'ils n'ont pas encore vécu la totalité de leur DVR, ils ne sont pas encore complètement amortis et il leur reste une durée de vie résiduelle (DV résiduelle). Leur impact est alors calculé de la façon suivante :

$$I = Q \times DE \times \frac{DV_{résiduelle}}{DVR}$$

où :

- Q = quantité de PCE conservé ou déposé non amorti $I = Q \times DE \times (DV_{résiduelle}) / DVR$
- DE = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur toutes les étapes du cycle de vie du produit (incluant la fin de vie)
- DV résiduelle = durée de vie résiduelle
- DVR = durée de vie de référence

b. Prise en compte des différents éléments par les trois méthodes

Les trois méthodes calculant de la même manière les contributeurs eau, énergie et chantier de l'ACV, nous avons focalisé notre travail de comparaison sur l'évaluation des PCE.

Les différentes prises en compte des impacts associés des PCE par les trois méthodes sont illustrées dans le schéma 29 ci-dessous.



Schéma 29 : Comparaison des 3 méthodes d'évaluation des PCE en rénovation

Éléments conservés

Pour valoriser le réemploi, la méthode A considère que les PCE conservés ont un impact environnemental nul. La méthode B comptabilise les impacts des phases de production, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie au prorata de ce qu'il reste à vivre au PCE par rapport à sa DVR. Si le PCE est déjà « amorti », son impact est nul. La méthode C quant à elle considère les impacts de la vie en œuvre qui restent à émettre pour le PCE considéré, c'est-à-dire qu'elle ne prend pas en compte les étapes de production et mise en œuvre des éléments conservés qui ont déjà eu lieu.

Éléments déposés

Dans les méthodes A et B, les PCE déposés sont à impact nul s'ils sont amortis (ou réemployés dans un autre bâtiment). S'ils sont non amortis, les impacts des phases de production, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie sont comptabilisés au prorata de ce qu'il restait à vivre au PCE par rapport à sa DVR. Dans la méthode C, la fin de vie des déchets est comptabilisée.



Éléments neufs

Pour les trois méthodes, les impacts environnementaux des PCE neufs – qu'ils soient ajoutés au moment de la rénovation ou, plus tard, lors des renouvellements de produits initialement conservés – sont calculés comme dans le cas d'un bâtiment neuf, suivant le référentiel E+C-. On notera que la fin de vie des éléments neufs est donc comptabilisée via les phases de fin de vie des FDES.

Fin de vie de la partie conservée

Enfin, la fin de vie de la partie conservée est sans impact dans la méthode A ainsi que dans la méthode B si le PCE est amorti. Sinon, la méthode B comptabilise la phase de fin de vie pondérée par le facteur DV_résiduelle/DVR. Dans la méthode C, la fin de vie des PCE conservés est comptabilisée de manière équivalente à celle des PCE neufs.

I. PRISE EN COMPTE DES ÉLÉMENTS RÉEMPLOYÉS EX-SITU PAR LES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Dans une opération de rénovation, les éléments conservés correspondent intrinsèquement à des éléments réemployés in-situ. Si un composant est déposé dans un bâtiment, il peut être réemployé dans un autre bâtiment, on parle alors de réemploi ex-situ.

Voici comment les trois méthodes d'ACV rénovation prennent en compte les impacts des composants réemployés ex-situ :

- méthode A : aucun impact ;
- méthode B : aucun impact si le composant est amorti, sinon impact calculé avec la notion d'amortissement. Si le composant n'est pas amorti, son impact est calculé au prorata de ce qu'il reste à vivre au PCE par rapport à sa DVR, et considéré comme transmis au nouveau propriétaire.
- méthode C : impacts liés à la fin de vie du composant et à son acheminement dans le nouveau bâtiment.

II. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

1. Méthode A

Prise en compte du réemploi

La méthode A encourage le réemploi in-situ et ex-situ.

Rénovation esthétique

La méthode A défavorise la dépose de composants non amortis quel que soit le gain énergétique associé à leur remplacement. Elle ne permet pas de défavoriser spécifiquement les rénovations esthétiques.

Comparaison avec une opération de déconstruction/construction (méthodologie ACV pour les bâtiments neufs)

La comparaison entre une opération de rénovation et une opération de déconstruction/construction n'est pas possible avec la méthode A (cf. annexe).

Cohérence avec l'ACV du bâtiment neuf de la période de référence précédente

Lors de la réalisation de l'ACV d'un bâtiment neuf, aucun amortissement n'est pris en compte (d'après la norme NF EN 15978). Effectivement, si la durée « vécue » par un produit n'a pas dépassé sa DVR, aucun mécanisme de calcul ne réduit l'impact associé au produit sur la période de référence du bâtiment. Une non homogénéité entre les méthodes d'évaluation dans le neuf et dans l'existant avec la méthode A pour les éléments déposés pourrait conduire à un double comptage des impacts sur une période de référence intégrant les deux études¹³.

Application de la méthode

L'application de la méthode A est facilitée par les nombreuses simplifications valorisant la conservation des PCE et le réemploi.

13 Même s'il est actuellement peu probable qu'un même bâtiment ait fait l'objet d'une ACV lors de sa phase de conception et lors de sa rénovation, il est primordial qu'à l'échelle d'un même bâtiment, les méthodologies appliquées soient homogènes afin de garantir à l'avenir la cohérence des impacts calculés sur l'ensemble de son cycle de vie (pouvant intégrer plusieurs études ACV et donc plusieurs périodes de référence).



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

2. Méthode B

Prise en compte du réemploi

La méthode B comptabilise des impacts liés à la fabrication et à la mise en œuvre des éléments réemployés s'ils ne sont pas amortis alors que ces impacts ont déjà eu lieu. Cependant, l'une des hypothèses associées à la prise en compte d'un amortissement dans les impacts environnementaux consiste à assimiler les données environnementales actuelles aux produits similaires mis en œuvre des années plus tôt. Une limite de cette méthode est donc la représentativité temporelle (mix énergétique) et technologique (procédés de fabrication) des impacts des éléments réemployés.

La méthode B pénalise le réemploi ex-situ de composants déposés « trop tôt » dans le bâtiment initial. La charge revient au bâtiment réemployant le composant alors que ce réemploi devrait être valorisé.

Rénovation esthétique

La méthode B défavorise la dépose de composants non amortis quel que soit le gain énergétique associé à leur remplacement. Elle ne permet pas de défavoriser spécifiquement les rénovations esthétiques.

Comparaison avec une opération de déconstruction/construction (méthodologie ACV pour les bâtiments neufs)

La comparaison entre une opération de rénovation et une opération de déconstruction/construction n'est pas possible avec la méthode B (cf. annexe).

Cohérence avec l'ACV du bâtiment neuf de la période de référence précédente

Comme pour la méthode A, une non homogénéité entre les méthodes d'évaluation dans le neuf et dans l'existant avec la méthode B pour les éléments conservés et déposés pourrait conduire à un double comptage des impacts sur une période de référence intégrant les deux études (cf. exemple détaillé dans l'Annexe 2.3).

Application de la méthode

L'application de la méthode B est complexe car de nombreuses informations sont à connaître : natures et quantités des éléments conservés (délicat à obtenir) et déposés (aisé à obtenir dans le cadre du suivi des travaux) mais également âges de ces éléments (complexe à obtenir car ces informations n'ont pas été capitalisées dans de nombreux cas).

Un outil d'estimation des quantités des éléments conservés et déposés est en test dans le cadre de l'expérimentation HQE Performance Économie Circulaire.

3. Méthode C

Prise en compte du réemploi

La méthode C tente de comptabiliser les impacts des éléments réemployés à partir de leurs impacts restants (éventuels remplacements, dépose et fin de vie).

Cette méthode, proposée à l'échelle ouvrage, est cohérente avec les approches à l'échelle produit (norme NF EN 15804+A1, FDES). Par exemple, l'acier issu du recyclage est considéré comme n'ayant « pas d'impact » lié à la mise à disposition de la matière première¹⁴. Pour favoriser le réemploi, il semble pertinent d'appliquer la même approche à l'échelle bâtiment et de ne pas compter d'impacts de production/mise en œuvre pour la partie conservée.

Rénovation esthétique

La méthode C ne permet pas de différencier les rénovations esthétiques des rénovations thermiques.

14 Il s'agit d'une application de la méthode des stocks : les impacts de la mise à disposition de la matière première (dépose, transport et traitement chez un ferrailleur sont alloués au produit initial). Le produit utilisant la matière recyclée assume les impacts de la transformation de la matière première, ici la refonte de l'acier issue du recyclage puis sa mise en forme.



Comparaison avec une opération de déconstruction/construction (méthodologie ACV de pour les bâtiments neufs)

La comparaison entre une opération de rénovation et une opération de déconstruction/construction est possible (cf. annexe).

Cohérence avec l'ACV du bâtiment neuf de la période de référence précédente

Ne pas comptabiliser les impacts associés à un amortissement de produits ayant moins vécu que leur DVR permet une meilleure homogénéité entre les méthodes d'évaluation dans le neuf et dans l'existant avec la méthode C et évite un double comptage des impacts sur une période de référence intégrant les deux études (cf. exemple détaillé dans l'Annexe 2.3).

Application de la méthode

Un audit pré-démolition permet d'accéder aux informations concernant les quantitatifs des PCE déposés. Comme pour la méthode B, les quantités conservées restent complexes à récupérer ; par contre, les dates de mises en œuvre des produits déposés et conservés ne sont pas nécessaires. Des données environnementales découpées par phase du cycle de vie doivent être utilisées pour pouvoir comptabiliser uniquement la fin de vie.

4. Remarque générale sur l'amortissement

La notion d'amortissement dans l'ACV des bâtiments en rénovation a notamment été pensée pour éviter que l'on démolisse des bâtiments trop récents. Une proposition méthodologique complémentaire est faite dans la suite du livrable : nous présentons ici un indicateur de performance de rénovation qui permettrait de pénaliser les rénovations dites « esthétiques ». (voir 3.1.3).

Il est également à noter que l'amortissement est basé sur une logique comptable permettant de définir « une valeur environnementale » absolue d'un bâtiment. Environnementalement amortir un impact ponctuel passé (comme la construction du bâtiment initial) n'a que peu de réalité physique. A construction équivalente, l'impact d'une opération de rénovation sera le même que le bâtiment ait 2 ans, 5 ans ou 20 ans.

5. Remarque générale sur les durées de vie et les scénarios de fin de vie

Les méthodologies d'ACV visent à caractériser les impacts associés à la mise en œuvre de produits ou équipements neufs. Pour y parvenir, elles reposent sur des hypothèses de durées de vie de référence, qui sont différentes des durées de vie en œuvre réelles (celles-ci étant notamment dépendantes des typologies d'opérations, des types de maîtres d'ouvrage, ainsi que du contexte local). Les scénarios de fin de vie sont également moyennés sur l'ensemble des opérations au niveau national.

Cette approche très standardisée des durées de vie et l'accès aux données, risquent de les rendre difficilement applicables à l'analyse de la fin de vie réelle de produits équipements déposés ou à l'analyse des composants d'ouvrage conservés lors d'une rénovation.

2.2.2. TEST DE LA MÉTHODE SUR LES PROJETS R1 ET R2

Les trois méthodes ont été testées sur deux projets utilisateurs issus du test HQE Performance Économie circulaire :

- R1, rénovation d'un bâtiment de bureaux de 30570 m² ;
- R2, rénovation d'un bureau de 70m² en RDC d'un immeuble.

Les deux analyses détaillées sont présentées en Annexe. L'application des différentes méthodes sur deux projets a permis de tirer des enseignements qualitatifs (différences de résultats selon la méthode utilisée et l'indicateur étudié) mais aussi un retour d'expérience méthodologique.

Le premier constat a été la nécessité distinguer deux durées de vie « résiduelles » :

- *DV résiduelle* = durée de vie résiduelle du composant conservé/réemployé après son premier cycle



de vie ($DV_{\text{cycle 1}}$) dans le bâtiment dont il est issu, par rapport à sa DVR. Cette durée permet de calculer l'amortissement si $DV_{\text{résiduelle}} > 0$

$$DV_{\text{résiduelle}} = \max(DVR - DV_{\text{cycle 1}}; 0)$$

- $DV_{\text{cycle 2}}$ = durée de vie du composant conservé/réemployé dans le nouveau bâtiment. Cette durée n'est pas forcément égale à $DV_{\text{résiduelle}}$. Pour les éléments de structure, on considère par exemple que $DV_{\text{cycle 2}} = PER$.

NB : Si un composant conservé a déjà atteint sa DVR dans le bâtiment initial, sa durée de vie résiduelle est nulle et donc si l'on fixe $DV_{\text{cycle 2}} = DV_{\text{résiduelle}}$, cela revient à renouveler, dès la rénovation, le composant. On a donc affaire à une incohérence méthodologique : le composant est dit conservé mais est considéré comme renouvelé dès le début de la période d'étude du bâtiment rénové.

Il nous a donc semblé intéressant de tester deux déclinaisons de la méthode B :

- **B Base** : $DV_{\text{cycle 2}} = DV_{\text{résiduelle}}$. Cela correspond à la méthode B telle que décrite aujourd'hui. Compte tenu de la remarque précédente, quand un produit conservé est amorti, la comptabilisation de son renouvellement revient en fait à considérer un composant neuf ; il n'y a donc pas de bénéfice environnemental à conserver un composant amorti dans cette méthode, à part le fait que l'on évite les impacts liés à sa dépose.
- **B Variante** : $DV_{\text{cycle 2}} = DVR$.

Concernant la méthode C, vu que l'outil actuellement disponible pour la mettre en œuvre (module Rénovation d'Elodie) ne permet pas de tester $DV_{\text{cycle 2}} = DV_{\text{résiduelle}}$ nous avons traité uniquement le cas $DV_{\text{cycle 2}} = DVR$.

Concernant les méthodes A et B, vu qu'aucun outil actuellement disponible ne permet de modéliser l'amortissement, nous avons adapté les quantités des composants conservés et déposés non amortis pour simuler leur amortissement.

La connaissance des éléments conservés, déposés et réemployés in-situ est assez complète pour les deux projets étudiés. Dans le cas du projet R2, pour les éléments conservés notamment – qui sont difficiles à quantifier – l'ensemble des lots de E+C- (à part les éléments sur la parcelle) sont décrits. La comparaison entre les méthodes fournit donc des différences plus significatives que dans les projets où seulement quelques éléments déposés, réemployés, mais surtout conservés, ont pu être estimés. Concernant le projet R1, peu d'éléments sont conservés et la plupart des éléments déposés sont amortis. Les données utilisées pour les éléments conservés n'étant pas toutes découpées en phase du cycle de vie, les différences sont moins marquées que pour le projet R2.

Même s'il est difficile de généraliser sur seulement deux cas d'étude, les tendances observées étant attendues et cohérentes, on peut tirer quelques conclusions :

- La mise en œuvre de la méthode A est la plus simple, les éléments conservés et réemployés n'ayant pas besoin d'être estimés. Les méthodes B et C sont plus complexes : la méthode C, car elle nécessite de connaître l'ensemble des éléments conservés, déposés et réemployés ; la méthode B car, même si elle ne nécessite de connaître que la nature et la quantité des éléments conservés et déposés non amortis, elle requiert la connaissance des années d'installation des différents éléments. Pour appliquer la méthode C, il faut également disposer de données environnementales découpées par phase du cycle de vie.
- Les résultats dépendent très fortement de la capacité à modéliser de façon exhaustive les éléments conservés et déposés et de la disponibilité des données environnementales adéquates. Sur l'indicateur réchauffement climatique, la différence maximale observée entre les méthodes est de 1,6% pour le projet R1 alors qu'elle est de 13% dans le projet R2. Sur cet indicateur, la différence entre les méthodes est généralement limitée. Il n'y a par exemple que 2% de différence entre les méthodes B base et C pour le projet R2.
- Les différences entre méthodes dépendent également du statut des composants. Si les composants conservés sont amortis, la différence sera surtout notable entre la méthode C et les autres. A l'inverse, si les composants conservés sont non amortis, la différence devrait surtout être notable entre la méthode A et les autres. Ceci s'explique majoritairement par le nombre de composants pris en compte dans chacune des méthodes selon leur statut (amorti ou non,



- DVR > ou < 50 ans). De façon générale, les impacts établis par la méthode A sont plus faibles que ceux de la méthode B eux-mêmes plus faibles que ceux de la méthode C.
- Pour l'ensemble des méthodes, les PCE conservés et déposés représentent une part limitée des impacts sur l'indicateur GWP. En effet, même avec une modélisation exhaustive des composants conservés (incluant notamment les fondations et la toiture) et déposés, ceux-ci représentent maximum 10% des impacts¹⁵. Les PCE installés lors de l'opération de rénovation représentent donc plus de 90% des impacts.
 - Une modélisation complète d'un bâtiment quant aux composants conservés, réemployés et déposés peut entraîner des différences significatives entre les méthodes ACV réno sur l'indicateur Déchets non dangereux éliminés. Une approche économie circulaire réalisée à partir des méthodes A ou B peut donc avoir pour conséquence de négliger une part importante des déchets générés (45% et 37% dans le cas du projet R2).

2.2.3. PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE POUR L'ACV EN RÉNOVATION

Synthèse des travaux sur les différentes méthodes d'ACV rénovation et manques identifiés

Nous avons étudié méthodologiquement et opérationnellement plusieurs méthodes d'ACV rénovation :

- la méthode A qui vise à favoriser la conservation des PCE, avec un impact nul pour les PCE conservés ou issus du réemploi ;
- la méthode B qui correspond à l'évaluation des impacts d'un bâtiment existant, avec une prise en compte des impacts au prorata de la durée de vie résiduelle via l'amortissement ;
- la méthode C qui correspond à l'évaluation des impacts d'une opération de rénovation jusqu'à la fin de vie du bâtiment rénové (éventuels renouvellements, fin de vie).

La comparaison entre les différentes méthodes d'ACV rénovation montre des écarts très variables selon la capacité des modélisateurs.trices à estimer les composants conservés.

De plus, la réalisation de ces ACV est très chronophage et la recherche d'informations est compliquée (notamment pour connaître les dates d'installation pour l'amortissement et connaître les quantités d'éléments conservés).

Les difficultés de compréhension méthodologique et de mise en œuvre des ACV fait finalement perdre de vue l'objectif de ces évaluations. Au niveau national, la SNBC fixe les objectifs suivants pour le bâtiment [1] :

- émissions de GES dues aux consommations d'énergie des bâtiments quasi nulles en 2050
- émissions de GES dues aux produits de construction et équipements non explicitées mais objectif de baisse de 80% pour l'industrie en général en 2050 ;
- consommations d'énergie correspondant au niveau BBC pour l'ensemble du parc en moyenne.

La rénovation doit donc permettre de diminuer drastiquement les émissions de GES et les consommations d'énergie des bâtiments.

L'objectif d'évaluation environnementale d'une opération de rénovation est avant tout de s'assurer de la pertinence énergétique et environnementale de l'opération de rénovation. Cette évaluation passe par la comparaison de deux scénarios :

- le bâtiment initial est conservé tel quel avec les mêmes composants (avec maintenance et renouvellement à l'identique des composants en fin de vie) et les mêmes vecteurs énergétiques ;
- le bâtiment est rénové, des composants neufs sont alors installés et les vecteurs énergétiques sont éventuellement modifiés.

Le calcul des impacts environnementaux des deux scénarios est réalisé sur une période d'étude fixée, notamment pour déterminer le renouvellement des composants et les impacts liés à l'exploitation. Finalement, la rénovation est pertinente si elle entraîne une baisse des impacts environnementaux entre le bâtiment initial et le bâtiment rénové.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Nous focalisons la comparaison sur les deux contributeurs les plus impactants et concernés par l'opération de rénovation : les contributeurs PCE et énergie.

	BÂTIMENT INITIAL	BÂTIMENT FINAL APRÈS RÉNOVATION
Contributeur Produits de construction et équipements	PCE_i	PCE_f
Contributeur Energie	NRJ_i	NRJ_f

Tableau 30 : Abréviations des contributeurs PCE et énergie avant et après l'opération de rénovation

La comparaison des scénarios sans et avec rénovation est illustrée dans le schéma ci-dessous.



Figure 31 : comparaison d'un bâtiment avec et sans rénovation

Une rénovation pertinente est une rénovation pour laquelle, sur une période d'étude donnée, les impacts du bâtiment final (après rénovation) sont inférieurs aux impacts du bâtiment initial qui serait conservé. Cela se traduit par l'équation suivante :

$$NRJ_i + PCE_i > NRJ_f + PCE_f$$

PCE_i correspond aux impacts des PCE à prendre en compte dans le bâtiment initial et correspond aux impacts des PCE à prendre en compte pour passer du bâtiment initial au bâtiment final via la rénovation. Comme illustré sur la figure, intègre donc à la fois les composants conservés du bâtiment initial, les composants déposés issus du bâtiment initial et les composants neufs installés lors de la rénovation (comprendre neufs comme installés dans le cadre de la rénovation, y compris des éléments réemployés). Le bâtiment initial quant à lui est constitué des éléments conservés et déposés du scénario de rénovation. Si, en première approximation, on néglige la maintenance et le renouvellement des composants du bâtiment initial, correspond aux PCE conservés et déposés. Nous avons donc :

$$PCE_f = PCE_i + PCE_{neufs}$$

L'équation se simplifie donc de la façon suivante :

$$PCE_{neufs} < NRJ_i - NRJ_f$$

Cette équation traduit le fait qu'une rénovation pertinente est une rénovation où les impacts liés aux nouveaux composants qu'on installe sont compensés par les économies d'énergie. Nous suggérons donc l'utilisation de l'indicateur de performance de rénovation suivant :

$$P_{réno} = \underbrace{NRJ_i - NRJ_f}_{\text{gains énergétiques}} - PCE_{neufs}$$

Pour mieux appréhender cet indicateur, regardons deux cas extrêmes :

- Dans une rénovation esthétique¹⁶, le gain énergétique sera nul alors que des PCE neufs sont installés, l'indicateur sera donc négatif ;
- A l'inverse, dans une rénovation thermique ambitieuse, la diminution des consommations d'énergie sera très importante, la diminution des impacts associés sera donc supérieure aux impacts liés aux nouveaux PCE et l'indicateur sera positif.

16 Rénovation esthétique (parfois appelée précoce) : travaux de rénovation réalisés dans un but de mise en cohérence avec les standards du marché, souvent réalisés suite au départ d'un locataire, sans objectif d'amélioration de la performance énergétique du projet. Cette pratique est courante dans le cadre de projets privés tertiaires.



L'indicateur est présenté de façon générale et pourrait être retranscrit sur l'ensemble des indicateurs de l'EN 15804 qui sont pertinents pour cette comparaison, c'est-à-dire les indicateurs pour lesquels les deux contributeurs sont significatifs. La priorité étant la lutte contre le réchauffement climatique et de façon à pouvoir s'inscrire dans les objectifs nationaux concernant les réductions de GES, l'indicateur le plus pertinent est l'indicateur de réchauffement climatique (kg CO₂ eq.). En complément, une analyse sur les consommations d'énergie peut également être utile. Dans ce cas, l'indicateur Utilisation totale des ressources d'énergie primaire (MJ) peut être utilisé.

Mise en œuvre de la méthode

Pour calculer l'indicateur de performance, les informations nécessaires sont les suivantes :

- Consommations d'énergie actuelles du bâtiment. Ces informations peuvent être obtenues via les factures d'énergie par exemple ;
- Consommations d'énergie du bâtiment rénové. Ces informations peuvent être obtenues par une simulation énergétique dynamique, ce type de calculs étant très courant pour une rénovation thermique.
- Quantités et natures des produits de construction et équipements installés lors de la rénovation. Comme pour la réalisation d'une ACV de bâtiment neuf, ces informations peuvent être obtenues via les DPGF par exemple.

Ces informations sont moins compliquées à obtenir que celles nécessaires à la réalisation des ACV rénovation. Elles sont bien maîtrisées par les acteurs (via les DPE, calculs SED et ACV de bâtiments neufs qui sont des pratiques de plus en plus courantes).

Dans le cadre du projet FBE, nous n'avons pas pu mettre en œuvre cette méthode puisqu'elle n'avait pas pu être anticipée et que nous ne disposions donc pas des éléments sur les consommations d'énergie des projets utilisateurs.

Cependant, cette méthode a pu être présentée dans le cadre du projet CEE Rénostandard auquel participe le CSTB. L'approche a été bien comprise par les acteurs et sa mise en œuvre n'a a priori pas posé de questions, ce qui est un indicateur de son caractère opérationnel.

Avantages de cette approche :

Cette approche d'évaluation de la rénovation présente plusieurs avantages :

- Elle permet de déterminer la pertinence environnementale d'une rénovation et de décourager les rénovations esthétiques. Une évaluation graduée est même possible entre les rénovations excellentes/bonnes/moyennes selon la valeur de l'indicateur ;
- Elle est simple à comprendre pour les acteurs via la retranscription d'un objectif clair et l'utilisation d'informations utilisées couramment ;
- Elle est opérationnelle car, par son caractère "relatif" (comparaison sans et avec rénovation), elle s'affranchit des difficultés méthodologiques en ne comptabilisant que les qui sont les plus faciles à modéliser.
- NB : Si seuls les impacts des PCE neufs sont comptabilisés, cela ne signifie pas que la dépose de composants n'est pas pénalisée. Au contraire, l'optimisation de la conservation des éléments est même implicitement contenue dans les prises en compte des impacts des PCE neufs. En effet, plus il y aura d'éléments conservés, moins il y aura d'éléments neufs et donc plus faibles seront les impacts des PCE neufs.

Inconvénients de l'approche et pistes de solution

Cette approche présente deux inconvénients (qui existent déjà au moins en partie dans les méthodes ACV rénovation) :

- Les éléments conservés et déposés étant omis de l'évaluation, les données collectées pour calculer l'indicateur de performance ne permettront pas d'avoir une approche sur le stock et les flux de matières. Il faudra compléter le recueil de données.



- Le périmètre n'englobe pas les cas de rénovations non thermiques où les composants de second œuvre sont objectivement arrivés en fin de vie. Pour ces bâtiments, la fonctionnalité n'est plus assurée (car le bâtiment ne peut plus être utilisé comme attendu), on ne peut donc comparer le bâtiment rénové avec le bâtiment non rénové, et une autre approche est nécessaire.

Dans les deux paragraphes suivants nous proposons des pistes pour répondre à ces deux inconvénients.

Perspectives pour étudier les flux de matières

Seule la méthode C permet d'appliquer directement une méthode sur le flux car elle est la seule à comptabiliser l'ensemble des produits conservés et déposés. L'inconvénient de l'impossibilité d'avoir une approche sur le stock et les flux de matière s'applique donc déjà aux méthodes A et B. La mise en œuvre de la méthode C a toutefois montré qu'il était difficile d'accéder aux quantités et natures des composants conservés.

Par conséquent, pour réaliser des études sur les flux de matières (type MFA), les méthodes ACV rénovation A, B et C ne représentent pas des outils/sources d'informations utilisables directement pour obtenir des résultats sur les flux. Il convient donc d'avoir recours à d'autres outils/méthodes permettant d'estimer le conservé (soit en aval de la réalisation de l'ACV pour les méthodes A et B, soit en amont pour la méthode C). Finalement, sur les études de flux, l'indicateur de performance a simplement le même inconvénient que les méthodes d'ACV rénovation. Les outils qui ont pu être développés en complément des méthodes ACV rénovation peuvent donc être aussi utilisés en complément d'une approche sur la performance de la rénovation.

Perspectives pour traiter le cas de rénovations esthétiques nécessaires

L'indicateur développé ci-dessus concerne les rénovations thermiques (quel que soit l'âge du bâtiment et de la dernière rénovation) et les rénovations de bâtiments dont les composants ne seraient pas arrivés en fin de vie. Mais si les éléments de second œuvre sont effectivement arrivés en fin de vie, il peut être admis de les remplacer sans pour autant réaliser une rénovation thermique. En effet, dans ce cas-là, une rénovation est nécessaire pour garantir la fonctionnalité du bâtiment. A première vue, l'indicateur de performance n'est alors pas adapté car il n'y aura pas de gain énergétique donc il sera forcément négatif alors que la rénovation est nécessaire.

Il s'agirait donc, pour les éléments effectivement arrivés en fin de vie et qu'il faudrait remplacer, de le faire en limitant au maximum les impacts. Pour ce cas, une approche « élément par élément » – inspirée de la RT existant par élément – pourrait donc être utilisée. Il faudrait construire, par catégorie de PCE, des seuils à respecter. Cette approche resterait toutefois compliquée, car elle sous-entend de pouvoir connaître l'âge de tous les produits déposés, ce qui en pratique est peu réaliste.

Etant donné le besoin de massifier les rénovations thermiques, l'indicateur de performance peut malgré tout être adapté. En effet, il offrirait deux lectures :

- l'indicateur étant négatif, il montrera bien la nécessité de réaliser aussi une rénovation thermique et pas seulement esthétique « à l'identique » ;
- selon la valeur de l'indicateur, il sera possible de valoriser les rénovations qui minimisent les impacts des PCE installés et celles pour lesquelles il n'y a pas de recherche de composants bas carbone.

Enfin, on peut aussi considérer que ces renouvellements en fin de vie correspondent simplement aux renouvellements nécessaires qui sont déjà pris en compte dans les ACV.

