

Etude N°2024-02
ACV des projets et infrastructures

Rapport final- 29/07/2025

Version	29/07/2025	
Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Nils GOFFETTE Johan LHOTELLIER Bernard DE CAEVEL	xx	xx



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, ACV des projets et infrastructures, 2025, 139, n°02-2024.
(à mentionner uniquement dans le rapport final)
- Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) : www.ademe.fr
- Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Pour la synthèse en anglais :

- SCORE LCA is an association that has been created to financially support collaborative research on LCA and related topics. It aims to promote and organize cooperation between companies, institutional and scientists in order to support the evolution of LCA methods and its practical implementation at European and international level.
- This work has been supported by ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) www.ademe.fr
- The views and recommendations expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily reflect, unless otherwise stated, the views of all members of SCORE LCA.
- The information and conclusions presented in this document were established on the basis of scientific and technical data and regulatory and normative framework in force at the date of the publication of documents.

RESUME

Cette étude a pour but de faire l'état de l'art des méthodologies et des bases de données, études et outils existants qui peuvent servir pour l'ACV des infrastructures et d'en dresser des recommandations pour leur usage en appui des décisions de conception ou en vue d'évaluations sur ce type de projet et la mise à disposition de données de référence.

MOTS CLES

ACV, Infrastructures, Bâtiment industriel, Infrastructure de transport, Biens capitaux

SUMMARY

The aim of this study is to take stock of existing methodologies and databases, studies and tools that can be used for infrastructure LCA, and to draw up recommendations for their use in support of design decisions or in order to assess this type of project, and the provision of reference data.

KEY WORDS

LCA, Infrastructures, Industrial building, transport infrastructure, Capital goods

Table des matières

Glossaire.....	6
1 Introduction.....	7
1.1 Mise en contexte.....	7
1.2 Objectif de l'étude	7
1.3 Champ de l'étude.....	8
1.4 Plan de travail	8
2 Qu'est-ce qu'une infrastructure ?	9
2.1 Analyse des définitions existantes.....	9
2.2 Définition proposée dans le cadre de cette étude	11
3 Etat de l'art	12
3.1 Inclusion des infrastructures dans des ACV produits/service	12
3.1.1 Position de différents textes méthodologiques et réglementaires sur l'inclusion/exclusion des infrastructures.....	12
3.1.2 Contribution des infrastructures dans les ACV de produits ou de services	13
3.2 Les jeux de données d'infrastructures disponibles dans ecoinvent	14
3.3 ACV des infrastructures – état des lieux des différentes normes.....	17
3.3.1 NF EN 15978	17
3.3.2 La norme française : RE2020	19
3.4 Pratiques observées dans l'ACV des infrastructures	22
3.4.1 Démarches d'ACV simplifiées	22
3.4.2 Définition de l'unité fonctionnelle	23
3.5 Phasage d'un projet et disponibilité des données	26
3.5.1 Le phasage d'un projet d'infrastructure	27
3.5.2 Données utilisées par l'ingénierie de la construction.....	28
3.6 Enjeux associés au données d'inventaires clés	30
3.6.1 Ciment et béton.....	30
3.6.2 Acier.....	35
3.6.3 Aluminium	40
4 Enjeux identifiés pour la réalisation d'ACV des infrastructures.....	41
4.1 Enjeux associés à l'étape « Objectif et champs de l'étude »	41
4.2 Enjeux associés à la phase d'inventaire.....	42
4.3 Enjeux associés à la phase de caractérisation des impacts	44
4.4 Enjeux associés à l'interprétation des résultats.....	44
5 Recommandations pour l'ACV infrastructure	46
5.1 Fiche n°01 : Définir l'objectif et le contexte d'utilisation de l'étude.....	47
5.2 Fiche n°02 : Identifier l'avancement du projet	49
5.3 Fiche n°03 : Définir l'unité fonctionnelle	52
5.4 Fiche n°04 : Définir le périmètre	56
5.5 Fiche n°05 : Choisir et calculer les indicateurs d'impact	58

5.6	Fiche n°06 : Identifier les acteurs/documents auprès desquels collecter l'information	59
5.7	Fiche n°07 : Collecter les données d'activité en subdivisant l'infrastructure	61
5.8	Fiche n°08 : Choisir et associer des données environnementales aux données d'activités	66
5.9	Fiche n°09 : Eléments clés pour la modélisation de matériaux	69
5.10	Fiche n°10 : Eléments clés pour la modélisation d'équipements	70
5.11	Fiche n°11 : Affiner la modélisation selon les objectifs poursuivis, la qualité des données et incertitudes associées	71
6	Cas d'études	73
6.1	Chimie fine	74
6.1.1	Périmètre d'évaluation	74
6.1.2	Inventaire de cycle de vie	75
6.1.3	Résultats	80
6.1.4	Analyses de sensibilité	85
6.2	Cas d'études – usine de batteries	86
6.2.1	Périmètre d'évaluation	86
6.2.2	Inventaire de cycle de vie	88
6.2.3	Résultats	93
6.2.4	Analyse de sensibilité	97
6.3	Cas d'études – ligne de tramway	98
6.3.1	Périmètre d'évaluation	98
6.3.2	Inventaire de cycle de vie	99
6.3.3	Résultats	104
6.3.4	Analyse de sensibilité	107
6.4	Conclusions générales des études de cas	108
7	Recommandations	112
8	Bibliography	116
	Table des tableaux	121
	Table des figures	123
	Annexes	125
	Annexe A : Inclusion des infrastructures dans les ACV de produits et de services	125
	Normes internationales et européennes	125
	Programmes d'affichage environnemental	126
	Programmes de DEP	126
	Annexe B : Inclusion des infrastructures dans les ACV organisationnelles	130
	Normes internationales et européennes	130
	Publications scientifiques	131
	Annexe C : Présence des infrastructures par secteur ecoinvent	132
	Annexe D : NF EN 15978 – Caractéristiques du bâtiment	133
	Annexe E : Eléments complémentaires concernant la RE2020	135
	Annexe F : Exemple de données couramment utilisées par l'ingénierie infrastructure	137
	Annexe G : Résultats des collectes de données pour les cas d'études	138

Glossaire

Dans l'analyse du cycle de vie (ACV) du bâtiment et des produits de construction, plusieurs termes clés sont utilisés pour décrire les phases du cycle de vie et les impacts environnementaux associés. Dans les déclarations environnementales de produits, les phases sont généralement désignées par module avec des codes normalisés tels que :

- A1-A3 pour la production des matériaux (extraction, fabrication),
- A4-A5 pour la construction (transport des matériaux, mise en œuvre),
- B1-B7 pour la phase d'usage (maintenance, consommation d'énergie et d'eau),
- C1-C4 pour la fin de vie (démolition, recyclage ou mise en décharge),
- le module D représente les bénéfices et charges au-delà du cycle de vie, notamment les gains liés au recyclage des matériaux.

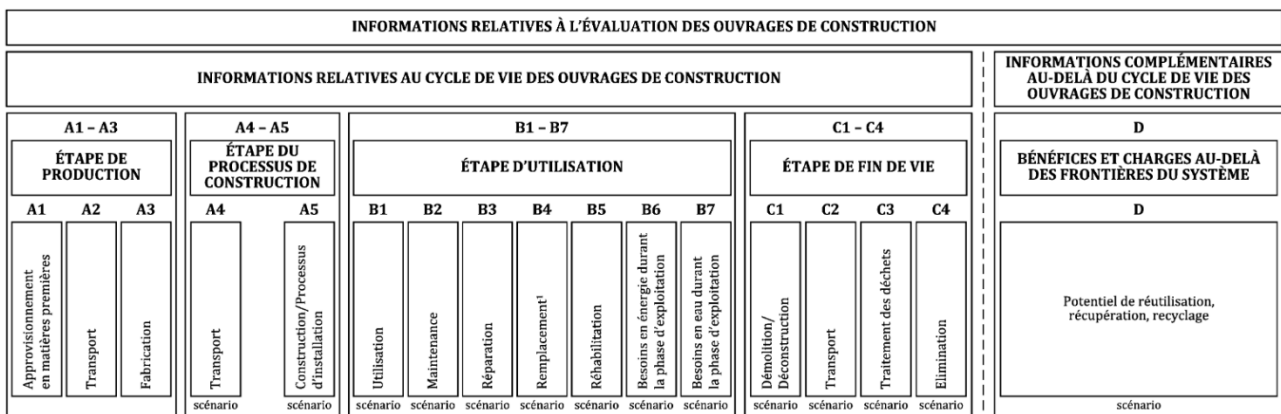


Figure 1 : Illustration des étapes du cycle de vie et modules pour l'évaluation des ouvrages (EN 15804)

Les terminologies suivantes sont aussi utilisées par la suite :

- **Produit de construction** : tout article fabriqué ou conçu pour être incorporé dans des ouvrages de construction (NF EN 15978)
- **Catégorie de produits** : groupe de produits de construction pouvant remplir des fonctions équivalentes (EN 15804:2012+A2:2019)
- **Règles de catégorie de produits (RCP)** : ensemble de règles, d'exigences et de lignes directrices spécifiques prévues pour le développement de déclarations environnementales de Type III pour une ou plusieurs catégories de produits (EN 15804:2012+A2:2019)
- **Règles complémentaires régissant les catégories de produits (RCP-c)** : RCP spécifiques d'un groupe de produits ou RCP horizontales, qui fournissent des exigences supplémentaires, conformes et non contradictoires avec celles de l'EN 15804 (EN 15804:2012+A2:2019)
- **Déclaration environnementale des produits (DEP)** : déclaration environnementale fournissant des données environnementales quantifiées à l'aide de paramètres prédéterminés et, s'il y a lieu, complétés par d'autres informations environnementales (ISO 14025)
- **Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)** : type de DEP utilisée principalement en France et conforme à la norme EN 15804 et à son complément national français
- **Donnée d'activité** : donnée concernant les quantités mises en œuvre lors du projet
- **Donnée environnementale** : donnée d'impacts environnementaux associées à une unité définie
- **Donnée spécifique** : donnée représentative d'un produit, d'un groupe de produits ou d'un service de construction, fournie par un fournisseur (EN 15804:2012+A2:2019)
- **Donnée générique** : données de substitution en l'absence de données spécifiques (INIES)

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

La question des infrastructures en ACV n'a fait l'objet que de peu d'études dédiées. Certaines ACV les omettent au motif qu'elles ne pèsent que peu dans le bilan global d'un produit. D'autres, à l'instar de bases de données, les prennent en compte de façon simplifiée.

Cependant, différentes méthodologies ont insisté sur l'importance de prendre en compte l'impact des bâtiments et infrastructures à l'instar de la méthode du GHG Protocol et de la Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre (ADEME, 2022) pour le calcul de la sous-catégorie « 4.2 Immobilisations de biens ».

Les ACV des bâtiments résidentiels se sont largement développées. Une première cause de ce développement est la surface importante que ces bâtiments représentent. Les bâtiments résidentiels (hors tertiaire) représentent 24,5 millions de mètres carrés de mises en chantiers neufs, tandis que les bâtiments industriels et de stockage représentent 8,8 millions de mètres carrés de mises en chantiers neufs (Fédération Française du Bâtiment, 2024). Une seconde cause de ce développement est les enjeux de politiques publiques (stratégie nationale Bas carbone, décarbonation de certaines filières dont le ciment). Ainsi, pour ce secteur, l'empreinte carbone de la construction représente un tiers de l'empreinte carbone (le reste étant lié à l'exploitation des bâtiments).

De plus, les ACV de produits de construction du bâtiment se sont largement démocratisées en raison de la création de Déclarations Environnementales de Produit (DEP ou Environmental Product Declaration (EPD) en anglais). Ainsi, des bases de données nationales se sont mises en place pour recenser les DEP, telles que la base INIES en France et la base IBU.data en Allemagne.

Certains matériaux représentent des enjeux considérables à l'échelle mondiale à l'instar du ciment qui représente 13.5 millions de tonnes de CO₂-eq en 2021 en France soit environ 2% de l'empreinte carbone de la France. Le ciment lié au secteur du bâtiment est responsable de 4% des émissions à l'échelle mondiale¹.

Ainsi, bien que l'ACV, soit un outil répandu pour les produits de construction et bâtiments résidentiels, elle reste relativement peu utilisée pour les installations industrielles et de transport. Cela s'explique par des questions méthodologiques et pratiques.

- Lors de l'ACV d'un bien ou d'un service, dans quels cas les infrastructures doivent-elles être prises en compte et dans quels cas doivent-elles être exclues ?
- Si elles sont incluses, dans quel cas une modélisation plus fine que celle d'une donnée environnementale générique (e.g. ecoinvent) est-elle nécessaire ?
- Suffit-il de sommer les impacts renseignés dans les DEP des éléments qui composent le bâtiment ?
- Que faire si pour certains éléments, les DEP portent seulement sur une partie du cycle de vie, voire s'il n'y a pas de DEP ?
- Quel est le niveau de détail pertinent en fonction de l'objectif de l'ACV ?
- Après de qui collecter les données ?
- Comment collecter efficacement les données ?

1.2 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'établir **des guidances méthodologiques spécifiques à l'analyse du cycle de vie appliquée aux bâtiments et installations industrielles et de transport** (ainsi qu'à leurs chantiers). Cette guidance porte

(1) sur l'identification des cas pour lesquels les données par défaut (ex : ecoinvent) ne sont pas pertinentes et pour lesquels une modélisation plus fine est donc nécessaire et

¹ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-9/>

(2) pour ces cas-là, sur des recommandations sur la collecte de données et les modélisations des matériaux (béton, acier, équipements).

1.3 Champ de l'étude

Le champ de cette étude inclut les bâtiments et installations industrielles (UN CPC 53121, UN CPC 53122 seulement les entrepôts, UN CPC 53262, UN CPC 53269) et, dans une moindre mesure, les infrastructures de transport (UN CPC 53211, UN CPC 53212, UN CPC 53221, UN CPC 53222).

Certains aspects méthodologiques ou impacts environnementaux sont rappelés ici car ils sont intrinsèques aux enjeux des infrastructures et de leurs chantier. Toutefois, ils ne seront pas développés dans le cadre de cette étude :

- Les impacts locaux (biodiversité, bruit, odeurs, ...) sont exclus de l'étude en raison de leur mauvaise prise en compte actuellement dans les ACV.
- Les infrastructures, notamment au travers de leur longue durée de vie et de leur maintenance, soulèvent des questions sur la prise en compte des émissions décalées dans le temps et d'autres aspects de l'ACV dynamique tels que présentés dans l'étude (SCORE LCA n°02-2023).
- Un autre enjeu soulevé par le domaine de la construction en ACV est celui de la gestion de la ressource foncière, de l'usage des sols et de la transformation des sols. Les concepts théoriques associés à ces enjeux sont clarifiés dans l'étude (SCORE LCA n°02-2022) et la méthode LANCA recommandée par la Commission Européenne est présentée avec des cas d'application.

1.4 Plan de travail

Les enjeux auxquels l'étude essaie répondre sont :

- La définition d'une infrastructure ;
- La prise en compte actuelle des infrastructures en ACV ;
- La définition des objectifs des ACV infrastructures ;
- La réalisation de la phase d'inventaire de l'ACV et en particulier
 - la collecte de données d'activité d'un système complexe regroupant de nombreux équipements et matériaux rattachés à de nombreux corps de métiers ;
 - l'association de données environnementales cohérentes et de qualité aux données d'activités
- La prise en compte de données temporaires (à des phases où le projet est en cours d'études)

Les recommandations établies dans cette étude sont testées à travers la réalisation de cas d'études.

2 Qu'est-ce qu'une infrastructure ?

2.1 Analyse des définitions existantes

Dans les textes suivants traitant de l'ACV, il n'y a pas de définitions explicites des termes bâtiments et infrastructures :

- ISO 14040 :2006 ;
- ISO 14044 :2006 ;
- PEF – Annex 1 to 2 ;
- OEF – Annex 3 to 4 ;
- EN 15804 :2012 + A2 :2019 ;
- PCR 4 du PEP Ecopassport ;
- GHG Protocol « Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard »
- GHG Protocol « Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard »

D'autres textes cependant permettent de les définir. Un inventaire non exhaustif des définitions des mots « bâtiment » et « infrastructure » a été réalisé et est présenté dans le tableau ci-dessous. On retrouve dans les définitions de « **bâtiment** » la notion d'**abri**, tandis que les définitions « **d'infrastructure** » tendent plutôt à désigner un système **d'équipements ou de structure**. Le champ de cette étude concerne les installations industrielles, qu'elles soient abritées ou non, ainsi que les infrastructures de transport.

Les infrastructures ne sont jamais explicitement définies dans les documents normatifs relatifs à l'évaluation environnementale (sauf pour le GHG Protocol et certains PCR particuliers). Il existe un flou entre les biens capitaux et les infrastructures. D'une manière simplifiée, on peut présenter les biens capitaux comme la somme des infrastructures, bâtiments et CAPEX. Les biens capitaux englobent parfois aussi la maintenance qui leur est nécessaire. Cette maintenance est en général incluse dans les OPEX.

Tableau 1 : Définitions des termes « Bâtiment » et « Infrastructure »

Terme	Définition	Source
Bâtiment	Ouvrage de construction dont l'une des fonctions principales est d'abriter ses occupants ou son contenu et qui est habituellement clos et conçu pour demeurer en place de façon permanente	NF EN 15978
	Ouvrage de construction dont l'un des principaux objectifs est de fournir un abri à ses occupants ou à son contenu, généralement partiellement ou totalement fermé et conçu pour rester en permanence au même endroit	ISO 21931-1:2022 (traduit de l'anglais)
	Ouvrage de construction dont l'une des fonctions principales est d'abriter ses occupants ou son contenu, et qui est généralement fermé et conçu pour demeurer en place de façon permanente	ISO 15686-1:2011
	Un bien immeuble couvert et destiné à accueillir une occupation, une activité ou tout autre usage humain	Article L111-1 du Code de la construction et de l'habitation
Infrastructure	Système d'installations, d'équipements et de services nécessaires au fonctionnement d'une organisation	ISO 6707-4:2021 (traduit de l'anglais) ISO 17427-1:2018
	Système des installations, équipements et services nécessaires au fonctionnement d'un organisme	ISO 41011:2024
	Ouvrage de construction comprenant une structure telle qu'un barrage, un pont, une route, une voie de chemin de fer, une piste de décollage, des services publics, des canalisations ou un système d'assainissement, ou le résultat de travaux tels que le dragage, le terrassement ou les opérations de géotechnique, à l'exclusion du bâtiment et des aménagements du terrain associés	ISO 21931-2:2019 (traduit de l'anglais)
		ISO 15392:2019 ISO 20887:2020
	Ensemble des biens capitaux fixes, y compris les usines, les routes, etc. (Source : Collins Dictionary). L'ATAG inclut dans le	PCR 2018:09 Business Jets

	terme « infrastructure » les aéroports, les installations et autres équipements (Source : ATAG).	
	Système socio-technique qui fournit des services essentiels tels que le transport de passagers ou de marchandises, la mise à disposition d'espaces commerciaux et le confort thermique <i>Exemples : halls de stockage, halls de production, infrastructures de transport mobiles et immobiles, machines agricoles, infrastructures agricoles, machines de production manufacturière ou encore le service d'hébergement touristique.</i>	ecoinvent ²

Dans des RCP ou le GHG Protocol, les infrastructures sont souvent abordées au travers des **biens capitaux**. Un inventaire des définitions de « biens capitaux » a été réalisé et est présenté dans le tableau ci-dessous. On retrouve dans ces définitions deux principes. Le premier est le fait que les biens capitaux sont des **biens employés dans un processus de production**. Le second est le fait que les biens capitaux **perduent au-delà du processus de production et ne sont pas consommés par le processus de production**.

Tableau 2 : Définitions du terme « biens capitaux »

Terme	Définition	Source
Biens capitaux	Les biens capitaux sont des produits finis qui ont une durée de vie longue et qui sont utilisés par l'entreprise pour fabriquer un produit, fournir un service ou vendre, stocker et livrer des marchandises. En comptabilité financière, les biens capitaux sont traités comme des actifs fixes ou comme des installations, des propriétés et des équipements. Des exemples de biens capitaux sont les équipements, les machines, les bâtiments, les installations et les véhicules.	GHG Protocol « Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions » (traduit de l'anglais)
	Les biens d'investissement sont des actifs tangibles tels que les bâtiments, les machines et les équipements utilisés pour produire des biens de consommation ou des services. Les biens capitaux sont des biens durables et diffèrent des biens et services de consommation, qui sont le produit final de la production et de la fabrication.	(Investopedia) (traduit de l'anglais)
	Produits qui ne sont pas épuisés par la consommation ou la production sur une courte période, mais qui conservent leur fonction sur une plus longue durée.	ISO 22948:2020 (traduit de l'anglais)
	Un bien capital est un bien utilisé dans la production de produits et de services et qui survit à ce processus de production (par exemple, les usines, les ordinateurs, les machines).	(Maxime Agez, 2022) (traduit de l'anglais)
Capitaux d'équipement	Les capitaux d'équipement peuvent être des voitures, des machines de production, des halls d'usine, etc.	(UNEP SETAC, 2011)
Infrastructure et biens capitaux	Produits utilisés dans le système de produits étudié qui ne sont pas consommés (par exemple, dans la production ou l'utilisation du produit) et qui conservent leur fonction pendant plus de trois ans. Des exemples sont le bâtiment dans lequel le produit étudié ou les matériaux ou composants en amont sont produits, les machines utilisées dans la fabrication du produit ou de ses matériaux ou composants, ou les véhicules utilisés pour les transports dans le système de produits.	(General Programme Instructions for The International EPD System (v5.0))

² <https://support.ecoinvent.org/infrastructures>

2.2 Définition proposée dans le cadre de cette étude

Au sens de cette étude, une infrastructure désigne un **ensemble d'équipements, d'installations, et de structures dont des bâtiments peuvent faire partie.**

L'ACV des infrastructures évalue la fabrication, la maintenance et la fin de vie de ces éléments (incluant l'utilisation des ressources, les émissions de polluants, et les déchets produits).

Une infrastructure est un ensemble d'immobilisations (CAPEX) autour du service rendu par cette infrastructure ainsi que des éléments qui permettent son entretien (maintenance, pouvant être incluse dans les OPEX) et son fonctionnement (consommations et émissions associées pour les systèmes inhérents au bâtiment).

Les OPEX ou dépenses d'exploitation (de l'anglais operational expenditure) sont les charges courantes pour exploiter un produit, une entreprise, ou un système.

Les CAPEX ou dépenses d'investissement (de l'anglais capital expenditure) se réfèrent aux immobilisations, c'est-à-dire aux dépenses qui ont une valeur positive à long terme.

Exemple sur le procédé d'incinération des déchets	
Usine d'incinération	Transport de passager
Pouvant être inclus	
Bâtiment (fondations, structure, bardage, système incendie, ...)	Rails
Eléments d'efforts architectural/esthétique (intégration du bâtiment dans son environnement local)	Traverses (matériau des traverses : bois, métal, béton)
Bâtiments administratifs, centre de R&D	Support (ballast ou béton)
Eventuels bâtiments complémentaires : station d'épuration ou station d'évaporation	Equipements (aiguillages, appareils de dilatation, ...)
Voiries	Ouvrages d'art (ponts et tunnels)
Eventuelles machines et équipements (convoyeurs, grappins, cuves, ...)	Equipements de signalisation
Fours (caractéristiques : capacité de traitement, technologie de four)	Pylônes et caténaires
Installations de distribution d'énergie (chaudières, turbines, brûleurs, ...)	Transformateurs
Installation de lavage des fumées	Gares
	Centres de maintenance
	<i>Matériel roulant en lui-même (train, tram, métro, ...)</i>
Pouvant être exclus	
Réactifs pour le lavage des fumées	Energie consommée pour le déplacement
Consommations énergétiques et émissions associées	
Emissions dans l'air / dans l'eau associées au procédé de combustion	
Energie produite/vendue	
Traitement des déchets (mâchefers, REFI)	

Remarque : La définition du périmètre est d'autant plus importante que certains éléments (comme le matériel roulant) peuvent être considérés comme faisant partie soit de l'infrastructure soit du service rendu.

3 Etat de l'art

3.1 Inclusion des infrastructures dans des ACV produits/service

3.1.1 Position de différents textes méthodologiques et réglementaires sur l'inclusion/exclusion des infrastructures

Cette partie s'intéressera aux recommandations et aux conséquences de l'inclusion ou de l'exclusion des infrastructures dans les ACV.

Le tableau ci-dessous présente les positions des différentes références méthodologiques analysées et citées dans l'Annexe A : Inclusion des infrastructures dans les ACV de produits et de services. Une analyse d'éléments de la littérature a aussi permis d'apporter un regard critique sur l'inclusion ou l'exclusion des infrastructures en ACV. Certains référentiels imposent l'obligation d'exclusion des infrastructures, d'autres indiquent d'exclure dans certaines conditions et certains autorisent l'inclusion et certains obligent l'inclusion des infrastructures.

Tableau 3 : Inclusion des référentiels dans les référentiels ACV clés

	Inclusion obligatoire	Inclusion possible	Exclusion sous condition	Exclusion obligatoire	Pas de guidance	Commentaires
Référentiels produits						
ISO 14040-44		x				
ISO 14025		x				
PEF				x		Sauf si une étude a démontré que l'inclusion est pertinente
EF compliant data sets		x				
Affichage environnemental français					x	
Base impacts / Base Empreinte	x					Inclusion "dans la mesure du possible"
NF EN 50693		x				
The International EPD System				x		Sur les 13 PCR analysés : 8 avec exclusion obligatoire, 5 avec exclusion recommandée
PEP Ecopassport			x			Exclusion si non proportionnel au flux de référence
EPD Italy				x		Sur 4 PCR analysés : 3 avec exclusion obligatoire et 1 sans mention
EPD Norge	x					
B-EPD					x	
IBU					x	
Référentiels organisation						
ISO 14 072 :2024		x				"Les actifs tels que les bâtiments, les usines et les équipements sont utilisés sur une période qui peut différer de la période fixée par l'ACV. Il convient que la méthodologie de calcul de l'ICV de ces actifs tienne compte de la période pendant laquelle ils sont utilisés"
ISO 14069	x					
GHG protocol organisation	x					
OEF (EU)				x		Sauf si une étude a démontré que l'inclusion est pertinente
Bilans d'émissions de gaz à effet de serre (ADEME 2022)	x					
PAS 2050				x		Sauf si pertinent

On peut notamment constater des incohérences, notamment pour le PEF qui recommande une exclusion sous condition tandis que pour les jeux de données EF, l'inclusion est recommandée.

En France, l'affichage environnemental ne donne pas de guidance, tandis que la Base Impacts présente une inclusion obligatoire.

Analyse : Aucune tendance marquée se dégage de l'analyse des référentiels susmentionnés. D'une manière générale, les référentiels obligeant à exclure les infrastructures autorisent leur inclusion avec justification.

3.1.2 Contribution des infrastructures dans les ACV de produits ou de services

L'étude de (Rolf Frischknecht, 2007) explore l'importance environnementale des biens capitaux dans les ACV des produits et services deecoinvent 1.2, en évaluant leur contribution aux impacts environnementaux de divers secteurs d'activités. Sept cents produits et services ont été analysés. Les produits ou services sont regroupés par activités. L'écart relatif de chaque indicateur d'impact avec et sans biens capitaux est calculé pour chaque produit ou service. Les écarts-relatifs sont regroupés par activité et pour chaque activité, la médiane, le 10^e centile et le 90^e centile sont présentés. **Il en ressort que les biens capitaux jouent un rôle majeur dans certaines catégories d'impacts environnementaux, notamment la toxicité humaine, et l'utilisation des ressources minérales.** L'inclusion des biens capitaux est essentielle pour les produits et services où les infrastructures dominent les impacts, par exemple, l'électricité photovoltaïque ou éolienne, pour lesquelles la quasi-totalité des impacts provient des infrastructures. Pour d'autres secteurs, comme l'électricité provenant de lignite et l'extraction et la transformation de métaux, les infrastructures ont des impacts minoritaires, sauf pour l'indicateur d'utilisation des sols. Les résultats agrégés par secteur d'activités sont présentés ci-dessous.

- Les catégories d'impacts étant indiquées comme ayant un impact « majeur » (noir) pour une activité doivent être incluses.
- Les catégories d'impacts étant indiquées comme ayant un impact « substantiel » (gris) pour une activité peuvent être exclues si des preuves tangibles sont fournies.
- Les catégories d'impacts étant indiquées comme ayant un impact « mineur » (blanc) pour une activité peuvent être exclus sans préciser les raisons.

Tableau 4 : Part des impacts causés par la fabrication de biens d'équipement sur les totaux cumulés

Type d'activité	Utilisation des sols	Ressources minérales	Demande cumulée d'énergie non renouvelable	Changement climatique	Acidification/eutrophisation	Toxicité & écotoxicité
Energie fossile	majeur	majeur	mineur	mineur	mineur	mineur ^a
Energie nucléaire	majeur	substantiel	mineur	substantiel	substantiel	substantiel
Energie biomasse	mineur	majeur	substantiel	substantiel	mineur	substantiel
Energie renouvelable, nca	majeur	majeur	majeur	majeur	majeur	majeur
Métaux	substantiel	mineur	mineur	mineur	mineur	mineur
Matériaux minéraux de construction	substantiel	majeur	mineur	mineur	mineur	substantiel
Produits en bois	mineur	majeur	substantiel	mineur	mineur	substantiel
Produits agricoles	mineur	majeur	substantiel	mineur	mineur	substantiel ^b
Services de transport	majeur	majeur	substantiel	substantiel	substantiel	substantiel
Incinération de déchets	substantiel	majeur	substantiel	mineur	mineur	mineur ^c
Mise en décharge	substantiel	majeur	substantiel	substantiel	substantiel	mineur ^c
Traitement des eaux usées	majeur	majeur	majeur	majeur	substantiel	substantiel

^a substantiel avec du gaz naturel ; ^b mineur pour l'écotoxicité terrestre ; ^c substantiel pour l'écotoxicité terrestre ; nca : non-couverte ailleurs

La publication (Olubukola Tokede, 2023) présente les avantages et les inconvénients d'inclure les biens capitaux dans les DEP suite à la mise à jour des RCPs pour les produits de constructions. Les impacts de l'inclusion et de l'exclusion sont présentés au travers de l'étude de trente-huit produits de construction de la base de données ecoinvent. L'inclusion des biens capitaux a une influence limitée sur l'impact sur le changement climatique, mais une influence marquée sur l'épuisement des ressources minérales et métalliques, l'occupation des sols et la toxicité humaine. L'indicateur le plus influencé par l'inclusion des biens capitaux est **l'épuisement des ressources minérales et métalliques**. Presque la moitié des trente-huit matériaux de construction analysés dans cette étude présente une augmentation de plus de 1000% de l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques avec l'inclusion des biens capitaux.

La recommandation présentée par l'étude de (Olubukola Tokede, 2023) est la suivante : « Il est suggéré d'exclure les biens capitaux jusqu'à ce qu'il y ait un affinage et une amélioration de la qualité des données d'inventaires de cycle de vie et que les programmes de DEP fournissent des guidances claires sur la manière de traiter les biens capitaux. Sinon, les EPDs pourraient documenter avec transparence l'inclusion ou l'exclusion des biens capitaux afin qu'il y ait une séparation claire des effets des biens capitaux sur les indicateurs ACV.» Cela amène à se questionner : vaut-il mieux ne rien considérer et omettre les infrastructures ou considérer des éléments incertains en caractérisant le niveau d'incertitude ?

Par ailleurs, l'étude (Olubukola Tokede, 2023) souligne **les incertitudes des inventaires de biens capitaux disponibles dans ecoinvent**. Par exemple, l'inventaire « building, hall, steel construction » ne contient pas de cuivre, tandis que l'inventaire « building, multi-storey » en contient. En pratique, un hall en acier contiendra quasi-systématiquement du cuivre, au moins pour les câblages électriques. La quantité de cuivre présente dans l'inventaire « building, multi-storey » est aussi pointé du doigt comme étant irréaliste et surestimée (8,48 kg/m³).

(Sébastien Lasvaux, 2015) présente une comparaison des données ecoinvent et des données d'une base de données de DEP développé en France pour 28 matériaux de construction. L'inclusion et l'exclusion des infrastructures est étudiée pour ces deux bases de données. Le pourcentage d'écart relatif entre les données ecoinvent avec infrastructures et celles sans infrastructures est de -56%. Le pourcentage d'écart relatif entre les données DEP avec et sans infrastructures est de -80%.

Analyse : Les biens capitaux (dont les infrastructures) jouent un rôle majeur dans certains secteurs et pour certaines catégories d'impacts. Les catégories d'impacts les plus impactées par l'inclusion des biens capitaux sont l'épuisement des ressources minérales et métalliques et l'utilisation des sols. Les secteurs les plus impactés par l'inclusion des biens capitaux sont les énergies renouvelables et le traitement des eaux usées.

Des incohérences entre les inventaires d'infrastructures ecoinvent sont, de plus, soulignées.

La modélisation très imprécise des infrastructures questionne sur l'intérêt de les prendre en compte par défaut dans les bases de données (et donc dans les études ACV qui les utilise).

Conclusion : Les auteurs de la présente étude prescrivent une prise en compte systématique (avec une approche conservatrice, à savoir maximiser les impacts) en première itération de calcul. Après une évaluation de leur influence sur les résultats et si leur impact est significatif, les infrastructures seront affinées en seconde itération. Si un affinage n'est pas possible, les infrastructures pourront être exclues en soulignant cette limite dans les conclusions de l'étude.

3.2 Les jeux de données d'infrastructures disponibles dans ecoinvent

Sur le site Ecoquery, les jeux de données ecoinvent sont classés par secteur.

Les infrastructures sont identifiées dans un secteur à part entière nommé « Infrastructures ».

Les principaux produits de construction (utilisés dans les inventaires Infrastructures) sont principalement classés dans les secteurs suivants :

- « Building and Construction » dans lequel on retrouve notamment les activités d'extraction de ressources minérales et la production de ciment et de béton,
- « Forestry » dans lequel on retrouve les produits de construction issus de la filière du bois,
- « Metals » dans lequel on retrouve les produits de construction métalliques.

Dans la base de données, « les infrastructures sont reconnaissables par le terme « construction » plutôt que « production » dans le nom de l'activité »³. Cependant la catégorie « Infrastructure & machinery » comprend aussi des machines qui, comme l'inventaire « conveyor belt production », qui elles sont « produites » et non « construites ». Le mot « construction » a donc été utilisé pour rechercher les inventaires ecoinvent d'infrastructures au sein de tous les secteurs. Les résultats de cette analyse sont présentés en *Annexe C : Présence des infrastructures par secteur ecoinvent*. Une seconde analyse a été réalisée sur SimaPro pour déterminer la distribution des infrastructures par sous-catégorie.