Remarques sur l'indicateur de performance

- La période d'étude pourrait être fixée à 50 ans qui est la durée utilisée dans E+C- et dans le label BBCA réno. Cette période d'étude ne semble toutefois pas nécessairement être la plus réaliste, dans la mesure où la durée de vie effective d'un bâtiment après une rénovation thermique pourra être très variable selon la typologie, la localisation et d'autres éléments variés



contextuels. Une compilation statistique sur les cycles de l'immobilier permettrait cependant d'extraire des tendances représentatives qui permettraient de définir certains scénarios de référence et de périodes d'études adaptées aux cas. La surévaluation de la durée de vie du bâtiment viendrait maximiser les gains énergétiques et fausser l'indicateur. Il n'existe pour le moment pas de données représentatives sur les cycles de l'immobilier suffisamment robustes pour définir les curseurs les plus adaptés, mais un arbitrage devra être réalisé sur ces durées d'étude pour le déploiement de la méthode.

- L'indicateur de performance peut être facilement adapté pour obtenir une durée de retour sur investissement carbone :

$$P_{\text{réno}} \text{ (en années)} = \frac{PCE_{\text{neufs}}}{\underbrace{RJ_i - NRJ_i}_{\text{gains énergétiques annuels}}}$$

NB : En cas de gains énergétiques nuls (rénovation purement esthétique), le retour sur investissement est infini.

2.2.4. SYNTHÈSE DES ANALYSES PORTANT SUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA RÉNOVATION

Objectif

L'objectif de cette partie était de réfléchir à l'évaluation environnementale d'une opération de rénovation pour favoriser les bonnes pratiques.

Méthodologie suivie

Pour cela nous avons procédé de la façon suivante :

- Etat des lieux des méthodologies d'ACV rénovation existantes
- Comparaison théorique des méthodes et analyse des inconvénients et avantages de chacune
- Application des trois méthodes identifiées à deux opérations de rénovation
- Analyse des résultats et retour d'expérience quant à la mise en œuvre des méthodes
- Proposition d'un indicateur de performance environnementale de la rénovation

Rappel des trois méthodes d'ACV rénovation étudiées

Les 3 méthodes se distinguent sur la prise en compte des impacts des produits de construction et équipements (PCE) mais comptabilisent de la même façon les contributeurs Énergie, Eau et Chantier. La comparaison des méthodes portent donc sur ce contributeur PCE :

- **Méthode A** : prise en compte des éléments **déposés non amortis**, les éléments conservés n'ont pas d'impact
- **Méthode B** : prise en compte des éléments **déposés et conservés non amortis**
- **Méthode C** : prise en compte de la **fin de vie** des éléments **déposés et conservés**

Application des trois méthodes, résultats et analyse

Les trois méthodes ont été appliquées à deux projets de rénovation de bureaux. Pour cela les données nécessaires sont les suivantes : quantité, nature et date de mise en œuvre des éléments conservés et déposés + quantité et nature des éléments neufs + DE découpées en phase du CdV

Les résultats sont les suivants :

- Grande variabilité selon la capacité à modéliser les éléments déposés et conservés et la disponibilité des données environnementales adéquates ;
- Nombre de composants pris en compte dépendant de leur statut (amorti ou non, DVR > ou < 50 ans) et croissant de la méthode A à la B puis C. Les impacts calculés par la méthode A sont donc plus faibles que ceux de la méthode B eux-mêmes plus faibles que ceux de la méthode C.

- Écart limité entre les méthodes sur GWP (2% entre méthodes B et C) ;
- Les éléments conservés et déposés représentent maximum 10% du GWP (6% + 4%)
- Les éléments mis en œuvre pendant l'opération de rénovation représentent plus de 90% du GWP
- Sur l'indicateur Déchets non dangereux éliminés, les écarts sont plus significatifs entre les méthodes. Risque de négliger les déchets avec méthodes A et B dans une approche économie circulaire.

Les analyses sont les suivantes

- Les méthodes ACV actuelles sont difficiles à mettre en œuvre du fait de l'accès aux données d'entrée (quantité et nature des composants conservés + données environnementales découpées par phase du cycle de vie) et de la disponibilité des outils (pas de logiciel ACV permet de modéliser l'amortissement)
- Les méthodes ACV actuelles reposent sur des hypothèses concernant les durées de vie et les scénarios de fin de vie moyens, ce qui les rend difficilement applicables à l'analyse des PCE conservés ou déposés sur un chantier spécifique ;
- Les impacts les plus importants sont liés aux PCE neufs et non aux PCE conservés et déposés. Les consommations d'énergie représentent l'autre poste le plus impactant¹⁷.

Indicateur de performance environnementale de la rénovation

Pour déterminer sur une rénovation est environnementalement performante, l'indicateur proposé est le suivant :

$$P_{\text{réno}} = \underbrace{NRJ_i - NRJ_f}_{\text{gains énergétiques}} - PCE_{\text{neufs}}$$

Les avantages de cet indicateur sont les suivants :

- Par son approche "relative" (comparaison sans et avec rénovation), l'indicateur proposé permet de s'affranchir de données relatives aux composants conservés et déposés;
- Les données nécessaires à son calcul étant couramment utilisées et plus facilement accessibles, l'approche est opérationnelle ce qui devrait permettre une massification de l'évaluation environnementale des opérations de rénovation
- L'indicateur permet d'identifier facilement les deux leviers majeurs (augmenter les gains énergétiques et limiter l'impact des PCE neufs) pour une rénovation performante

Perspectives quant à l'évaluation environnementale de l'existant

- Des travaux de recherche devraient être entrepris pour affiner les connaissances sur les durées de vie réelles des composants d'ouvrage, en fonction des différentes situations ;
- Les données sur les dates de mise en œuvre des composants sont aujourd'hui très peu disponibles et devraient être mieux capitalisées pour permettre des analyses en cycle de vie plus proche de la réalité. Cette capitalisation des données pourrait d'ailleurs être étendue aux données permettant d'optimiser le devenir après la première vie en œuvre (réemploi ou recyclage futur) ;
- L'optimisation de la conservation des éléments et la valorisation des produits, matériaux et déchets déposés doit être, au moins dans un premier temps, analysée avec d'autres outils (diagnostics déchets...).

¹⁷ Les consommations d'énergie n'ont pas été étudiées car traitées de la même façon dans les trois méthodes. Elles représentent environ le même impact que les PCE neufs [ALLIANCE HQE-GBC, 2018].

2.3. Modélisation de l'approvisionnement d'un composant issu du réemploi

Objectif : connaître l'impact environnemental du réemploi

De la même manière, plusieurs méthodes d'évaluation de l'intégration d'éléments issus de réemploi dans un projet de construction neuve ou de réhabilitation sont étudiées. Pour l'instant, dans la méthodologie ACV E+C-, la modélisation de composants issus du réemploi n'est pas encadrée. Ces méthodes sont ensuite testées sur deux opérations intégrant du réemploi : le projet R3 qui met en œuvre du plancher technique de réemploi (participant au test HQE Performance Économie circulaire, Icade) ainsi que la production de pavés béton de réemploi issus de la déconstruction des bâtiments de la Cité Gagarine (Est Ensemble).

2.3.1. LES DIFFÉRENTES MÉTHODOLOGIES

Les quatre approches différentes portées à connaissance des membres de l'enjeu B sont les suivantes :

- La méthode A qui ne comptabilise aucun impact pour les composants issus de réemploi. Cette méthode est portée par l'association BBKA ;
- La méthode B qui fait appel à la notion d'amortissement pour les composants issus de réemploi. Cette méthode est préconisée par l'Alliance HQE-GBC pour le test HQE Performance économie circulaire. La durée de vie restante du produit est considérée.
- La méthode C qui comptabilise les impacts de transport, mise en œuvre, de vie en œuvre et de fin de vie des produits issus de réemploi. La durée de vie restante du produit est considérée équivalente à la DVR de la FDES car le produit est soumis aux mêmes protocoles de validation qu'un produit neuf. Le transport entre le site de collecte, le site de stockage et reconditionnement et le chantier du projet sont pris en compte. Deux variantes sont envisagées pour cette méthode afin de permettre une approche simplifiée de la modélisation du process de préparation au réemploi.
- La méthode D qui nécessite une évaluation réelle de l'impact environnemental des produits issus du réemploi, en particulier des phases de déconstruction, et de préparation au réemploi. Une FDES spécifique peut être éventuellement réalisée.

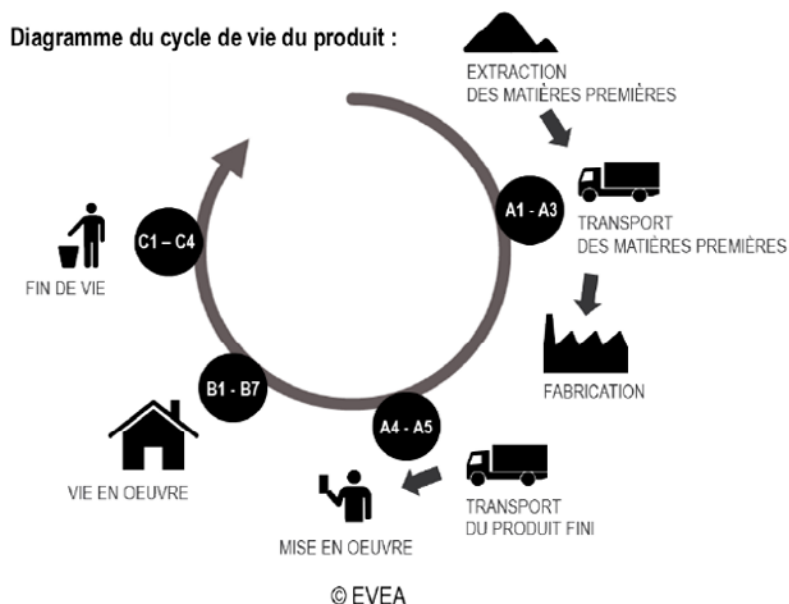


Figure 31 : Visualisation de l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit – source EVEA , FDES du plancher technique Mobius



2.3.2. DÉTAIL DE MODÉLISATION DES MÉTHODOLOGIES

$I_{\text{valorisé}}$ = impact environnemental du composant issu de réemploi

Méthode A : $I_{\text{valorisé}} = 0$

Méthode B : $I_{\text{valorisé}} = Q \times DE \times \frac{DV_{\text{résiduelle}}}{DVR}$

où :

- Q = quantité de PCE conservé ou déposés non amorti
- DE = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur toutes les étapes du cycle de vie du produit (incluant la fin de vie)
- $DV_{\text{résiduelle}}$ = durée de vie résiduelle du composant de réemploi
- DVR = durée de vie de référence du produit

Méthode C

$I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ éq neuf}} + 0,1 * I_{A3 \text{ éq neuf}} + I_{A4 \text{ éq neuf}} + I_{A5 \text{ éq neuf}} + I_{B \text{ éq neuf}} + I_{C \text{ éq neuf}}$

où :

- I_{A_i} = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur l'étape A_i du cycle de vie
- I_B = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur l'étape B du cycle de vie
- I_C = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur l'étape C du cycle de vie

Les valeurs I_{A_i} ... etc sont issues des données environnementales des PCE. Au vu du niveau de détail par étape du cycle de vie donné dans les Données Environnementales par Défaut publiées sur la plateforme INIES, nous proposons deux approches pour modéliser les phases de préparation au réemploi :

Méthode C1 : $I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ A3 éq neuf}} + I_{A4 \text{ éq neuf}} + I_{A5 \text{ éq neuf}} + I_{B \text{ éq neuf}} + I_{C \text{ éq neuf}}$

Méthode C2 : $I_{\text{valorisé}} = 0,1 * I_{A1 \text{ A3 éq neuf}} + I_{A4 \text{ éq neuf}} + I_{A5 \text{ éq neuf}} + I_{B \text{ éq neuf}} + I_{C \text{ éq neuf}}$

NB : une approche méthodologique spécifique aux produits bois et à la notion de carbone biogénique est proposée dans la suite du document (Paragraphe 1.1.2)

Méthode D

Le calcul est fait en fonction du process de chacun des composants de réemploi conformément à la norme EN15804. Il s'agit de réaliser une ACV du produit. Ce calcul peut faire l'objet de la publication d'une FDES.

2.3.3. FOCUS SUR LA PRÉPARATION AU RÉEMPLOI

La préparation en vue du réemploi consiste en « toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement »

Source : ADEME, FFB, 2014

En particulier, la préparation au réemploi peut avoir deux phases :

- La préparation peut avoir une première phase « mécanique lourde », avec les moyens et la méthodologie du démolisseur par exemple ;
- Et / ou la préparation peut avoir une phase « artisanale légère », avec les moyens et la méthodologie de l'artisan qui dépose, « re »-fabrique et pose le produit de réemploi.

Source : REPAR2, Bellastock, 2018



Parmi les méthodes décrites ci-dessus, deux permettent de modéliser ces étapes :

- La méthode C, par une approche simplifiée à partir des données environnementales des produits neufs
- La méthode D, par une approche détaillée d'évaluation de l'impact du process de préparation au réemploi

Les deux projets utilisateurs permettent de tester ces approches pour :

- Une phase « mécanique lourde » : il s'agit du process de découpe du béton pour réalisation de pavés de réemploi dans le cadre du projet Est Ensemble
- Une phase « artisanale légère » : il s'agit du process de récupération de dalles de plancher technique sur les chantiers de déconstruction, leur transport jusqu'aux ateliers de Mobius, et leur valorisation (ponçage, réparation).

2.3.4. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

6. Méthode A

Prise en compte du réemploi

La méthode A avantage la mise en œuvre de réemploi

Pas de prise en compte de l'impact des phases de préparation au réemploi et fin de vie.

Application de la méthode

Cette méthodologie est la seule qui soit applicable simplement à l'aide des logiciels d'ACV du marché conformes à la méthodologie E+C-, elle est la plus simple d'application pour les modélisateurs.

7. Méthode B

Prise en compte du réemploi

La méthode B comptabilise des impacts liés à la fabrication et à la mise en œuvre des éléments réemployés s'ils ne sont pas amortis. Des hypothèses ont été prises dans le cas de l'expérimentation HQE Performance ainsi que dans la modélisation détaillée plus loin pour le projet R3.

Dans une logique similaire à celle abordée en rénovation, elle permet de pénaliser la « dépose précoce » des composants en vue de leur réemploi. Cependant, cette dépose dite « précoce » dépend de la date de rénovation du bâtiment dont sont issus les composants et non de leur âge intrinsèque. Dans le cas où les composants sont amortis, la modélisation est équivalente à la méthode A et ne permet pas la prise en compte de l'impact des phases de préparation au réemploi et fin de vie

Application de la méthode

Il est difficile de connaître précisément la durée de vie résiduelle des matériaux, en particulier dans le cas de sourcing multiple (grande quantité de matériaux collectée provenant de différents chantiers de déconstruction).

De plus, pour une mise en œuvre dans un projet, les matériaux sont testés en laboratoire afin de respecter les performances résiduelles de produits neufs, l'estimation de la durée de vie restante ne représente pas la réalité physique.

Cette méthodologie est applicable à l'aide des logiciels d'ACV du marché en modifiant les quantités de PCE intégrées.

8. Méthode C

Prise en compte du réemploi

Cette méthode propose une première approche simplifiée de la modélisation de l'impact du réemploi,



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

cependant, elle ne permet pas d'évaluer l'impact lié à la collecte et à la déconstruction sélective des produits. Pour le seul produit pour lequel nous avons eu accès à la donnée (plancher technique) : cette approche simplificatrice reste pénalisante par rapport à la modélisation détaillée du processus de réemploi (méthode D).

Application de la méthode

Aujourd'hui, à notre connaissance les outils d'ACV conformes à la méthodologie E+C- ne permettent pas de modéliser une partie seulement de l'impact d'un PCE. Cependant, une évolution de ces outils est à prévoir. Il n'existe pas de données pour la collecte des éléments de réemploi. Des FDES « traitement » sont à venir pour modéliser la préparation en vue du réemploi. Ces FDES pourraient faciliter la modélisation « simplifiée » pour les produits courants de second œuvre issus du réemploi.

Les données environnementales par défaut telles que publiées aujourd'hui sur INIES ne permettent pas d'obtenir le détail d'impact sur toutes les phases Ai du cycle de vie du produit. Deux approches simplifiées ont été étudiées.

9. Méthode D

Prise en compte du réemploi

Il s'agit de la méthodologie la plus précise de modélisation d'impact du réemploi.

Application de la méthode

Cette méthode représente une forte implication des acteurs du réemploi ou des modélisateurs, à la fois en termes de temps et de coûts. Sa réalisation est pertinente lorsque l'acteur du réemploi est inscrit dans une logique de sérialisation.

Elle semble cependant indispensable pour les cas de réutilisation nécessitant des processus de préparation dits « mécaniques lourds » comme la découpe de béton.

2.3.5. APPLICATION AU PROJET C

Les quatre méthodes ont été testées sur un projet utilisateur issu du test HQE Performance Économie circulaire : R3 : la construction neuve d'un immeuble d'environ 30 000 m² SDP en Île-de-France.

Dans le cadre de ce projet, 20 445 m² de plancher technique issus de réemploi ont été mis en œuvre, permettant la mise en place d'une filière en Île de France par l'acteur Mobius.

Une FDES a été réalisée pour le produit plancher technique de réemploi.



Image 32 : photo de l'atelier de préparation au réemploi de Mobius, installé sur le site du chantier – Source : Mobius

L'analyse détaillée est présentée en Annexe.



L'application des différentes méthodes sur deux projets a permis de tirer des enseignements qualitatifs (différences de résultats selon la méthode utilisée et l'indicateur étudié) mais aussi un retour d'expérience méthodologique et pratique concernant la collecte de données du réemploi.

Le premier constat a été l'impossibilité d'extraire de l'ensemble des phases du cycle de vie pour les données environnementales dites « par défaut ». La méthode C est donc simplifiée avec deux approches de modélisation simplificatrices :

Une première méthode « optimiste », ne comptabilisant pas l'impact des phases A1 à A3 (soit de l'extraction des matières premières jusqu'à leur fabrication). L'impact du transport de l'usine au chantier ainsi que des phases mise en œuvre et vie en œuvre sont comptabilisées. Une seconde méthode comptabilise 10% des phases A1 à A3, pour représenter le process de préparation au réemploi.

$$\text{Méthode C1 : } I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ A3 \text{ \textit{ég} neuf}}} + I_{A4 \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{A5 \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{B \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{C \text{ \textit{ég} neuf}}$$

$$\text{Méthode C2 : } I_{\text{valorisé}} = 0,1 * I_{A1 \text{ A3 \text{ \textit{ég} neuf}}} + I_{A4 \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{A5 \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{B \text{ \textit{ég} neuf}} + I_{C \text{ \textit{ég} neuf}}$$

Les étapes A1 à A3 comprennent la récupération des dalles de plancher technique, le transport jusqu'aux ateliers de Mobius (A2) et la valorisation des dalles brutes amovibles

Un second constat a été l'impossibilité de connaître la $DV_{\text{résiduelle}}$ de l'ensemble des gisements de composants issus du réemploi. Nous avons alors pris une moyenne pour l'ensemble des gisements.

Il est difficile de généraliser seulement sur un cas d'étude, les tendances observées étant attendues et cohérentes, on peut tirer quelques conclusions :

- La mise en œuvre de la méthode A est la plus simple. Les méthodes B, C et D sont plus complexes : la méthode B car il est difficile en pratique d'obtenir « l'âge » de l'ensemble des gisements de réemploi, la méthode C car il faudrait déposer de données environnementales découpées par phase du cycle de vie, et enfin la méthode D nécessite la réalisation d'une FDES complète spécifique au produit de réemploi.
- La modélisation complète à l'échelle du bâtiment peut entraîner des différences significatives entre les méthodes (compte tenu du fait que les résultats ne concernent qu'un seul composant réemployé), en particulier sur les indicateurs réchauffement climatique et déchets dangereux. Pour les cas modélisés, les résultats des méthodes B et C sont relativement proches pour les indicateurs changement climatique et déchets non dangereux. Pour les modélisations réalisées résultats des méthodes A et D sont également très proches, ce qui peut s'expliquer par la Donnée Environnementale pour le produit plancher technique qui est une donnée par défaut. Également, nous pouvons supposer que le process de préparation au réemploi a été surévalué dans l'approche simplifiée

2.3.6. APPLICATION AU PROJET GAGARINE (EST ENSEMBLE)

Le projet de montage d'une filière de production de pavés en béton porté par Est Ensemble s'inscrit dans l'approche globale « d'étude pour l'identification des gisements de matériaux et de filières de valorisation des déchets du BTP sur Est Ensemble » décrite dans la partie contexte local du livrable.

Dans cette perspective, Cycles de Ville, co-traitant de Néo-Eco, en tant qu'AMO Réemploi pour Est Ensemble, a pour mission de réaliser l'analyse de cycle de Vie des éléments de pavés, produits par la déconstruction : Pavés produits par découpe, de certains éléments structurels des barres (principalement B et H) de la cité, pour être ensuite mis en œuvre sur en voirie piétonne du futur projet de renouvellement urbain prévu sur le site.

Cette approche s'inscrit pleinement dans la logique de la méthodologie D décrite ci-dessus. Ici, le process de préparation au réemploi inclut une phase mécanique lourde de découpe du béton (deux phases de découpe décrites dans le schéma ci-après).

Les produits ne seront pas remis en œuvre dans un projet de bâtiment mais de voirie, aussi la logique de comparaison est pour l'instant à l'échelle du produit : par rapport à un produit béton neuf et non à l'échelle de l'ACV bâtiment comme l'étude a pu être réalisée pour les projets R1, R2 et R3. L'étude à l'échelle des bâtiments reconstruits n'est à présent pas prévue.

Processus de production (jusqu'à mise en œuvre)

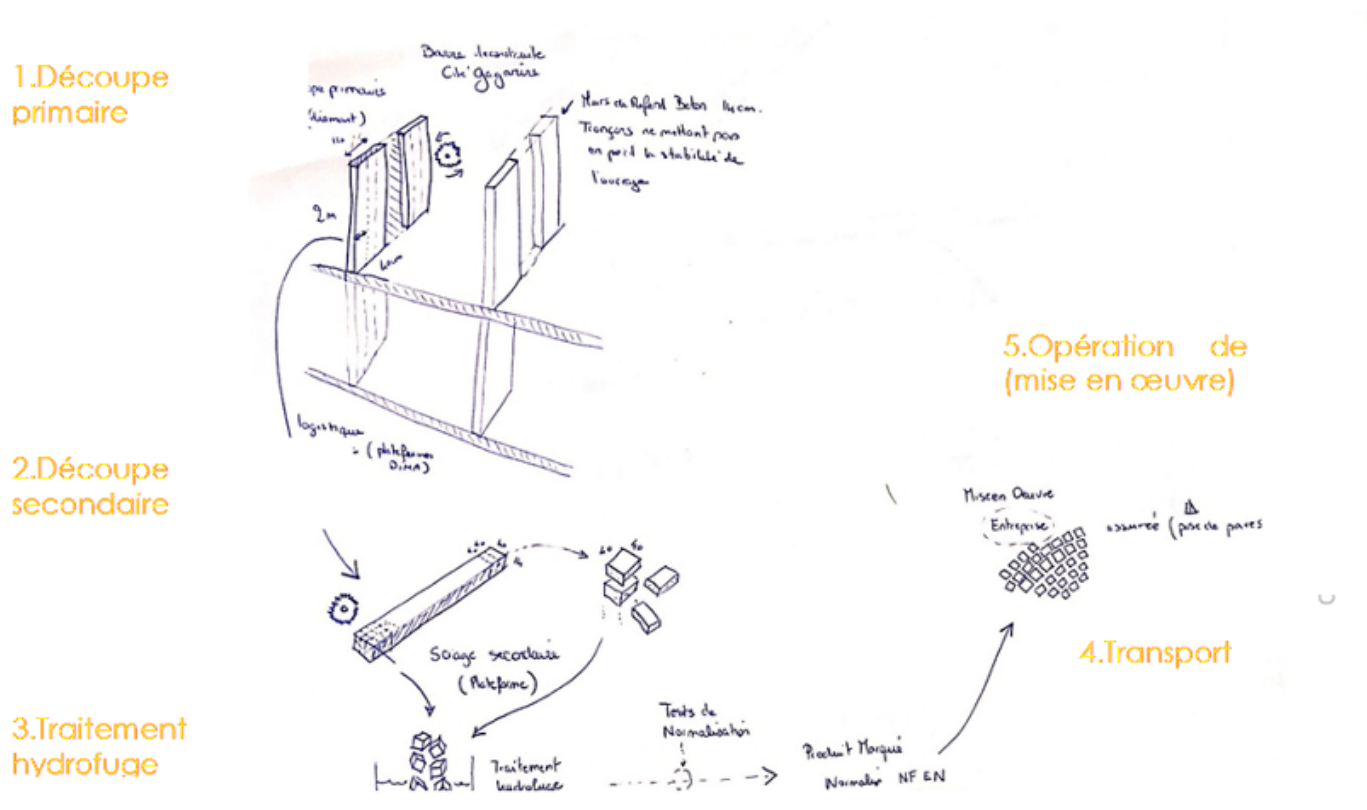


Figure 33 : Processus de production de pavés béton de réemploi - Source : Cycles de Ville

L'intégralité des réflexions sur le process de modélisation ACV, ainsi que les résultats sont présentés en annexe.

Il est à noter que nous parlons ici d'une modélisation spécifique qui ne rentre pas dans le cadre pur du réemploi, puisque nous avons ici un détournement d'usage et le process ne correspond pas au seul reconditionnement comme c'est le cas du plancher technique.

2.3.7. PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE POUR LA MODÉLISATION DU RÉEMPLOI

Nous avons étudié méthodologiquement et opérationnellement plusieurs méthodes d'ACV du réemploi :

- la méthode A qui vise à valoriser l'intégration de composants issus de réemploi (impact = 0) ;
- la méthode B qui correspond à l'évaluation des impacts « restants » du composant issu de réemploi (avec une vision comptable d'amortissement) ;
- la méthode C qui correspond à une modélisation de l'impact des phases transport, mise en œuvre et fin de vie ainsi qu'à une approche simplifiée pour modéliser le process de préparation au réemploi
- la méthode D qui correspond à une modélisation détaillée du process de préparation au réemploi, puis transport, mise en œuvre et fin de vie

La comparaison entre les différentes méthodes de modélisation ACV de composants issus du réemploi intégrés dans un nouveau projet fait ressortir des différences significatives en fonction des sources de données.

La réalisation d'une ACV détaillée du process de réemploi est très chronophage mais pour l'instant nécessaire pour collecter des données qui permettront d'affiner une approche simplifiée.

En pratique, l'intégration de composants issus de réemploi est techniquement et économiquement complexe. Il est nécessaire d'accorder une vigilance particulière à la faisabilité de la modélisation des bénéfices environnementaux liés à cette démarche afin d'éviter de rajouter une contrainte trop lourde pour les modélisateurs et opérateurs du réemploi, en particulier dans une phase d'émergence et de structuration des filières. Le risque étant de les décourager à se lancer dans la démarche.

Nous proposons deux approches permettant de répondre chacune à un objectif donné.

Approche incitative : Méthode A soit $I_{\text{valorisé}} = 0$

Partant du constat que l'ACV telle qu'envisagée dans la RE 2020 ne permet pas de modéliser tous les bénéfices liés au réemploi (impact économique, social, sur les filières locales et sur l'extraction des matières premières), cette approche vise à encourager les filières en cours de structuration.

Modélisation des impacts environnementaux : Méthode en deux temps

L'objectif poursuivi est de mesurer les impacts environnementaux afin soit de pouvoir comparer différentes solutions de composants issus du réemploi ou d'éco-concevoir une opération.

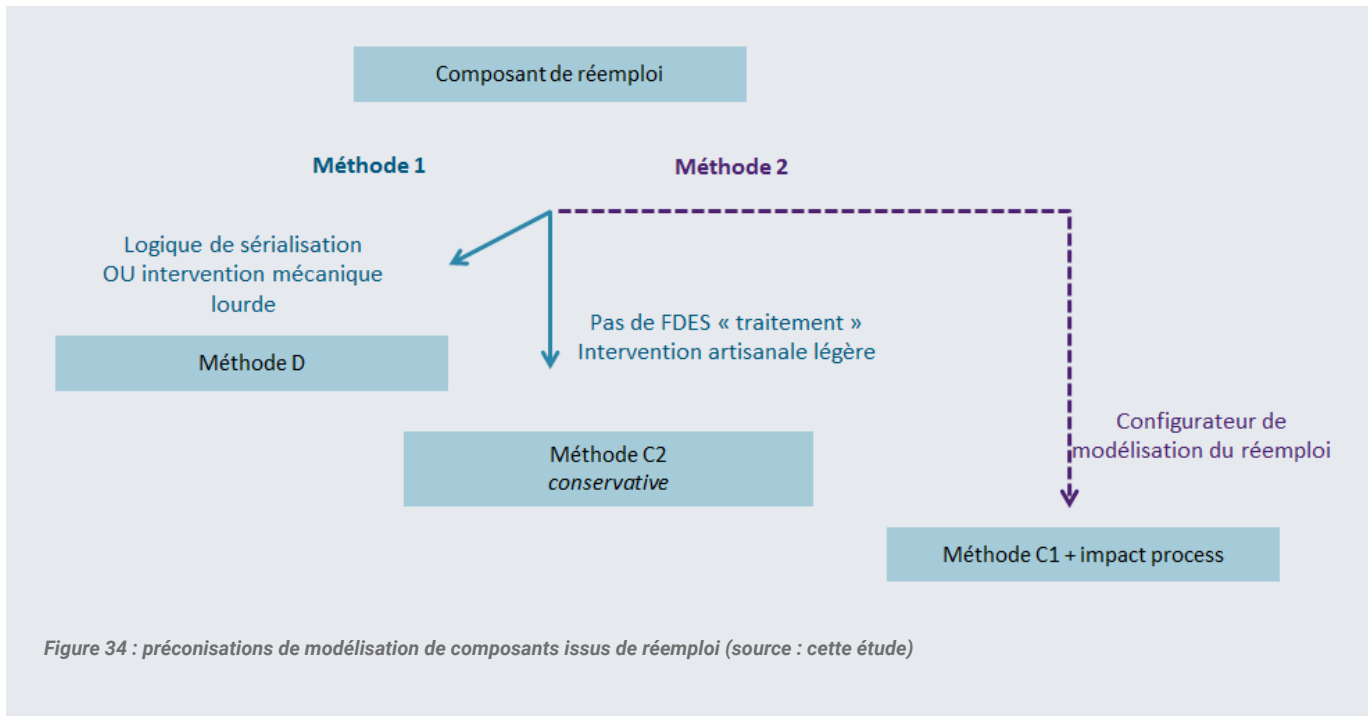
Cette méthode, basée dès que possible sur une modélisation détaillée lorsque l'opérateur est engagé dans une logique de sérialisation ou de création de produit ou le process de réemploi correspond à une intervention mécanique lourde. Dans un second temps, la méthode C2 pourrait être utilisée afin de modéliser au plus juste les impacts de fin de vie et commencer à approcher de manière conservatrice le bénéfice lié au réemploi pour les cas où le process correspond à une intervention artisanale légère.