Tableau 5 : Nombre d'inventaires classés "infrastructure" dans SimaPro par sous-catégorie

Catégorie de niveau 1	Catégorie de niveau 2	Nombre d'inventaires par catégorie de niveau 2
Materials	Agricultural	16
	Chemicals	17
	Constructions	20
	Electronics	24
	Fuels	28
	Glass	5
	Metals	14
	Minerals	29
	Paper	6
	Water	16
Sous-total		175
Energy	Cogeneration	1
	Gas	59
	Oil	5
	Wood	7
	Electricity by fuel	19
	Heat	63
Sous-total		154
Transport	Air	15
	Building equipment	6
	Electricity	12
	Intermodal	14
	Pipeline	9
	Rail	15
	Road	43
	Water	23
Sous-total		137
Processing	Agricultural	18
	Compressed air	4
	Metal working	4
	Plastics	1
	Waste	34
	Wood	6
Sous-total		67
Total		533

Les étapes de cycle de vie considérées sont :

- l'extraction et la transformation des matières premières ;
- le transport des matières premières (uniquement considéré à travers l'utilisation des données « market for ») ;

³ <https://support.ecoinvent.org/infrastructures>

- La consommation d'énergie pour la construction et la maintenance (la donnée est identifiée de mauvaise qualité et la distinction en ces deux postes n'est pas claire) ;
- La fin de vie des matériaux (modélisé avec des données « market for waste » donc avec des données du passé).

Pour certaines infrastructures, il existe des inventaires distincts en fonction des phases du cycle de vie du bâtiment et pour d'autres des inventaires dédiés pour leur usage.

Les inventaires d'infrastructures bâtementaires reposent pour la plupart directement ou indirectement sur trois inventaires ecoinvent (sans compter la multiplicité des géographies) :

- « building, hall, steel construction » représentant 1 m² d'un bâtiment avec une structure en acier et une durée de vie de 50 ans ;
- « building, hall, wood construction » représentant 1 m² d'un bâtiment avec une structure en bois et une durée de vie de 50 ans ;
- « building, multi-storey » représentant 1 m³ d'un bâtiment en béton de plusieurs étages.

Une analyse des inventaires classés « infrastructures » dans SimaPro a été réalisée pour cette étude. Le schéma ci-dessous présente les catégories d'activités dans lesquelles les infrastructures sont présentes.

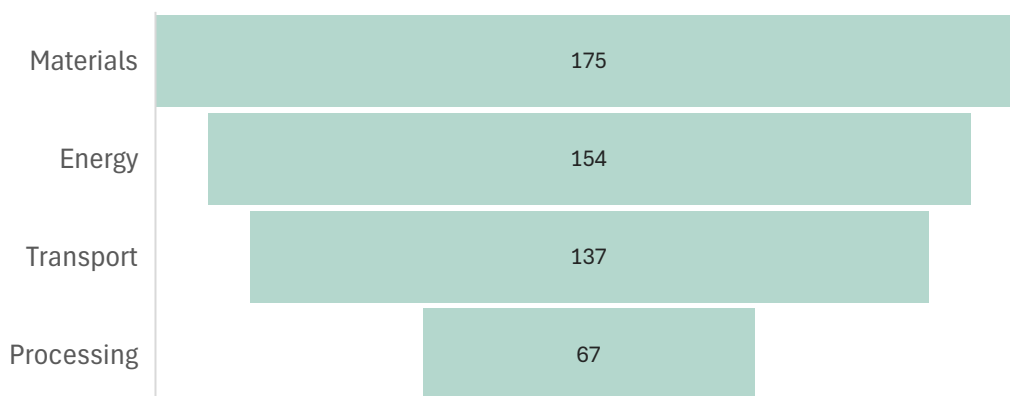


Figure 2 : Nombre d'inventaires classés "infrastructures" dans SimaPro par secteur

Pour la catégorie Materials, une analyse plus approfondie a été menée sur 62 des 175 inventaires. Il en ressort que :

- 56 des 62 inventaires ont été développés avant la version 3 d'ecoinvent (avant 2010)
- 12 des 62 inventaires ont un message explicite indiquant une forte incertitude des données : « *This module should not be used if its relative importance would be high in a certain environmental inventory.* »
- 37 des 62 inventaires font appel à d'autres inventaires d'infrastructures. Ces 37 inventaires ne sont pas explicitement identifiés avec des fortes incertitudes. Cependant ces 37 inventaires sont, le plus souvent, basés sur au moins un des huit inventaires suivants. Les inventaires suivants présentent tous (sauf « electronics, for control units ») une mention explicite indiquant une forte incertitude.
 - Building, hall, steel construction
 - Building, hall, wood construction
 - Building, hall
 - Building, multi-storey
 - Chemical factory
 - Industrial machine, heavy, unspecified
 - Conveyor belt
 - Electronics, for control units

L'inventaire « building, hall » est composé à 30% de « building, hall, wood construction » et à 70% de « building, hall, steel construction » qui est présent dans plusieurs centaines d'autres inventaires. En France,

la part de marché des bâtiments en bois parmi les bâtiments industriels et artisanaux est de 23%⁴. Le chiffre de 30 % est donc légèrement surestimé pour la situation française. En revanche, lorsque le matériau de structure du bâtiment est clairement identifié, il est pertinent de sélectionner directement l'inventaire avec le matériau de structure correspondant.

Analyse : Les inventaires ecoinvent d'infrastructures datent pour la plupart d'avant 2010 et sont directement ou indirectement spécifiés comme ayant de fortes incertitudes.

Conclusion : Il est donc recommandé de n'utiliser ces inventaires infrastructures ecoinvent que si l'infrastructure est incluse dans l'ACV d'un produit ou d'un service et que la part de ses impacts sur les impacts totaux reste raisonnable.

3.3 ACV des infrastructures – état des lieux des différentes normes

3.3.1 NF EN 15978

Concernant l'**unité fonctionnelle**, la norme NF EN 15978:2011 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul » spécifie avec justesse que « une unité de référence commune peut être déduite de l'équivalent fonctionnel et être utilisée pour présenter les résultats des indicateurs de l'évaluation environnementale en fonction de l'équivalent fonctionnel. Une unité de référence commune peut être sans dimension ou être qualifiée par une dimension (par exemple, par m², par an, par employé, par pièce par an, par m² par an). »

Cette norme apporte aussi des éléments à spécifier dans l'unité fonctionnelle : « L'équivalent fonctionnel d'un bâtiment ou d'un système assemblé (partie d'ouvrage) doit inclure, sans s'y limiter, des informations sur les aspects suivants :

- type du bâtiment (par exemple, bureaux, usine) ;
- exigences techniques et fonctionnelles pertinentes (par exemple, exigences réglementaires et propres au maître d'ouvrage) ;
- profil d'utilisation (par exemple, habitat) ;
- durée de vie requise. »

Dans notre situation, ces éléments peuvent être :

- Type de bâtiment : entrepôt de stockage, atelier de production,
- Exigences techniques et fonctionnelles pertinentes : exigences de sécurité incendie, exigences thermiques et hygrométriques
- Profil d'utilisation : usine en 3×8h, usine en 2×8h, fermeture annuelle 2 semaines à Noël et 2 semaines en août
- Durée de vie requise : 50 ans

D'un point de vue **périmètre**, la norme NF EN 15978 indique que « l'objet de l'évaluation est le bâtiment, y compris ses fondations et les ouvrages extérieurs situés sur le périmètre du bâtiment, sur l'ensemble de son cycle de vie. Le périmètre utilisé pour caractériser le site doit être cohérent avec la définition et l'utilisation envisagée du bâtiment. [...] Si l'évaluation se limite à une partie d'un bâtiment ou à un système assemblé (partie d'ouvrage) ou encore à une partie du cycle de vie, ou que certains des impacts ou aspects pertinents ne sont pas traités, cela doit être documenté, signalé et justifié. »

Cette norme apporte des éléments sur les **frontières du système**, notamment pour les phases de construction et d'utilisation.

Pour la **phase de construction (A5)**, « la frontière du système doit inclure les processus suivants :

— les travaux de fondation et l'aménagement paysager ;

⁴ [Enquête nationale de la construction bois 2022](#)

- le stockage des produits, y compris fourniture de chauffage, refroidissement, humidité, etc. ;
- le transport des matériaux, des produits, des déchets et des équipements sur l'implantation ;
- les ouvrages provisoires, y compris les ouvrages provisoires hors site nécessaires pour le processus l'installation pour la construction ;
- la production et la transformation d'un produit sur l'implantation ;
- la fourniture de chauffage, refroidissement, ventilation, régulation de l'humidité, etc. pendant le processus de construction ;
- l'installation des produits dans le bâtiment, y compris les matériaux auxiliaires non pris en compte dans la DEP des produits, tels que les agents de démoulage dans les coffrages en béton et les coffrages éliminés à la fin du projet ;
- la consommation d'eau pour le refroidissement des machines de construction ou le nettoyage sur site ;
- les processus de gestion des déchets des autres déchets générés sur l'implantation. Ceci inclut tous les processus (notamment le transport à partir de l'implantation) jusqu'à l'élimination finale ou jusqu'au statut de fin de déchets ;
- la production, le transport et la gestion des déchets pour les produits et les matériaux perdus pendant le processus de construction et d'installation. »

Pour la **phase d'utilisation (B1 à B7)**, « la frontière du système comprend l'utilisation des produits et services de construction servant à protéger, conserver, adapter à l'usage ou contrôler l'objet de l'évaluation, par exemple les services du bâtiment tels que le chauffage, le refroidissement, l'éclairage, l'alimentation en eau et les transports internes (assurés par exemple par des ascenseurs et des escalators), et des scénarios d'entretien comprenant le nettoyage, l'exploitation et le remplacement des machines. »

Pour **l'énergie consommée pendant la phase opérationnelle (B6)**, il est spécifié que « la consommation d'énergie dans le bâtiment fait référence à l'activité et aux processus tels que présentés dans l'EN 15603. La performance énergétique d'un bâtiment est déterminée sur la base de l'énergie consommée annuellement calculée ou réelle afin de répondre aux différents besoins associés aux utilisations définies du bâtiment :

- le chauffage ;
- l'alimentation en eau chaude sanitaire ;
- la climatisation (refroidissement et humidification/déshumidification) ;
- la ventilation ;
- l'éclairage ;
- l'énergie auxiliaire consommée pour les pompes, la régulation et l'automatisation.

L'énergie consommée par les autres systèmes techniques intégrés au bâtiment (par exemple, ascenseurs, escalators, installations de sécurité et systèmes de communication), nécessaires à la performance technique et fonctionnelle du bâtiment, doit être incluse dans le module B6 et être consignée et communiquée séparément ».

Pour **l'eau consommée pendant la phase opérationnelle (B7)**, il est spécifié que « le module B7 doit inclure tous les processus intégrés au bâtiment qui consomment de l'eau durant l'exploitation du bâtiment, tels que les processus pour :

- l'eau potable ;
- l'eau d'assainissement ;
- l'eau chaude sanitaire ;
- l'irrigation des espaces paysagers associés, des toits et des murs végétalisés ;

— l'eau pour le chauffage, le refroidissement, la ventilation et l'humidification ;

— toute autre eau consommée par les systèmes intégrés au bâtiment tels que fontaines, piscines, saunas.

Si l'eau consommée par des appareils sans rapport avec le bâtiment (par exemple, lave-vaisselle, machines à laver) est incluse dans l'évaluation, cela doit être consigné et communiqué séparément ».

La norme NF EN 15978 spécifie aussi les caractéristiques physiques qui doivent être prise en compte dans la modélisation du bâtiment. Ces caractéristiques sont présentées en Annexe D : NF EN 15978 – Caractéristiques du bâtiment.

La norme préliminaire pr-EN 15978:2024 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul » prévoit de :

- Prendre en compte les indicateurs environnementaux recommandés dans l'EN 15804+A2 ;
- L'ajout du module A0 (pour la pré-construction), du module B8 pour les impacts liés aux activités des usagers (notamment les trajets pendulaires), les distinction des modules D1 et D2 (respectivement D1 la gestion et valorisation des matériaux récupérés à la fin de vie du bâtiment et D2 la gestion des énergies exportées et des autres utilités fournies au-delà de la frontière du bâtiment) ;
- Deux approches pour comptabiliser l'énergie produite sur site (indication séparée des équipements d'énergie exportée).

Analyse : La norme NF EN 15978 présente un cadre pour l'ACV des bâtiments en spécifiant notamment les éléments à prendre en compte :

- dans l'unité fonctionnelle (type de bâtiment, exigences techniques, profil d'utilisation et durée de vie) ;
- pour les frontières du systèmes (e.g. inclusion de l'énergie relative au chauffage, à la climatisation, à la ventilation, ...) ;
- pour la modélisation (nombre d'étages, hauteur des étages, système sécurité incendie, ...)

3.3.2 La norme française : RE2020

Dans la partie « performance environnementale », l'indicateur $I_{c \text{ bâtiment}}$ est présenté. Cet indicateur mesure l'impact carbone global d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, prenant en compte les émissions de gaz à effet de serre associées à la construction, l'exploitation et la fin de vie du bâtiment. $I_{c \text{ bâtiment}}$ est la somme de plusieurs indicateurs :

- $I_{c \text{ composants}}$ mesure l'impact carbone des matériaux et composants de construction, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur mise en œuvre. Cet indicateur permet de sélectionner des matériaux ayant un faible impact environnemental et favorise l'usage de matériaux bas carbone.
- $I_{c \text{ énergie}}$ évalue l'impact carbone des consommations énergétiques du bâtiment durant sa phase d'exploitation (chauffage, climatisation, eau chaude, etc.). Il encourage l'utilisation d'énergies renouvelables et des équipements efficaces pour minimiser les émissions liées à l'usage du bâtiment.
- $I_{c \text{ chantier}}$ (à ne pas confondre avec l'indicateur $I_{c \text{ construction}}$ qui est la somme de $I_{c \text{ chantier}}$ et $I_{c \text{ composants}}$) quantifie les émissions de CO₂ générées par les activités de chantier, notamment liées au transport des matériaux, aux engins de construction et aux installations temporaires. Cet indicateur pousse les acteurs du bâtiment à optimiser les processus de chantier pour réduire l'empreinte carbone.
- $I_{c \text{ eau}}$ prend en compte les impacts environnementaux liés à la consommation et au cycle de vie de l'eau dans le bâtiment, bien que cet indicateur soit moins central que les autres dans la RE2020. Il encourage l'optimisation de la gestion de l'eau, y compris les économies d'eau et la réutilisation des eaux grises.

La RE2020 évalue chacun de ces indicateurs. Cependant seul les indicateurs $I_{c \text{ énergie}}$ et $I_{c \text{ construction}}$ (somme de $I_{c \text{ chantier}}$ et $I_{c \text{ composants}}$) sont soumis à des seuils maximaux réglementaires présentés ci-dessous.

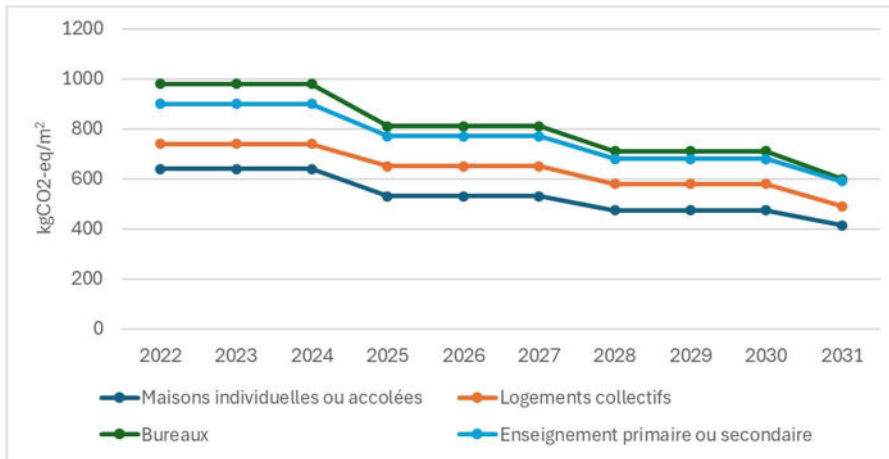


Figure 3 : Valeur de $I_{c, construction_maxmoyen}$ représentant la valeur du seuil maximal standard de la RE2020 qui est ensuite pondéré par des facteurs complémentaires ($M_{i, combles}$, $M_{i, surf}$, $M_{i, VRD}$, ...)

Le calcul des indicateurs est réalisé à partir des données environnementales disponibles dans les FDES présentes dans la base INIES et des données d'activité. Plusieurs catégories de données sont disponibles dans la base INIES : les données conventionnelles (elles concernent principalement les consommations d'électricité et d'eau, leur usage est obligatoire si elles sont disponibles), les données spécifiques (FDES) et les données environnementales par défaut (DED) à utiliser s'il n'y a pas de FDES disponible. De manière plus détaillée, en omettant les données conventionnelles, le choix des données environnementales pour chaque élément suit la logique présentée ci-dessous.