Enfin, à plus long terme, nous espérons la réalisation de données environnementales liées au process et au transport des composants issus du réemploi qui pourraient s'appliquer de manière complémentaire à la méthode C1.

Méthode C1 : $I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ A3 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{A4 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{A5 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{B \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{C \text{ \textit{éq} neuf}}$

Méthode C2 : $I_{\text{valorisé}} = 0,1 * I_{A1 \text{ A3 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{A4 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{A5 \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{B \text{ \textit{éq} neuf}} + I_{C \text{ \textit{éq} neuf}}$

Un configurateur permettant de modéliser de manière personnalisée cet impact "process" de préparation au réemploi, associé à une modélisation du transport spécifique à la localisation du chantier pourrait être une bonne solution, et permettrait de lier modélisation de l'allongement du cycle de la matière et contexte local.



Remarque : Spécificité des produits bois issus du réemploi

Dans la version actuelle de la norme 15804, le carbone biogénique est comptabilisé dans les phases A1-A3 et ne peut pas être extrait des données issues des FDES. En appliquant la méthode de modélisation C nous arrivons à un impact sur l'indicateur GWP du produit issu du réemploi supérieur à l'impact du produit neuf.

A terme le carbone biogénique sera une donnée comptabilisée à part dans les FDES et nous pourrons aisément assurer son transfert dans le second cycle de vie du produit.

Proposition méthodologique transitoire :

Si $I_{A1 A3 \text{ éq neuf}} < 0$ alors nous considérons que le carbone biogénique est égal à $I_{A1 A3 \text{ éq neuf}}$

Méthode de modélisation : $I_{\text{valorisé}} = I_{A1 A3 \text{ éq neuf}} + I_{A4 \text{ éq neuf}} + I_{A5 \text{ éq neuf}} + I_{B \text{ éq neuf}} + I_{C \text{ éq neuf}}$

Remarque : un configurateur pour modéliser les impacts du transport permettraient de mieux valoriser un réemploi de bois réalisé localement



ÉCONOMIE CIRCULAIRE

DES BÂTIMENTS

3.

Conclusions



Si la démarche de réflexion et d'étude entre les deux enjeux s'est déroulée en parallèle, nous notons plusieurs enseignements communs à la fois aux acteurs du groupe recherche mais également auprès des projets utilisateurs : la nécessité de se baser sur des données environnementales spécifiques : adaptées au contexte local (Pirmil les Isles et l'idée d'un configurateur FDES spécifique pour le transport) et au process d'allongement du cycle de la matière inventé pour le projet (Est Ensemble pour l'ACV des blocs béton de réemploi, ou la FDES Mobius spécifique au plancher technique de réemploi). Un configurateur permettant de modéliser de manière personnalisée cet impact "process" de préparation au réemploi, associé à une modélisation du transport spécifique à la localisation du chantier pourrait être une bonne solution.

Les indicateurs extraits des ACV telles que pratiquées aujourd'hui et l'organisation des bases de données associées permettent difficilement de réaliser une étude de comptabilité des flux et stocks de matières.

Un autre constat commun aux deux axes de réflexion est qu'avant de rentrer dans une approche méthodologique détaillée, il est important de bien définir les objectifs poursuivis par l'étude. Concernant l'enjeu du contexte local, l'objectif poursuivi en phase amont peut être la planification territoriale ou régionale, l'identification des matériaux disponibles sur un territoire, jusqu'aux phases plus opérationnelles avec un objectif d'incitation à l'utilisation de la ressource locale ou bien le suivi d'une opération en phase chantier. Concernant l'allongement du cycle de la matière et plus généralement l'ACV, plusieurs objectifs peuvent également être poursuivis, et leur niveau de précision et la méthodologie adoptée varieront en fonction de ces objectifs et de la phase à laquelle est réalisée l'étude : comparer plusieurs scénarios de rénovation ou démolition/reconstruction pour une même opération, comparer deux scénarios de rénovation, évaluer l'impact environnemental d'une solution de manière la plus précise possible assurer un suivi de l'impact environnemental d'une opération dans le temps, ou encore distinguer les "bonnes pratiques" de conception.

Les résultats et propositions méthodologiques sont synthétisés dans chaque partie pour la notion de contexte local, et de modélisation des impacts environnementaux de la rénovation et du réemploi (voir **encadrés**).

Enfin, les initiatives d'opérations pilotes ou d'études permettant d'étoffer les données à disposition se multiplient. Capitaliser ces données pour pouvoir alimenter les futures méthodologies nous semble indispensable



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

4.

Glossaire



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

ACV

Analyse de Cycle de Vie

PCE

Produits de Construction et Équipements

FDV

Fin de Vie

DVR

durée de vie de référence mentionnée dans les FDES et les PEP (aussi appelée DVT soit durée de Vie typique)

Durée de vie résiduelle : la durée de vie résiduelle correspond à la différence entre la DVR de l'élément et sa durée de vie déjà réalisée dans le bâtiment soit DV résiduelle = DVR – DV Réalisée

PER

Période d'étude de référence : il s'agit de la durée d'étude pour laquelle l'Analyse de Cycle de Vie est réalisée. Pour tous les bâtiments, il s'agit d'une donnée conventionnelle prise égale à 50 ans

RÉNOVATION ESTHÉTIQUE (PARFOIS APPELÉE PRÉCOCE)

travaux de rénovation réalisés dans un but de mise en cohérence avec les standards du marché, souvent réalisés suite au départ d'un locataire, sans objectif d'amélioration de la performance énergétique du projet. Cette pratique est courante dans le cadre de projets privés tertiaires

PRÉPARATION EN VUE DU RÉEMPLOI

toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement

Source : ADEME, FFB, 2014

En particulier, la préparation au réemploi peut avoir deux phases :

- La préparation peut avoir une première phase « mécanique lourde », avec les moyens et la méthodologie du démolisseur par exemple ;
- Et / ou la préparation peut avoir une phase « artisanale légère », avec les moyens et la méthodologie de l'artisan qui dépose, « re »-fabrique et pose le produit de réemploi.

Source : REPAR2, Bellastock, 2018

FDES

Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

5.

Bibliographie

Prise en compte du contexte local

- **Abibois.** (2015). *BOIS d'ici transformé par les scieurs bretons*. 63 p.
- **Alizert L., Bertrand G., Barthélémy F., Colin S.** (2009). *Inventaire des carrières d'approvisionnement des cimenteries en France métropolitaine*. Rapport BRGM RP-56986-FR, 33 p., 6 fig., 7 tab.
- **Alliance HQE-GBC.** (2020). *Test HQE Performance Economie Circulaire : quels résultats ?*
En ligne : <http://www.hqegbc.org/wp-content/uploads/2020/07/S%C3%A9quence-2.pdf>
- **AQC.** (2009). *L'évolution des parts de marché des produits et matériaux de construction*. Observatoire de la qualité de la construction.
- **ARENE Ile-de-France et ICEB.** (2012). *L'énergie grise des matériaux et des ouvrages*. Les guides Biotech.
- **Augiseau, V.** (2017). *La dimension matérielle de l'urbanisation. Flux et stocks de matériaux de construction en Ile-de-France*. Thèse de doctorat. Université Panthéon-Sorbonne-Paris I. 554 p.
- **Augiseau, V.** (2019). « Utiliser les ressources secondaires de matériaux de construction : contraintes et pistes d'action pour des politiques territoriales », *Flux* n° 116-117 : 21-36.
- **Augiseau, V.** (2020). Économie circulaire et construction, in Delchet-Cochet, K. (dir.). 2020. *Economie circulaire, de la lutte contre le gaspillage à la création de valeur*, Editions ISTE (sous presse)
- **Augiseau, V., Barles, S.** (2017). « Studying construction materials flows and stock: A review », *Resources, Conservation and Recycling* 123: 153-164.
- **Ayres, R. U., Simonis, U. E.** (1994). *Industrial metabolism: Restructuring for sustainable development*. United Nations Univ. 376 p.
- **Baccini, P., Brunner, P. H.** (1991). *Metabolism of the Anthroposphere*. Heidelberg, Springer-Verlag. 157 p.
- **Bahers, J. B., Durand, M., & Beraud, H.** (2017). « Quelle territorialité pour l'économie circulaire? Interprétation des typologies de proximité dans la gestion des déchets », *Flux* (3): 129-141.
- **Bâti Etudes.** (2008). Chiffres marché 2008, in CIM béton, CERIB, FIB, SNBPE. 2009. *Qualité environnementale des bâtiments BBC. Apports des systèmes constructifs en béton*. Support de présentation réalisée en octobre 2009.
- **Batirama** (2011). *Ardoises naturelles : une production française limitée mais très prisée*. Dernière consultation en aout 2020.
<https://www.batirama.com/article/1654-ardoises-naturelles-une-production-francaise-limitee-mais-tres-prisee.html>
- **Batirama.** (2012). *Les ciments français contre le « dumping » des importations*.
En ligne : <https://www.batirama.com/article/3644-les-ciments-francais-contre-le-dumping-des-importations.html>
- **Bazzana, M., Schiopu, N., Monfort Climent, D., Sement, N., Bonnet, R.** (2019). *OVALEC, contextualiser la construction*. L1.4. Rapport de synthèse final.
- **Beaurain, C., Brullot, S.** (2011). « L'écologie industrielle comme processus de développement territorial: une lecture par la proximité ». *Revue d'Economie Regionale Urbaine* (2): 313-340.
- **Bellastock.** (2018). Identification des freins réglementaires et normatifs possibles sur le réemploi d'éléments de construction dans le projet Métabolisme urbain. Articulation envisageable avec le travail consultatif engagé autour de la loi Elan. Note de **Bellastock**. 30 mai 2018, in Bellastock, Albert & Compagnie, Auxilia, Recovering, Le Phares, CSTB, Encore Heureux, Halage, BTP Consultants, *Bilan technique et stratégique. An 1 de la phase opérationnelle du projet Métabolisme urbain. 2017-2018*, p. 383-392.
- **Bellastock, Albert & compagnie, Auxilia, Recovering, Le Phares, CSTB, Encore Heureux, Halage, BTP Consultants.** (2018). *Bilan technique et stratégique. an 1 de la phase opérationnelle du projet métabolisme urbain. 2017-2018*. 450 p.

- **Bergogne, I., Laurenceau, S., Lemagnant, M., Louerat M.** (2019). *Estimation of building waste flows and adequacy with resources*. CSTB.
- **BIO by Deloitte.** (2015). *Bilan national du recyclage 2003-2012. Rapport final*, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME.
- **Blot, F., Milian, J.** (2004). « "Ressource", un concept pour l'étude de relations éco-socio-systémiques. Montagnes méditerranéennes et développement territorial », in Institut de géographie alpine, 2004, n° spécial 10 ans du CERMOSEM, *La notion de ressource territoriale*, pp.69-73.
- **Bourrelief, P. H., & Diethrich, R.** (1989). *Le mobile et la planète, ou, L'enjeu des ressources naturelles*. Economica.
- **Bribián, I. Z., Capilla, A. V., & Usón, A. A.** (2011). « Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential ». *Building and environment* 46(5): 1133-1140.
- **Bringezu, S.** (2002). « Towards sustainable resource management in the European Union », *Wuppertal papers* (121). 50 p.
- **Brunner, P. H.** (2011). « Urban mining, a contribution to reindustrializing the city », *Journal of Industrial Ecology* 15(3): 339-341.
- **Carré, C., Chartier, M.** (2002). « La gestion d'une ressource non renouvelable : entre gestion durable et aménagement des nuisances, le cas des granulats alluvionnaires en Île-de-France », *Annales de Géographie* 111(626) : 406-418.
- **CGDD - SOES.** (2013). *Le cycle des matières dans l'économie française*, Repères. 56 p.
- **CGDD-SDES.** (2018). *Le recyclage des déchets produits par l'activité de BTP en 2014*, Datalab. 51 p.
- **Circle Economy, DGBC, Metabolic, SGS Search, REDEVCO Foundation.** (2018). *A framework for circular buildings. Indicators for possible inclusion in BREEAM*. 26 p.
- **CitéSource et Neo-Eco.** (2019). *Etude d'identification des gisements de matériaux et de filières de valorisation des déchets du BTP. Lot 2 : Identification des gisements de matériaux et foncier temporaire sur le territoire d'Est Ensemble et production d'outils de suivi cartographiques*. 42 p.
- **Collectif des chercheurs d'Aussois.** (2015). *Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie*. CNRS Éditions via OpenEdition.
- **Conteville, L., Den Hartigh, C.** (2009). *Les éco-matériaux en France : Etat des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements*, Les Amis de la Terre.
- **CTICM.** (2016). *FDES. Poutrelle en acier utilisée comme élément d'ossature (poteau, poutre, lisse, solive, panne ...)*. 17 p.
- **CTMNC** (2016). *Déclaration Environnementale de Produit (DEP). Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de la tuile canal et de la tuile plate de terre cuite*.
- **Damas, O., Coulon, A.** (2016). *Créer des sols fertiles : Du déchet à la végétalisation urbaine*. Editions Le Moniteur.
- **Debacker, W., Manshoven, S.** (2016). *D1 Synthesis of the state-of-the-art. Key barriers and opportunities for materials passports and reversible building design in the current system*.
- **De Larrard, F., Colina, H** (dir.). (2018). *Le béton recyclé*. Les collections de l'Ifsttar - ouvrages scientifiques. 791 p.
- **Den Hartigh, C.** (2010). *Développer les filières courtes d'écomatériaux - Guide à destination des collectivités territoriales*, Les Amis de la Terre (éd).
- **Dessandier, D., Colin, S.** (2016). « Un outil de connaissance de l'activité extractive en France: la base nationale de données sur les carrières », *Resources & Innovative Geology (RIG 2016)*.
- **DRIEE, IAU ILE-DE-FRANCE, UNICEM.** 2017. *Granulats en Île-de-France. Panorama régional*. 76 p.
- **DRIRE Haute-Normandie.** (1999). *Schéma interrégional d'approvisionnement du Bassin parisien en matériaux de construction à l'horizon 2015*.

- **Dupont, P.** (1984). « Méthodologie d'approvisionnement en granulats d'un grand centre urbain : Paris », *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur* n°29.
- **Elementarium.** (2020). *Aciers*. Dernière consultation en août 2020. <https://www.lelementarium.fr/product/aciers/>
- **Elementarium.** (2020). *Verres*. Dernière consultation en août 2020 <https://www.lelementarium.fr/product/verres/>
- **Emelianoff, C.** (2007). « La ville durable : l'hypothèse d'un tournant urbanistique en Europe », *L'Information géographique*, N° 71
- **Esin, T.** (2007). « A study regarding the environmental impact analysis of the building materials production (in Turkey) », *Building and Environment* 42: 3860-3871.
- **Espaces Ferroviaires.** (2020). Hébert. *Quartier résilient, ouvert et intelligent*.
En ligne : https://res.cloudinary.com/espace-ferroviaire/image/upload/H%C3%A9bert/Espaces-Ferroviaires_H%C3%A9bert_FR.pdf
- **Est Ensemble.** (2017). *Référentiel pour un aménagement durable du territoire. Livre technique*. 87 p.
- **Est Ensemble.** (2018). *Etude d'identification des gisements de matériaux et de filières de valorisation des déchets du BTP sur Est Ensemble. Cahier des clauses techniques particulières (C.C.T.P.)*. 39 p.
- **FCBA** (2014). *Mémento 2014. Supplément spécial 5th Forest Engineering Conference*.
- **FCBA** (2018). *FDES Charpente industrielle fabriquée en France*.
- **FCBA** (2018). *FDES Charpente traditionnelle 100% résineux fabriquée en France*.
- **FCBA.** (2018). *FDES. Charpente traditionnelle 100% résineux fabriquée en France*. 9 p.
- **FCBA** (2020). *FDES Fenêtre et porte-fenêtre double vitrage, fabriquée en France, en Bois tropicaux provenant d'Afrique, d'Amérique du Sud ou d'Asie du Sud Est*.
- **FIB.** (2017). *Chiffres clés de l'industrie du béton*. En ligne : <https://www.fib.org/industrie-du-beton-chiffres-cles/>
- **Gély, J. P.** (2014). Du centre carrier au centre urbain, stratégie d'approvisionnement en pierres d'appareil des chantiers de construction : l'exemple du Bassin parisien, in Lorenz (J.) dir., Blary (F.) dir., Gély (J.-P.) dir. *Construire la ville. Histoire urbaine de la pierre à bâtir*, actes de congrès, Tours 2012, Paris : Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques. p. 61-82
- **Ghyoot, M.** (2014). *Le concepteur et les matériaux de construction. Éléments de réflexion pour une reconfiguration des circuits de l'économie matérielle par les pratiques architecturales contemporaines*. Thèse de doctorat. Université Libre de Bruxelles.
- **Gilly J.-P., Torre A. (dir.)**. (2000). *Dynamiques de proximité*, Paris : Éditions L'Harmattan.
- **Graedel, T. E.** (2011). « The prospects for urban mining », *Bridge* 41(1) : 43-50.
- **IAURIF.** (2003). « Le SDRIF et la ressource en matériaux », *Note Rapide sur le bilan du S.D.R.I.F.* n°325. n. p.
- **Infociments** (2018). *L'essentiel*. En ligne : <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/pdf/SFIC2018-chiffres-cles.pdf>
- **INSEE.** (2009). *Les fournisseurs de la construction en chiffres*. Edition 2009. 33 p.
- **Interchanvre.** (2017). *Plan filière de l'interprofession du chanvre*.
- **James, O.** (2010). « Même le ciment se délocalise ! », *L'Usine nouvelle*, 18 mars 2010.
En ligne (page consultée le 21/01/2015) : <http://www.usinenouvelle.com/article/meme-le-ciment-se-delocalise.N127984>
- **Kébir, L., & Crevoisier, O.** (2004). « Dynamique des ressources et milieux innovateurs », in Ressources naturelles et culturelles, milieux et développement local (pp. 261-290). GREMI et EDES, Presses universitaires de Provence.

- **Kleeman F., Lederer J., Rechberger H. et Felner J.** (2016). « GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings ». *Journal of Industrial Ecology* 21, N2.
- **Knauf** (2017). *FDES Plaque de plâtre Diamant 12,5*
- **Knauf Insulation** (2017). *FDES Laine de verre ECOSE Acoustilane 035 100 mm*
- **Lacoste, Y.** (1957). « L'industrie du ciment », *Annales de Géographie* t. 66, n°357: 411-435.
- **Lajarge, R., Pecqueur, B., Landel, P.-A., Lardon, S.** (2012). *Ressources territoriales : gouvernance et politiques publiques*.
- **Lawrence, M.** (2015). « Reducing the environmental impact of construction by using renewable materials », *Journal of renewable materials* 3(3): 163-174.
- **Lebert, A., Lasvaux, S., Grannec, F., Nibel, S., Achim, F., Schiopu, N.** (2013). *Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Analyse statistique. Action 22. Rapport final de recherche du CSTB pour la DHUP*. 235 p.
- **Les Echos** (2014). *Le leader mondial Cupa se bat contre le déclin de l'ardoise en France*. En ligne (consulté le 2 août 2020): <https://www.lesechos.fr/2014/03/le-leader-mondial-cupa-se-bat-contre-le-declin-de-lardoise-en-france-296194>
- **Les Echos.** (2019). *Cem'In'Eu, la start-up industrielle qui s'attaque au marché du ciment*. En ligne: <https://www.lesechos.fr/pme-regions/pays-de-la-loire/cemineu-la-start-up-industrielle-qui-sattaque-au-marche-du-ciment-1028466>
- **Les Industries du Plâtre.** (2009). *L'origine du plâtre, le gypse*. En ligne : <https://www.lesindustriesduplatre.org/origine-platre-gypse.html>
- **Ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales.** (2019). *Matériaux de construction biosourcés et géosourcés*. En ligne (consulté le 13/07/2020): <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/materiaux-de-construction-biosources-et-geosources>
- **Nantes Métropole Aménagement.** (2020). *Réponse au questionnaire écrit pour l'atelier B FBE*.
- **Neo-Eco.** (2019). *Hébert – Déconstruction Innovante. Rapport de pré-audit*. 27 p.
- **Nomadéis** (2017). *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits biosourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois). Etat des lieux économique du secteur et des filières*.
- **Obras, D'ici là, Artelia, ZEFCO, Biotec, BURGEAP, CEBTP, RR&A, Nantes Métropole Aménagement.** (2019). *Le projet de Pirmil – les Isles*. 1er octobre 2019, Nantes. En ligne : <https://fr.calameo.com/read/005444786cc507a25f0c1>
- **Observatoire BBC.** (2018). *Les bâtiments Effinergie+ et Bepos Effinergie 2013. Retour d'expérience*. 47 p.
- **Omont, L.** (2012). « La filière bois en Ile-de-France : un fonctionnement qui dépasse les limites régionales », *A la page* n°394. INSEE. n. p.
- **Ouatéco** (2019). *FDES Ouate de cellulose en vrac Mise en œuvre par soufflage Epaisseur 335 mm*.
- **Perron, L., Janin, C.** (2014). *Valoriser les ressources territoriales : des clés pour l'action. Guide méthodologique*. 98 p. En ligne : https://www.mountainwilderness.fr/IMG/pdf/valoriser_les_ressources_territoriales.pdf
- **Pierre du Sud.** (2019). *FDES Mur en pierre du midi*.
- **PIPAME.** (2012). *Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*. 200 p.
- **PIPAME.** (2016). *Marché actuel et offre de la filière minérale de construction et évaluation à échéance 2030. Rapport final*. En ligne: https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/Industrie/2016-11-Filiere-minerale-construction-Rapport-pipame.pdf
- **Placo Saint-Gobain.** (2016). *FDES Placomur DuoPass 3.55-130*
- **Placo Saint-Gobain.** (2018). *FDES Caroplate Standard/Carreau de plâtre*

- **Raffestin, C.** (1980). *Géographie économique du pouvoir*. Paris, Librairies techniques (LITEC).
- **RDC Environment, AJI-Europe.** (2014). *Positionnement et compétitivité des industries de recyclage en France*. Rapport d'étude pour le compte de l'ADEME, du Ministère du Redressement Productif (DGCIS) et du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (DGPR).
- **RDC Environment, Eco BTP, I Care & Consult.** (2016). *Identification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction*, Rapport d'étude pour le compte de l'ADEME.
- **Routes de France.** (2020). *L'état de la route 2020*. En ligne : https://www.routesdefrance.com/wp-content/uploads/RDF2020_juin2020_VF.pdf
- **Rouveau L., Michel P., Serrand M., Monfort Climent D., Jayr E., Papinot, P.E.** (2012). *Analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire (tâche 4.2)*.
- **Royon, M.** (1985). « Compétitivité des producteurs de matériaux de construction et dysfonctionnement dans la distribution », *Revue d'économie industrielle* 32(2e trimestre) : 74-85.
- **SALONI.** (2018). *FDES : carreaux de grès céramique BIII 8,3 mm*.
- **SESSI.** (2007). *Les fournisseurs de la construction en chiffres. Edition 2007*. 34 p.
- **Simonetti, J. O.** (1977). « Réflexions sur l'industrialisation de la construction et la production du bâti », *Norois* 96(1): 561-572.
- **Stephan, E.** (2016). *Comparaison des impacts environnementaux de maisons individuelles avec des systèmes constructifs différents*. 24 novembre 2016, Toulouse.
- **Terreal.** (2017). *FDES Brique monolithe isolée (BMI) 30*.
- **Torre, A., Beuret, J.-E.** (2012). *Proximités territoriales*, Paris : Economica.
- **Treize Développement et Pöyry SAS.** (2011). *Analyse technico-économique de trente-neuf plateformes françaises de tri/valorisation des déchets du BTP*. 26 p.
- **UNICEM, SNBPE.** (2019). *L'industrie française du béton prêt à l'emploi. Edition 2019* (données 2017).
- **UNICEM, SNROC.** (2019). *L'industrie française des roches ornementales et de construction. Edition 2019* (données 2017). En ligne : http://www.snroc.fr/fichiers/doc-2019-chiffres-snroc-2017_1552658242.pdf
- **UNICEM, UNPG.** (2018). *L'industrie française des granulats. Edition 2017/2018*. Données 2016. En ligne : <http://www.unicem.fr/wp-content/uploads/depliant-unpg-chiffres-2016.pdf>
- **UNPG.** (2012). *Situation, enjeux et perspectives du transport et de la distribution des granulats*. 27 p.
- **UNPG.** (2013). *L'industrie française des granulats en 2013*. n.p.
- **Vernus, E., De Cazenove, A.** (2011). *Déchets de démolition et déconstruction : gisements, caractérisations, filières de traitement et valorisation*, Rapport d'étude n°09-0139/1A pour RECORD.
- **Vidal de La Blache, P.** (2015). « Les matériaux de construction », in *Principes de géographie humaine : Publiés d'après les manuscrits de l'auteur par Emmanuel de Martonne*. Lyon : ENS Éditions.
- **Vincent, M.** (1985). « Les secteurs de la construction, un panorama des analyses récentes et des voies de recherches », *Revue d'économie industrielle* 32 (2ème semestre): 86-109.
- **Wienerberger.** (2017). *Déclaration Environnementale de Produit (DEP) Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) De la brique PoroTherm GRF 20 Th+*
- **ZEFCO.** (2020). *Point d'étape. Zoom modes constructifs et filières locales*. 54 p.

Allongement du cycle de la matière

- **ALLIANCE HQE-GBC**, Guide Pratique ACV Rénovation, *Pour évaluer la performance environnementale des bâtiments rénovés et comparer leurs niveaux avec E+C-*, 2018
- **ALLIANCE HQE-GBC**, *Regard croisé des méthodes Addendum E+C- versus Label BBCA*, 2019
- **ALLIANCE HQE-GBC**, *Bâtiments rénovés au regard de E+C- et de l'économie circulaire*, 2018
- **BENOIT J, SAUREL G, BILLET M, BOUGRAIN F, LAURENCEAU S, ADEME, BELLASTOCK, CSTB**, *REPAR 2, Le réemploi passerelle entre architecture et industrie*, Avril 2018
- **BOUILLASS G** – *L'ASCV : une approche pour regarder la vie d'un produit autrement*, rapport de projet de fin d'études, Université de Lorraine, CSTB, 2018
- **BRIERE, R**, Étude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources. Focus sur les procédés de transport et de décharge, Thèse de Doctorat, Ecole doctorale de sciences ingénierie et environnement et Laboratoire Navier ENPC, 2016
- **WEIDEMA, B. P., WESNÆS, M. S.** 1996. « Data quality management for life cycle inventories - An example of using data quality indicators », *Journal of Cleaner Production* 4(3-4): 167-174.
- Résultats ACV recybéton et échanges avec **Adélaïde Ferraille**, chercheur laboratoire Navier ENPC
- **MOBIUS Réemploi et EVEA, FDES** Plancher technique de réemploi non revêtu monté sur vérins neuf, 2020
- Rapports **Democles** : amélioration des connaissances, fiches filière pour valoriser les déchets, traçabilité des déchets
- Résultats projet **Demodolor** - partie ACV, démarche multicritères qualitative
- Rapports **Groupes d'Expertise RE2020** : Rapport fin de vie des bâtiments GE4 , Rapport GE 1 sujet 8
- Guide d'évaluation **AFAQ 26000**, définition d'une stratégie de responsabilité sociétale
- Quantifier les emplois de l'économie circulaire de Paris, **Ville de Paris et cabinet Utopies**, étude présentée lors du Club Métiers Orée Création de Valeur, étude statistique basée sur la méthode développée par l'Observatoire national des emplois et métiers de l'économie verte (Onemev)
- Cycles de Ville, présentation de l'ACV production de pavés béton issus de la déconstruction de la cité Gagarine, 2020
- **Alliance HQE**, données d'Analyse de Cycle de Vie issues de l'expérimentation HQE Performance Economie Circulaire pour les projets R1, R2 et R3.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

6.

Annexes

A

Questionnaire transmis aux utilisateurs (critère local)



Fondation Bâtiment Énergie
Atelier FBE ECB
Économie Circulaire des Bâtiments

Enjeu B
Contexte local
Allongement du cycle de la matière

Responsables du groupe enjeu B: Léa Brachet / ARTELIA
Contributeurs pour la partie contexte local : Daniel Monfort-Climent (BRGM), Vincent Augiseau (Unilasalle - CitéSource)

Trame d'enquête auprès des membres du groupe utilisateurs – collectivités et aménageurs

Objet de la démarche d'approvisionnement local

1. Présentation synthétique de la démarche
2. Objectifs environnementaux et socio-économiques
3. Territoires de « localité » ciblés (matériaux considérés comme locaux car issus de ressources situées dans un périmètre inférieur à n km) et matériaux ciblés

Organisation de la démarche

4. Acteurs impliqués et organisation du projet
5. Principales phases de la démarche
6. Budget dédié à la démarche et financements (si aides ADEME notamment)

Méthodologie d'évaluation

7. Méthodes, outils et critères/indicateurs utilisés (si création de fiches FDES locales : sur quels produits ?)
8. Pourquoi avoir choisi ces méthodes et outils ?
9. Avis sur les méthodes, outils et indicateurs utilisés : manques, limites, etc. ?