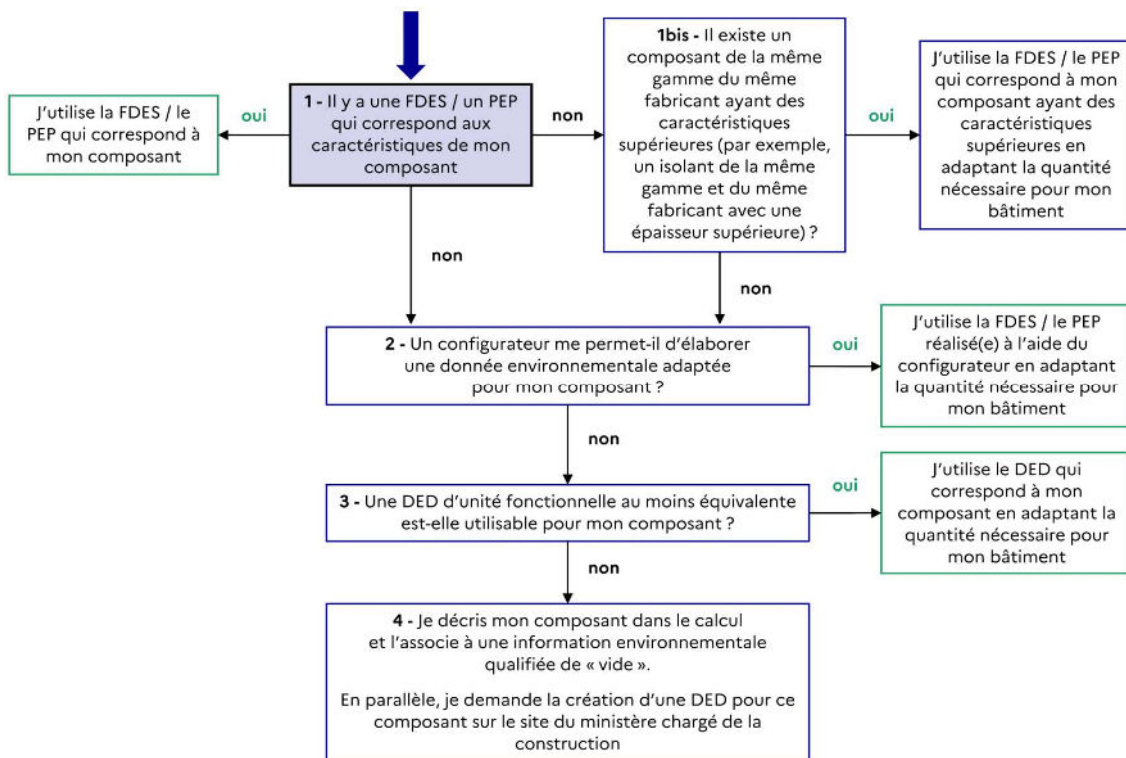


Figure 4 : Logigramme pour le choix des données environnementales dans le cadre de la RE2020 (CEREMA Méditerranée, Ministère de la Transition Ecologique, 2024)

Le périmètre pour la réalisation d'une ACV dans le cadre de la RE2020 est présenté ci-après. Tous les éléments présents sur le permis de construire sont à prendre en compte, hormis pour le lot VRD, où il ne faut prendre en compte que les parkings aériens et les réseaux (CEREMA, 2021).

	Inclus	Exclus
Temporel	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Fabrication des composants du bâtiment ➤ Chantier de construction et de terrassement ➤ L'utilisation du bâtiment et sa maintenance ➤ La déconstruction ou démolition du bâtiment 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Démolition préalable à la construction ➤ Dépollution et remise en état de la parcelle
Physique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tous les éléments du permis de construire : bâtiment et parcelle* ➤ Les usages de l'énergie de la méthode de calcul énergétique ➤ Les usages de l'eau prévus par le permis de construire 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les déplacements des acteurs du chantier ➤ Les déplacements des usagers ➤ Les déchets d'activités ➤ Les équipements mobiliers

Figure 5 : Périmètre physique et temporel pour la réalisation d'ACV dans le cadre de la RE2020 (CEREMA, 2021)

La durée de vie du bâtiment à employer est de 50 ans. De plus, les exigences règlementaires de la RE2020 doivent être appliquées à des valeurs d'impact sur le changement climatique qui sont calculées de manière dynamique.

Les exigences de la RE2020 s'appliquent actuellement aux maisons individuelles, logements collectifs, bureaux, bâtiments d'enseignement primaire et secondaire. Le GTM2 (Groupe de Travail Modélisateur 2) étudie actuellement d'autres typologies de bâtiments. Une attention particulière devra être portée sur ce point et il est recommandé de consulter le fruit du travail du GTM2 sur le « Lot 09 – Bâtiment à usage industriel et artisanal » lorsqu'il sera publié (Définition des exigences RE2020 applicables à de nouvelles typologies de bâtiments (tertiaire hors bureaux, industriel)).

Bâtiments actuellement soumis à la RE2020	Bâtiments actuellement étudiés pour une inclusion dans la RE2020
<ul style="list-style-type: none"> • Habitation (logement collectif, maison individuelle ou accolée) • Bureaux • Bâtiments d'enseignement primaire et secondaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Hôtels • Restaurants • Commerces • Etablissements d'accueil de la petite enfance • bâtiments universitaires d'enseignement et de recherche et bâtiments d'enseignements atypiques type privé • Etablissements de santé et EHPAD • Gymnases et salles de sports, y compris vestiaires • Bâtiments à usage industriel et artisanal • Aéroports • Médiathèques et bibliothèques
Bâtiment qui ne sont pas soumis à la RE2020 et qui sont exclus des travaux en cours	
<p>« Les bâtiments ou parties de bâtiment qui, en raison de contraintes spécifiques liées à leur usage, doivent garantir des conditions particulières de température, d'hygrométrie ou de qualité de l'air, et nécessitant de ce fait des règles particulières »</p> <p>« Les bâtiments ou parties de bâtiment chauffés ou refroidis pour un usage dédié à un procédé industriel. »</p> <p><i>Exemples : entrepôts frigorifiques, abattoirs, production de batteries au lithium, industrie papetière</i></p>	

Analyse : La RE2020 présente donc une méthodologie ACV pour l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Des exigences quantitatives sont définies concernant les émissions de GES maximales autorisées associées aux indicateurs $I_{c \text{ énergie}}$ et $I_{c \text{ construction}}$ (somme de $I_{c \text{ chantier}}$ et $I_{c \text{ composants}}$). La méthodologie définit un périmètre et des outils approuvés, ainsi que les données à utiliser dans différents cas.

Conclusion : Le logigramme de sélection des données environnementales pourrait être appliqué à l'ACV des infrastructures industrielles et de transport.

3.4 Pratiques observées dans l'ACV des infrastructures

3.4.1 Démarches d'ACV simplifiées

Des modèles simplifiés de bâtiments ont été développés et testés (Bonnet, Hallouin, Lasvaux, & Galdric, 2014). Deux méthodes sont proposées, la méthode Pareto, basée sur le principe de Pareto « 80% des conséquences sont dues à 20% des causes », et la méthode EMMA, basée sur le principe que les quantités d'éléments mises en œuvre dans un bâtiment sont liées à des paramètres définis dans les étapes préliminaires d'un projet.

Méthode Pareto

La méthode Pareto (option 1 présentée dans la Figure 6) consiste à ne considérer qu'une liste réduite d'éléments de construction en utilisant une liste prédéfinie et harmonisée. Les impacts environnementaux de ces éléments sont ensuite calculés, puis sommés. Un facteur est ensuite appliqué à ce résultat pour prendre en compte les impacts d'éléments ayant été omis pour simplification. Le résultat de l'ACV simplifiée avec la méthode Pareto est ainsi obtenu. Cette première méthode s'apparente à du travail de première itération pour une ACV « classique ».

Méthode EMMA

La méthode EMMA (option 2 présentée Figure 6) prend en compte des paramètres du bâtiment (nombre d'étages, surface, dimensionnements des ventilations, ...) définis au préalable. Ces paramètres permettent de calculer les quantités d'une liste d'éléments (béton, acier, isolant, etc.) auxquels sont attribués des impacts environnementaux génériques. Les méthodes proposées dans cette étude permettent de conserver une fiabilité des résultats, avec une précision minimale de 85% pour deux des sept indicateurs d'impacts étudiés. Les cinq autres indicateurs (dont le Pouvoir de Réchauffement Global) ont une précision supérieure à 90%. La méthode EMMA permet un gain de temps de 33% (EMMA) et la méthode Pareto de 75%.

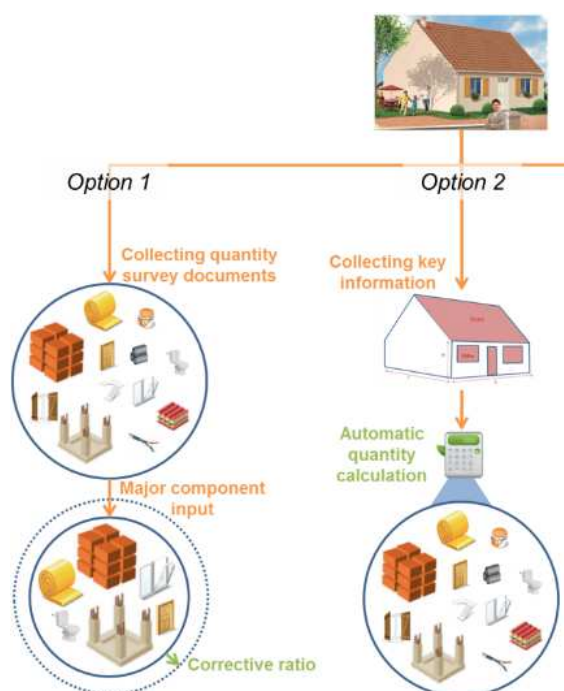


Figure 6 : Représentation schématique de trois options de simplification (Lebert, 2013) (seules les options 1 et 2 sont développées dans (Bonnet, Hallouin, Lasvaux, & Galdric, 2014))

Ces deux méthodes présentent certaines limites. Ces méthodes ne sont applicables qu'à des typologies de bâtiments dont un panel a été préalablement étudié et pour lesquelles les listes d'éléments et de paramètres, ainsi que les ratios ont été définis. La qualité des résultats de ces méthodes dépend donc de la taille du panel étudié en amont. Dans le cadre du projet (BENEFIS), seuls des bâtiments résidentiels ont été étudiés au travers de ces méthodes.

Le projet (BENEFIS) a conclu que le temps de modélisation a été réduit de 33% pour la méthode EMMA et de 75% avec la méthode Pareto par rapport à l'ACV détaillée. Tout cela en conservant une précision minimale de 80% par rapport à l'ACV détaillée.

Analyse : Des méthodes de simplification existent pour les bâtiments résidentiels ou tertiaire qui sont par nature plus homogènes que les infrastructures industrielles ou de transport.
Conclusion : La méthode Pareto semble plus adéquate pour l'ACV des infrastructures qui sont très diverses par nature. Ce principe de Pareto est, par ailleurs, généralement employé en ACV pour la première itération de calcul. Cette collecte simplifiée des données pourrait être couplée à des inventaires de cycle de vie préétablis sur les éléments majeurs retrouvés classiquement dans les infrastructures industrielles ou de transport.

3.4.2 Définition de l'unité fonctionnelle

Tout comme dans une ACV produit, la définition de l'unité fonctionnelle est cruciale afin de déterminer clairement le sujet de l'ACV. L'ISO 14040, posant les principes et la cadre de l'ACV, donne la définition suivante : « L'unité fonctionnelle définit la quantification des fonctions identifiées (caractéristiques de performance) du produit. L'objectif premier d'une unité fonctionnelle est de fournir une référence à laquelle les intrants et les extrants sont liés. Cette référence est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats d'une analyse du cycle de vie. Le caractère comparable des résultats d'une ACV est particulièrement critique lors de l'évaluation de différents systèmes pour s'assurer que ces comparaisons sont effectuées sur une base commune ». **Dans le cas de l'ACV infrastructure, plusieurs éléments sont à considérer, notamment le service rendu, la qualité de ce service, la durée de vie, la période de service et la localisation .**

(Chirjiv Kaur Anand, 2017) indique que les unités fonctionnelles courantes pour les ACV bâtiment sont le m² et le m³. Cependant ce ne sont pas des unités fonctionnelles à proprement parler, mais plutôt des flux de référence.

(E. Hoxha, 2020) présente une revue systématique de la littérature des analyses du cycle de vie d'infrastructures routières. Le choix de l'unité fonctionnelle est analysé au travers des différents paramètres qu'elle prend en compte.

Ces paramètres sont :

- la longueur de la route ;
- la largeur de la route ;
- la stratigraphie ;
- la durée de référence ;
- le trafic journalier moyen annuel (AADT, pour Annual Average Daily Traffic, en anglais) ;
- la vitesse ;
- et le climat.

On observe dans cette étude que certains paramètres sont quasi-systématiquement renseignés (longueur, nombre de voies, durée de référence) et d'autres paramètres sont souvent omis (flux journalier moyen, vitesse, climat, pente, charge maximale supportée, ...).

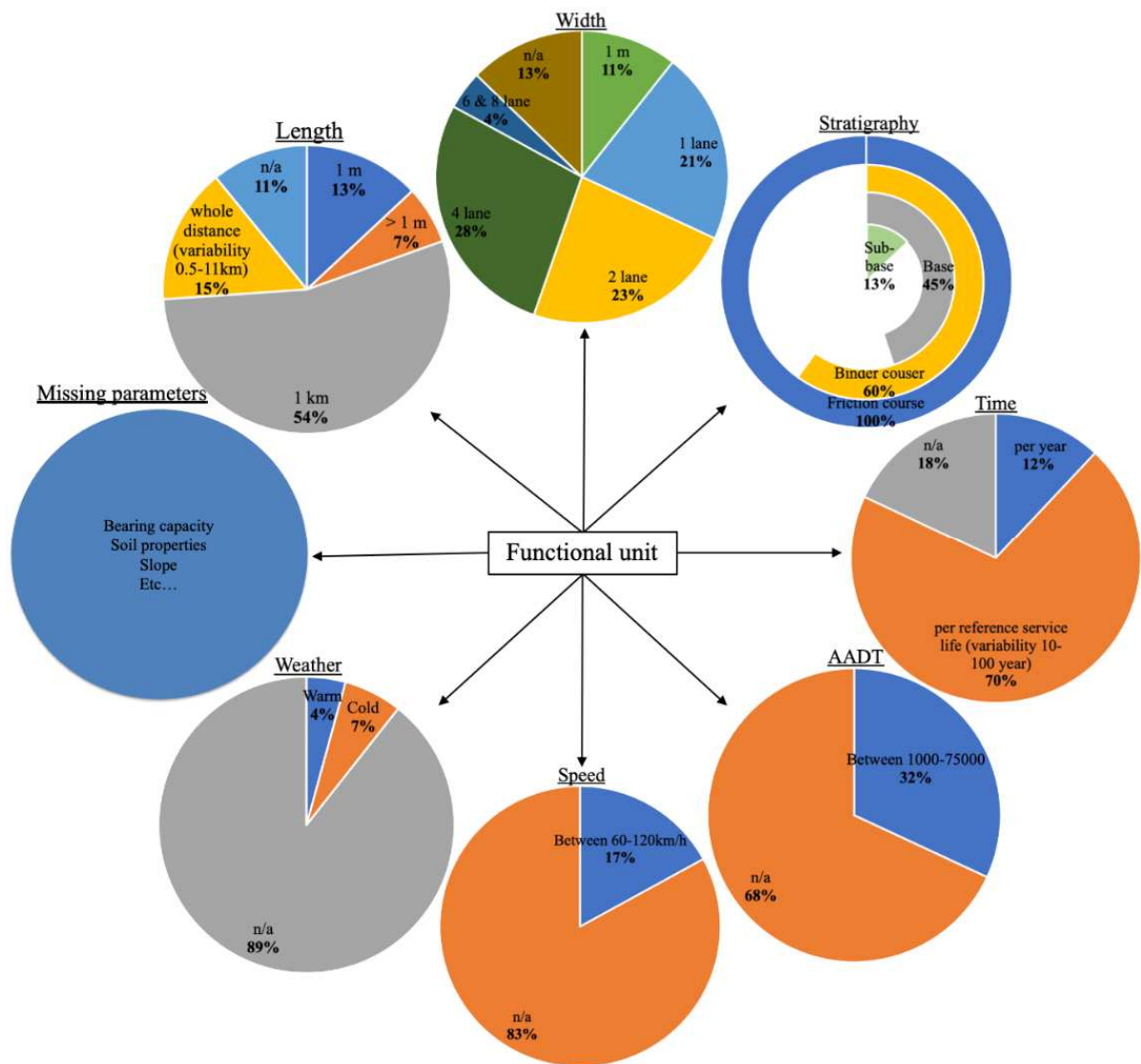


Figure 7 : Fréquence d'apparition des valeurs de chaque paramètres parmi les 47 publications étudiées (E. Hoxha, 2020)

Service rendu par l'infrastructure

Pour les bâtiments industriels, le service rendu peut être d'héberger ou de permettre l'activité industrielle. Dans le cas de l'hébergement, les équipements de production (machines immeubles et matériel roulant) tendent à ne pas être inclus, tandis que dans le cas où l'on considère la permission de l'activité industrielle, les équipements (machines immeubles, mais pas matériel roulant) tendent à être inclus.

Le service rendu par une infrastructure de transport est plutôt de permettre le déplacement d'un flux de X personnes et/ou de marchandises par an d'un point A à un point B.

(Audi, 2016) présente une analyse des unités fonctionnelles possibles pour les infrastructures de transport, notamment sous-terraines. Les unités fonctionnelles suivantes sont entre autres citées :

- « transporter une personne par kilomètre ou un tonne par kilomètre » ;
- « réaliser 1km de tunnel » ;
- « permettre de faire passer pendant un certain nombre d'années un flux de véhicules d'un point A à un point B, où la distance de référence est de X km » ;
- « construire une structure de 1km de longueur et trois voies de circulation dans chaque sens, permettant de passer un trafic annuel de $AADT_{40} = 1600$ véhicules par jour ».

Le RCP (C-PCR-022 (TO PCR 2019:14)) indique d'utiliser l'unité fonctionnelle « infrastructure routière qui permet d'offrir un service de transport au cours de la période d'étude de référence définie » et le RCP (PCR 2013:20) présente une unité fonctionnelle plus précise prenant en compte le trafic moyen « m2 de route à usage spécifique. L'impact environnemental global de la route et l'impact environnemental par m2, avec le trafic journalier moyen annuel mentionné, doivent être indiqués. ».

Analyse : Les bâtiments sont définis par unité permettant une activité industrielle ; il existe une différence d'interprétation sur la prise en compte de la seule enveloppe du bâtiment ou des machines.
Conclusion : De façon générale les infrastructures de transport sont définies en km pour une certaine largeur ou pour un certain nombre de voies. L'indication du flux moyen journalier de passager ou de marchandises est un élément souvent omis. L'intégrer systématiquement permettrait de quantifier l'intérêt de cette infrastructure.

Durée de vie de l'infrastructure

La durée de vie de l'infrastructure est un paramètre clé à définir dans l'unité fonctionnelle. Il est important de ne pas confondre la durée de vie et la période de référence. La période de référence est la « période pendant laquelle sont analysées les caractéristiques temporelles de l'objet de l'évaluation » (EN15978).

L'EN 15978 précise que la durée de vie requise doit être incluse dans la définition de l'unité fonctionnelle. Il est de plus précisé que « si le maître d'ouvrage ou la réglementation ne spécifie aucune durée de vie requise, il est possible d'utiliser la durée de vie au stade de la conception. En cas d'utilisation de la durée de vie au stade de la conception (qui peut être plus longue que la durée de vie requise), la méthode par laquelle celle-ci a été obtenue doit être décrite ; par exemple, déterminée à partir de données empiriques, probabilistes ou statistiques ».

La RE2020 indique que « la durée conventionnelle de la phase d'exploitation du bâtiment (« sa durée de vie») prise en compte dans le calcul est appelée période d'étude de référence (PER). La PER est de 50 ans pour tous les bâtiments (2 ans pour l'application partielle de la RE 2020 aux constructions provisoires) ».

Dans la littérature, les ACV bâtiments, qu'ils soient résidentiels, de bureaux ou industriels, présentent des durée de vie entre 25 et 100 ans. La durée de vie la plus couramment utilisée est 50 ans (Hugo Henrique de Simone Souza, 2021) (Haibo Feng, 2022) (Matthias Buyle, 2013).

(Olubanjo Olugbenga, 2019) présente une revue de la littérature de 22 études ACV ou carbone de transport ferroviaire comportant 57 études de cas. La répartition des durées d'amortissement est présentée dans le diagramme ci-dessous. Plus de la moitié des articles analysés présentent des durées d'amortissement entre 50 et 100 ans. En comparaison, ecoinvent une durée de vie de 100 ans pour les voies ferrées⁵ et les routes⁶. Cependant pour ces infrastructures de transport, de nombreux éléments sont remplacés pendant la durée de vie, notamment pour les routes où seul la couche de fondation de la chaussée est prévue de durée 100 ans.

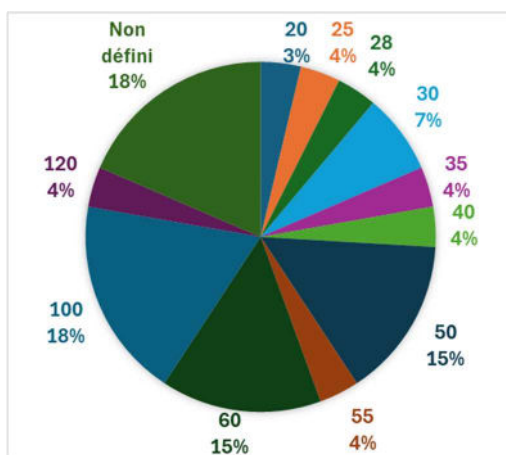


Figure 8 : Répartition de la durée d'amortissement d'infrastructures ferroviaires

⁵ <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/9964/documentation>

⁶ <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/5630/documentation>

Analyse : De façon générale la durée de vie des bâtiments est généralement considérée de 50 ans. La durée de vie des infrastructures de transport est comprise entre 50 et 100 ans.

Conclusion : La durée de vie par défaut recommandée pour les bâtiments est de 50 ans. La durée de vie par défaut recommandée pour les infrastructures industrielles est de 50 ou 100 ans.

Localisation

La localisation de l'infrastructure fait partie de la définition de l'unité fonctionnelle puisqu'elle va conditionner certaines des fonctions et certains des besoins que l'infrastructure va devoir remplir. Plusieurs exemples peuvent être donner :

- Les équipements d'isolation, de chauffage, refroidissement et ventilation dépendront du climat auquel l'infrastructure est exposée.
- Lorsque l'infrastructure est un moyen de production dépendant de son environnement (barrage, panneaux solaires), la localisation conditionne directement le service rendu.
- Le type de sol de la parcelle conditionne la mise en œuvre de pieux pour consolider les fondations.

Pour prendre l'influence du climat sur la conception des bâtiments, la RE2020 module les seuils réglementaires de $I_{\text{Construction_max}}$ en fonction des zones géographiques au travers du facteur Mi_{Geo} qui entraîne un « bonus de 30 kg eqCo_2/m^2 en zones chaudes [...], pour ne pas freiner les solutions apportant de l'inertie, qui ont un impact carbone plus fort généralement) » (CEREMA, 2021). Les zones chaudes correspondent dans la RE2020 à la côte méditerranéenne en remontant environ jusqu'à l'Ardèche et la Drôme.

La prise en compte de la localisation présente un intérêt principalement lors d'une comparaison de deux infrastructures dans des climats différents (exemple : lors de la comparaison d'une maison de montagne et d'une maison de bord de mer, omettre leur localisation biaise la comparaison puisque la maison de montagne aura sûrement un toit particulier pour supporter la neige et la maison de bord de mer aura des matériaux plus résistants aux environnements salins).

La localisation de l'infrastructure peut aussi avoir des conséquences en terme distance et de moyens de transport pour l'activité.

Conclusion : La localisation de l'infrastructure est rarement prise en compte. Il est nécessaire de la prendre en compte quand cela peut avoir un impact notable dans le cas où l'infrastructure est le support de production. Lorsque l'infrastructure est le moyen de production, il est toujours nécessaire de spécifier la localisation.

3.5 Phasage d'un projet et disponibilité des données

Réaliser une ACV d'une infrastructure est extrêmement chronophage dans la mesure où un bâtiment fait appel à de très nombreux matériaux ou éléments eux même composés de plusieurs matériaux. Une ACV détaillée nécessiterait un temps considérable, utile dans des cas très limités (exigence importante de précision pour la constitution d'un inventaire bien précis dans le cadre d'un projet, ou pour la comparaison de plusieurs projets). De façon générale, le praticien, quel que soit son objectif d'étude sur les infrastructure cherchera à travailler sur une simplification.

L'objectif lors de la phase d'inventaire est de décomposer l'infrastructure en sous-systèmes jusqu'à obtenir une liste de données d'activités pour lesquelles des données environnementales correspondantes existent (et pour lesquelles la qualité satisfait les objectifs de l'ACV). Cela signifie pour chaque élément de la liste :

- soit l'élément est mono-matériau,
- soit l'élément est un sous-système pour lequel les composants par matériaux ont déjà été caractérisés par des travaux préalables.
- le poids et/ou des caractéristiques techniques sont connues (ex : pompe de 40 W)
- l'origine/le lieu de production est connu. Cela est nécessaire car les mix énergétiques varient d'un pays à un autre.

3.5.1 Le phasage d'un projet d'infrastructure

Le document (ACE International Recommended Practice No. 18R-97) propose un système de classification des estimations des coûts (CAPEX), établissant des niveaux de maturité des projets (classes 5 [niveau très préliminaire] à 1 [définition complète]) en fonction de leur niveau de définition et fournissant des lignes directrices pour harmoniser les pratiques. A chaque classe de définition de projet sont associés une incertitude sur le CAPEX (coûts d'investissement), une utilisation courante des estimations, une méthodologie d'estimation, une fourchette de précision et un degré d'efforts de préparation.

Bien que les éléments de ce document concernent des estimatifs pour les CAPEX, ils peuvent, dans une certaine mesure, s'appliquer aux données de l'ACV. Les données disponibles par classe de définition de projet ainsi que leur précision sont présentées ci-après.

Tableau 6 : Extrait du (ACE International Recommended Practice No. 18R-97) (traduit de l'anglais)

Classe ACE	Classification ANSI	Utilisation courante	Définition du projet	Fourchette attendue de précision	
				Coût minimal réel prévu	Coût maximal réel prévu
Classe 5	Ordre de grandeur	Planification stratégique ; examen du concept	0 à 2 %	-50 à -20%	+30 à +100%
Classe 4		Etude de faisabilité	1 à 15 %	-30 à -15%	+20 à +50%
Classe 3	Budgétaire	Budgétisation	10 à 40 %	-20 à -10%	+10 à +30%
Classe 2	Définitif	Appels d'offres ; contrôles de projet ; gestion des changements	30 à 75 %	-15 à -5%	+5 à +20%
Classe 1		65 à 100 %	-10 à -3%	+3 à +15%	

Disponibilité des données selon les classes de définition de projet

Remarque : la description ci-dessous peut varier d'un projet à l'autre.

Classe 5 : Étape de faisabilité (0 à 2 % de définition)

À ce stade, les données sont limitées à des informations générales telles que :

- Le type de projet (bâtiment industriel ou infrastructure de transport).
- L'emplacement approximatif.
- Une estimation préliminaire des capacités ou des besoins fonctionnels.
- Quelques références à des projets similaires passés.

Ces données sont souvent insuffisantes pour une modélisation ACV précise et nécessitent des hypothèses génériques, augmentant l'incertitude des résultats.

Classe 4 : Étude de faisabilité ou étape de conception initiale (1 à 15 % de définition)

À ce stade, des documents préliminaires sont disponibles, notamment :

- Des schémas fonctionnels et diagrammes de flux.
- Une première liste des équipements majeurs.
- Des estimations de surfaces et volumes des structures principales.
- Une indication des matériaux envisagés pour les éléments majeurs (par exemple : acier, béton, panneaux sandwich).

Ces données permettent une première évaluation ACV, bien que de nombreuses approximations subsistent, notamment sur les masses et spécifications techniques.

Classe 3 : Conception avancée (10 à 40 % de définition)

Les données deviennent plus détaillées et incluent :

- Des plans préliminaires d'implantation et d'organisation spatiale.
- Des listes d'équipements complètes avec dimensions et besoins fonctionnels.
- Des spécifications initiales pour les matériaux (qualité, type, quantité).
- Une estimation des masses des structures principales.

Ces informations sont exploitables pour une modélisation ACV plus précise, notamment pour les éléments structurels et les impacts liés à la phase de construction.

Classe 2 : Définition finale avant appel d'offres (30 à 70 % de définition)

Les données à ce stade incluent :

- Des plans d'exécution complets (tuyauterie, schémas électriques, implantations précises).
- Des listes d'équipements et de matériaux avec toutes les caractéristiques techniques nécessaires.
- Des estimations précises des masses et des volumes.
- Des informations sur les méthodes de mise en œuvre (logistique, transport).

Ces données répondent généralement aux besoins d'une ACV détaillée, bien que des ajustements soient encore possibles selon les modifications de conception.

Classe 1 : Projet exécutif (65 à 100 % de définition)

Tous les documents nécessaires à la réalisation du projet sont finalisés et validés. Cela inclut :

- Des spécifications complètes pour chaque élément du projet (matériaux, dimensions, performances).
- Des données de fournisseurs et des devis précis.
- Des informations détaillées sur la logistique et les phases de construction.

3.5.2 Données utilisées par l'ingénierie de la construction

Une des difficultés de cette phase est le fait que l'ingénierie de la construction (maîtrise d'œuvre), ne prévoit pas le besoin d'agrèger les données des matériaux et équipements en vue d'obtenir un bilan matériaux-masses.

Les données les plus utilisées par l'ingénierie de la construction et donc les plus « facile d'accès » sont des estimatifs monétaires (CAPEX) et des estimatifs de quantités. Cependant les quantités ne sont pas forcément en masse (unité la plus souvent exploitée pour les ACV), mais plutôt en nombre ou en dimensions (exemple : mètres linéaires pour la tuyauterie).

Par ailleurs, les données sont divisées en lot (gros œuvre, charpente, clos-couvert, second œuvre, fluides et réseaux, électricité, finitions, VRD & aménagement extérieur, installations spécifiques...).

Les praticiens ACV doivent donc collaborer étroitement avec les équipes de maîtrise d'œuvre pour structurer les données, tout en utilisant des outils adaptés pour intégrer ces informations dans une modélisation environnementale cohérente. Un exemple de données utilisées par la maîtrise d'œuvre est présenté Annexe F : Exemple de données couramment utilisées par l'ingénierie infrastructure.

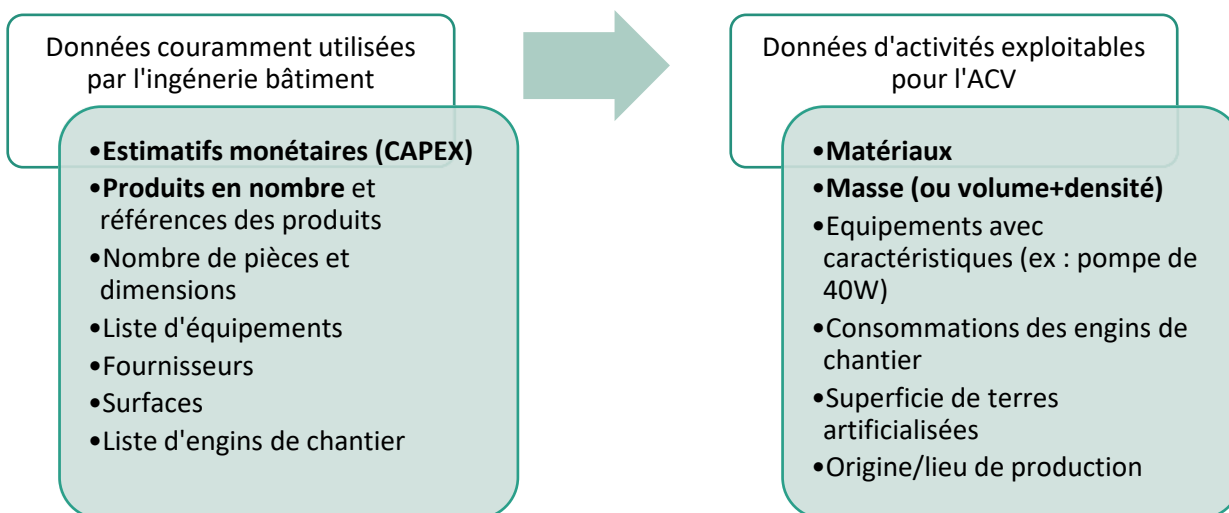


Figure 9 : Illustration du besoin de "conversion" entre les données employées par l'ingénierie bâtiment et les données exploitables par l'ACV

Le BIM (Building Information Modelling) est un outil à fort potentiel pour la réalisation d'ACV.

Lorsque le sujet de l'ACV est une infrastructure en elle-même, il existe un besoin de simplification à différents niveaux, selon les phases de construction et les corps de métiers impliqués. Cette simplification est notamment nécessaire pour la collecte de données qui est une étape chronophage de la réalisation des ACV d'infrastructures (Chirjiv Kaur Anand, 2017). Le BIM (Building Information Modelling) est une méthode de travail améliorant la collaboration en s'appuyant sur une ou des maquette(s) numérique(s) renseignées représentant l'ouvrage en trois dimensions (Fédération Française du Bâtiment, 2021). Le BIM complète la modélisation 3D classique avec des informations supplémentaires (références des pièces/éléments, matériaux, poids, temporalité de livraison, etc.).

Présenté ainsi, le modèle BIM d'un projet semble être une « base de données » répondant aux besoins des ACVistes pour la collecte des données d'activité. Cependant, en pratique, les modèles BIM manquent régulièrement de complétude et présentent seulement des éléments partiels pour la réalisation de l'ACV (matériaux de certains éléments non indiqués, éléments en « package », etc.).

Au-delà de cette limite, il est aussi nécessaire de faire correspondre les références matériaux de la maquette BIM aux données environnementales disponibles. Le processus de correspondance peut être réalisé de différentes manières plus ou moins automatiques :

- soit les données environnementales sont intégrées directement dans le modèle BIM telle une entrée supplémentaire dans une base de données, ce qui permet de conserver toutes les données dans un même fichier sans perte d'information, mais qui demande en général des performances de calcul plus importantes
- soit les données du modèle BIM sont exportées dans un outil tiers permettant la réalisation de l'ACV. (Potrč Obrecht T, 2020) indique que l'outil tierce le plus utilisé est Excel. Cela reflète un manque de compatibilité entre les données extraites du modèle BIM et les outils ACV (SimaPro, Gabi, ...)

Il existe des plug-ins permettant l'automatisation de ce processus. Ces plug-ins présentent cependant certaines limites vis-à-vis des données disponibles (matériaux, géographies, etc.) (Potrč Obrecht T, 2020) (Mohammad Najjar, 2017) (Cristiane Bueno, 2018). L'enjeu de la correspondance des éléments BIM avec les données environnementales a été étudié au travers du prisme des éléments de services dans les bâtiments, notamment les systèmes CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation) (Sebastian Theißen, 2020). Partant du constat que les impacts des services des bâtiments sont souvent omis ou sous-estimés, l'utilisation des normes IFC (Industry Foundation Classes) dans les plateformes Open BIM pour faciliter le partage et l'analyse des données des éléments de services est étudiée. Seul 5,5% des éléments BIM considérés pouvaient être liés sans adaptation aux données ACV. Après adaptation et applications de six solutions (entre autres : correction du calcul des volumes des cylindres vides, ajout et corrections de durées de vie), 94.5% des 7312 éléments BIM ont pu être correctement liés aux bases de données ACV. Cela met en avant les limites des méthodes BIM, tout en proposant des solutions.