Résultats de la démarche

10. Principaux résultats de la démarche (en juin/juillet 2020)
11. Bilan en termes d'utilisation de ressources locales (notamment minérales vs biosourcées)
12. Difficultés rencontrées, avancées, pistes pour la suite

Illustrations (images ou schémas illustrant la démarche (peut être envoyé séparément))



B

Réponses de Nantes Métropole Aménagement

1. Présentation synthétique de la démarche

Pirmil-Les Isles est l'un des grands projets urbains qui redessineront la métropole nantaise autour de la Loire à l'horizon 2030. A cheval sur les communes de Nantes, Rezé et Bouguenais, le projet se dessine autour de deux secteurs : Pirmil Saint-Jacques à l'est et Basse Île à l'ouest. D'ici 15 ans, c'est un nouveau quartier qui sera réalisé, comprenant des logements diversifiés (environ 3 300), des programmes d'activités et des équipements publics (environ 100 000 m² SDP), associés à de nouvelles lignes de tramway, la création d'un parc fluvial et la plantation d'une canopée apportant ombre et fraîcheur à l'ensemble du quartier.

L'objectif majeur du projet Pirmil – Les Isles est de construire une ville responsable en matière de transition écologique.

Pour mener à bien cette expérience, l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine, sélectionnée mi-2018 et pilotée par Frédéric Bonnet (OBRAS), a défini un projet des intentions, associé à un projet de transition fondé sur un schéma de « 5 pas de côté » :

1. *Vivre avec la Loire, ses risques et ses écosystèmes*
2. *Fabriquer des paysages en transition*
3. *Réduire l'impact de la mobilité par la programmation*
4. *Déclencher les filières de la transition*
5. *Pouvoir... vivre de façon durable La notion d'approvisionnement local n'est qu'une notion parmi d'autres dans un projet global. Elle est abordée dans le cadre de ces cinq pas de côtés, et à travers 3 enjeux de méthode explorés en parallèle :*
6. *- Enjeu de CONCEPTION renouvelée : l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine met en œuvre de nouvelles logiques de conception permettant d'améliorer la performance écologique de l'opération, notamment pour augmenter les opportunités en approvisionnement local ; - Réforme des MODÈLES DE COLLABORATION mis en œuvre dans le cadre du projet urbain, via en particulier une méthodologie de sourçage amont auprès d'acteurs clés des chaînes de valeur de l'aménagement et de l'immobilier : o Mise en place d'un « groupe local » ; o Démarche de sourçage individuel auprès d'une centaine d'acteurs de l'aménagement et de l'immobilier, pour des sujets portant sur les 5 pas de côté ; o Démarche de sourçage collectif via 2 plénières (environ 400 participants) et 4 ateliers thématiques (60-80 participants chacun) croisant tous les métiers. - Réforme des RÉSULTATS à atteindre par l'opération d'aménagement : construction de nouveaux indicateurs et modalités de calcul, qualitatifs et quantitatifs, permettant de fédérer les acteurs autour d'objectifs communs, ces indicateurs jouant ensuite le rôle de « boussole » pour savoir si le projet réalisé est à la hauteur des enjeux. La réflexion sur la mise au point de FDES locales pour le projet fait partie de cet enjeu de méthode.*
7. *Ces enjeux de méthode concernent non seulement l'aménageur et son équipe mais très probablement l'ensemble des acteurs appelés à intervenir en aval de la chaîne de valeur.*

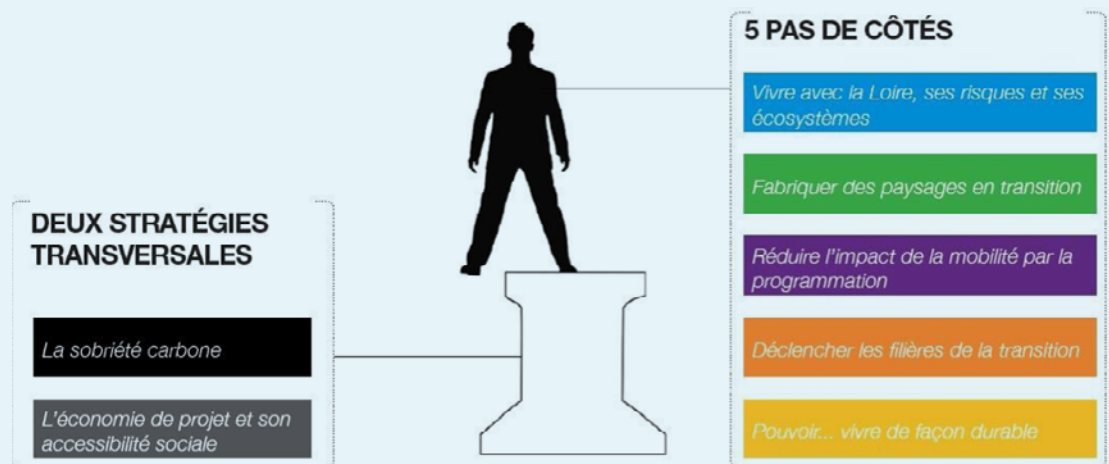
La réflexion porte sur l'ensemble du projet urbain mais aussi plus spécifiquement sur sa première phase, dont les consultations seront lancées fin 2020-début 2021.

2. Objectifs environnementaux et socio-économiques

Pour mener à bien cette expérience, l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine, sélectionnée mi-2018 et pilotée par Frédéric Bonnet (OBRAS), a défini un projet des intentions, associé à un projet de transition fondé sur un schéma de « 5 pas de côté » :



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Et deux stratégies transversales :

- La sobriété carbone ;
- L'économie de projet et son accessibilité sociale.

Les objectifs environnementaux et socio-économiques portent :

- sur une modification effective des processus (via modification notamment des modèles de collaboration et des méthodologies de conception) mis en œuvre ;
- sur une modification effective des résultats à atteindre (construction et mise en débat des indicateurs qui seront utilisés tout au long du projet, en particulier indicateurs carbone et indicateurs d'accessibilité sociale des items réalisés).

3. Territoires de « localité » ciblés (matériaux considérés comme locaux car issus de ressources situées dans un périmètre inférieur à n km) et matériaux ciblés

NMA engage la réflexion sur l'approvisionnement local en matériaux pour l'ensemble des processus et résultats mis en œuvre sur l'opération d'aménagement. Les territoires de localité ciblés sont donc variables en fonction des sujets : il n'y a pas d'objectif a priori type « un périmètre inférieur à n km » mais la question est systématiquement étudiée.

Par exemple :

- Aménagement des espaces publics :
 - o Stratégie de gestion des terres excavées maximisant la réutilisation des terres in situ pour :
 - Fabrique de terres fertiles ;
 - Bétons ;
 - Sous-couche de voiries ;
 - Etc.
 - o Stratégie de plantations : sourcing des filières « végétales », mise à l'étude d'une pépinière de plants locaux, etc.
 - o Étude d'opportunités pour un approvisionnement en matériaux originaires d'autres opérations sous maîtrise d'ouvrage de NMA (opérations de démolition, terres excavées sur d'autres opérations) pour la réalisation d'édicules sur espaces publics (cabane de projet, locaux vélos, etc.).
- Développements immobiliers :
 - o Transition des modes constructifs : approche « oecuménique » des ressources biosourcées (paille, chanvre, bois...), géosourcées (terre, pierre), bétons (solutions bas carbone...), métaux, réemploi. Avec un degré d'avancement variable en fonction des filières et du temps opérationnel ayant pu être consacré à date (cf. infra « organisation de la démarche »).

Organisation de la démarche

4. Acteurs impliqués et organisation du projet

Bases méthodologiques

S'inspirant de méthodes développées par Nidumolu et al (cf. « De l'impératif de collaborer », HBR n°24 décembre 17-janvier 18) mais aussi Silberzahn (démarche dite « effectuale »), la méthode envisagée sur Pirmil – Les Isles propose d'instituer de nouveaux modèles de collaboration privilégiant :



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

L'inclusion des parties prenantes, en veillant à la participation des bons acteurs, à la fois motivés mais qui ont aussi directement intérêt, en modifiant leurs pratiques et comportements, à protéger et capter la valeur du système ;

- Centrer ces modèles de collaboration sur l'amélioration des processus opérationnels ou les résultats en matière environnementale :

- o *Processus coordonnés* : les parties prenantes identifient et partagent de nouveaux processus opérationnels qui réduisent la consommation de ressources et les déchets, tout en protégeant les ressources naturelles ;
- o *Résultats coordonnés* : Les parties prenantes travaillent ensemble pour définir les résultats souhaités, créer des indicateurs standardisés pour mesurer les impacts environnementaux et comparer les performances.

Les méthodes de collaboration de différencient en fonction du type d'acteur et notamment s'il participe aux chaînes de valeur (exemple : aménageur, opérateurs immobiliers, investisseurs, entreprises de construction, paysagistes, architectes etc.) ou non (ex : les habitants, associations, etc.) :

FOCUS	Résultats	<p>STRATÉGIE CLÉ Développer des indicateurs de référence sectoriels et des systèmes standardisés pour mesurer les performances environnementales dans la chaîne de valeur</p> <p>Exemple Analyse de l'empreinte carbone de l'opération (globale et projets) sur tout ou partie du cycle de vie.</p>	<p>STRATÉGIE CLÉ Instaurer des modèles de « paiement pour services écosystémiques » permettant aux acteurs d'investir des fonds rémunérant des communautés locales pour qu'elles améliorent les résultats en matière environnementale.</p> <p>Exemple Subvention ou paiement direct (temps, ou monétaire) d'une association pour la création, la conservation et l'entretien d'espaces de la « ville-nature » (« gestion d'un commun »)</p>	
		<p>STRATÉGIE CLÉ Identifier et partager des <i>processus opérationnels</i> qui réduisent les émissions, la consommation des ressources naturelles et les déchets.</p> <p>Exemple Développer une méthodologie de gestion des terres en réduisant les déblais émis, le recours à la terre végétale, en transformant ces déblais en ressource pour la construction du bâti et des sols vivants</p>	<p>STRATÉGIE CLÉ Créer des collaborations étendues qui encouragent les acteurs de la chaîne de valeur et les autres parties prenantes à poursuivre des innovations opérationnelles et à suivre de bonnes pratiques qui créent de la valeur commune.</p> <p>Exemple Défis « zéro déchet », soutien aux acteurs du réemploi... par Nantes Métropole et diverses parties prenantes.</p>	
	Acteurs de a chaîne de valeur		Acteurs de a chaîne de valeur et autres parties prenantes	
	ACTEURS			

D'après Nidumolu, Ellison, Whalem, Billman « De l'ompératif de collaborer », HBR, 12/17.01/18

Acteurs impliqués

Concession d'aménagement 2018-2037 confiée à Nantes Métropole à Nantes Métropole Aménagement Désignation d'une équipe de maîtrise d'œuvre urbaine ayant notamment pour mission d'intégrer à sa démarche de conception les questions relatives à l'économie circulaire : groupement mandaté par OBRAS (architecte-urbaniste), avec D'ICI LA (paysagiste), ZEFECO (expert bas carbone et économie circulaire), BIOTEC (expert renaturation), ARTELIA (hydraulique et vrd), BURGEAP (BE pollution), CEBTP (BE géotechnique), RR&A (expert déplacements).

Outre les collectivités (Nantes Métropole, Nantes, Rezé, Bouguenais), l'aménageur s'est entouré d'un « groupe local » d'acteurs clés, impliquant :

- Novabuild (cluster écoconstruction) ;
- Atlanbois (filère bois) ;
- Construire en chanvre (filère chanvre) ;
- Collectif paille armoricain (filère paille) ;
- Pick Up Production (opérateur du projet culturel Transfert) ;
- CSTB
- DREAL (Chargée de mission Filières vertes et Matériaux biosourcés)



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Enfin, en parallèle de la relance de la participation citoyenne, NMA a engagé une démarche de sourçage auprès des acteurs aval de la chaîne de valeur de l'aménagement immobilier (cf. infra)

5. Principales phases de la démarche

Démarche de conception

A partir de mi-2018, lancement des études pré-programme en vue de l'établissement du plan des intentions (ou plan guide), d'un projet de transition écologique, et d'un AVP général pour l'ensemble des espaces publics. Ces documents sont réalisés en plusieurs itérations et versions :

- o V1 à l'été 2019 ;
- o V2 à l'été 2020 ;
- o Version 3 fin 2020-début 2021 (date prévisionnelle).

Cette démarche de conception comprend la mise au point des indicateurs de résultats et des méthodologies associées.

Animation du groupe local :

Dès le lancement de la concession d'aménagement (2018), et même un peu avant (novembre 2017), constitution d'un groupe resserré d'acteurs clés, associés à la conception et à la mise au point du projet, à l'occasion de l'AMI économie circulaire et urbanisme saison 2 lancé par l'Ademe. C'est le « groupe local ».

- De fin 2017 à l'automne 2020, il est réuni périodiquement, tous les 3 à 6 mois, par l'aménageur, pour présenter l'avancement des réflexions et en débattre.
- A partir du premier semestre 2020, les filières font l'objet d'un traitement à part, avec un sourçage ad hoc (questionnaire filières, ci-joint) et un travail spécifique portant sur le détail des futures consultations.
- A partir du second semestre 2020, la question d'une évolution de l'organisation de ce réseau d'action collective sera à envisager.

Démarche de sourçage :

En parallèle et alimentant la phase de conception un sourçage est engagé :

- **Individuel** : consultation via entretien d'un acteur ou d'un groupe d'acteurs par entretien individuel, organisés notamment autour des thématiques de transition. Le choix des acteurs ou groupes d'acteurs sourcés relève de NMA, sur recommandation parfois de participants au groupe local. Environ 100 entretiens auront été menés pendant cette première phase de sourçage.
- **Collectif** : organisé en partenariat avec Novabuild. Cette étape consiste à confronter les éléments issus du sourçage individuel à d'autres compétences de l'aménagement et de l'immobilier, en regroupant autour de tables l'ensemble des acteurs engagés dans la chaîne de valeur. Le sourçage collectif est organisé en partenariat avec Novabuild, voire d'autres intervenants ponctuellement associés à la démarche par le maître d'ouvrage. Les différentes étapes sont :
 - o Un atelier de lancement, le 1er octobre 2019, visant à énoncer les ambitions et défis du projet urbain Pirmil – Les Isles à l'ensemble des acteurs professionnels de la chaîne de valeur de l'aménagement et de l'immobilier. Environ 400 participants ont répondu présent. <https://www.nantes-amenagement.fr/2019/10/04/retour-sur-les-premieres-rencontres-professionnelles-de-pirmil-les-isles/>
 - o Quatre ateliers participatifs :

Atelier #1 – Filières de construction en transition

Atelier #2 – Sols et végétations en transition

Voici le lien vers la restitution de ces deux premiers ateliers : <https://www.nantes-amenagement.fr/2020/07/02/rencontres-professionnelles-de-pirmil-les-isles-decouvrez-les-restitutions-des-ateliers-1-et-2/>

Atelier #3 – Services et usages bas carbone (annulé pour cause de crise Covid - en attente de reprogrammation)

Atelier #4 – Programmations et modèles immobiliers (annulé pour cause de crise Covid - en attente de reprogrammation)

o Un atelier de clôture du sourçage collectif, visant à énoncer les principaux enseignements de la démarche et leur prise en compte dans les futurs projets immobiliers et d'espace public (date à définir).

6. Budget dédié à la démarche et financements (si aides ADEME notamment)

NC



Methodologie d'évaluation

7. Méthodes, outils et critères/indicateurs utilisés (si création de fiches FDES locales : sur quels produits ?)

Cf. présentation sur les FDES locales

Les méthodes et outils relatifs au sourçage sont décrits ci-avant.

L'objectif, en lien avec le sourçage, est de faire progresser les filières du territoire en vue de massifier le recours aux matériaux bas carbone tant dans les phases ultérieures du projet que sur d'autres projets sur le territoire. Aussi, la nécessité de recourir à des méthodes partageables par le plus grand nombre rend le recours aux FDES comme une solution efficace pour atteindre cet objectif.

L'enjeu pour les filières serait donc, à moyen terme, de disposer de leurs propres FDES conçues pour être utilisées dans un configurateur, afin de pouvoir disposer de l'impact environnemental réel, contextualisé aux filières du territoire, pour chaque projet.

Néanmoins, les FDES présentent plusieurs inconvénients : elles sont coûteuses à élaborer pour une petite structure, si elles sont faites à l'échelle de plusieurs entreprises elles peuvent mal représenter des efforts particuliers faits par une des entreprises du groupement, elles prennent mal en compte le fret sans configurateur, elles peuvent surestimer la fin de vie des matériaux du fait de filières de réemploi non présente, etc.

Aussi, la méthode d'évaluation de la qualité environnementale des projets, encore en cours d'élaboration, ne se limitera pas à l'analyse via les seules FDES.

8. Pourquoi avoir choisi ces méthodes et outils ?

Les bases méthodologiques mobilisées pour la démarche (effectuation, mais aussi la littérature sur les modèles de collaboration) permettent d'engager pragmatiquement et à grande échelle des changements rapides, et ce sur des domaines à forte incertitude.

Elles permettent, via en particulier le sourçage, d'avoir des réponses « maintenant » et d'engager une dynamique vis-à-vis des filières (l'opération d'aménagement ne se pense pas dans un contexte « statique-filières » mais vise à modifier activement ce contexte).

Il est cependant nécessaire de mobiliser également des outils de type indicateurs, pour objectiver la démarche. Faut cependant partager avec les acteurs de la chaîne de valeur ces indicateurs et leurs modes d'emploi.

Sur l'utilisation des FDES comme outil, éléments de réponse ci-dessus mais en synthèse : reconnu par tous donc possibilité d'essayer sur d'autres projets pour des filières locales qui en réaliseront, caractérisation plutôt fine de l'impact environnementale si elles sont adossées à un configurateur. A noter sur ce point que nous espérons pouvoir utiliser le configurateur pour matériaux biosourcés en cours de finalisation pour le projet (à minima les phases ultérieures). Le recours au configurateur pour les matériaux en disposant (bois, béton et acier) sera imposé pour les projets qui mettront en oeuvre ces matériaux.

9. Avis sur les méthodes, outils et indicateurs utilisés : manques, limites, etc ?

Les limites sont les suivantes :

- Relatives au sourçage :*
 - o Exhaustivité/représentativité des interlocuteurs sourcés ;*
 - o Exactitude des informations communiquées, bonne interprétation des informations par des acteurs divers, ne parlant pas forcément le même langage ;*
 - o Capacité des informations énoncées à être converties en modifications effectives des processus et résultats opérationnels : le sourçage ne suffit pas. Le travail de conception de l'équipe de maîtrise d'œuvre urbaine, ainsi que son travail analytique (mise au point d'indicateurs pour objectiver certains éléments) demeurent indispensables.*



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Les limites relatives aux outils et indicateurs sont les suivantes :

- Absence de données locales pour chaque producteur de matériau sur le territoire
- Absence de configurateur pour les biosourcés
- Nombreuses données forfaitaires et maximalistes pour les postes secondaires du bâtiment (fluides notamment) Difficulté de caractériser la fin de vie des biosourcés du fait que leur emploi est assez récent et qu'il y a encore peu de volume à retraiter donc pas de filière en place
- Difficile d'exiger de toutes les équipes de MOeu de disposer d'une ACV précise de leur projet en tenant compte des remarques précédentes, des enjeux de délais pour réaliser les études, du fait que les entreprises de construction ne sont pas toujours connues en phase conception (une des pistes pour Pirmil est d'associer les entreprises de construction au processus de conception)

Résultats de la démarche

10. Principaux résultats de la démarche (en juin/juillet 2020)

En juin-juillet 2020, la démarche se trouve dans une étape intermédiaire.

NMA et ses équipes et partenaires ont suffisamment d'éléments pour a minima prédimensionner les premières consultations dans leurs principaux paramètres, objectifs et résultats. Mais un travail considérable de formalisation et de test reste à faire d'ici fin 2020-début 2021.

11. Bilan en termes d'utilisation de ressources locales (notamment minérales vs biosourcées)

Ce bilan sera à réaliser après les premières mises en chantier, mais d'ores et déjà le travail de sourçage a permis de faire remonter ce que chaque filière était en mesure de réaliser chaque année. Il sera donc possible de calibrer les consultations au regard des moyens disponibles de chaque filière, ce qui évitera des les mettre en trop grande tension tout en contribuant à pérenniser les éventuels investissements que ces filières pourraient réaliser.

Le sourçage a également permis de faire remonter les enjeux à considérer par les équipes de conception, les freins et levier pour favoriser le recours aux matériaux bas carbone. La mise à disposition de ces informations pour les équipes de conception et les opérateurs immobiliers devrait permettre d'améliorer l'efficacité économique des projets.

12. Difficultés rencontrées, avancées, pistes pour la suite

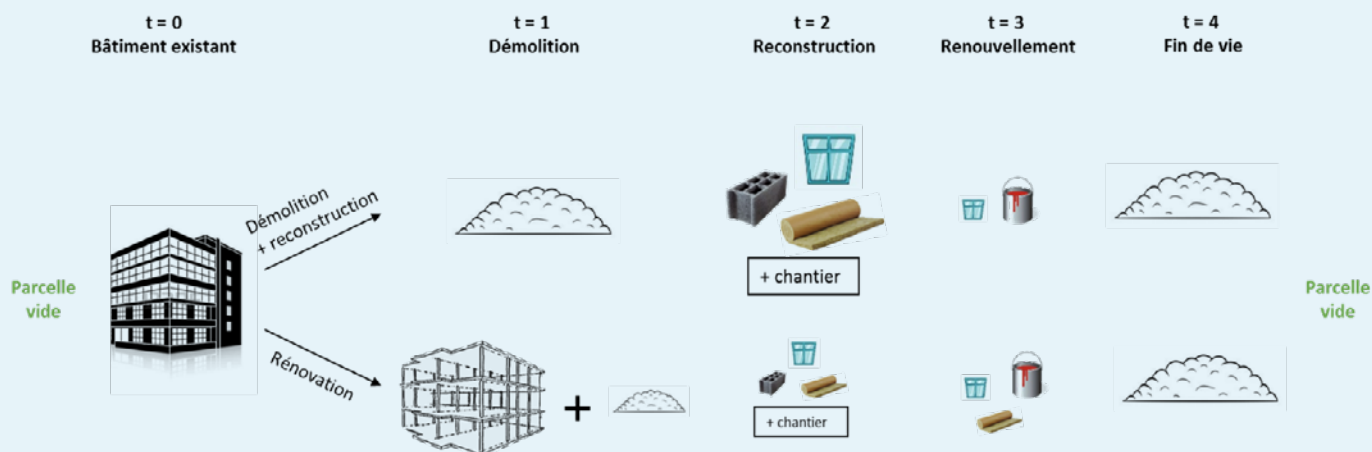
Cf. la partie « manques et limites » supra.

C

Rénovation vs. déconstruction/reconstruction

Dans cette annexe, l'objectif est de déterminer si les trois méthodes d'ACV rénovation permettent de comparer un scénario de rénovation à un scénario de déconstruction/rénovation. L'idée implicite est qu'une telle comparaison est possible si la méthode d'ACV rénovation considérée est cohérente avec l'ACV des bâtiments neufs.

Les différentes étapes d'une rénovation et d'une démolition/reconstruction sont décrites dans le schéma ci-dessous. Points de départ et d'arrivée : la parcelle vide



Dans le scénario de rénovation, on conserve une partie du bâtiment existant. Au moment de la démolition/réhabilitation, le volume de déchets est donc moins important que dans un scénario de démolition/reconstruction. Pour la même raison, les produits neufs installés sont moins volumineux en cas de rénovation mais les renouvellements seront souvent plus importants (pour remplacer les PCE conservés). En fin de vie, le volume de déchet est équivalent dans les deux scénarios.

Dans les méthodes A et B, des différences de périmètre apparaissent aux étapes t = 1 et t = 4 entre le scénario de démolition/reconstruction et le scénario de rénovation.

A t = 1, la méthode A comptabilise les PCE déposés non amortis et non réemployés dans le cas de la démolition/reconstruction mais ne comptabilise pas les PCE conservés dans le cas de la rénovation. Le périmètre est donc bien différent entre une opération de démolition/reconstruction et une opération de rénovation.

A t = 4, dans le cas d'une démolition/reconstruction, toute la fin de vie des matériaux est comptabilisée car il s'agit de PCE neufs. En revanche, dans le cas d'une rénovation, seule une partie de la fin de vie des matériaux est comptabilisée : celle des PCE neufs (pour les méthodes A et B) et une partie de celle des PCE conservés non amortis (pour la méthode B uniquement).

Conclusion :

Pour comparer un scénario de rénovation à un scénario de démolition/reconstruction, la méthode C prend en compte un périmètre identique dans les deux cas. En effet, les impacts environnementaux de tous les déchets sont pris en compte et calculés de la même façon. A l'inverse, les méthodes A et B présentent des périmètres différents ce qui limite la pertinence de la comparaison et biaiserait l'aide à la décision.

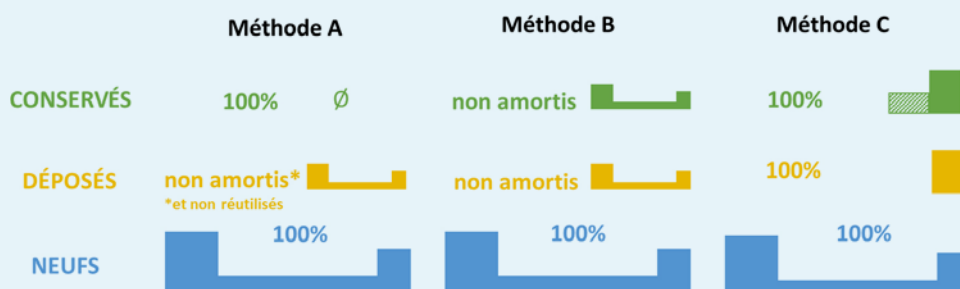
D

Autre schéma sur les différentes méthodologie d'ACV rénovation

Une donnée environnementale (DE) peut être schématisée de la façon suivante :



Le schéma résumant la prise en compte des différents éléments par les trois méthodologies d'ACV rénovation est alors le suivant :



E

Cohérence avec la méthode ACV appliquée à des bâtiments neufs : exemple détaillé

Exemple détaillé dans la section 9.3.3 de la norme NF EN 15978 :

« Exemple du calcul du nombre de remplacement d'une chaudière sur une période de référence 80 ans :

Chaudière ayant une durée de vie estimée de 25 ans.

Calcul du nombre de remplacements = $(80/25) - 1 = 2,2$, arrondi à trois remplacements. Pour le calcul des impacts environnementaux, trois remplacements sont pris en compte du fait de l'importance du fonctionnement du système de chauffage ». –

Dans ce cas de figure, les impacts environnementaux associés à la chaudière sont comptabilisés 4 fois sur la période de référence choisie (80 ans ici) : mise en œuvre initiale + 3 remplacements intervenant respectivement à 25, 50 et 75 ans.

Imaginons qu'à la 80^{ème} année, une action de rénovation soit réalisée et étudiée via une ACV (avec connaissance de l'historique du bâtiment) : la chaudière ayant une DVT de 25 ans et ayant été remplacée il y a 5 ans (75^{ème} année), a vécu moins que sa DVR. Il faut alors amortir 20 ans sur la période de référence associée à l'ACV de l'existant (50 ans). Cependant ces impacts ont déjà été comptabilisés sur la période de référence précédente.