Chaque élément d'une maquette BIM est, en général, associé à une référence de matériau, de composant ou de sous-composant. Cette référence peut prendre plusieurs formats (Soust-Verdaguer, 2023). La structure hiérarchique des MDSB est retranscrite dans les méthodes BIM en Level of Development (niveau de développement en français). Il existe six niveaux de développement (Autodesk) :

- LOD 100 : Concept Design – Modèle conceptuel avec formes et dimensions générales pour exprimer l'intention de design.
- LOD 200 : Design schématique – Modèle schématique avec dimensions et quantités approximatives, pour analyser l'espace.
- LOD 300 : Detailed Design – Modèle détaillé avec dimensions précises, utilisé pour les documents de construction.
- LOD 350 : Construction Documentation – Modèle enrichi pour la documentation de construction et les plans d'atelier.
- LOD 400 : Fabrication and Assembly – Modèle précis pour la fabrication et l'assemblage des éléments.
- LOD 500 : As-built or Facility Management – Modèle "tel que construit" pour la gestion et maintenance des installations.

Le niveau de développement se traduit en LOD (Level of Details, ou niveaux de détails en français) et en LOI (Level of Information, niveau d'information en français). Le LOD retranscrit le niveau de détails géométriques. Le LOD peut être défini par éléments. Il est recommandé d'avoir une homogénéité raisonnable entre les différents LOD d'une même maquette. Le LOI désigne la finesse et/ou la quantité d'informations complémentaires associées à un élément (Sibué, Définir le niveau de détail (LOD) de sa maquette BIM, 2020). Ces informations peuvent, entre autres, être des caractéristiques mécaniques de l'élément, des données environnementales qui y sont associées ou encore des informations relatives aux durées d'approvisionnement. Les niveaux de Level of Development, Level of Details et Level of Information ne sont pas toujours communs aux acteurs du bâtiment (Advenser).

Les modèles BIM permettent, de plus, de réaliser des études paramétriques permettant d'évaluer les variations des propriétés mécaniques, économiques et environnementales en fonction de choix de matériaux ou de géométries à des phases préliminaires de conception (Mohammad Najjar, 2017) (Martin Röck, 2018) (Fabian Prideaux, 2024).

Le BIM est un sujet en cours de maturation aussi d'un point de vue chantier/construction. Profiter des chantiers de digitalisation moderne pour inclure directement les niveaux d'informations de l'ACV permettrait de fluidifier les travaux des praticiens ACV. De plus, inclure, dans les tâches d'administration de maquette (qui correspondent à de la complétion de bases de données), les données ACV permettraient de sensibiliser les acteurs du bâtiment aux travaux du praticien ACV.

L'intégration de l'ACV dans les modèles BIM (Building Information Modelling) est donc une solution prometteuse permettant des gains de temps. Plusieurs éléments apparaissent cruciaux afin de fluidifier l'intégration de l'ACV dans les méthodes BIM :

- la nécessité d'une rigueur de la part des différentes parties prenantes lors de la construction d'une maquette BIM et de ses modifications
- une plus grande interopérabilité des bases de données environnementales avec l'usage de formats de données tel que l'IFC
- une meilleure uniformisation de son usage et de son vocabulaire entre les différentes entreprises du bâtiment

3.6 Enjeux associés aux données d'inventaires clés

3.6.1 Ciment et béton

Le béton est un matériau répandu dans le domaine de la construction. En 2021, 40 millions de m³ de béton prêt à l'emploi ont été produits en France (i.e. 0,6 m³ par habitant) (Statista). La juste modélisation de ce matériau est donc clé pour la modélisation des infrastructures dans leur ensemble. Les ingrédients composant principalement le béton sont le ciment, le sable, les graviers et de l'eau. Le ciment représente 97% de l'impact sur le changement climatique du béton (A. Feraille, 2022). Les cycles de vie du ciment et du béton sont présentés ci-dessous.

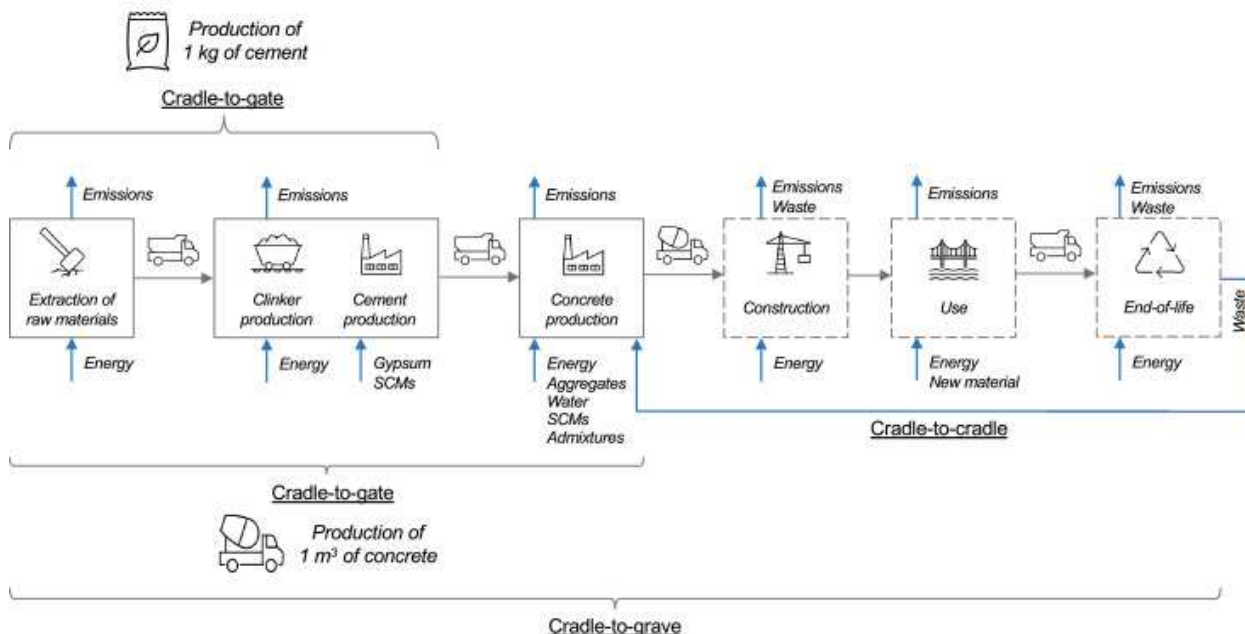


Table 1 : Etapes du cycle de vie du ciment et du béton (Josefine A. Olsson, 2024)

Il existe plusieurs classes de ciments définies principalement par leur résistance à la compression et leur composition. La nomenclature des ciments ainsi que les compositions des classes de ciments sont présentées ci-dessous. Le composant principal du ciment est le clinker. Les autres composants du ciment sont des laitiers de haut fourneau, de la fumée de silice, des pouzzolanes ou des cendres volantes.

Le ratio clinker-à-ciment est un des principaux facteurs influençant les impacts environnementaux des ciments. Cela s'explique par la consommation énergétique des fours de cimenterie qui produisent le clinker et nécessitent un chauffage à 1450°C pour permettre les réactions nécessaires (InfoCiments, 2019) (Josefine A. Olsson, 2024). Pour réduire significativement le ratio clinker-à-ciment on incorpore d'autres éléments dans le ciment (notamment les laitiers de hauts-fourneaux et les cendres volantes).

L'emploi de combustibles alternatifs (e.g. biomasse, pneus, combustibles solides de récupération) permet de réduire la consommation de combustibles fossiles pour la production de clinker et ainsi les impacts environnementaux (Josefine A. Olsson, 2024).

	CLINKER	LAITIER	POUZZOLANES OU CENDRES	CALCAIRE OU SILICE OU SCHISTE CALCINÉ	CONSTITUANTS SECONDAIRES
CEM I	> 95				< 5
CEM II	68 à 94	6 à 32% OU 6 à 32% OU 6 à 32%			< 5
CEM III	5 à 64	36 à 95			< 5
CEM IV	45 à 89		11 à 55		< 5
CEM V	20 à 64	18 à 50 ET 18 à 50			< 5

Figure 10 : Composition des ciments (hors gypse), selon les familles de la NF EN 197-1 (InfoCiments, 2022)

Exemple d'appellation d'un ciment	CEM	V/A	(S/V)	32,5	N
Eléments généraux relatifs à chaque segments de l'exemple d'appellation	Types de ciment : CEM I : ciment portland CEM II : ciment Portland composé CEM III : ciment de haut fourneau CEM IV : ciment pouzzolanique CEM V : ciment au laitier et aux cendres	Quantité de constituants principaux autres que le clinker selon les types de ciment	Noms des constituants principaux : S : laitier granulé de hauts fourneaux V : cendre volante siliceuse L ou LL : calcaire D : fumée de silice T : schistes bitumineux F : fines de béton recyclé	Résistance caractéristique minimum à 28 jours exprimée en MPa	Sous-classe de résistance (résistance caractéristique minimum à 2 ou 7 jours exprimée en MPa) : L (lent), N (normal), R (rapide)

Table 2 : Nomenclature des ciments (inspirée de (Ciments Calcia))

Un enjeu fondamental pour les concepteurs est de choisir les bonnes caractéristiques du béton au regard du bâtiment considéré : les performances mécaniques, la durée de vie et la maniabilité du béton. (Josefine A. Olsson, 2024). Par exemple, un béton résistant qui dure plus longtemps pourrait avoir un impact environnemental plus faible sur le long terme malgré des impacts environnementaux initiaux plus élevés.

La base de données ecoinvent met à disposition les jeux de données de plusieurs classes de ciment, ainsi que des inventaires de ciment moyen pondéré par la part de marché de chacun des ciments. Les valeurs d'impacts sur le changement climatique des différentes classes de ciment sont présentées ci-dessous, dans un premier graphe, d'après les données ecoinvent pour l'Europe sans la Suisse et, dans un second, d'après les données de France Ciment concernant les adhérents à France Ciment.

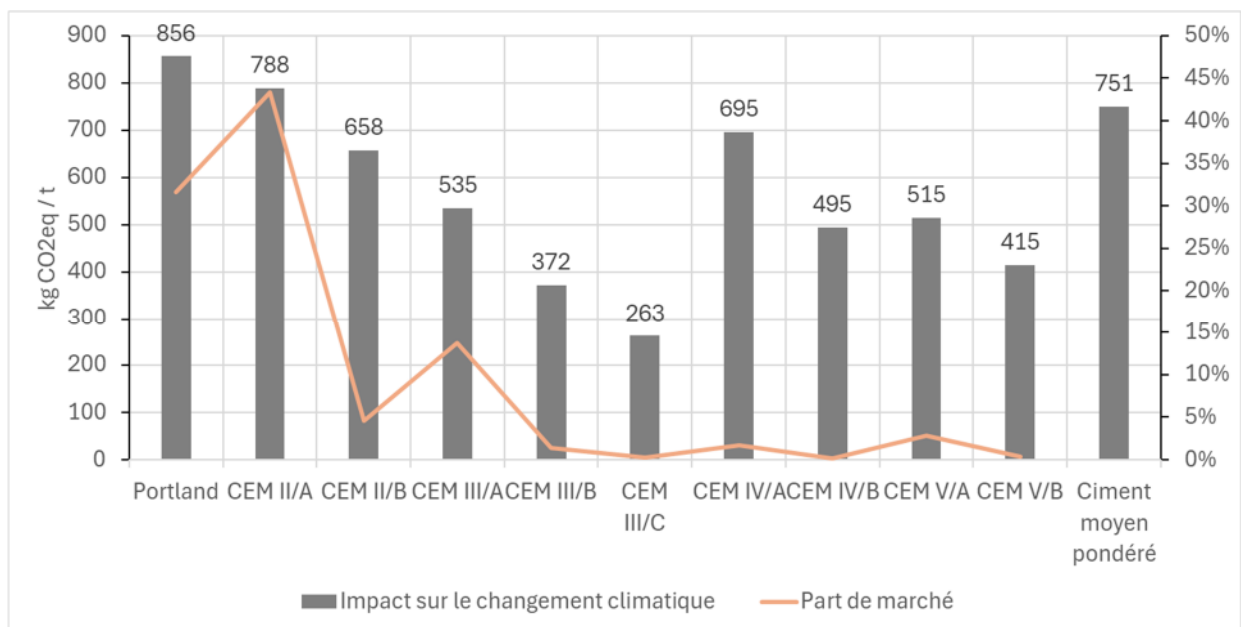


Figure 11 : Impact sur le changement climatique et part de marché des classes de ciments (Europe sans Suisse) (RDC sur base des données ecoinvent 3.9.1 avec la méthode EF3.1)

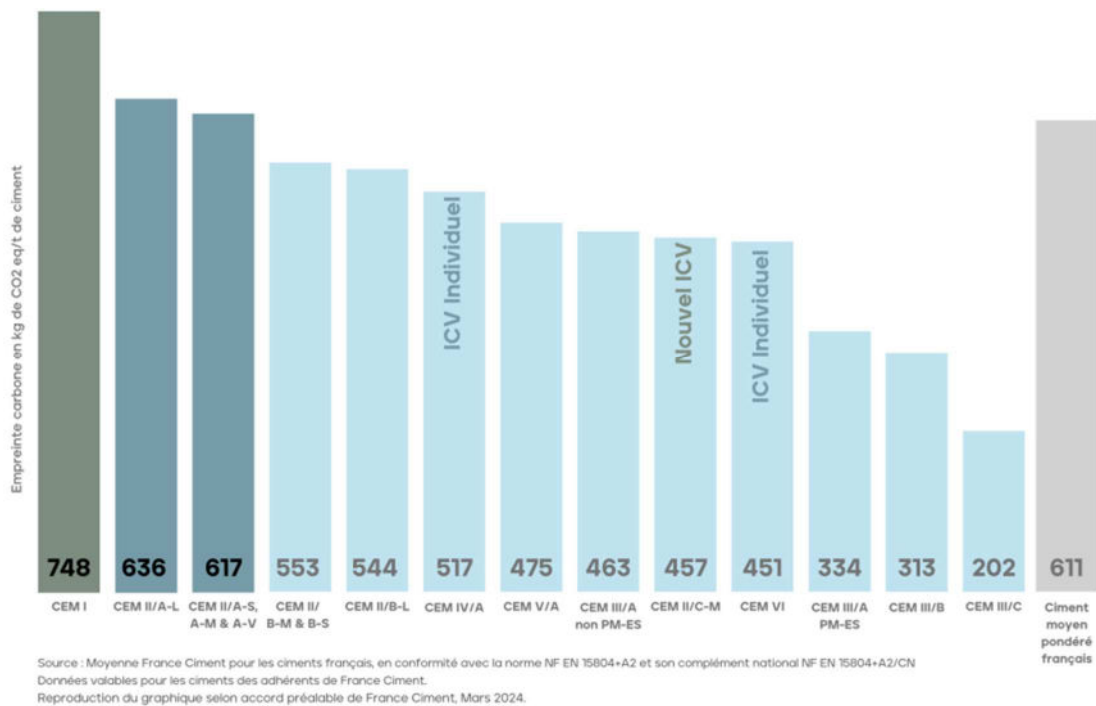


Figure 12 : Impact sur le changement climatique des classes de ciment des adhérents de France Ciment (InfoCiments, 2022)

On observe donc une variabilité significative des impacts environnementaux en fonction des types de ciments. On note que l'impact moyen est inférieur à celui des deux bétons les plus courants et que certains bétons ont des impacts significativement plus faibles (3 à 4 fois).

Les ACV de ciment présentent des impacts variables en fonction du périmètre. Le ciment « net » (excluant les émissions liées aux combustibles secondaires) a un impact sur le réchauffement climatique de 748 kgCO₂eq/tonne, tandis que le ciment « brut » (incluant les émissions liées aux combustibles secondaires) a un impact de 822 kgCO₂eq/tonne.

Les ciments peuvent être classés par composition comme illustré ci-dessus et les bétons peuvent être classés par résistance à la compression à 28 jours (mesure standard pour les bétons). (Gervasio & Dimova) présente les impacts environnementaux en fonction des grades de résistance à la compression sur base des données GaBi en utilisant le grade C25/30 comme référence.

En fonction de propriétés souhaitées du béton, le taux de ciment dans le béton peut varier. On a, par exemple, dans les inventaires ecoinvent suivants les contenu en ciment présentés dans le tableau ci-après. La colonne « Produits dans lequel ce béton est utilisé » provient des titres des bétons présents dans l'inventaire « market for ».

Tableau 7 : Contenu en ciment dans les inventaires béton ecoinvent

Inventaire	Unité	Densité (kg/m ³)	Contenu en ciment (kg/m ³)	Type de ciment	Produits dans lequel ce béton est utilisé
market for concrete, 25 MPa - CH	1 m ³	2420	290	50% CEM II/A 50% CEM II/B	« For building construction »
market for concrete, 30 MPa - CH	1 m ³	2400	355	60% CEM I 30% CEM II/A 10% CEM II/B	« For drilled piles »
market for concrete, 37 MPa - CH	1 m ³	2400	310	55% CEM II/A 30% CEM II/B 15% CEM I	« For civil engineering »



Figure 13 : Impacts environnementaux pour plusieurs grades de bétons (résistance à la compression à 28 jours) sur base des données GaBi (Gervasio & Dimova)

Plusieurs composants des ciments sont des co-produits (déchets) d'autres industries, notamment les laitiers de hauts-fourneaux et les cendres volantes. Pour la modélisation des ciments contenant des co-produits, l'allocation des impacts de ces co-produits est un enjeu crucial. Par exemple, la DHUP (Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages) recommande l'emploi d'une allocation économique entre la fonte et les laitiers de haut fourneau (1,4% pour les laitiers de hauts fourneaux). Le programme INIES a pris la décision, en juin 2022, de mettre en place l'obligation de cette allocation et a demandé la mise à jour, avant septembre 2022, des inventaires générant ou utilisant des laitiers pour lesquels ce changement entraîne un écart de plus de 10% sur l'indicateur de réchauffement climatique (CERIB, 2022) (INIES, 2022).

La norme EN 15804 présente aussi des règles pour l'allocation qui peuvent être particulièrement utiles pour la modélisation de la production d'acier et l'incorporation de laitiers de hauts fourneaux dans le ciment (voir page 35). Il est notamment précisé que « Dans le cas d'une coproduction conjointe, lorsque les processus ne peuvent pas être subdivisés, l'attribution doit respecter l'objectif principal des processus étudiés, en attribuant tous les produits et fonctions pertinents de manière appropriée. La finalité d'une usine et, par conséquent, des processus connexes, est généralement déclarée dans son permis et doit être prise en compte. Les procédés qui ne contribuent que très faiblement aux recettes globales peuvent être négligés. Les coproduits communs sont répartis comme suit :

- l'allocation est basée sur les propriétés physiques (e.g. la masse, le volume) lorsque la différence de recettes provenant des coproduits est faible⁷ ;
- dans tous les autres cas, l'allocation est basée sur des valeurs économiques ;
- les flux de matières présentant des propriétés intrinsèques spécifiques, par exemple le contenu énergétique, la composition élémentaire (e.g. la teneur en carbone biogène), doivent toujours être attribués de manière à refléter les flux physiques, quelle que soit l'allocation choisie pour le processus ».

La présence d'armatures dans le béton est aussi un paramètre influant à prendre en compte. Ces armatures sont majoritairement en acier, mais il existe aussi des armatures en composites. Les enjeux de modélisation de l'acier sont abordés dans la partie suivante.

Pour la modélisation ACV des éléments en béton, il existe le configurateur BETle du SNBPE. C'est un outil pour les calculs des impacts du béton prêt à l'emploi. Dans BETle, les entreprises de production de béton prêt à l'emploi adhérentes du SNBPE peuvent définir des bétons et leur composition au travers de DEP A1-A4.

⁷ En remarque, la norme précise « qu'une contribution aux recettes globales de l'ordre de 1 % ou moins est considérée comme très faible. Une différence de plus de 25 % est considérée comme élevée. »

Pour cela, ils renseignent la résistance du ciment, sa classe d'exposition, sa consistance, le type de ciment, ainsi que d'autres informations concernant la composition du béton. Tout utilisateur peut ensuite utiliser ces bétons prédéfinis et définir un élément en béton. Cette définition s'effectue en deux parties : la construction (module A4-A5) et la fin de vie et les bénéfices (modules C et D). La partie construction concerne le transport (type de transport et distance) et la mise en œuvre (type d'ouvrage/élément, dimensions, densité d'acier pour les armatures, type de mise en œuvre). La fin de vie est différenciée entre les bétons contenant des fibres métalliques et ceux n'en contenant pas. Le module D est comptabilisé automatiquement et prend en compte la revalorisation des granulats, celle des banches⁸ et celles des armatures métalliques. D'autres outils existent aussi comme OpenConcrete développé sur base de données majoritairement états-uniennes (Alyson Kim, 2022).

Analyse : Les principaux paramètres influençant les impacts environnementaux du ciment et donc du béton sont : la classe du ciment (i.e. son ratio clinker-à-ciment, donc sa composition) et les combustibles employés pour la production du clinker. Les principaux enjeux méthodologiques soulevés sont ceux de l'allocation pour les co-produits incorporés dans le ciment.

Conclusion : Afin de modéliser avec justesse un ciment, il est nécessaire de connaître à minima sa classe CEM. La base de données à utiliser dépendra principalement des objectifs de l'ACV (cf. partie 5.1). Il est, de plus, nécessaire d'avoir connaissance des allocations employées dans les données utilisées afin d'être vigilant vis-à-vis de la cohérence entre les différentes données utilisées si elles proviennent de sources présentant des choix méthodologiques différents.

3.6.2 Acier

L'acier dans les installations industrielles et infrastructures de transport est utilisé en grande quantité pour la fabrication d'éléments de structures (poutres), d'armatures pour le béton ou d'équipements (e.g. conduits d'aération). Tout comme le béton, cela rend son impact particulièrement significatif lors de la réalisation de l'ACV d'une infrastructure. L'acier est un alliage de fer (Fe) contenant un faible pourcentage de carbone (C), généralement entre 0,2 % et 2 %. Sa composition peut également inclure d'autres éléments pour améliorer ses propriétés, comme le manganèse, le chrome, le nickel, le molybdène et le vanadium. Ces éléments ajoutent des propriétés spécifiques : par exemple, le chrome et le nickel augmentent la résistance à la corrosion, tandis que le molybdène améliore la résistance à la chaleur et aux contraintes mécaniques. Le carbone permet d'augmenter la dureté et la résistance mécanique de l'acier. Cependant, au-dessus d'un certain seuil, il rend l'acier plus fragile.

La production d'acier primaire, qui repose sur la réduction du minerai de fer dans des hauts fourneaux, est énergivore puisqu'elle nécessite de monter à plus de 1400°C (Centre d'Information sur les Emballages Recyclés en Acier). L'acier peut être produit de deux manières différentes : via un haut-fourneau ou via un four électrique. La production via un haut-fourneau utilise du minerai de fer et du charbon afin de produire de l'acier et des laitiers de hauts-fourneaux. La production dans un four électrique utilise principalement des ferrailles.

Lors de la production en haut-fourneau, une allocation est nécessaire entre l'acier et les laitiers. Cela est particulièrement important pour les ACV bâtiment car les laitiers de hauts fourneaux sont utilisés dans la composition de certains ciments. Selon la méthode d'allocation, le taux d'utilisation de ferraille (i.e. recyclage amont) et le taux de recyclage en fin de vie, les impacts environnementaux de l'acier varient significativement. Cette influence est aussi significative lors de la modélisation de bétons armés à ratios d'armatures faibles (Sébastien Maitenaz, 2021). Si une allocation économique est réalisée, une part réduite des impacts environnementaux est allouée aux laitiers : 1.4%.

L'acier dans les infrastructures a de nombreuses fonctions ; la documentation de la Base Impacts® présente, dans le tableau ci-dessous, des recommandations d'usages d'inventaires Worldsteel pour différents types d'éléments en acier.

⁸ Une banche est un élément de coffrage d'abord utilisé dans la technique du pisé. Dans les travaux de bâtiment et travaux publics, on les utilise principalement pour coffrer les murs de béton généralement armé. On parle alors de béton banché. Les banches peuvent être métalliques ou bien faites en bois (souvent contreplaqué avec une paroi glacée pour obtenir un béton avec un aspect bien lisse). *Source Wikipedia consulté le 14/01/2025 ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Banche_\(ma%C3%A7onnerie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Banche_(ma%C3%A7onnerie)))*

Application	1 = preferable 2 = possible	Plate	Pipe	Hot Rolled Coil	Pickled Hot Rolled Coil	Cold Rolled Coil	Finished Cold Rolled Coil	Electro-Galvanized	Hot-Dip Galvanized	Organic Coated	Tin Plate	Electrolytic Chromed Coated Steel	Section Rolling	Rebar	Engineering Steel	Wire Rod
		Construction	Structural parts	1	1	1				1	2	1			1	
walls elements								1	1	1						
Basement													1	1		
Concrete reinforcement														1		
Cladding				2				1	1	1						
Roofing									1	1						
Farm building walls									2	1						
Gutter system (ducts)									1	1						
Chimney ducts				2												
construction components				2	2			1	1	1						
Farm building components									2	1						
Doors and garages									2	1						
Fences									2							
Stairs				1					2							
Tiles									2	1						
Ceilings components								1	1	1						
Floor components				1				2	1							
inside decoration panels											1					
partition walls								2	1	1						
inside panels food industry											1					
security rails on roads								1								
Home appliances	furnitures						2	1		1						
	white goods						1	1	1	1						
	heating, ventilation and air condition						1	1	1	1						
Machinery	Rail												1			
	Machines	2					1								1	
	Pipes		1													
Others	tubes			1	2		1									
	pools							2	2							
	water tanks							1								
	greenhouses							2	2							
	signs							2								
	tools														1	
	dies														1	
wires													1		1	

Table 3 : Tableau de recommandations d'emploi des inventaires Worldsteel (ADEME, 2016)

Ce tableau peut être utilisé comme base pour identifier l'inventaire à utiliser selon le composant d'acier de l'infrastructure à modéliser.

Le tableau suivant présente les principaux inventaires Worldsteel disponibles dans Simapro :

Tableau 8 : Principaux inventaires Worldsteel disponibles dans SimaPro

Type of steel	Type of route	Perimeter	Typical thickness
Steel cold rolled coil	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.15 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm
Steel ECCS	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.13 - 0.49 mm. typical width between 600 - 1100 mm
Steel Electrogalvanized	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.3 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm
Steel Engineering steel	electric arc furnace route	production mix, at plant	
Steel finished cold rolled coil	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.3 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm
Steel hot dip galvanised	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.3 - 3 mm. typical width between 600 - 2100 mm
Steel Hot Rolled Coil	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	between 2 - 7 mm. typical width between 600 - 2100 mm

Steel organic coated	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.15 - 1.5 mm. typical width between 600 - 1300 mm
Steel pickled hot rolled coil	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	between 2 - 7 mm. typical width between 600 - 2100 mm
Steel plate	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	between 2 to 20 mm. The maximum width is 1860 mm
Steel rebar	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	
Steel seamless pipe	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	
Steel sections	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	
Steel tinplated	blast furnace route	production mix, at plant	between 0.13 - 0.49 mm. typical width between 600 - 1100 mm
Steel UO pipe	blast furnace route	production mix, at plant	
Steel welded pipe	blast furnace route	production mix, at plant	
Steel wire rod	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	
Value of Scrap	blast furnace route and electric arc furnace route	production mix, at plant	

Trois zones géographiques sont proposées par inventaire :

- Monde (GLO),
- Asie (RAS),
- Europe (RER).

Le graphique suivant présente les résultats pour les données sur le périmètre géographique mondial.

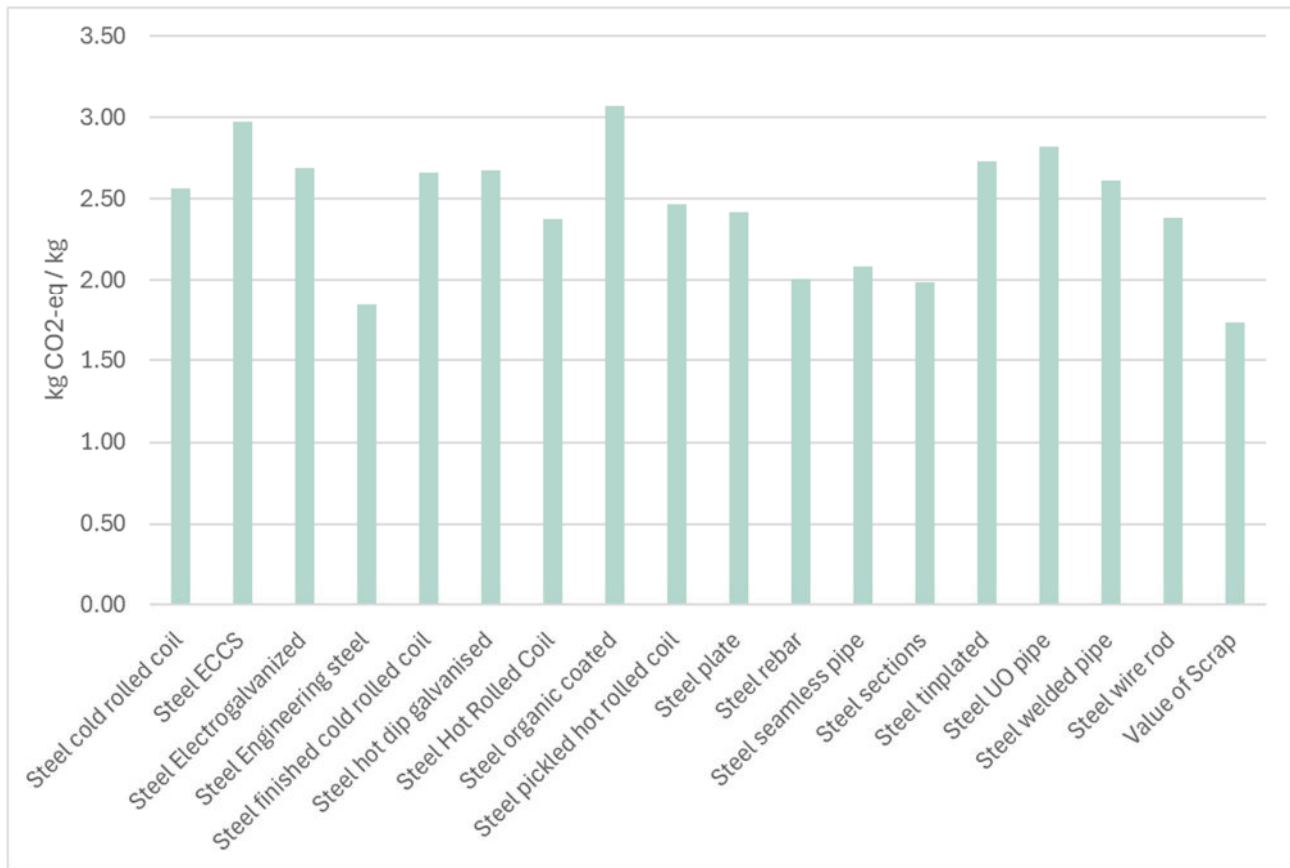


Figure 14 : Contribution au changement climatique des différents types d'acier sur le périmètre monde (basé sur les inventaires Worldsteel ; calculé avec la méthode EF 3.1)

La valeur moyenne (arithmétique) est de 2,45 kg CO₂-eq / kg avec un écart-type de 0.38. On observe que c'est entre la filière électrique et la filière haut-fourneau qu'il y a la plus grande différence avec une moyenne (arithmétique) de 2.75 kg CO₂-eq pour les aciers 100% haut-fourneau et 1.8 kg CO₂ pour l'acier 100% filière électrique.

Enfin, pour un acier issu de la filière 100% haut-fourneau, on observe des différences de l'ordre de 5 à 10% selon la zone géographique alors que la différence pour la filière électrique est beaucoup plus élevée (44% entre la valeur monde et la valeur européenne) en raison des variations des mix électriques.

Tableau 9 : contribution au changement climatique des principaux inventaires Worldsteel selon la zone géographique

Type of steel	RER	RAS	GLO	diff GLO vs. RER	diff. GLO vs. RAS
Steel cold rolled coil	2.23	2.68	2.56	-13%	5%
Steel ECCS	#N/A	#N/A	2.97	#N/A	#N/A
Steel Electrogalvanized	2.57	2.68	2.69	-4%	0%
Steel Engineering steel	1.03	1.85	1.84	-44%	0%
Steel finished cold rolled coil	2.42	2.80	2.66	-9%	5%
Steel hot dip galvanised	2.41	2.96	2.67	-10%	11%
Steel Hot Rolled Coil	2.15	2.38	2.38	-10%	0%
Steel organic coated	2.65	#N/A	3.07	-14%	#N/A
Steel pickled hot rolled coil	2.19	2.49	2.47	-11%	1%

Steel plate	2.24	2.41	2.42	-8%	0%
Steel rebar	2.36	2.21	2.01	17%	10%
Steel seamless pipe	2.06	#N/A	2.09	-2%	#N/A
Steel sections	1.55	2.05	1.99	-22%	3%
Steel tinplated	2.66	2.87	2.73	-2%	5%
Steel UO pipe	#N/A	#N/A	2.82	#N/A	#N/A
Steel welded pipe	2.52	#N/A	2.61	-4%	#N/A
Steel wire rod	2.24	2.55	2.38	-6%	7%
Value of Scrap	#N/A	#N/A	1.73	#N/A	#N/A

Remarque : basé sur les inventaires Worldsteel – calculé avec la méthode EF 3.1.

L'indicateur d'épuisement des ressources minérales peut également présenter des différences significatives en raison des éléments d'alliages ajoutés selon le type d'acier. Les inventaires Worldsteel étant des inventaires « black box », il n'est pas possible d'identifier clairement si les différences sont liées à ces éléments d'alliage, à d'autres contributeurs d'arrière-plan ou plus simplement des allocations biaisant le bilan massique des ressources co-extraites.

Analyse : Il existe plusieurs types d'aciers en fonction des exigences et de contraintes que l'élément en acier va subir. Le profil des pièces et, par extension, leur processus de mise en forme jouent un rôle notable dans les impacts environnementaux des aciers mais les différences relatives observées ne sont pas aussi fortes que pour le ciment.

Conclusion : **En première estimation, on peut donc utiliser un acier issu de la filière haut-fourneau (approche conservatrice) et affiner la modélisation en distinguant (par ordre d'importance) : la filière, l'origine géographique, le type d'acier.**

3.6.3 Aluminium

L'aluminium est largement utilisé dans les infrastructures, les bâtiments, et les biens capitaux en raison de ses propriétés comme la légèreté, la résistance à la corrosion et sa durabilité.

Quelques exemples d'applications dans les infrastructures industrielles :

- Structures portantes comme les ossatures métalliques légères ;
- Fenêtres et portes ;
- La machinerie et les équipements industriels.