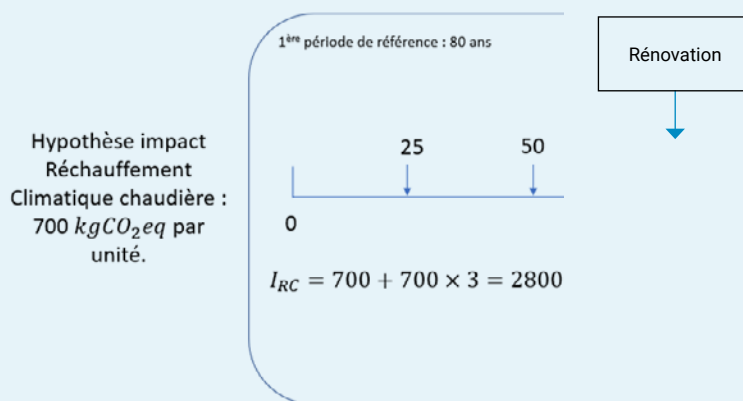


Figure 1 : Cas d'un calcul conforme à la norme EN15978 suivi d'un calcul conforme à l'actuelle méthodologie « bâtiment existant » (méthode B)



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Si l'on ne comptabilise pas les impacts associés à un amortissement de produits ayant moins vécu que leur DVR (c'est-à-dire que l'on attribue l'ensemble des impacts des PCE non amortis à la première période de référence du bâtiment), on obtient les résultats suivants :

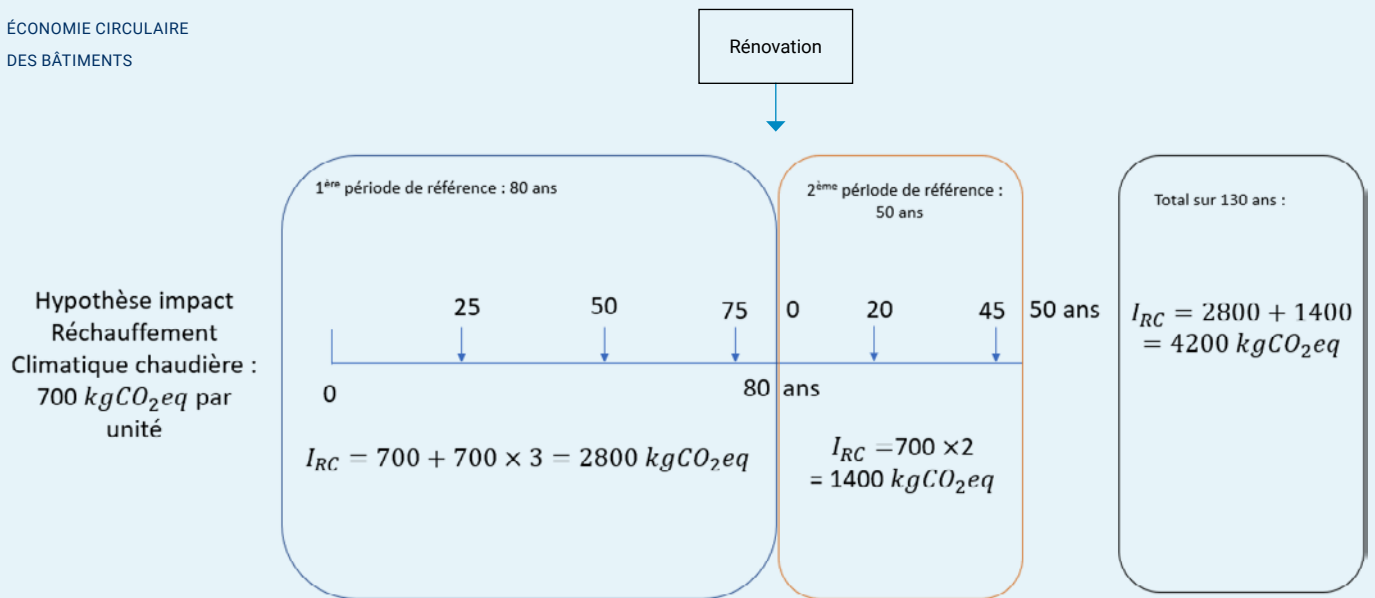


Figure 2 : Cas d'un calcul conforme à la norme EN15978 puis de la proposition méthodologique pour « bâtiment existant »

De plus, afin de répondre à la problématique de l'absence de données liées à l'historique du bâtiment, la méthode B préconise de considérer que la « durée de vie résiduelle est égale à la moitié de la DVR d'un produit équivalent présent sous INIES ». Cette hypothèse majorante et très générale ne garantit pas une qualité suffisante aux valeurs « absolues » d'impacts calculés, et la question de limiter les études ACV dans l'existant aux bâtiments disposant d'un historique connu et détaillé se pose.

F

Analyse résultats projet R1

Description du projet R1:

PROJET	
Données projet	
Typologie	Tertiaire : Bureaux
Nombre de bâtiments	1
Surface projet	30570 m ²
Localisation	Paris (75)
Année de construction	1967
Année de livraison	2019
Surface de Plancher Totale	34801 m ²



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Description des éléments conservés/déposés du projet R1 :

Éléments conservés :

- 4 éléments (planchers béton et voiles de périphérie façades béton) sont conservés. Ces 4 éléments sont pris en compte par la méthode C. Seulement 2 éléments sont pris en compte par les méthodes B Base et B Variante (car les 2 autres sont amortis). Aucun n'est considéré par la méthode A (aucun impact pour le produit conservé et aucun renouvellement).
- 2 éléments (labradors verts granit Façades et marbre blanc) sont réemployés in-situ. Ces 2 éléments sont pris en compte par la méthode C, ainsi que par les méthodes B Base et B Variante (car il faut considérer leur renouvellement). Ils ne sont pas pris en compte par la méthode A.
- 32 éléments (dont 10 hors périmètre) feront l'objet d'un réemploi via la plateforme Cycle Up = réemploi ex-situ (en dehors du projet). Ils ne sont comptabilisés par aucune des 3 méthodes. Les impacts vont à l'acquéreur pour la méthode C, ainsi que pour la méthode B (si non amortis).

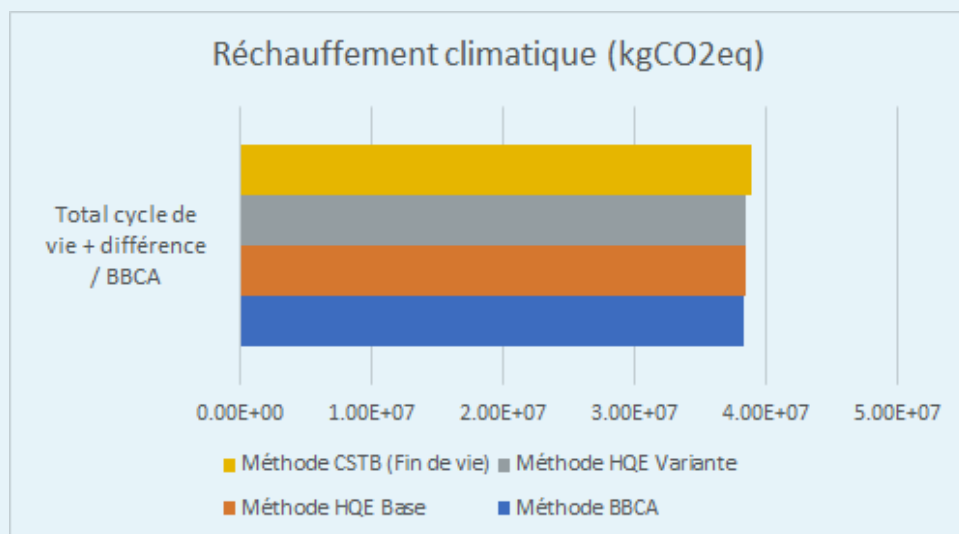
Éléments déposés :

- 25 éléments déposés (dont la fin de vie est encore inconnue). La fin de vie des 25 éléments est prise en compte par la méthode C. Aucun élément n'est pris en compte par la méthode A, B Base et B Variante (car ils sont déjà tous amortis).
- 4 éléments déposés (planchers béton et voiles intérieurs maçonneries béton) sont orientés vers du recyclage VRD et 1 élément (façade vitrée) est aussi recyclé. Ces 5 éléments sont pris en compte par la méthode C. Seulement 2 sont pris en compte par les méthodes A, B Base et B Variante (car les 3 autres sont amortis).

ANALYSE DES RÉSULTATS :

Les résultats obtenus sur le projet R1 pour les quatre méthodes sont présentés ci-dessous pour les quatre indicateurs suivants :

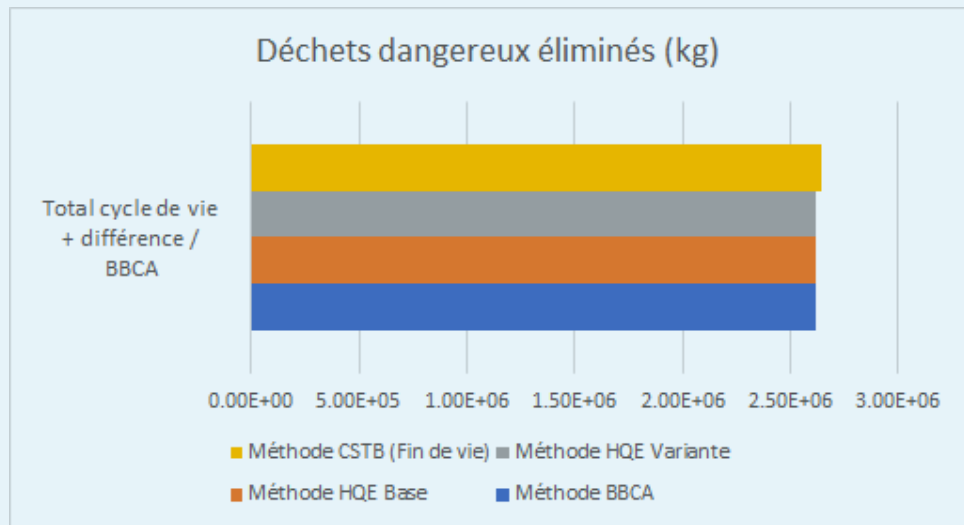
- réchauffement climatique ;
- déchets non dangereux ;
- déchets dangereux ;
- énergie primaire totale.



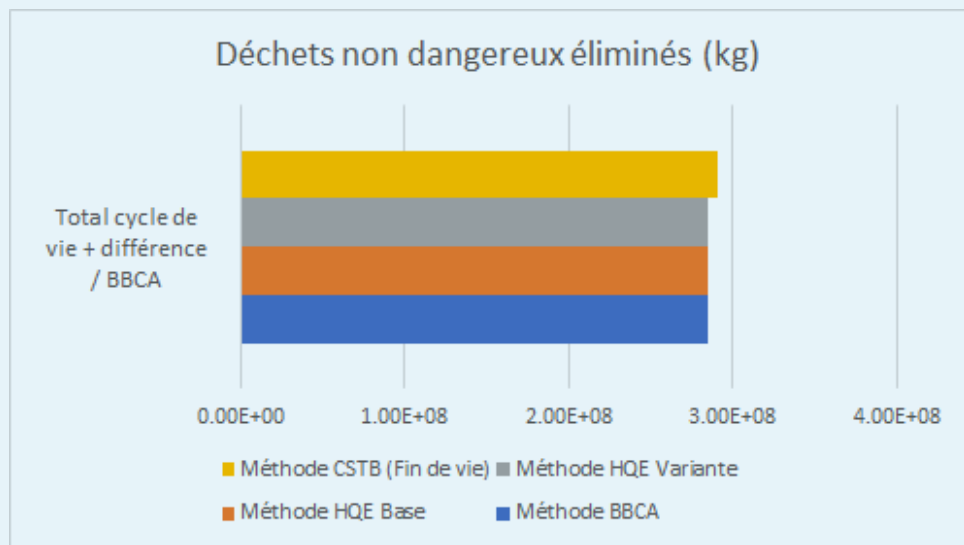
Pourcentages d'écart (/A) : Jaune +1.6%, Gris +0.36%, Orange +0.40%



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



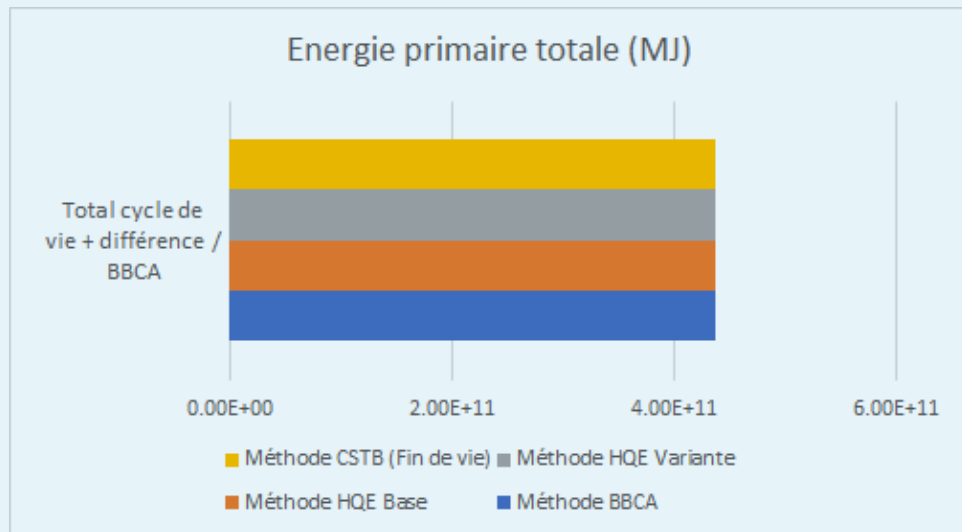
Pourcentages d'écart (/A) : Jaune +0.92%, Gris +0.02%, Orange +0.04%



Pourcentages d'écart (/A) : Jaune +2.2%, Gris +0.13%, Orange +0.13%



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Pourcentages d'écart (/A) : Jaune +0%, Gris +0%, Orange +0%

Comme on pouvait s'y attendre vu le nombre de composants pris en compte dans chacune des méthodes, l'indicateur réchauffement climatique est croissant suivant l'ordre des méthodes suivant :

- Méthode A
- Méthode B Variante (+0.3% par rapport à la méthode A)
- Méthode B Base (+0.5%)
- Méthode C (+0.8%)

En effet, la méthode A est celle qui prend en compte le moins de composants, tous les éléments conservés étant sans impact.

La méthode B quant à elle prend en compte quelques éléments conservés. Les résultats issus de la variante sont moins impactants que ceux issus de la méthode de base car, dans la variante, les renouvellements sont considérés après la DVR et non après la DV résiduelle (DV résiduelle < DVR).

Enfin, l'indicateur réchauffement climatique est le plus important dans la méthode C car l'ensemble des éléments conservés, réemployés in-situ et déposés sont pris en compte.

Concernant l'indicateur Déchets non dangereux, la différence entre la méthode C et les autres méthodes est légèrement plus significative. Il y a une différence de 2.2% avec la méthode A et une différence de 2.0% avec la méthode B base. Cela s'explique par le fait que cette méthode, contrairement aux autres, prend en compte la fin de vie des éléments conservés et déposés et que c'est lors de cette phase que l'indicateur DND est le plus élevé. A noter que l'analyse complémentaire ci-dessous montre que certains éléments n'ont pas pu être pris en compte pour le calcul de cet indicateur avec la méthode C, ce qui a tendance à sous-estimer les impacts pour cette méthode.

Enfin, il y a très peu de différences entre les méthodes pour l'indicateur Déchets dangereux, et aucune pour l'indicateur d'énergie primaire totale.

Cependant, même quand il y a des différences entre les méthodes, elles restent minimales. Ceci s'explique par le fait que dans le projet R1, sur 30 éléments déposés, seuls 2 sont pris en compte par les méthodes A, B Base et B Variante, car tous les autres sont amortis. Il s'agit de 2 éléments de structure (planchers béton GA2 et voiles intérieurs maçonneries béton GA2). Concernant les éléments conservés, seuls 6 éléments sont conservés (conservés ou réemployés in-situ), et ils représentent quelle que soit la méthode de modélisation moins de 1% des impacts totaux du bâtiment. La différence entre les méthodes de modélisation n'est donc pas visible dans les résultats pour ces éléments.

Pour avoir des différences vraiment significatives, il faudrait un cas d'étude avec plus d'éléments déposés non amortis, et plus d'éléments conservés.

Analyse complémentaire :

- L'impact des **éléments déposés** est analysé plus en détail dans le tableau ci-dessous, sauf pour l'énergie primaire totale car il n'y a pas de différence entre les méthodes pour cet indicateur.

Potentiel de réchauffement climatique (GWP) en kg éq. CO2 / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	7.69E+04	7.69E+04	7.69E+04	5.68E+05
Voiles intérieurs maçonneries béton GA2	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04	
Autres éléments déposés (amortis)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
TOTAL Bâtiment	3.83E+07	3.84E+07	3.84E+07	3.89E+07
Part des éléments déposés dans le bâtiment	0.24%	0.24%	0.24%	1.46%

Déchets dangereux en kg / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	2.27E+01	2.27E+01	2.27E+01	2.37E+04
Voiles intérieurs maçonneries béton GA2	4.06E+00	4.06E+00	4.06E+00	
Autres éléments déposés (amortis)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
TOTAL Bâtiment	2.62E+06	2.62E+06	2.62E+06	2.64E+06
Part des éléments déposés dans le bâtiment	0.00%	0.00%	0.00%	0.90%

Déchets non dangereux en kg / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	2.36E+05	2.36E+05	2.36E+05	4.75E+06
Voiles intérieurs maçonneries béton GA2	2.17E+05	2.17E+05	2.17E+05	
Autres éléments déposés (amortis)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
TOTAL Bâtiment	2.85E+08	2.85E+08	2.85E+08	2.91E+08
Part des éléments déposés dans le bâtiment	0.16%	0.16%	0.16%	1.63%

Pour les éléments déposés amortis, les méthodes A et B (base + variante) ont toujours un impact nul. Pour les éléments déposés non amortis, les méthodes A et HQE (base + variante) considèrent un impact (le même).

Pour les éléments déposés quels qu'ils soient (amortis ou non), la méthode C considère un impact lié à la fin de vie des éléments. Avec la méthode C, cet impact représente environ 1.5% de l'impact total du bâtiment sur les indicateurs réchauffement climatique et déchets non dangereux, ce qui reste très faible. Il faudrait un cas d'étude avec plus d'éléments déposés non amortis, pour avoir des différences vraiment significatives.

- L'impact de ces **éléments conservés** est analysé plus en détail dans le tableau ci-dessous, sauf pour l'énergie primaire totale car il n'y a pas de différence entre les méthodes pour cet indicateur.

Potentiel de réchauffement climatique (GWP) en kg éq. CO2 / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	0.00E+00	9.88E+04	9.88E+04	2.55E+04
Planchers béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	7.07E+04
Voiles de périphérie (façades) béton GA2	0.00E+00	2.75E+04	2.75E+04	9.19E+03
Voiles de périphérie (façades) béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.63E+04
Labradors verts granit Façades	0.00E+00	1.37E+04	5.48E+03	6.36E+03
Marbre blanc Galerie RDC	0.00E+00	1.21E+04	4.85E+03	5.62E+03
TOTAL Bâtiment	3.83E+07	3.84E+07	3.84E+07	3.89E+07
Part des éléments conservés dans le bâtiment	0.00%	0.40%	0.36%	0.33%

Déchets dangereux en kg / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	0.00E+00	2.92E+01	2.92E+01	0.00E+00
Planchers béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Voiles de périphérie (façades) béton GA2	0.00E+00	4.62E+01	4.62E+01	1.06E+01
Voiles de périphérie (façades) béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.88E+01
Labradors verts granit Façades	0.00E+00	5.70E+02	2.28E+02	2.56E+02
Marbre blanc Galerie RDC	0.00E+00	5.04E+02	2.02E+02	2.26E+02
TOTAL Bâtiment	2.62E+06	2.62E+06	2.62E+06	2.64E+06
Part des éléments conservés dans le bâtiment	0.00%	0.04%	0.02%	0.02%

Déchets non dangereux en kg / Total Cycle de Vie	Méthode A	Méthode B Base	Méthode B Variante	Méthode C (Fin de vie)
Planchers béton GA2	0.00E+00	3.03E+05	3.03E+05	0.00E+00
Planchers béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Voiles de périphérie (façades) béton GA2	0.00E+00	6.39E+04	6.39E+04	6.85E+05
Voiles de périphérie (façades) béton GA1+Pergolèse	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.21E+06
Labradors verts granit Façades	0.00E+00	7.31E+03	2.92E+03	5.08E+03
Marbre blanc Galerie RDC	0.00E+00	6.47E+03	2.59E+03	4.50E+03
TOTAL Bâtiment	2.85E+08	2.85E+08	2.85E+08	2.91E+08
Part des éléments conservés dans le bâtiment	0.00%	0.13%	0.13%	0.66%

Pour les éléments conservés, la méthode A a toujours un impact nul car elle ne considère aucun impact pour le produit conservé et aucun renouvellement.

Pour les éléments de structure conservés amortis (planchers béton GA1+Pergolèse et voiles de périphérie GA1+Pergolèse), les méthodes B (base + variante) ne considèrent pas non plus d'impact car les éléments sont amortis.

Pour les éléments de structure conservés non amortis (planchers béton GA2 et voiles de périphérie GA2), les méthodes B (base + variante) considèrent un impact car les éléments ne sont pas amortis (le même impact car pas de renouvellement considéré donc la DV_{cycle2} n'a pas d'influence).

Pour les éléments conservés non amortis (hors éléments de structure, c'est-à-dire labradors verts granit et marbre blanc, qui sont réemployés in-situ), l'impact de la méthode B Base est plus élevé que celui de la méthode B Variante car nécessitera plus de remplacements.

Pour tous les éléments conservés la méthode C considère normalement la vie en œuvre restante et la fin de vie des éléments. Cependant, sur certains éléments (planchers béton), seul un impact sur

le réchauffement climatique apparait. Ceci s'explique par l'utilisation de données par défaut (DED, ex-MDEGD) pour ces éléments : ces données agrègent tous les impacts sur le cycle de vie total, sauf pour le réchauffement climatique. La vie en œuvre restante et la fin de vie de ces éléments n'ont donc pas pu être prises en compte pour les indicateurs déchets dangereux et non dangereux, ce qui sous-estime probablement fortement les impacts sur ces indicateurs, en particulier pour l'indicateur déchets non dangereux étant donné les volumes importants de béton en jeu. Ceci est une limite à avoir en tête lors de l'application de la méthode C si des données par défaut sont utilisées.

Les différences restant minimales entre les méthodes, il faudrait un cas d'étude avec plus d'éléments conservés pour avoir des différences vraiment significatives.

G

Analyse résultats projet R2

Comparaison de 4 méthodes sur l'opération R2

Description du projet :

BUREAUX R2	
Données projet	
Typologie	Tertiaire : Bureaux
Nombre de bâtiments	1
Surface projet	70 m ²
Localisation	Nantes (44)
Année de construction	1904
Année de livraison	2016
Surface de Plancher Totale	710 m ² (immeuble complet)

BUREAUX R2	
Description technique avant travaux	
Fondations	Hypothèse de fondations superficielles béton.
Structure	Plancher bas : poutres et hourdis béton + dalle béton, non isolé.
Isolation	5 mm de polystyrène expansé sous plaque de plâtre en doublage intérieur, entièrement déposés.
Couverture	Charpente traditionnelle en bois et couverture ardoise.
Façade	Murs périphériques en granit (50 à 60cm d'épaisseur). Menuiseries sur rue en simple vitrage.
Chauffage et ECS	Chaudière mixte à condensation à gaz et radiateurs.
Ventilation	Ventilation naturelle.
Travaux réalisés	
Isolation	Isolation du plancher bas par liège en vrac dans structure secondaire, de 10 à 20 cm, Isolation du mur sur hall d'entrée par plaques de liège expansé collées de 4 cm d'épaisseur.
Façade	Correction thermique par l'intérieur des murs en pierre par un enduit chaux-argile-billes de liège de 5cm environ. Remplacement menuiseries extérieures par double vitrage en bois exotique.
Chauffage et ECS	Remplacement des radiateurs par moindre puissance.
Ventilation	Ventilation Mécanique Contrôlée Double Flux (modèle Comfoair de la marque ZEHNDER1) avec récupération de chaleur sur les serveurs informatiques.
Sanitaire	Remplacement sanitaires (WC combiné lave-main, douche).
Mobilier et finition intérieure	Réemploi des anciens planchers pour finition murale.

Description des éléments conservés/déposés du projet R2 :

Éléments conservés :

- 17 éléments (principalement des éléments de structure : fondation, toiture, plancher, murs + chaudière + fenêtre et carrelage en petites quantités) sont conservés. Ces 17 éléments sont pris en compte par la méthode C. Seulement 5 éléments sont pris en compte par les méthodes B Base et HQE Variante (soit parce qu'ils sont non amortis, soit parce que leur DVR étant inférieure à 50 ans, leur renouvellement est à comptabiliser). Aucun n'est considéré par la méthode A (aucun impact pour le produit conservé et aucun renouvellement).



NB : pour les fondations et la toiture, les quantités de composant conservés ont été déterminées au prorata de la surface du bureau étudié par rapport à la surface du bâtiment complet¹⁸.

- 4 éléments (parquet, bardage, porte et lambourdes) sont réemployés in-situ. Ces 4 éléments sont pris en compte par la méthode C, 2 sont pris en compte par les méthodes B Base et B Variante (car le bardage est non amorti et qu'il faut considérer le renouvellement de la porte). Ils ne sont pas pris en compte par la méthode A.

Éléments déposés :

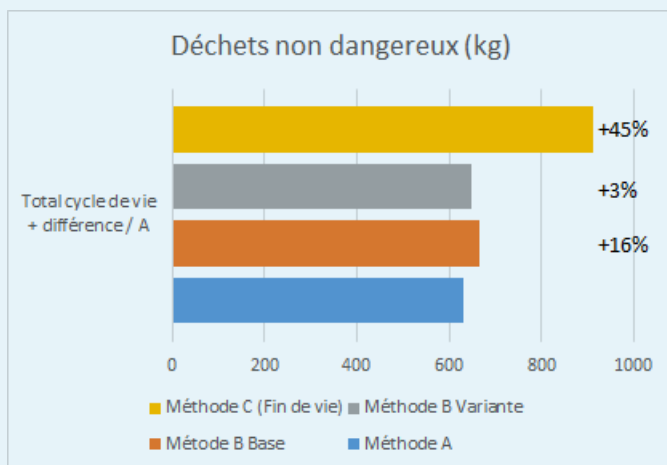
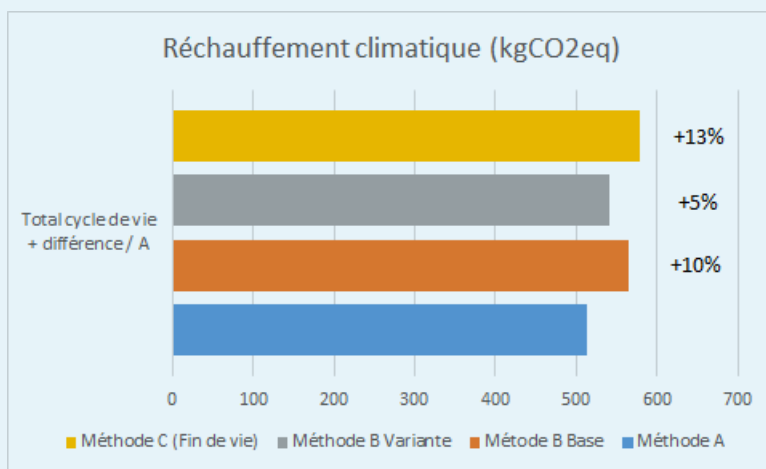
- 15 éléments sont déposés sans être réemployés ou réutilisés (ces derniers ne sont comptabilisés par aucune des 3 méthodes. Les impacts vont à l'acquéreur pour la méthode C, ainsi que pour la méthode B (si non amortis)). Les 15 éléments sont pris en compte par la méthode C mais seul un composant non amorti (une cloison en brique) est comptabilisé dans les méthodes A et B.

ANALYSE DES RÉSULTATS :

Les résultats obtenus sur le projet R2 pour les quatre méthodes sont présentés ci-dessous pour les quatre indicateurs suivants :

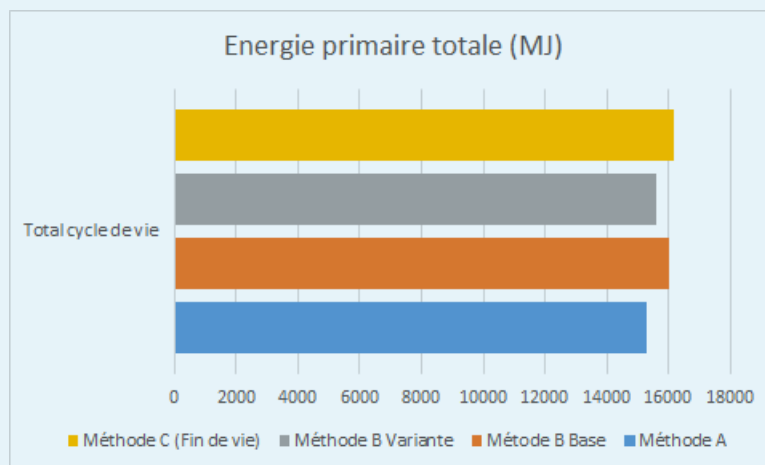
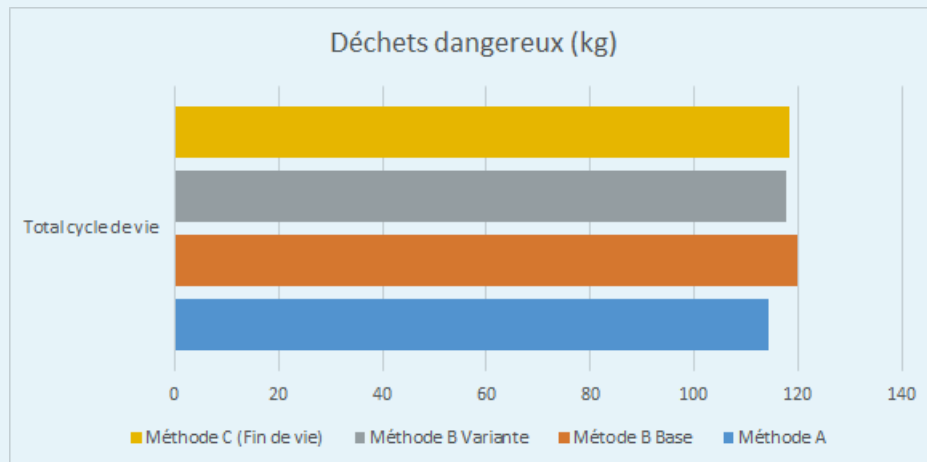
- réchauffement climatique ;
- déchets non dangereux ;
- déchets dangereux ;
- énergie primaire totale.

La différence relative entre chacune des méthodes et la méthode A (qui est la moins impactante) est indiquée en pourcentage pour les deux indicateurs présentant les différences les plus significatives.





ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Comme on pouvait s’y attendre vu le nombre de composants pris en compte dans chacune des méthodes, l’indicateur réchauffement climatique est croissant suivant l’ordre des méthodes suivant :

- Méthode A
- Méthode B Variante (+5% par rapport à la méthode A)
- Méthode B Base (+10%)
- Méthode C (+19%)

En effet, la méthode A est celle qui prend en compte le moins de composants, tous les éléments conservés étant sans impact.

La méthode B quant à elle prend en compte quelques éléments conservés. Les résultats issus de la variante sont moins impactants que ceux issus de la méthode de base car, dans la variante, les renouvellements sont considérés après la DVR et non après la DV résiduelle (DV résiduelle < DVR). Enfin, l’indicateur réchauffement climatique est le plus important dans la méthode C car l’ensemble des éléments conservés, réemployés in-situ et déposés sont pris en compte.

Concernant l’indicateur Déchets non dangereux, la différence entre la méthode C et les autres méthodes est encore plus significative. Il y a une différence de 44% avec la méthode A et une différence de 36% avec la méthode B base. Cela s’explique par le fait que cette méthode, contrairement aux autres, prend en compte la fin de vie des éléments conservés et déposés et que c’est lors de cette phase que l’indicateur DND est le plus élevé.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Analyse complémentaire :

Pour chaque méthode, les impacts des éléments neufs, conservés, déposés et réemployés (qui sont mis en œuvre au moment de l'opération de rénovation comme les composants neufs) ont été estimés sur l'indicateur changement climatique :

TYPE DE COMPOSANTS	MÉTHODE A	MÉTHODE B BASE	MÉTHODE B VARIANTE	MÉTHODE C
PCE neufs	99,6%	90,3%	94,3%	88,4%
PCE conservés	0%	7,8%	4,4%	5,5%
PCE déposés	0,4%	0,3%	0,3%	4,4%
PCE réemployés	0%	1,5%	1,0%	1,6%

Les PCE conservés sont les plus impactants en proportion dans le cas de la méthode B Base à cause de la prise en compte d'une partie de la fabrication et de la mise en œuvre (contrairement à la méthode C) et de renouvellements plus nombreux que dans la méthode B Variante.

Les PCE conservés et déposés sont les plus impactants la méthode C, du fait de la prise en compte de la totalité des fins de vie de ces composants. Ils représentent dans ce cas d'étude très exhaustif 10% des impacts GWP.

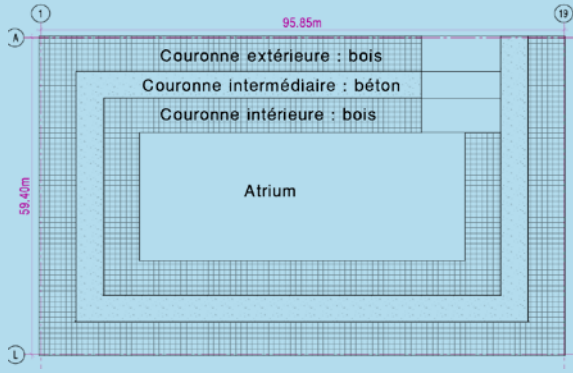
H

Analyse résultats projet R3

Comparaison de 4 méthodes sur l'opération R3

Description du projet R3

R3	
Données projet	
Typologie	Tertiaire : Bureaux
Nombre de bâtiments	1
Surface de plancher	29 549 m ²
Localisation	Saint Denis (93)
Année de livraison	2019 livraison en blanc 2021 travaux preneurs

R3	
Description technique	
Morphologie	6 niveaux de superstructure 2 niveaux de sous-sol Le bâtiment est organisé autour d'un atrium central non chauffé
Fondations	Pieux et béton projeté
Structure	Structure mixte bois-béton Infrastructure béton Couronne intermédiaire béton Planchers périphériques bois CLT et structure poteaux poutres bois 
Isolation	Laine de verre
Couverture	Toiture terrasse accessible avec potager urbain
Façade	Mur rideau aluminium et bois-aluminium Bardage aluminium
Chauffage et ECS	Thermofrigopompes électriques Chaudière gaz en secours
Ventilation	Ventilation double flux
Production énergétique	300 m ² de panneaux photovoltaïques en autoconsommation

Description des éléments issus du réemploi intégrés dans le projet :

20 445 m² de plancher technique issu du réemploi permettant la structuration de la filière en île de France. Les dalles de plancher technique sont issues de 8 gisements différents provenant d'île de France en majorité mais également de Nice ou Belgique pour certains.



Les dalles sont approvisionnées dans un entrepôt à côté du chantier puis subissent une opération de valorisation (ponçage, nettoyage). Leurs performances résiduelles sont également vérifiées par échantillonnage.

Malgré une recherche active de la part de l'équipe réemploi, il a été impossible d'obtenir l'âge de l'ensemble des gisements.

Une FDES spécifique au produit plancher technique issu du réemploi et reconditionné Mobius a été réalisée en 2020.

Il n'existe pas de FDES produit associée au plancher technique, seule une donnée environnementale par défaut est disponible.



Source : Mobius

Description des hypothèses

DVT composants issus du réemploi = 15 ans - cette hypothèse est prise après échanges avec Mobius et correspond à l'âge moyen des gisements

Méthode A : $I_{\text{valorisé}} = 0$

Méthode B : $I_{\text{valorisé}} = Q \times DE \times \frac{DV \text{ résiduelle}}{DVR}$

où :

- Q = quantité de PCE conservé ou déposés non amorti
- DE = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur toutes les étapes du cycle de vie du produit (incluant la fin de vie)
- DV_{résiduelle} = durée de vie résiduelle
- DVR = durée de vie de référence

Méthode C

$$I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ A2 \text{ éq neuf}}} + 0,1 * I_{A3 \text{ éq neuf}} + I_{A4 \text{ éq neuf}} + I_{A5 \text{ éq neuf}} + I_{B \text{ éq neuf}} + I_{C \text{ éq neuf}}$$

où :

- I_{Ai} = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur l'étape Ai du cycle de vie
- DE = impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti sur toutes les étapes du cycle de vie du produit (incluant la fin de vie)

Problématique : les données issues des données environnementales ne sont pas détaillées sur toutes les étapes du cycle de vie du produit. Deux variantes de la méthode C sont ainsi présentées :

Étape de production [module A1 - A3]	Étape du processus de construction [module A4 - A5]	Étape d'utilisation [module B]	Étape de fin de vie [module C]
--------------------------------------	-----------------------------------------------------	--------------------------------	--------------------------------



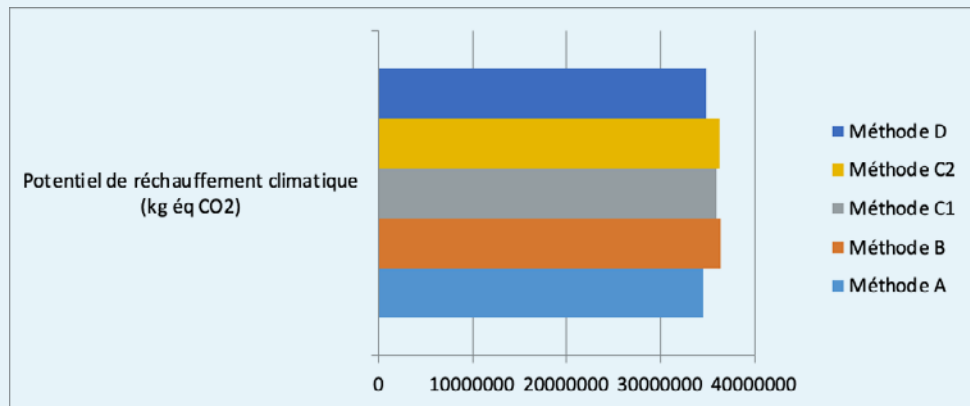
Méthode C1 : $I_{\text{valorisé}} = 0 * I_{A1 \text{ A3 \acute{e}q neuf}} + I_{A4 \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{A5 \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{B \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{C \text{ \acute{e}q neuf}}$
 Méthode C2 : $I_{\text{valorisé}} = 0,1 * I_{A1 \text{ A3 \acute{e}q neuf}} + I_{A4 \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{A5 \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{B \text{ \acute{e}q neuf}} + I_{C \text{ \acute{e}q neuf}}$

Méthode D : utilisation des données environnementales issues de la FDES Mobius « Plancher technique de réemploi non revêtu monté sur vérins neufs »

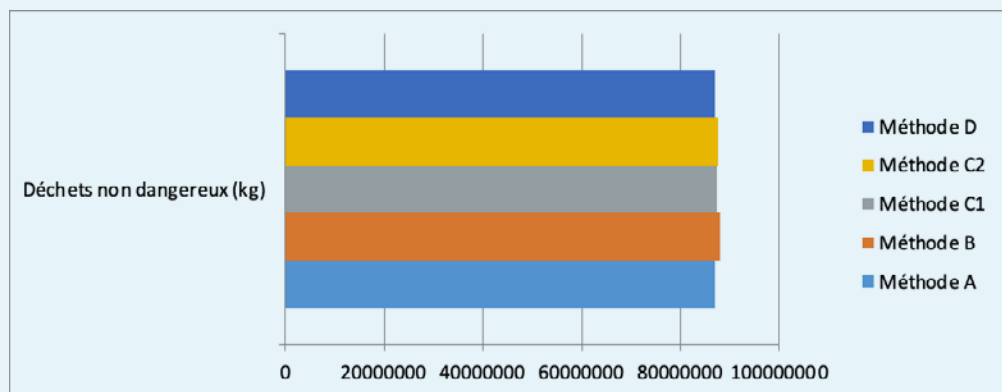
Analyse des résultats

Les résultats obtenus de l'ACV sur l'ensemble du projet R3 avec les 4 méthodes décrites ci-dessus sont présentés ci-dessous pour les quatre indicateurs suivants :

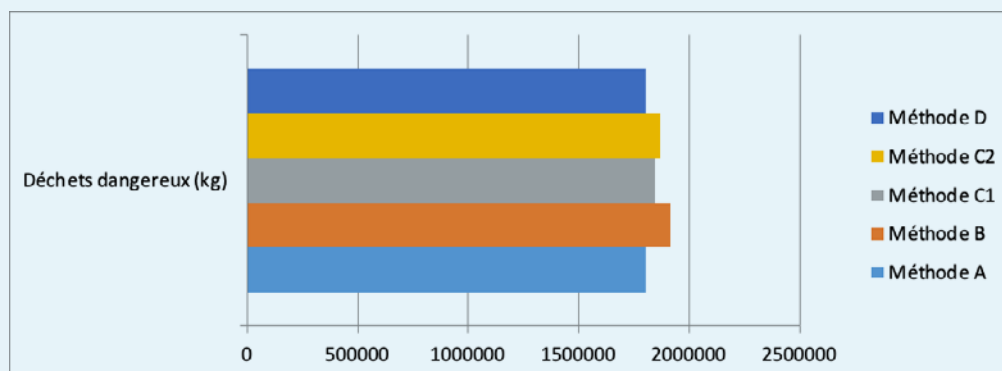
- réchauffement climatique ;
- déchets non dangereux ;
- déchets dangereux ;
- énergie primaire totale.



Ecarts par rapport à la méthode A : méthode B : + 5,40%, méthode C1 : + 4,12%, méthode C2 : + 5,06%, méthode D : 1,03%



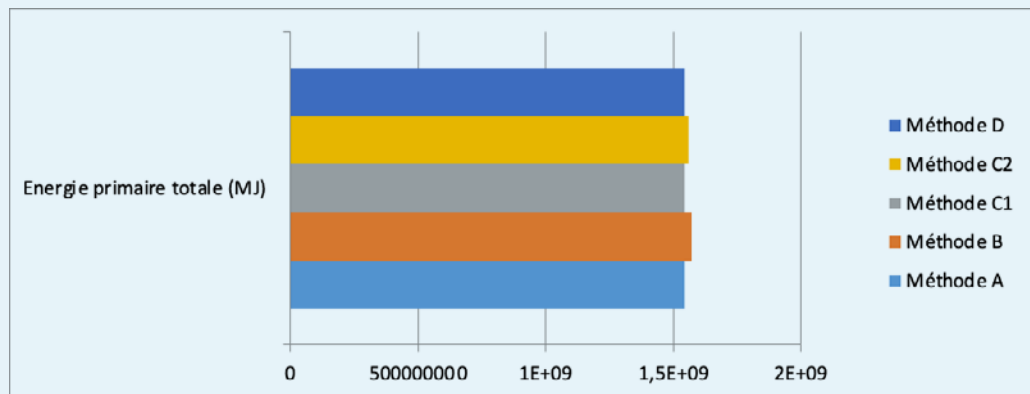
Ecarts par rapport à la méthode A : méthode B : + 1,1%, méthode C1 : + 0,41%, méthode C2 : + 0,65 %, méthode D : 0%



Ecarts par rapport à la méthode A : méthode B : + 6,33%, méthode C1 : +2,43%, méthode C2 : + 3,77%, méthode D : 0%

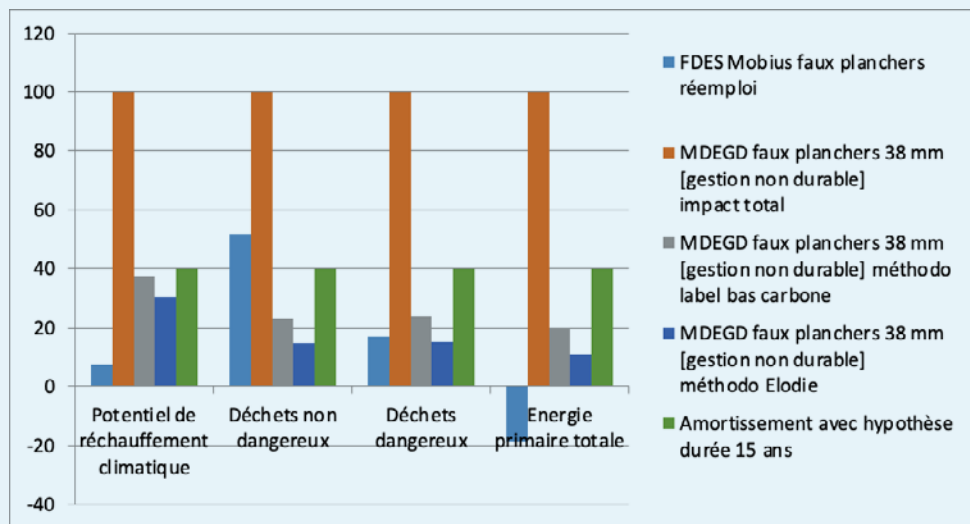


ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Ecarts par rapport à la méthode A : méthode B : + 1,95%, méthode C1 : +0%, méthode C2 : + 1,97%, méthode D : 0%

Résultats normalisés à l'échelle **composant** – pour 1 m² de plancher technique sur sa DVT de 25 ans



Sans surprise, la méthode A, correspondant à un impact nul, est la plus moins impactante sur tous les indicateurs.

Les méthodes B et C1 ont des résultats proches pour les indicateurs réchauffement climatique et déchets.

Les écarts concernant l'indicateur changement climatique sont les plus significatifs à l'échelle du projet, avec un écart allant de 5,40% pour la méthode B à 1,03% pour la méthode D (FDES réalisée). Les données environnementales par défaut issues de la MDEGD sont particulièrement élevées peuvent expliquer ces forts écarts.

La méthode D est la plus proche de la méthode A sur tous les indicateurs. Le résultat sur l'indicateur énergie primaire totale est encore à clarifier avec Mobius.

Pour le produit plancher technique, il semble avantageux de réaliser une FDES par rapport au recours à des méthodes d'évaluation du réemploi « simplifiées » à partir des données des produits neufs. Il reste difficile de tirer des conclusions généralisées sur les coefficients à adopter dans ces méthodes en se basant sur les résultats d'un seul produit.

REX pratique

Il a été impossible de déterminer la durée de vie résiduelle des différents gisements mis en œuvre sur le projet.

La réalisation d'une FDES spécifique à un process de réemploi est un engagement pour les acteurs à la fois en terme de coût mais aussi de durée d'études (1 an d'échanges avec l'organisme ayant réalisé la FDES).

Les différences restant minimes entre les méthodes, il faudrait un cas d'étude avec plusieurs éléments issus de réemploi mis en œuvre dans un projet pour affiner la pertinence des méthodologies d'évaluation dites « simplifiées » du réemploi. Évaluer l'ACV du process de réemploi pour les produits en voie de sérialisation nous semble une approche pertinente.

Analyse résultats projet GAGARINE – production de pavés en béton*

*rapport complet Cycle de Ville annexé à ce document

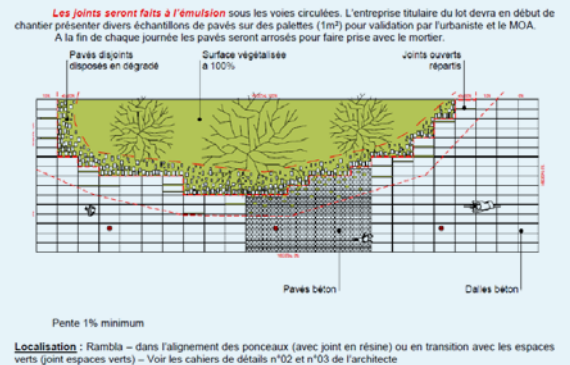
ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Associée à la production de

PAVES EN BETON ISSUS DE LA DECONSTRUCTION DES BATIMENTS DE LA CITE GAGARINE – A ROMAINVILLE (93)



Source : Cycle de ville



Dans le cadre du projet de renouvellement urbain porté par Est Ensemble, maître d'ouvrage de l'opération de déconstruction de la cité Gagarine à Romainville (93), et Seine Saint Denis Habitat propriétaire des bâtiments, ont souhaité mettre en œuvre une démarche de réemploi du béton, matière première essentielle mise en œuvre dans la structure des barres de logement HLM, datant des années 70, et prévues pour être déconstruites à partir de 2021.

Dans cette perspective, Cycles de Ville, co-traitant de Néo-Eco, en tant qu'AMO Réemploi pour Est Ensemble, a pour mission de réaliser l'analyse de cycle de Vie des éléments de pavés, produits par la déconstruction : Pavés produits par découpe, de certains éléments structurels des barres (principalement B et H) de la cité, pour être ensuite mis en œuvre sur en voirie piétonne du futur projet de renouvellement urbain prévu sur le site.

L'objectif de ce calcul est de mesurer l'ensemble des impacts environnementaux liés à la production de pavés issu du réemploi :

- o Depuis les premières découpe de béton sur le chantier et jusqu'à a mise en œuvre des éléments sur les différents sites de pose en voirie, conformément aux exigences de la norme **ISO 14044**
- o Pour une série **d'indicateurs environnementaux** choisis en adéquation avec les enjeux du réemploi et propre aux processus de production traditionnels des éléments de pavés en béton
- o Dans une analyse comparative à une production « traditionnelle », de pavés béton, avec comme base de comparaison les données issues de la FDES *FDES_Prefabricats Lleida pave*

Le produit visé dans cette ACV est le pavé en béton issu du réemploi, dont les mesures, les Tolérances et les propriétés physicochimiques sont décrites dans le document « CDV - Normativité - Méthodo production - Pavés réemploi béton »

Conformes aux spécifications de la norme EN 1338 : 2004 Pavés en béton - Prescriptions et méthodes d'essai.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

L'ACV porte sur un format de pavés cubiques : 14X14X14 Cm (bien que le projet prévoit un second format de 28X14X14) afin de simplifier au maximum l'approche.

NOTA : Contrairement au projet R3, le produit étudié n'est pas strictement l'équivalent du produit neuf, le pavé Gagarine étant issu d'un détournement d'usage et les méthodes proposées pour la modélisation du réemploi ne peuvent s'appliquer comme pour le plancher technique. Nous appliquerons toutefois les méthodologies C1 et C2 à titre illustratif, même si l'abattement proposé par ces méthodes est a priori trop favorable par rapport au process nécessaire pour une réutilisation. La méthode B est quant à elle très peu pertinente ici, un raisonnement en termes d'amortissement étant difficilement transposable sur ce scénario.

ANALOGIE :

Comme c'est le cas pour des pavés traditionnels : L'étude a été réalisée sur la totalité du cycle de vie d'1 m de pavés béton, avec une **DVT identique de 50 ans**

Les propriétés mécaniques et liées à l'usage du matériau étant les mêmes que celle d'un pavé classique, les éléments produits répondant au même cadre normatif, L'ensemble de impacts liés à aux phases d'utilisation et de fin de vie sont considérées comme identiques

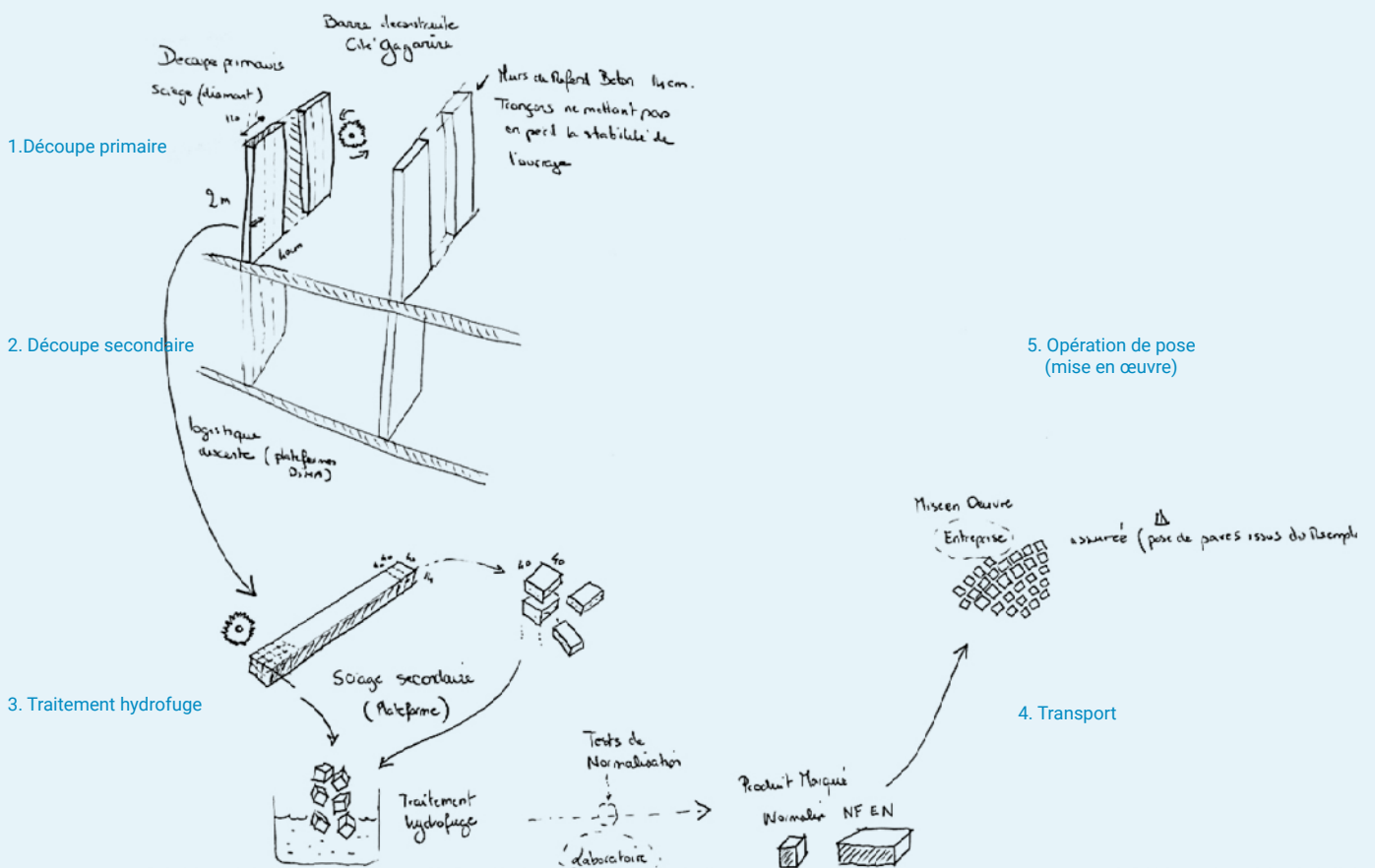
Les unités seront calculées pour prendre en compte la différence de format entre les pavés liés à la FDES et ceux du format décrit ci-dessus

ADAPTATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL SUIVANT LE PROCESS DE PRODUCTION :

Seules les phases de production ont fait l'objectif d'un calcul « alternatif », basé sur le processus de production spécifique envisagé dans le cadre du projet expérimental mené sur la cité Gagarine

- Les étapes de production (Étape de production (A1 – A3)) ont fait l'Object d'une analyse spécifique , qui constitue l'essentiel de la partie « innovante »/hors cadre du projet .
- La mise en œuvre des pavée étant réalisée sur le site même de la cité Gagarine, dans les futurs aménagements de voirie : L'étape de Transport de Matériaux (A4) a été considérée comme nulle
- Il est envisagé de mettre en évidence le « bénéfice de charge au-delà de la frontière du système, car nous allongeons la durée de vie du produit, en envisageant de le réemployer lui-même
- Afin de prendre en compte a différence de format entre les 2 produits (FDES pavés classiques et pavés Gagarine) un facteur 2,238 est appliqué dans la comparaison des impacts environnementaux associés aux 2 produits *(explication détaillée dans le rapport de calcul)

Processus de production (jusqu'à mise en œuvre)



Source : Cycle de ville

ESTIMATION DES IMPACTS PAR POSTE

- Impact des découpes : par un matériel essentiellement électrique et hydraulique
- Impact de l'usinage : par un matériel essentiellement électrique
- Impact des produits de finition : FDES trouvé sur une référence de produit qui sera de fait prescrit, comme hydrofuge, ainsi que celui d'un passivateur de béton ou produit dégradant le plâtre (en cours)

CHOIX DES INDICATEURS

Les indicateurs de la norme EN 15804 ont été retenus, afin de permettre une comparaison avec une FDES de pavé classique.

En plus de ces indicateurs normalisés, d'autres indicateurs ont été mis en évidence afin de mieux exprimer l'impact évité sur les ressources naturelles, et notamment les éléments suivants :

- Extraction de Sable
- Extraction de graviers/Granulats
- Extraction de Gypse/calcaire/autres Produits entrant dans la composition du Ciment (la phase de fabrication du ciment est déjà mesurée par l'impact CO2 évité)

NOTA : une comparaison ACV à partir du système « bâtiment », aurait pu être réalisée pour apprécier la réduction d'impact de ce remploi par rapport à une fin de vie en centre d'enfouissement / remblais de voirie. Cette étude n'est pas à ce jour prévue par EST ENSEMBLE, l'étude ACV réalisée étant centrée sur l'élément « pavé béton issu du réemploi des barres B et H »

Pour les indicateurs qui ont été étudiés pour l'ensemble des projets utilisateurs, l'étude montre les résultats suivants pour la comparaison entre le pavé produit à partir de la déconstruction de la cité Gagarine et l'unité fonctionnelle équivalente en pavé neuf :



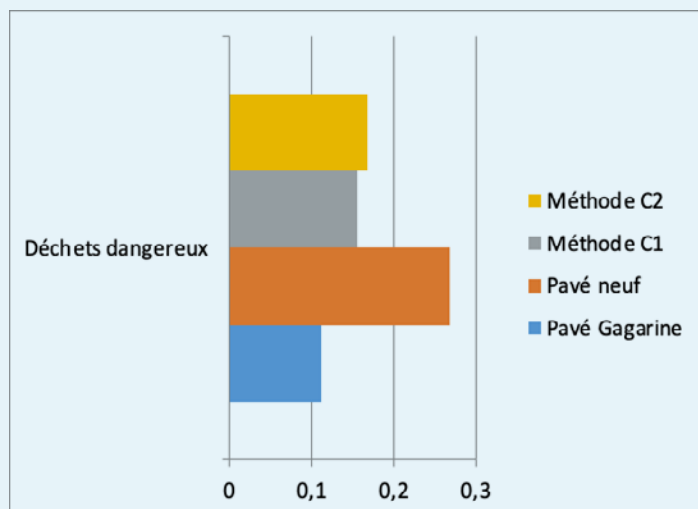
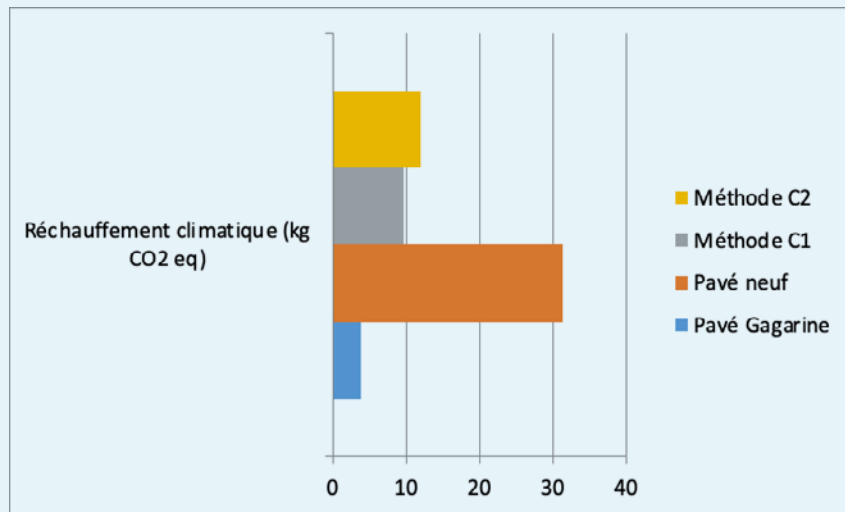
ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

	PAVÉ GAGARINE	PAVÉ CLASSIQUE	MÉTHODE C1	MÉTHODE C2
Réchauffement climatique (kg CO ₂ eq)	3,77	31,33	9,73	11,89
Déchets dangereux (kg)	0,11	0,27	0,16	0,17
Déchets non dangereux (kg)	60,30	73,30	69,30	69,70
Energie primaire (MJ)	589,34	299,70	188,70	199,80

La différence est particulièrement spectaculaire sur l'impact réchauffement climatique (près de 90% de réduction pour le pavé Gagarine par rapport au neuf).

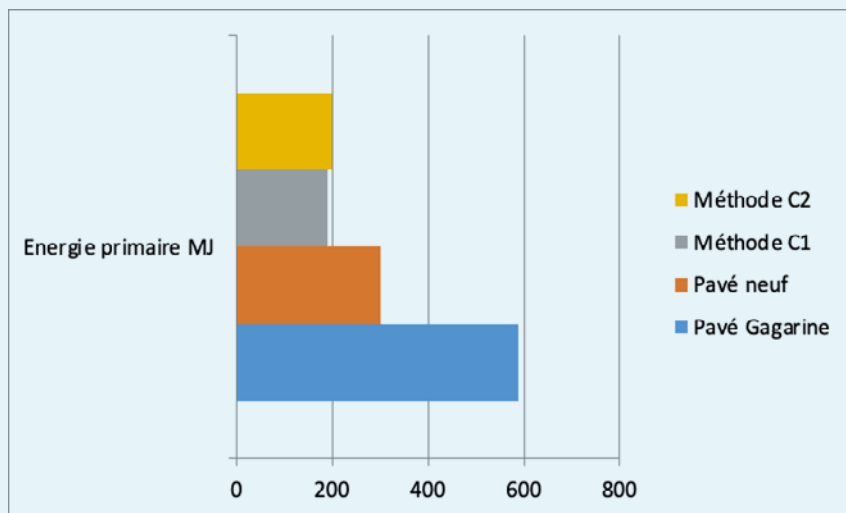
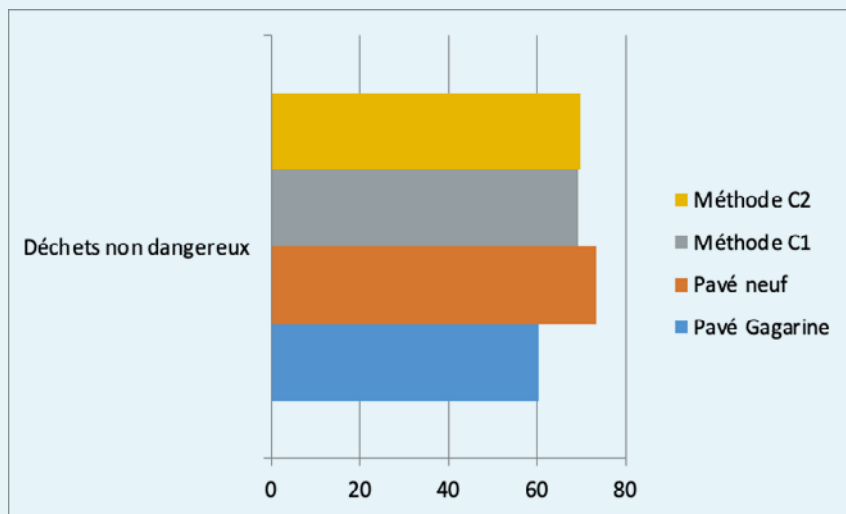
La consommation totale d'énergie primaire non renouvelable est en revanche beaucoup plus élevée pour le pavé Gagarine, soulignant l'importante consommation énergétique engendrée par le processus de production du pavé issu du réemploi. Cet impact est en effet majoritairement issu de la phase A1-A3. Il souligne l'importance de cette phase de cette phase dans les procédés de transformation pour un réemploi ou une réutilisation, qui ne peuvent être négligés pour quantifier l'impact environnemental du réemploi. Ces impacts sont directement issus de l'étude réalisée par Cycle de Ville et nous n'avons pas été en mesure de les vérifier. Bien qu'un impact conséquent du processus de découpe du béton puisse s'expliquer, la décorrélation entre les indicateurs changement climatique et consommation d'énergie primaire qui ressort de l'étude est à considérer avec vigilance.

Les résultats pour ces indicateurs sont illustrés graphiquement ci-dessous par indicateur :

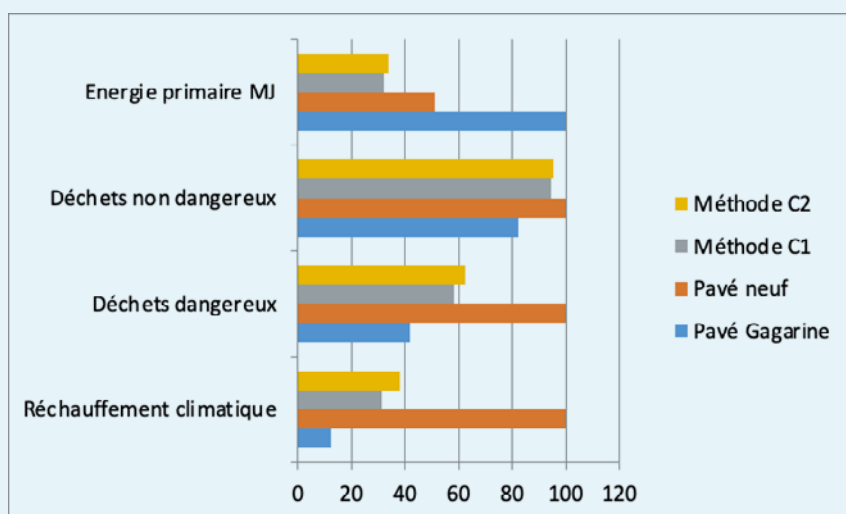




ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS



Puis normalisés par rapport à l'impact majoritaire, en % :



Ces comparaisons montrent des variations assez importantes d'une méthode à l'autre : la question de la réutilisation est bel et bien plus complexe que celle du réemploi pur.



ÉCONOMIE CIRCULAIRE
DES BÂTIMENTS

Les données environnementales du matériau final ne sont pas nécessairement la bonne référence pour extrapoler l'impact dû aux phases A1 à A3. Il conviendrait de tester plusieurs types de process pour plusieurs types de réutilisations afin de définir des règles plus spécifiques pour les types de scénarios étudiés.

Les résultats de l'étude sur le pavé Gagarine sont de plus questionnables sur les résultats énergie et carbone et des conclusions précises sont de fait difficiles à tirer de ces résultats.

NB : l'étude est en cours d'actualisation afin d'approfondir les indicateurs énergie et carbone calculés et de mieux pouvoir exploiter les résultats. Il sera intéressant d'analyser cette mise à jour pour aller plus loin dans les enseignements de cette étude de cas.

Concernant l'étude des ressources naturelles « économisées », les données suivantes ont pu être rassemblées, indiquant la quantité de matière qui n'aura pas besoin d'être extraite si le pavé Gagarine est mis en œuvre au lieu d'un pavé neuf :

Matière première	Poids		Poids en Kg/m ² pavés	
	min	max	Mini : 115	Maxi :190
Sable	40%	60%	46	114 kg/m ²
Sable recyclé	1,50%	6%	0,69	6,84
Gravier	30%	50%	2,07	3,42
Ciment	5%	15%	0,0104	0,513
Eau	5%	15%	5,18E-04	0,0770
Additifs	1%	10%	5,18E-06	7,70E-03

La prise en compte des paramètres matière, encore très peu abordée, ne devrait pas être dissociée de l'approche en termes de réchauffement climatique en effet, indépendamment du process, la préservation de la matière non renouvelable est un enjeu clé du réemploi et sa quantification peut être réalisée très factuellement.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

Sommaire

1. PREAMBULE	3
1.1 Précaution d'utilisation de la DEP pour la comparaison des produits	3
2.1 Unité fonctionnelle	4
2.2 Description du produit	4
2.3 Classe des produits et désignation	4
2.4 Classe des produits comparés (pavés traditionnels) et désignation	5
3.1 . Description des principaux composants et/ou matériaux du produit	6
3.2 Autres caractéristiques techniques non incluses dans l'unité fonctionnelle	6
4. DETAILS DU PROCESSUS DE PRODUCTION	7
4.1 Post-traitement / usinage	7
4.2 Traitement de finition	7
5. ÉTAPES DU CYCLE DE VIE	8
5.1 4.1. Limites du système	8
5.2 - Étape de production (A1 – A3) spécifiques	9
5.2.1 Consommation énergétique liée aux découpes	9
5.2.1 Traitement de finition hydrofuge	10
5.2.1 Comparaison au processus de production des pavés bétons classiques	11
5.3 Étape du processus de construction (A4 – A5)	12
A4. TRANSPORT.	12
A5. INSTALLATION DANS LE BATIMENT Y COMPRIS ESPACES EXTERIEURS)	12
5.4 - Étape d'utilisation (B1 à 7)	12
5.5 Étape de fin de vie :	13
6. INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX RETENUS	13
7. ECONOMIE DE RESSOURCES NATURELLES	15
8. CALCUL DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	16
8.1.1 Impacts liés à la consommation électrique	16
8.1.1 Impacts des produits de finition	17
Impacts des produits de finition pour une durée de vie de référence de 20 ans – pour 1 m ² de pavés	17
9. RESULTATS IMPACTS GLOBAUX	18
9.1.1 Interprétation des résultats	18
9.1.2 Comparaison des impacts environnementaux par indicateur entre le pavé neuf et le pavé de réemploi	20
9.1.3 Bilan global des résultats	24

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

1. Préambule

Dans le cadre de l'ambitieux projet de renouvellement urbain porté par Est Ensemble , maitre d'ouvrage de l'opération de déconstruction de la cité Gagarine à Romainville (93), et Seine Saint Denis Habitat propriétaire des bâtiments , ont souhaité mettre en œuvre une démarche de réemploi du béton , matière première essentielle mise en œuvre dans la structure des barres de logement HLM, datant des années 70, et prévues pour être déconstruites à partir de 2021 , dans le cadre d'un ambitieux projet de renouvellement urbain

Dans cette perspective, Cycles de Ville, co-traitant de Néo-Eco, en tant qu'AMO Réemploi pour Est Ensemble, ont pour mission de réaliser l'analyse de cycle de Vie des éléments de pavés, produits par la déconstruction, par découpe, des barres de la cité et mis en œuvre sur une voirie piétonne du futur projet de renouvellement urbain associé à la Cité Gagarine.

L'objectif de ce calcul est de mesurer l'ensemble des impacts environnementaux liés à la production de pavés issu du réemploi :

- Depuis les premières découpe de béton sur le chantier et jusqu'à a mise en œuvre des éléments sur les différents sites de pose en voirie, conformément aux exigences de la norme **ISO 14044**
- Pour une série d'indicateurs environnementaux choisis en adéquation avec les enjeux du réemploi et propre aux processus de production traditionnels des éléments de pavés en béton
- Dans une analyse comparative à une production « traditionnelle », de pavés béton, avec comme base de comparaison les données issues de la FDES_Prefabricats Lleida pave présentée en annexe 1

Ce document présente :

D'abord la méthodologie de calcul ACV, qui suit les principales étapes de production des pavés, (telle que décrite dans la note méthodologique de production), tout en respectant le cadre réglementaire liés à la norme NF EN 15804+A1.

- Les hypothèses, prises en comptes dans le calcul
- Les indicateurs retenus

1.1 Précaution d'utilisation de la DEP pour la comparaison des produits

Les DEP de produits de construction peuvent ne pas être comparables si elles ne sont pas Conformés à la norme NF EN 15804+A1.

La norme NF EN 15804+A1 définie au § 5.3 Comparabilité des DEP pour les produits de construction, les conditions dans lesquelles les produits de construction peuvent être comparés, sur la base des informations fournies par la DEP :

" Une comparaison de la performance environnementale des produits de construction en utilisant les informations des DEP doit être basée sur l'usage des produits et leurs impacts sur le bâtiment, et doit prendre en compte la totalité du cycle de vie (tous les modules d'informations)."

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

2. Description du produit Unité fonctionnelle

Assurer le revêtement de 1 m² de revêtement extérieur en pavé béton pendant Une durée de vie de référence de 50 ans.

Paramètre	Valeur
Durée de vie de référence	50 années
Propriétés déclarées du produit (à la sortie de l'usine) et finitions, etc.	Voire point 3.4 autres caractéristiques techniques non incluses dans l'UF
Paramètres théoriques d'application, y compris les références aux pratiques appropriées	Conforme aux indications de la future fiche technique produit (suite à normalisation)
Qualité présumée des travaux, lorsque l'installation est conforme aux instructions du fabricant	Conforme aux indications de la future fiche technique produit (suite à normalisation)
Environnement extérieur	Le produit est inerte, sans dégradation ni émission de polluants dans l'air, eau ou sol.
Environnement intérieur	Non pertinent.
Conditions d'utilisation	Conforme aux indications de la future fiche technique produit (suite à normalisation)
Maintenance	Le produit n'a pas besoin de maintenance.

2.2 Description du produit

Le produit visé dans cette ACV est le pavé en béton issu du réemploi, dont les mesures, les Tolérances et les propriétés physicochimiques sont décrites dans le document « CDV - Normativité - Méthodo production - Pavés réemploi béton » Conformes aux spécifications de la norme EN 1338 : 2004 Pavés en béton - Prescriptions et méthodes d'essai.

L'ACV porte sur les 1 format de pavés cubiques : 14X14X14 Cm

2.3 Classe des produits et désignation

Dans le cadre de la demande d'admission à la normalisation (marquage NF, certifiée AFNOR), les caractéristiques d'identification des pavés objet de la demande seront les suivants :

Pavés issus du réemploi de béton de la cité Gagarine à Romainville

DESIGNATION	L	L	E
Pavés cubes	14 cm	14 cm	14 cm

Caractéristiques	Type pavé cube
Appellation du modèle	Pavé béton de réemploi – aspect brut

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

Type de pavé	Autobloquant
Appellation NF	T3-4
Dimensions de fabrication	14X14
Epaisseur	14cm
Catégorie de béton	A préciser suite au sondage : béton armé
Famille de surface (traitement de surface et granulat principal)	Brut (surface non sciée) / lavé/alluvionnaire ?
Résistance renforcée aux agressions climatiques (option D)	Traitement post traitement – rebouchage des pores (produit spécifique de type SP100/ ou Sikagard90)
Machine de fabrication	Scie circulaire murale et manuelle à Disque diamanté

2.4 Classe des produits comparés (pavés traditionnels) et désignation

(marquage NF, certifiée AFNOR), les caractéristiques d'identification des pavés objet de la demande seront les suivants :

Les pavés béton « traditionnels » utilisés comme base de comparaison présentent les formats suivants

Tableau 2. Références incluses

Famille de produit	Nom commercial	Dimensions (mm) Long x Large x Haut
Pavés	Pavé 8x10x20 Gris	200x100x80
	Pavé 8x10x20 Noir	200x100x80
	Pavé 8x10x20 Rouge	200x100x80
	Pavé Pelouse 10x45x67	670x450x100

Les résultats présentés dans cette FDES correspondent à une moyenne pondérée en fonction du pourcentage de ventes des produits (l'impact moyen est inférieur à 1,4 fois les bornes minimales et maximales).

Soit un volume moyen de 0,0087375 m3 / 8,737 dm3 par pavé

Si l'on considère le pool de pavés issus de la déconstruction, dans un mélange composé de 2 éléments de 14X14X14 pour un élément de 14X14X28, le volume moyen d'un pavé de réemploi serait de 3,65 dm3 par pavé de réemploi

- Un facteur **2,388** est donc à prévoir dans la comparaison des impacts environnementaux associés aux 2 produits (réemploi / classique)

3. Description de l'usage du produit

Les chaussées construites avec des pavés combinent les avantages des chaussées flexibles sans les inconvénients des produits bitumineux. Contrairement aux pavés rigides, le sol revêtu avec pavé de réemploi, posé sur lit de sable, en « opus incertum » est capable d'absorber les déformations, les impacts et les charges à la fois distribuées et ponctuelles et d'absorber les contraintes horizontales telles que le freinage, l'accélération ou la rotation. Utilisé pour la circulation piétonne, son fonctionnement et sa durabilité sont presque illimités.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

3.1 . Description des principaux composants et/ou matériaux du produit

Au regard de la caractérisation des bétons réalisés par carottage / tests en laboratoire, à la suite des sondages et carottage du 13 /15 juin 2020



Carottage dans murs de refend ep= 14 cm

3.2 Autres caractéristiques techniques non incluses dans l'unité fonctionnelle

Caractéristique	Norme	Valeur pavé	Valeur pavé pelouse
Absorption de l'eau	EN 1338 :2004 EN 771-3:2003	≤6% (Classe 2:B)	7 g/m2 sec
Résistance à l'abrasion	EN 1338 :2004 EN 771-3:2003	Classe IV :I	-
Réaction au feu	EN 1338 :2004 EN 771-3:2003	Euroclasse A1	Euroclasse A1
Émission d'amiante	EN 1338 :2004 EN 771-3:2003	Sans émissions	Sans émissions

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

4. Détails du processus de production

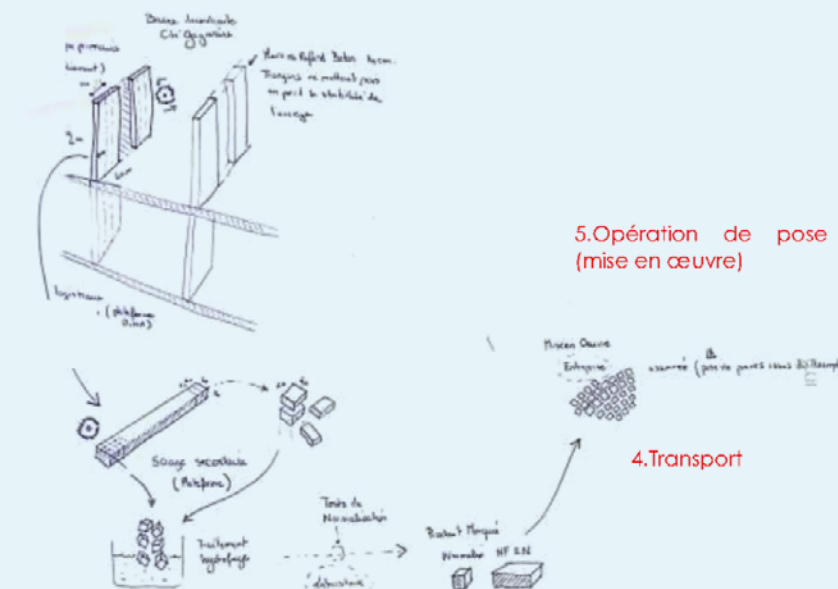
1. Découpe primaire

2. Découpe secondaire

3. Traitement hydrofuge

5. Opération de pose (mise en œuvre)

4. Transport



4.1 Post-traitement / usinage

Afin de limiter les coûts et impacts environnementaux, aucune opération d'usinage ni traitement de surface particulier n'est prévu, en dehors du strict nécessaire à la viabilité et la bonne tenue dans le temps des pavés. (Voir infra) ainsi :

- Aucune découpe secondaire n'est envisagée : finition des angles, retaille manuelle ...
- Aucun traitement de type bouchardage, flammage, peinture...

Ne sont prévus.

4.2 Traitement de finition

Afin d'assurer la résistance des éléments au gel et à l'humidité, notamment, et compte tenu de la nature intrinsèquement poreuse du béton, ainsi que de la présence d'éléments métalliques d'acier au contact de l'air et de l'humidité, susceptibles de subir une oxydation pouvant fragiliser sa structure du pavé et pouvant mener à l'éclatement, un traitement préalable des blocs de pavés issus de la découpe, sera nécessaire.

Plusieurs traitements sont à prévoir :

- 1- Un traitement de la porosité : par application d'un produit minéralisant en phase aqueuse (hydrofuge) qui traitera également les aciers apparents contre la corrosion Et protégera également les pavés contre l'éclatement lié au gel.

les produits en phase aqueuse sont moins nocifs pour l'environnement (dans la continuité de la logique mise en œuvre dans le cadre du réemploi, afin de limiter les impacts environnementaux liés au traitement et le risque pour le personnel de chantier) ;

- 2- Un traitement anti-corrosion des pointes d'acier en contact avec l'air

Plusieurs références de produits sont accessibles sur le marché : produit **SP100 (Weber)** de ou **sikagard (marque Sika)**

Les quantités de produit de finition est estimée chapitre 5.2.2

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

5. Étapes du Cycle de vie



5.1 4.1. Limites du système

En conformité avec les normes NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN, les modules inclus sont les suivants (du berceau à la tombe) :

Étape de production			Étape du processus de construction		Étape d'utilisation							Étape de fin de vie			Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	
Approvisionnement matière première	Transport	Fabrication	Transport	Installation	Usage	Maintenance	Réparation	Remplacement	Réhabilitation	Utilisation de l'énergie	Utilisation de l'eau	Déconstruction/démolition	Transport	Traitement des déchets		Décharge
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X: Module inclus

MND: Module Non Déclaré

Tableau 4. Modules du cycle de vie inclus dans les limites du système.

Au regard des objectifs liés à cette production de pavés issus du réemploi de béton, qui consiste à obtenir un pavé réemployable, répondant aux mêmes normes et caractéristiques requises dans un domaine d'usage identique à des pavés béton classique,

Nous considérerons dans l'étude ACV que :

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

- L'ensemble des étapes de production (A1-A3) et de transport A4, comme spécifiques à cette production
- Toutes les autres étapes seront identiques à celle d'un pavé classique béton (installation, utilisation, fin de vie) y compris la fin de vie

5.2 - Étape de production (A1 – A3) spécifiques

Les modules A1, A2 correspondant à l'approvisionnement en matière première et à son transport sont **considérés comme nulle**, puisque le béton est découpé sur le site même de Gagarine ou sont produits les pavés., **à l'exception du** produit minéralisant et de traitement des aciers qui constitue la seule finition dans le **procédé**

- **Impact environnemental du produit** : FDES Produits minéralisant en phase aqueuse
- **Quantités utilisées pour 1 m² de pavés** : Le flux de référence qui correspond à la quantité de produit minéralisant en phase aqueuse nécessaire à la protection de 1m² de surface est : 0,093 kg/m² soit 79mL

Le module A3 : production est le plus différenciant, car il comprend l'ensemble des opérations de découpe du béton, primaire et secondaire, ainsi que le traitement hydrofuge de finition indispensable à la résistance au gel et tenue dans le temps du pavé.

3 étapes donc :

- La découpe primaire (ou déconstruction)
- La découpe secondaire
- La finition = traitement minéralisant du béton et corrosion des aciers

Dans cette phase :

- De **l'eau** liée aux opérations de sciage est consommée
- La **consommation d'énergie** est liée aux opérations de découpe par sciage au disque diamanté (ou découpe hydraulique haute pression le cas échéant) et de logistique (nacelles bi-mats)
- Les seuls produits considérés sont les **produits de traitement minéralisant et anti-corrosion des aciers** : avec une production de déchets dangereux associée

Le processus de production est décrit au chapitre 3

5.2.1 Consommation énergétique liée aux découpes

Afin d'estimer les impacts environnementaux associés à la consommation énergétique du process, examinons l'ensemble des étapes de la production des pavés, et tentons d'estimer pour chaque étape :

- Le type de consommable : électrique / fuel ou autre combustible fossile
- La puissance des appareils de production et d'usinage mis en œuvre
- Leur temps de fonctionnement

Les étapes consommant de l'énergie dans la production correspond **(en dehors des outils de transport interne ou de maintenance nécessaire : montes charges ...ceux-ci étant considérés comme mutualisés avec d'autres équipements de chantier indispensable) : au sciage primaire et secondaire des pavés*

- **Outils & puissances unitaires :**

La fiche technique de la scie employée pour réaliser les calculs de consommations, nous indique les caractéristiques suivantes :

- Puissance du générateur : 40 kVA @ 32 A
- Alimentation eau de refroidissement : 4 L/mn
- Puissance du moteur : 15 kW
- Diamètre initiale lame max. : 900 mm

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

• **Temps de fonctionnement :**

Selon les retours d'expérience et données issus de diverses entreprises de sciage : le temps de découpe pour une porte de 2.6 m² est estimé à 2h

SCIAGE PRIMAIRE			
Porte 2,6 m²			
Temps découpe	Puissance SCIE	Consommation en eau en litres	Consommation électrique en kWh
2 Heures	40 kW	480	80
SCIAGE SECONDAIRE			
Porte 2,6 m²			
Temps découpe	Puissance SCIE	Consommation en eau en litres	Consommation électrique en kWh
2 Heures	40 kW	480	80

Rapporté à la surface d' 1 m² pavé de béton 45 minutes

SCIAGE PRIMAIRE				
Pavé 1 m²				
Temps découpe	Puissance SCIE	Consommation en eau en litres	Consommation électrique en kWh	
45 min	40 kW	185	31	
SCIAGE SECONDAIRE				
Pavé 1 m²				
Temps découpe	Puissance SCIE	Consommation en eau en litres	Consommation électrique en kWh	
45 min	40 kW	185	31	
TOTAL	1h30	40 kW	369	62

Sur l'ensemble du processus de découpe : une consommation totale de **62 kWh** d'énergie finale, soit **159,34 kWh** d'énergie primaire sera nécessaire

Une consommation d'eau de **369 m3** est également estimée .

5.2.1 Traitement de finition hydrofuge

Suite à la découpe des pavés, ceux-ci ne peuvent pas être considérés comme prêt à l'emploi dans un usage de revêtement de sol extérieur et devront subir un traitement hydrofuge (minéralisant) afin de compenser la porosité naturelle du béton , leur confèrent une meilleure résistance à l'infiltration d'eau, au gel , agent pouvant entrainer à terme leur fissuration et la corrosion des aciers .

Le produit minéralisant sera un produit en phase aqueuse de marque **Hydro MINERAL, seul produit présentant l'avantage de posséder , à cette date , une FDES** présentée en annexe.

La quantité de produit recommandée pour la protection **d'une surface de 1 m² (cf. . selon les données du fabricant : fiche technique et FDES)** est de **0,093 kg/m2 soit 79 ml**

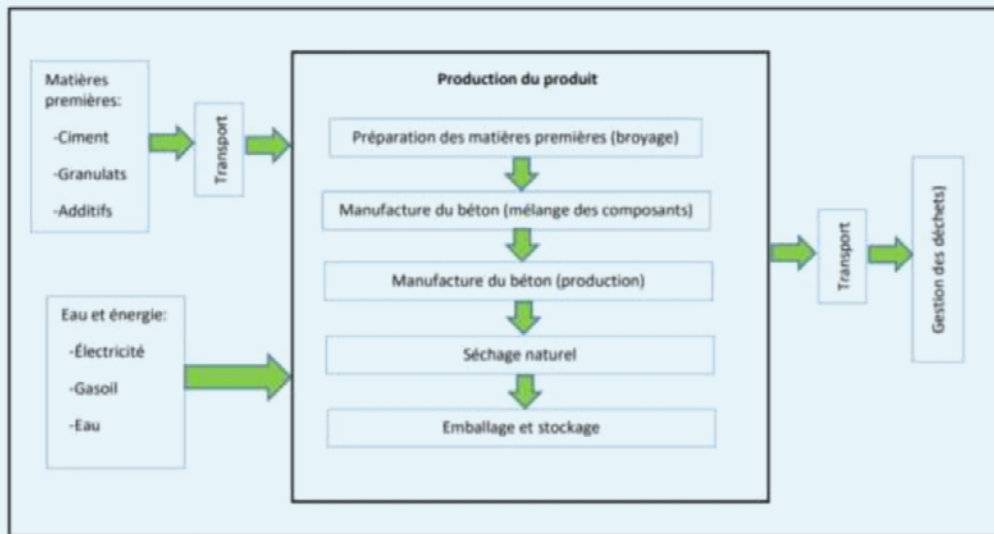
A noter : la durée de vie du produit étant de 20 ans, un renouvellement de la protection tous les 20 ans, sera à prévoir : **soit 2 traitements** à prévoir sur toute la durée de vie du pavé (DVT des pavés béton = 50 ans)

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

5.2.1 Comparaison au processus de production des pavés bétons classiques

Figure 1 Diagramme du processus de production



ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

5.3 Étape du processus de construction (A4 – A5)

A4. Transport.

Le transport considéré sera réalisé par camion, sur les distances minimales entre lieu de production (barre B par exemple) et lieu de pose en voirie. Soit de très faible distance, car limitées à 500 m/1 km, en tous les cas inférieurs à 5 km (dans le cadre d'une mise en œuvre sur le territoire d'est Ensemble) nous envisagerons de négliger ces impacts

➤ Cette étape sera mise à jour en fonction localisation finale des chantiers de pose , dans la version finale de l'ACV

A5. Installation dans le bâtiment y compris espaces extérieurs)

Cette étape concerne les opérations de mise en œuvre du pavé en voirie piétonne/légère. La mise en œuvre sera réalisée sur lit de sable, en « opus incertum », avec joint engazonné

5.4 - Étape d'utilisation (B1 à 7)

L'étape de vie en œuvre comprend :

- B1. Utilisation du produit dans des conditions normales d'utilisation, processus de carbonatation compris.

La Carbonatation est un processus chimique par lequel le dioxyde de carbone dans l'air est absorbé par le béton. Pendant la durée de vie du produit, le dioxyde de carbone présent dans L'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau, modifiant progressivement la composition chimique et la microstructure. Le degré de carbonatation Dépend du temps d'exposition, de la géométrie du produit et de l'exposition du produit aux Intempéries.

- Le pavé ne nécessite aucune consommation d'énergie ni d'eau supplémentaire pendant sa durée de vie ; par conséquent les modules B6 et B7 n'ont pas d'impact.

- Les scénarios de nettoyage ou de remplacement n'ayant pas été considérés comme pertinents, au regard de la pérennité des ouvrages et de l'absence d'entretien spécifique prévu sur les voiries, les modules B2, B3, B4 et B5 n'ont donc aucun impact.

Pendant l'étape d'utilisation, seul le processus de carbonatation a été pris en compte. Pour le Calcul de ce processus la méthodologie montrée dans la norme EN 16757 a été suivie.

PARAMÈTRE	VALEUR
PROCESSUS DE CARBONATATION DU BETON PENDANT LA DUREE DE VIE DU PRODUIT	2,17 kg de dioxyde de carbone atmosphérique/m2 de produit

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

5.5 Étape de fin de vie :

L'étape de fin de vie comprend :

- C1. Déconstruction/démolition : utilisation d'une machine mécanique.
- C2. Transport
- C3. Traitement des déchets : le concassage / tamisage des déchets de béton est inclus pour être réutilisé en tant que granulats secondaires. (Sous réserve d'une caractérisation pour vérifier sa compatibilité avec les normes béton ou VRD)
- C4. Décharge : déposition en décharge.

Pour la gestion du pavé en béton en fin de vie, que ce soit pour le pavé issu du réemploi ou le pavé béton standard, le scénario indiqué dans la norme NF EN 15804 /CN a été considéré, faisant référence à la situation en France en 2011, dans laquelle 75% du béton a été recyclé (source : Commission Générale du Développement Durable).

6. Indicateurs environnementaux retenus

Dans un souci de cohérence et de sens vis-à-vis des enjeux environnementaux associés à la production spécifique de ces pavés issus du réemploi du béton, mais également à ceux associés à une production « classique » de pavés béton.

Les indicateurs suivant correspond aux indicateurs normalisés, définis dans le cadre de la norme NF EN 15 804 .

parmi eux , certains seront éliminés car nuls dans le bilan ACV de chaque produit (béton classique ou de réemploi) , d'autres seront mise en évidence , notamment :

- Les indicateurs « Matière » : liés à la consommation et à la production de matière et ressource naturelle
- Les indicateurs « environnementaux fondamentaux »
- Les indicateurs « déchets » : de production de déchets

Afin de mettre en évidence les gains escomptés dans le cadre de la production de pavés de réemploi , nous réaliserons une estimation du gain, et

➤ **Indicateurs environnementaux (principaux) :**

- Réchauffement climatique (GWP),
- Acidification des sols et de l'eau (AP),
- Potentiel d'Eutrophisation (EP),
- Formation d'ozone photochimique (POCP), (ou potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique)
- Épuisement des ressources abiotiques (fossiles) (ADPF),
- Pollution de l'eau (Water)
- Pollution de l'air (Air).
- Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

➤ **Indicateurs déchets**

- Déchets dangereux éliminés
- Déchets non dangereux éliminés

➤ **Indicateurs énergie**

- Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières)
- Utilisation de l'énergie primaire renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie employées en tant que matière première
- Utilisation de ressources énergétiques primaires renouvelables employées en tant que matière première
- Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire employées en tant que matière première
- Énergie fournie à l'extérieur*

➤ **Indicateurs matière**

- Utilisation de matières secondaires
- Utilisation nette d'eau douce
- Matières pour le recyclage**
- Composants destinés à la réutilisation

- Matières pour la récupération d'énergie (à l'exception de l'incinération)
- Utilisation de combustibles secondaires renouvelables
- Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables

* indicateurs ne sont pas mesurés car nuls

**indicateurs apparaisse en excédent ou en perte dans le système , mais en réalité présente un atout puisque la matière pourra être valorisées , réutilisée dans un autre process : ils sont donc considérés, contrairement aux autres comme des externalités positives .

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

7. Economie de ressources naturelles

A ces indicateurs conventionnels normalisés, nous nous intéresserons également à la matière première naturelle économisée, c'est-à-dire « non extraite »: à savoir :

L'ensemble des composants naturels entrant dans la fabrication des pavés béton :

- le Sable
- les graviers ou Granulats
- le Gypse naturel
- le calcaire/autres produits entrant dans la composition du Ciment

A noter :

- L'impact lié à la fabrication du ciment est mesuré dans la phase A1 : approvisionnement en matière première du pavé de béton classique
- En France , le gypse entrant dans la composition des ciments est essentiellement naturel, en ile de France, il provient principalement des carrières de Vaujours et Bonneuil , dans le val d'Oise (95)

Les ressources nécessaires à la production d'un m² de pavé traditionnel étant les suivantes :

Densité surfacique des pavés béton : 115 Kg/m²-190 Kg/m²

Matière première	Poids		Poids en Kg/m ² pavés	
	min	max	Mini : 115	Maxi :190
Sable	40%	60%	46	114 kg/m ²
Sable recyclé	1,50%	6%	0,69	6,84
Gravier	30%	50%	2,07	3,42
Ciment	5%	15%	0,0104	0,513
Eau	5%	15%	5,18E-04	0,0770
Additifs	1%	10%	5,18E-06	7,70E-03

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

8. Calcul des impacts environnementaux

8.1.1 Impacts liés à la consommation électrique

Afin d'estimer les impacts associés aux consommation énergétique du process, nous avons considéré l'ensemble des outils et postes de consommation (voir infra 5.2.1) et avons tenter d'estimer les impacts environnementaux associés à la production électrique française .

- **Méthode de calcul :**

- **Indicateurs de développement durable - EDF 2018***:

Une première estimation des impacts a été réalisée sur la base des données EDF publiée en 2018, pour la production électrique française (voir annexe 2 : edfgroup_indicateurs-dd-2018_4_fr). La principale difficulté d'exploitation de cette base vient du décalage existant entre les indicateurs publiés et les indicateurs conventionnels de l'analyse de cycle de vie, tel que publiés dans le cadre de la norme NF EN 15804+A1 .

Une partie des indicateurs sont cependant visibles et communs, pour les valeurs suivantes

2018		
Déchets, sous-produits et émissions liés au processus de production d'électricité d'EDF (2018)	Quantités	unité
Eau consommée/production thermique	0,97	litre/kWh
Eau consommée/production globale	0,86	litre/kWh
Cendre produite	0,269742016	g/kWh
Gypse produit	0,108580169	g/kWh
Boue de désulfuration	0,004118143	g/kWh
Combustible nucléaire usé évacué	0,002291139	g/kWh
CO2 total	15,9092827	g/kWh
SO2	0,009046434	g/kWh
Nox	0,035909283	g/kWh
COV	6,1519E-05	g/kWh
Poussière	0,000465612	g/kWh
Particules PM10	0,000462025	g/kWh
Particules PM2.5	6,11814E-05	g/kWh
Mercur	3,3124E-08	g/kWh
Total déchet conventionnels	0,577639243	g/kWh
Déchets industriels conventionnel non dangereux	0,520736287	g/kWh
Déchets industriels conventionnel dangereux	0,056902954	g/kWh
Déchet radioactifs solides de haute et moyenne activité à vie longue	6,45159E-10	m3/kWh
Déchet radioactifs solides de haute et moyenne activité à vie courte	1,22932E-08	m3/kWh
Déchet solides TFA d'activité	6,93951E-09	m3/kWh
Déchets TFA issu de la déconstruction	5,75481E-09	m3/kWh
Déchets FMA issu de la déconstruction	6,76646E-10	m3/kWh
Cu	8,82131E-05	g/kWh
Zinc	2,62574E-05	g/kWh

* les émissions de polluant lié à la production d'électricité française pour 1 kWh d'énergie (primaire), selon le mix énergétique de 2018

- **Indicateurs ACV – base de données INIES**

Pour les indicateurs conventionnel ACV nous avons complété l'approche par une base sur une base de données INIES (www.inies.fr) disponible pour l'évaluation des impacts environnementaux dans le cadre de l'expérimentation énergie-carbone .

Nous considérerons que l'impact du kWh électrique français est similaire à celui consommé sur le projet de Romainville .

	unité	Impacts / kWh Energie électrique française
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg CFC-11 eq	1,67E-07
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg C2H4 eq.	1,70E-05
Pollution de l'air	m3	4,97E+01
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg SO2 eq	3,61E-04

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine – Est Ensemble

Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments	kg Sb eq	5,77E-03
Pollution de l'eau	m3	2,37E-02
Potentiel de réchauffement climatique	kg eq Co2	7,07E-02
Potentiel d'eutrophisation	kg (PO4)3- eq	5,57E-05

La difficulté de cette approche vient du décalage entre les indicateurs publiés par EDF, et les indicateurs conventionnels d'analyse de cycle de vie .

Car si certains indicateurs, nous semblent communs avec les principaux indicateurs ACV , leur mode de calcul pour conversion en indicateurs conventionnels demeure opaque .

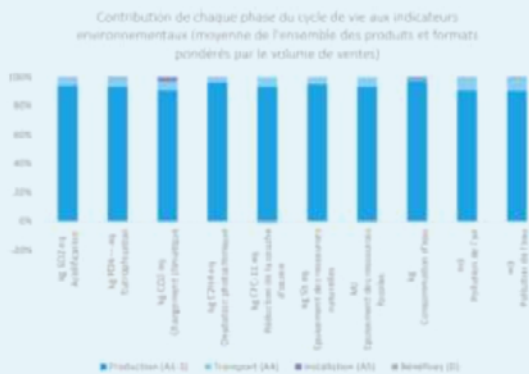
8.1.1 Impacts des produits de finition

Les principaux impacts liés au traitement de finition des pavés de réemploi seront en grande majorité liés à sa minéralisation, par un produit en phase aqueuse. Le traitement des pointes d'aciers anti-corrosion peut être considéré comme marginale.

Impacts des produits de finition pour une durée de vie de référence de 20 ans – pour 1 m² de pavés

Indicateur	Unité	Total
Impacts environnementaux par unité fonctionnelle		
Potentiel de Réchauffement Global	kg CO ₂ eq	1,57E-01
Potentiel d'Épuisement de la couche d'Ozone	kg CFC 11 eq	1,71E-08
Potentiel d'Acidification	kg SO ₂ eq	8,53E-04
Potentiel d'Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq	1,12E-04
Potentiel de Création d'Ozone Photochimique	kg C ₄ H ₈ eq	5,52E-05
Épuisement des Ressources Abiotiques (éléments)	kg Sb eq	9,37E-07
Épuisement des Ressources Abiotiques (fossiles)	Mt eq	2,28E+00
Utilisation des ressources		
Utilisation d'énergies primaires renouvelables en excluant les ressources en énergies primaires renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	8,53E+00
Utilisation d'énergies primaires renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	7,19E-02
Utilisation totale des ressources d'énergies primaires renouvelables	MJ	3,60E+00
Utilisation d'énergies primaires non renouvelables en excluant les ressources en énergies primaires non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	2,48E+00
Utilisation d'énergies primaires non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ	9,84E-02
Utilisation totale des ressources d'énergies primaires non renouvelables	MJ	2,57E+00
Utilisation de matériaux secondaires	kg	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ	0,00E+00
Utilisation nette d'eau fraîche	m ³	1,55E-03
Élimination des déchets		
Déchets dangereux éliminés	kg	2,90E-04
Déchets non dangereux éliminés	kg	9,69E-02
Déchets radioactifs éliminés	kg	1,21E-05

Autres flux et indicateurs		
Composants destinés à la réutilisation	kg	5,68E-3
Matériaux destinés au recyclage	kg	6,93E-3
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg	3,01E-03
Énergie exportée	kg	0,00E+00
Pollution de l'air	m ³	1,36E+01
Pollution de l'eau	m ³	2,09E-01



ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine - Est Ensemble

9. Résultats impacts globaux

9.1.1 Interprétation des résultats

➤ Analyse des phases :

Dans le cadre d'une production classique de pavés béton : L'impact sur l'environnement du cycle de vie du produit est dominé par les étapes de A1-A3 production et A4 transport.

L'étape de **production (A1-A3)** est l'étape du cycle de vie ayant le **plus grand impact** pour les 7 principaux indicateurs des catégories d'impacts :

- entre le 37% et le 69% de l'impact total du cycle de vie sur les **catégories principales** (GWP= réchauffement climatique / AP (acidification des sols et de l'eau, EP (eutrophisation), POCP (formation d'ozone photochimique)
- entre le 37% et le 69% de l'impact total du cycle de vie sur les catégories d'impact suivantes: Réchauffement climatique (GWP), Acidification des sols et de l'eau (AP), Eutrophisation (EP), Formation d'ozone photochimique (POCP), Épuisement des ressources abiotiques (fossiles) (ADPF), Pollution de l'eau (Water) et Pollution de l'air (Air).
 - Cette étape sera fortement réduite et donc favorable dans le cadre d'un pavé de Réemploi de par son utilisation In Situ , avec des réductions de 83 à 99% selon les indicateurs

L'étape de **distribution (A4)** représente entre le 15% (Eutrophisation) et le 40% (Appauvrissement de la couche d'ozone, ODP) de l'impact total du cycle de vie.

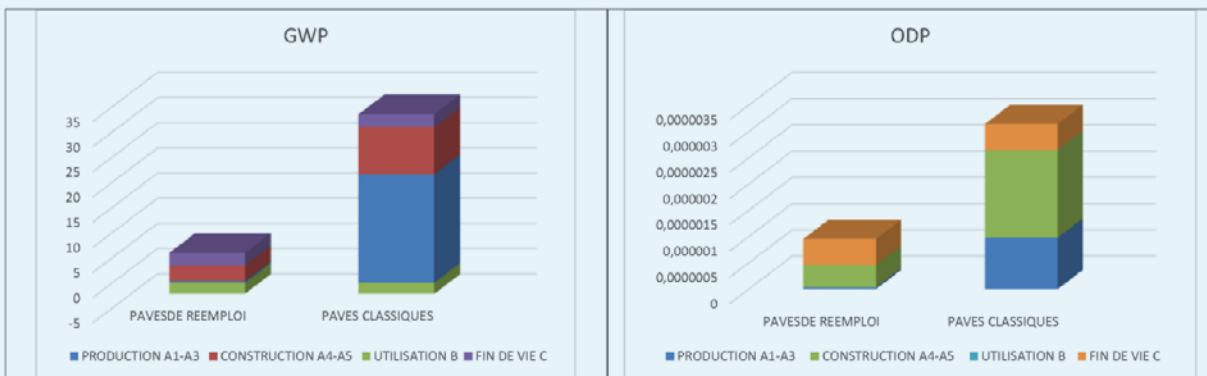
- Cette étape sera fortement réduite et donc favorable dans le cadre d'un pavé de Réemploi de part son utilisation In Situ Avec des réductions de 50 à 74% selon les indicateurs

		GWP		AP		POCP		ADPF		EP		ODP		Water		ADP		
		Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	Impact Global	
PRODUCTION	A1-A3	0,00072148	0,00072148	0,000191517	0,000191517	0,00000004	0,00000004	0	0	0,000021	0,000021	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	
	vs réduction grand cycle de vie	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	0,00%	0,00%	1,00%	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
CONSTRUCTION	A4-A5	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
	vs réduction grand cycle de vie	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
UTILISATION	B	-0,00000000	-0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
FIN DE VIE	C	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
TOTAL	Impact Global	0,00072148	0,00000000	0,000191517	0,00000000	0,00000004	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,000021	0,00000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000	0,0000000000000000
	gain réemploi/Grand cycle de vie	99,40%	100,00%	99,10%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	99,99%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

➤ Bilan prévisionnel pour le pavé de Réemploi

Sur l'ensemble du cycle de vie : la production de pavés issus du Réemploi propose une réduction de plus de 60% des impacts sur les principaux indicateurs : **entre 60% et 99%** selon les indicateurs et notamment **un abattement de 89,40%** sur les émissions GES = GWP réchauffement climatique .

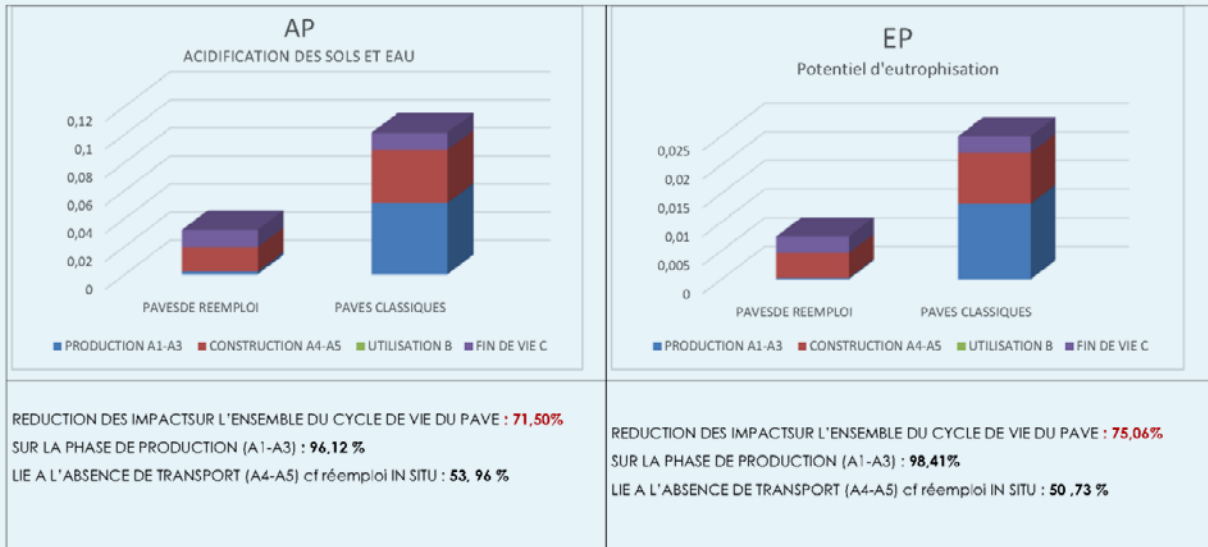
9.1.2 Comparaison des impacts environnementaux par indicateur entre le pavé neut et le pavé de réemploi



Réduction de **90%** (89,71) de l'empreinte carbone du pavé sur la totalité de son cycle de vie , soit une empreinte de 10,29% de celle d'un pavé classique
 Avec une réduction de **plus de 98 % des impacts CO2 évités sur la seule phase de production** et de **68% de la phase de construction** (transport et mise en oeuvre), lié à une mise en oeuvre in situ

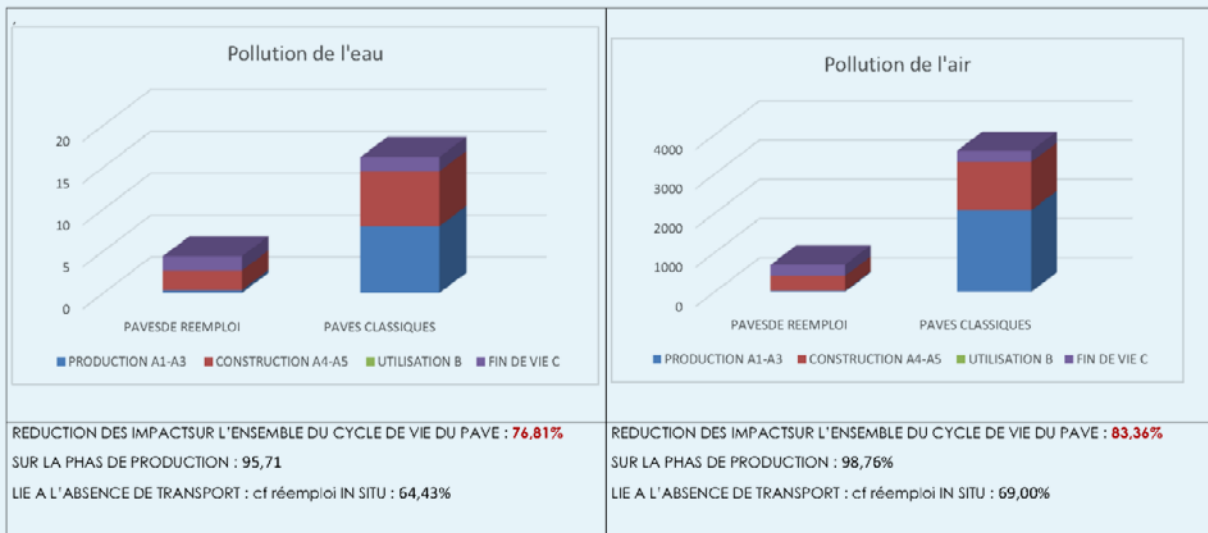
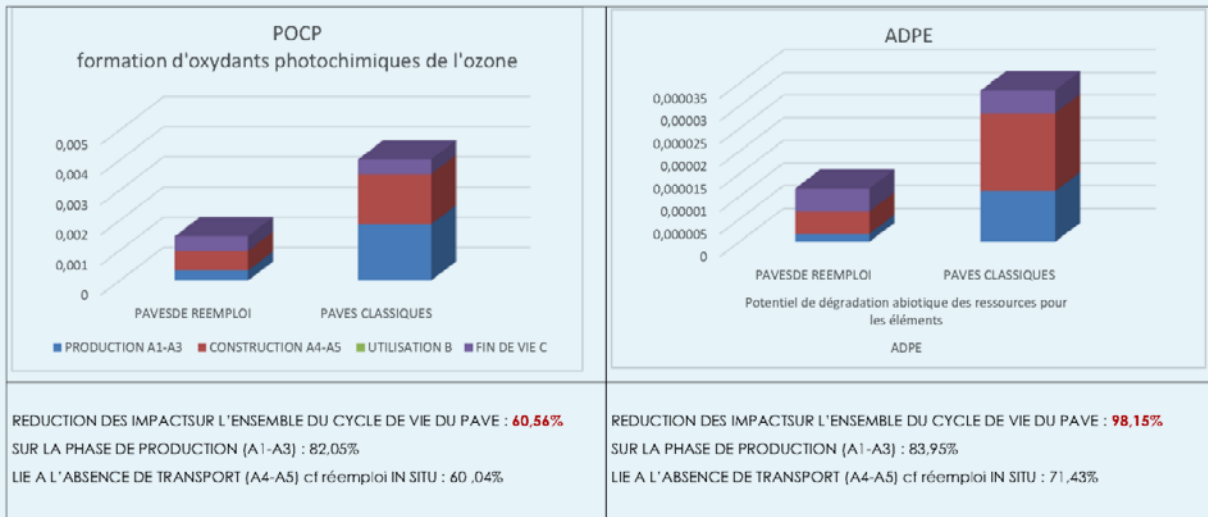
REDUCTION DES IMPACTS SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DU PAVE : **72,36 %**
 SUR LA PHASE DE PRODUCTION (A1-A3) : **96,87 %**
 LIE A L'ABSENCE DE TRANSPORT (A4-A5) cf réemploi IN SITU : **74,21%**

REDUCTION DES IMPACTS SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DU PAVE : **89,71 %**
 SUR LA PHASE DE PRODUCTION (A1-A3) : **98 %**
 LIE A L'ABSENCE DE TRANSPORT (A4-A5) cf réemploi IN SITU : **68%**



ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine - Est Ensemble



9.1.3 Bilan global des résultats

9.1.3.1 Principaux indicateurs environnementaux

ETAPES		Type de pail et opération	Principe de recyclage des déchets	Principe de réutilisation du sol de l'eau	Principe de traitement des déchets (biométhane)	Principe de séparation sélective des déchets (bois)	Principe de recyclage des déchets (plastiques)	Principe de séparation des déchets de construction pour les éléments	Principe de recyclage des déchets (papier)	Principe de recyclage des déchets (autres)	Principe de recyclage des déchets (autres)	Principe de recyclage des déchets (autres)	
			% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	% 0% à 100%	
PRODUCTION	Approvisionnement machine pressoir	A1	palet de réemploi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Transport	A2	palet de réemploi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Fabrication	A3	Déchets des palets de réemploi primaire + secondaire	7,07E-02	2,61E-04	0,0002382							
CONSTRUCTION	Total PRODUCTION	A3-A3	palet de réemploi	0,35671343	0,001975317	0,0003358	0	0,00021	0,000001798	3,96E-00	0,142	25,8	
		A3-A3	palet classique	2,19E-03	7,05E-02	1,87E-00	1,12E-02	1,12E-02	1,12E-02	9,79E-07	7,97E-00	2,08E-03	
UTILISATION	Transport	A4	palet de réemploi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		A4	palet classique	9,12E-00	2,02E-02	1,07E-00	1,06E-02	4,36E-01	1,12E-02	1,12E-02	1,12E-02	9,86E-02	
FIN DE VIE	Bénéfice de charges au delà de la fonctionnalité du système	B	palet de réemploi et classique	3,00E-00	8,74E-02	6,55E-04	2,89E-01	4,37E-02	1,82E-00	4,21E-07	2,52E-00	3,50E-02	
		B1											
		B2											
		B3											
		B4											
		B5											
		B6											
		B7											
TOTAL A4	Cadré du réemploi dans le cadre de la production de palet (pays total)	A3-A4	palet de réemploi	0,35671343	0,001975317	0,0003358	0	0,00021	0,000001798	3,96E-00	0,142	25,8	
		A3-A4	palet classique	2,19E-03	7,05E-02	1,88E-00	1,12E-02	1,12E-02	1,12E-02	9,79E-07	7,97E-00	2,08E-03	
		A3-A4											
		A3-A4											

9.1.3.2 Indicateurs MATIERES & DECHETS

ETAPES		Type de pail et opération	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	Indicateur matière (kg CO2e)	
PRODUCTION	Approvisionnement machine pressoir	A1	palet de réemploi	0	0	0	0	0,00000	0	0	0	0	
	Transport	A2	palet de réemploi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Fabrication	A3	Déchets des palets de réemploi primaire + secondaire	4,97E-01									
CONSTRUCTION	Total PRODUCTION	A3-A3	palet de réemploi	0,5000524	0,149	0	0	0,00000	0,01134	0,00001	0,22557		
		A3-A3	palet classique	1,50E-01	1,04E-01	2,52E-00	0	0,00000	0,01134	0,00001	0,22557		
FIN DE VIE	Bénéfice de charges au delà de la fonctionnalité du système	A4	palet de réemploi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		A4	palet classique	2,12E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	
		B	palet de réemploi et classique	1,12E-01	1,12E-01	0	0,00000	7,60E-01	0,56E-00	2,12E-02	6,17E-00		
		B1											
		B2											
		B3											
		B4											
		B5											
TOTAL A4	Cadré du réemploi dans le cadre de la production de palet (pays total)	A3-A4	0,5000524	0,149	0	0	0,00000	0,01134	0,00001	0,22557			
		A3-A4	1,72E-01	1,48E-01	2,52E-00	0,00000	1,06E-01	0,00000	1,66E-01	1,32E-01			
		A3-A4											
		A3-A4											

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Pavé béton issu du réemploi - Cité Gagarine - Est Ensemble

9.1.3.3 Indicateurs ENERGIE

ETAPES	Type de pavé et épaisseur	Utilisation de ressources énergétiques primaires non renouvelables employées en tant que matières premières	Utilisation totale des ressources d'énergie et de chaleur d'origine primaire et renouvelable d'origine primaire employées en tant que matières premières	Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières)	Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières)	Utilisation de l'énergie primaire renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières	Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable à l'exclusion des ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières	Bénéfice à l'habitat								
									no	no	no	no	no	no		
PRODUCTION	Approvisionnement matière première	A1	0	0	0	0	0	0								
	Transport	A2	0	0	0	0	0	0								
	Fabrication	A3	Distance des pavés de réemploi primaire + secondaire	91,77	501,921		0									
				Faciles (mobilier hydraulique, etc)	0,528	7,2	4,12	7,06	4,5							
Total PRODUCTION		A1-A3	0,528	0	91,97	506,741	7,06	4,5	0							
CONSTRUCTION	Transport	A4	0	0	3,095+01	1,115+02	2,228+01	1,115+02	0							
										0	0	0	0	0		
UTILISATION	Installation	A5	0,528+02	3,998+01	1,905+00	3,998+01	1,878+00	3,998+01	0,908+00							
										B1						
										B2						
										B3						
										B4						
										B5						
FIN DE VIE	Installation des éléments	C1	0,000+00	1,127+01	6,105+02	1,127+01	6,105+02	1,127+01	0,908+00							
										C2	0,000+00	3,378+01	3,325+01	3,378+01	3,378+01	0,000+00
										C3	0,000+00	5,315+01	1,429+01	5,315+01	1,429+01	5,315+01
										C4	0,000+00	7,288+00	1,788+01	7,288+00	1,788+01	7,288+00
Bénéfice de charges au delà de la frontière du système		D	3,528+02	-1,268+01	-1,518+00	-12,80	-1,518+00	-1,268+01	0,908+00							

TOTAL A1 -A4	A1-A4	0,528	0	94,97	506,741	7,06	4,5	0	
	A1-A4	0,096+01	2,188+02	1,016+01	2,178+02	2,102+01	2,178+02	0,908+00	
Gain de Réemploi dans le cadre de la production de pavé		A1-A4	0,25	218,00	-66,57	-208,74	16,94	212,50	0,00

Les seuls indicateurs pour lesquels la production de pavés de réemploi est excédentaire sont : l'utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables et non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire employées en tant que matières premières)

		A5 pavé de réemp	0	91,97	506,741	7,06	4,5	0
PRODUCTION	A1-A3	0,528+02	0	91,97+01	506,741+01	7,06+01	4,5+01	0,000+00
CONSTRUCTION	A4	0,000+00	0	3,095+01	1,005+00	3,998+01	1,878+00	3,998+01
UTILISATION	A5	1,028+02	3,998+01	1,905+00	3,998+01	1,878+00	1,878+00	0,908+00
FIN DE VIE	C	0,000+00	4,378+01	7,518+01	4,378+01	7,518+01	4,378+01	0,000+00
TOTAL	TOTAL	1,556+01	7,906+01	1,076+02	5,025+02	1,476+01	7,906+01	0,908+00
		0,096+01	2,028+02	1,042+01	2,078+02	2,102+01	2,078+02	0,908+00



FONDATION
BÂTIMENT
ÉNERGIE