Quelques exemples d'applications dans les infrastructures de transport :

- Barrières de sécurité, balustrades, signalisation, éclairage ;
- Construction de ponts suspendus ;
- Plateformes et passerelles piétonnes;
- Bardage de tunnels souterrains.

Le tableau suivant présente la contribution au changement climatique des inventaires de cycle de vie sur la production d'aluminium primaire (basés sur les données IAI⁹) et la production d'aluminium secondaire (basés sur les données EAA¹⁰).

Tableau 10 : Contribution au changement climatique des ICV sur la production d'aluminiums primaire et secondaire

Reference product	Region	Activity name	kg CO ₂ -eq / kg
Production primaire			
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, Africa	aluminium production, primary, ingot	15.3
Aluminium, primary, ingot	CA	aluminium production, primary, ingot	7.2
Aluminium, primary, ingot	CN	aluminium production, primary, ingot	24.5
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, Asia, without China and GCC	aluminium production, primary, ingot	29.3
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, EU27 & EFTA	aluminium production, primary, ingot	7.5
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, Gulf Cooperation Council	aluminium production, primary, ingot	18.1
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, Russia & RER w/o EU27 & EFTA	aluminium production, primary, ingot	9.6
Aluminium, primary, ingot	IAI Area, South America	aluminium production, primary, ingot	11.9
Production secondaire (aluminium recyclé)			
Aluminium, wrought alloy	RER	treatment of aluminium scrap, new, at remelter	0.6
Aluminium, wrought alloy	RER	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter	0.8
Aluminium, wrought alloy	RoW	treatment of aluminium scrap, new, at remelter	0.6
Aluminium, wrought alloy	RoW	treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter	0.9

Analyse : La contribution au changement climatique de l'aluminium dépend essentiellement de son origine géographique et du type de production : primaire vs. secondaire.

Conclusion : En première estimation, on peut donc utiliser un aluminium primaire produit en Asie (approche conservatrice) et affiner la modélisation en distinguant la géographie et le type de production.

⁹ International Aluminium Institute

¹⁰ European Aluminum Association

4 Enjeux identifiés pour la réalisation d'ACV des infrastructures

Les enjeux présentés dans cette section sont basés sur :

- L'analyse de la littérature ;
- L'expertise ACV de RDC Environnement ;
- Les réunions de travail avec Artelia (expertise d'ingénierie d'installations industrielles) ;
- Les cas d'études (réalisés en partenariat avec Artelia) ;
- Les échanges en comité de pilotage avec les membres de ScoreLCA.

4.1 Enjeux associés à l'étape « Objectif et champs de l'étude »

Estimer quantitativement le/les service(s) délivré(s)

L'estimation des services délivrés par une infrastructure implique de quantifier la valeur qu'elle apporte tout au long de sa durée de vie. **Cela nécessite de calculer un amortissement basé sur l'utilisation réelle ou projetée de l'infrastructure, ce qui peut varier selon le temps et les conditions d'exploitation.** Par exemple, une route utilisée intensivement pour le transport de marchandises aura une contribution différente à analyser par rapport à une route rurale peu fréquentée. De plus, la multifonctionnalité de certains biens capitaux doit être prise en compte : **une usine peut produire divers types de biens au cours de son cycle de vie, ou un bâtiment peut avoir des usages multiples (bureaux, espaces de stockage, etc.).** Ces éléments complexes exigent des méthodes d'évaluation flexibles et adaptées à chaque contexte.

Définir les frontières du système

La définition des frontières du système dans une ACV est cruciale pour assurer **une analyse cohérente et permettant la comparabilité.** Il s'agit de déterminer quelles **étapes du cycle de vie sont incluses** (construction, exploitation, maintenance, fin de vie) et d'identifier **les composantes de l'infrastructure.** Par exemple, pour un bâtiment, cela inclut non seulement les murs et les toitures, mais aussi les équipements internes (machines), ainsi que les éléments connexes comme les routes d'accès ou les parkings.

Caractériser le système étudié

Chaque type d'ouvrage **a ses spécificités techniques, terminologies et besoins particuliers, ce qui rend essentielle la collaboration avec des experts de différents domaines,** par exemple, un ingénieur spécialisé en bâtiment ou un spécialiste en infrastructures routières ou ferroviaires. Le praticien ACV, qui réalise l'analyse, doit s'immerger dans le contexte du projet pour bien comprendre les spécificités, en travaillant avec des ingénieurs, architectes ou experts métiers, afin de garantir une représentation/modélisation fidèle du système.

Un enjeu de modélisation pour l'ACViste est de bien comprendre les descriptifs fournis. **Le vocabulaire** du bâtiment et de la construction est en effet un vocabulaire particulièrement détaillé pour chacun des corps de métiers et celui-ci peut différer d'un secteur à l'autre. De plus le vocabulaire **des différentes phases** d'un projet de construction n'est pas standardisé. L'ACViste devrait donc s'assurer qu'il a bien compris et modélisé les installations et faisant confirmer ses hypothèses et modèles, en particulier pour les parties à contribution majeure.

Prendre en compte les spécificités géographiques et climatiques locales

Les impacts environnementaux d'une infrastructure peuvent fortement dépendre de son implantation géographique. Le **climat influence la durabilité des matériaux** (par exemple, les cycles de gel et dégel affectent les routes), le **type de sol peut influencer les techniques de fondation**, et l'hydrologie locale joue un rôle crucial dans la gestion de l'eau et le drainage. Les recommandations des ACVistes devraient intégrer ces spécificités

et aller plus loin que les recommandations génériques pour des installations. Les infrastructures situées dans des zones naturelles protégées nécessitent également une attention particulière pour limiter les perturbations sur les écosystèmes environnants.

4.2 Enjeux associés à la phase d'inventaire

Chronophage de la phase d'inventaire d'un système complexe

Les constructions des infrastructures font appel à de nombreux corps de métier, matériaux et équipements. Compte tenu du nombre élevé de composants dans une infrastructure et de la dissémination des informations parmi les acteurs du projet, la phase d'inventaire d'une ACV d'infrastructure est souvent très chronophage. La collecte des données requiert des échanges avec des spécialistes multiples (architectes, ingénieurs structures, électriciens, etc.), une vérification approfondie des sources et parfois des hypothèses sur des données manquantes. Cela constitue un véritable défi organisationnel.

Par exemple, la construction d'un pont mobilise des ingénieurs civils, des spécialistes du béton et des fournisseurs d'acier, impliquant des matériaux et des processus divers. Établir un modèle incluant tous les éléments pertinents utilisés et identifier les flux associés demande une collecte de données rigoureuse (qui inclut de nombreux allers-retours et confirmations).

Travailler avec des sources hétérogènes

Les données nécessaires à l'ACV proviennent souvent d'acteurs variés, comme les maîtres d'œuvre, les maîtres d'ouvrage ou les fournisseurs, qui utilisent des formats, des hypothèses ou des méthodes différents. Ces disparités peuvent engendrer des incohérences dans les informations collectées (par exemple, des divergences dans les quantités ou les spécifications des matériaux), nécessitant un travail d'harmonisation pour assurer la fiabilité des résultats.

Travailler avec des données non définitives

Au début d'un projet, les informations disponibles sont souvent incomplètes et approximatives, évoluant au fur et à mesure de l'avancement. Par exemple, les plans d'un bâtiment peuvent changer, entraînant des modifications dans les matériaux ou équipements prévus. Selon l'objectif de l'étude et son déroulé par itérations ou non, l'analyste doit donc gérer les incertitudes provisoires en estimant l'incertitude associée aux données.

Travailler avec des données d'activité manquantes / des hypothèses fortes

Certaines données nécessaires à l'analyse peuvent être absentes, particulièrement pour des matériaux ou équipements spécifiques (multi-matériaux). Dans ces cas, des hypothèses doivent être formulées pour combler les lacunes, mais ces hypothèses peuvent avoir un impact significatif sur les résultats.

Par exemple, une estimation erronée de la durée de vie d'un matériau peut influencer fortement le calcul des impacts environnementaux.

Utiliser les données d'inventaires incomplètes, génériques ou imprécises

Les bases de données utilisées dans les ACV ne couvrent pas certaines spécificités des matériaux, équipements ou méthodes de construction. Par exemple, les étapes de transformation d'un acier (et en particulier les pertes) sont généralement basées sur les données génériques disponibles dans les bases de données ACV mais les données réelles peuvent s'écarter substantiellement des valeurs génériques. Si les

activités de transformation ne sont pas négligeables (avec une modélisation conservatrice), il convient d'essayer d'affiner les données ou de reconnaître une incertitude substantielle sur ce point.

Caractériser un système ayant une longue durée de vie

Comme les infrastructures ont une durée de vie allant de 20 à 100 ans, une partie des éléments la composant seront remplacés durant la vie de l'infrastructure. Il est nécessaire d'établir des durées de vie différentes selon les matériaux / équipements.

Par exemple, les revêtements routiers peuvent nécessiter plusieurs cycles de réfection, et les équipements électriques peuvent être remplacés pour intégrer des technologies plus récentes. L'évaluation devrait donc intégrer ces dynamiques temporelles.

Identification d'outils pour faciliter la modélisation

La complexité de modéliser des infrastructures complètes rend souhaitable le développement ou l'utilisation d'outils adaptés. Certains outils existent déjà comme les configurateurs FDES, l'outil CIOGEN ou encore le BIM. Le **BIM (Building Information Modelling)** est une méthode de travail améliorant la collaboration en **s'appuyant sur une ou des maquette(s) numérique(s) renseignées représentant l'ouvrage en trois dimensions** (Fédération Française du Bâtiment, 2021). Le BIM complète la modélisation 3D classique avec des informations supplémentaires (références des pièces/éléments, matériaux, poids, temporalité de livraison, etc.). Cependant ces outils présentent chacun des lacunes :

- Les configurateurs FDES ne s'appliquent qu'à certains éléments bien définis ;
- L'outil CIOGEN ne s'applique qu'aux ponts type SETRA ;
- La qualité et précision du modèle BIM dépend des usages des acteurs du bâtiment. Il est souvent incomplet.

Il y a donc encore de la place pour des améliorations ou de nouveaux outils.

Il importe d'inclure la maintenance dans la modélisation car elle peut avoir des impacts significatifs, qui dépendent de l'ouvrage, des technologies mises en œuvre

- Pour une usine, le renouvellement des équipements va dépendre de leur usage et de leur usure ;
- Pour un barrage, les opérations de liées à l'accumulation de sédiments dépendent de la rivière et des systèmes mis en œuvre pour éviter leur accumulation ;
- Pour une route, la maintenance va dépendre de l'usure (qui dépend elle-même de l'usage / la fréquentation / la localisation), de la nature du bitume, mais également de la manière dont les sous-couches ont été mises en œuvre.

Modéliser des étapes du cycle de vie qui auront lieu dans le futur, en particulier la fin de vie de l'infrastructure

Modéliser la fin de vie d'une infrastructure est complexe, car cela implique de gérer les incertitudes sur les évolutions technologiques, les méthodes de démolition, les filières de gestion des déchets ainsi que des bénéfices liés au recyclage (les matériaux futurs devraient être nettement moins intensifs en carbone). Par exemple, une infrastructure conçue aujourd'hui pourrait être démantelée à une époque où les techniques de recyclage sont radicalement différentes, influençant les impacts environnementaux associés.

L'étude ScoreLCA sur l'ACV dynamique (ScoreLCA n°2023-02) traite de ce sujet en particulier. Dans cette étude, la pratique classique de l'ACV est détaillée pour en présenter les écarts par rapport à la réalité : « *En effet, il est coutume en ACV conventionnelle de ramener les impacts liés à la fin de vie au temps t_0 . Pour les bâtiments, la fin de vie a généralement lieu plusieurs dizaines d'années après la construction de celui-ci. Ainsi,*

pour des matériaux dont les étapes de production sont particulièrement importantes (ex. acier, béton...), allouer les bénéfices liés au recyclage de ces matériaux au temps t_0 de production contrebalance les impacts défavorables liés aux étapes de production. Inversement, pour des matériaux biosourcés (ex. le bois) dont les étapes de fin de vie (généralement de l'incinération) sont nettement plus impactantes que les étapes de production (croissance par stockage de CO₂), ramener les impacts de fin de vie au temps t_0 a pour effet d'obtenir in fine des résultats comparables entre les deux types matériaux. »

4.3 Enjeux associés à la phase de caractérisation des impacts

Travailler avec des catégories d'impacts largement utilisées dans les ACV bâtiments en prenant en compte les enjeux régionaux

Les travaux de la Commission européenne dans le cadre du PEF (Product Environmental Footprint) et la publication de la mise à jour de la norme EN 15 804 en 2019 tendent à uniformiser les pratiques en ACV pour le choix des catégories d'impacts. Afin de permettre au praticien d'utiliser des données environnementales (DEP) publiées, il est nécessaire d'utiliser les mêmes catégories d'impacts pour l'ACV des infrastructures.

Le nombre d'indicateurs disponible est suffisamment large pour permettre de prendre en compte les spécificités d'un projet et focaliser l'analyse approfondie sur un nombre plus restreint mais considéré comme pertinent pour l'étude. Par exemple, pour un bâtiment situé en zone aride, l'impact sur l'eau douce peut être plus significatif que d'autres catégories souvent prioritaires dans des zones tempérées.

Travailler avec des méthodes de caractérisation qui évoluent dans le temps

Les référentiels et normes encadrant l'ACV évoluent régulièrement, avec l'apparition de nouvelles méthodes de caractérisation des impacts ou la mise à jour des facteurs existants. Par exemple, les derniers travaux du GLAM font évoluer les indicateurs d'épuisement des ressources et favorisent l'utilisation d'indicateur de dommage (comme les impacts sur les écosystèmes/la biodiversité). Cela implique dès lors une difficulté pour comparer des ACV réalisées à des moments différents, car les données et méthodes employées sont souvent différentes.

4.4 Enjeux associés à l'interprétation des résultats

Travailler de manière itérative afin de focaliser les efforts sur ce qui est important pour les conclusions recherchées

L'approche itérative est essentielle en ACV, car elle permet de concentrer les ressources humaines sur les aspects qui influencent le plus les résultats et les conclusions. L'analyse préliminaire (première itération) identifie les étapes ou matériaux ayant le plus d'impact, afin d'approfondir leur évaluation dans les itérations suivantes. Cela permet d'éviter un surinvestissement inutile dans des aspects marginaux et de ne pas garder des incertitudes majeures, ce qui augmente la pertinence de l'analyse.

Faire le lien entre la qualité des données et la pertinence des hotspots identifiés

La qualité des données utilisées dans une ACV conditionne directement la fiabilité des résultats obtenus, notamment pour identifier les hotspots environnementaux (les éléments ayant les impacts les plus élevés). Des données de mauvaise qualité ou approximatives peuvent fausser l'identification de ces points critiques, conduisant à des évaluations tronquées.

Les composantes sous-estimées dans une ACV posent un problème méthodologique majeur, car elles peuvent passer inaperçues et biaiser les résultats finaux. À l'inverse, les éléments surestimés sont souvent plus faciles à repérer grâce à une vérification croisée ou des comparaisons avec des bases de données standards. Par exemple, un équipement dont les impacts sont absents ou fortement minimisés dans l'inventaire pourrait être négligé, faussant ainsi les priorités d'éco-conception ou de mitigation des impacts.

Interpréter l'indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques

Cet indicateur est très important pour les infrastructures et il importe donc d'y prêter une attention particulière.

- Privilégier l'utilisation de la méthode « Future Welfare Loss » recommandée par le GLAM, pour avoir des résultats qui sont plus en accord avec les évaluations qualitatives et donc plus faciles à interpréter
- Corriger les inventaires produits avec une méthode de caractérisation différente de celle de l'étude
- Vérifier les allocations par défaut incluses les bases de données, car certaines ne respectent pas le bilan massique (co-extraction) concernant l'allocation des intrants. Par exemple, dans les données d'arrière-plan, la façon dont les émissions ou consommations de ressources sont réparties entre plusieurs co-produits ou systèmes peut changer significativement les résultats. Cela demande une transparence et une vigilance accrues pour garantir que l'indicateur reflète correctement la réalité du système étudié.

Obtenir une qualité et une précision suffisantes lorsque l'objectif de l'ACV est de faire de l'éco-conception des infrastructures

Lorsque l'ACV est utilisée comme outil d'éco-conception, il est essentiel d'avoir des données détaillées et précises sur les impacts environnementaux des principaux matériaux, technologies et processus envisagés. Si elle n'est pas réalisée avec précision, cela peut amener à sélectionner des solutions moins optimales d'un point de vue des impacts environnementaux. Lors d'une éco-conception, il est aussi nécessaire d'identifier les influences des éléments de l'infrastructure les uns sur les autres. Par exemple, si une cuve est choisie dans un matériau plus lourd que celui initial, mais aux impacts environnementaux plus faibles, il sera nécessaire de quantifier les impacts environnementaux liés au renforcement des poutres soutenant la cuve. Mais inversement, la cuve plus lourde peut avoir une plus longue durée de vie ou être plus facile à entretenir.

5 Recommandations pour l'ACV infrastructure

Dans ce chapitre, plusieurs actions accessibles aux praticiens de l'ACV seront présentées sous forme de fiches outils. Les fiches peuvent être rattachées aux étapes de l'ACV : définition des objectifs et du champ de l'étude, inventaire, évaluation des impacts et interprétation. La chronologie des fiches est cruciale. Les fiches n°1 et n°2, concernant la définition de l'objectif de l'ACV et de l'identification de l'état d'avancement du projet d'infrastructure, jouent notamment un rôle majeur dans les fiches suivantes.

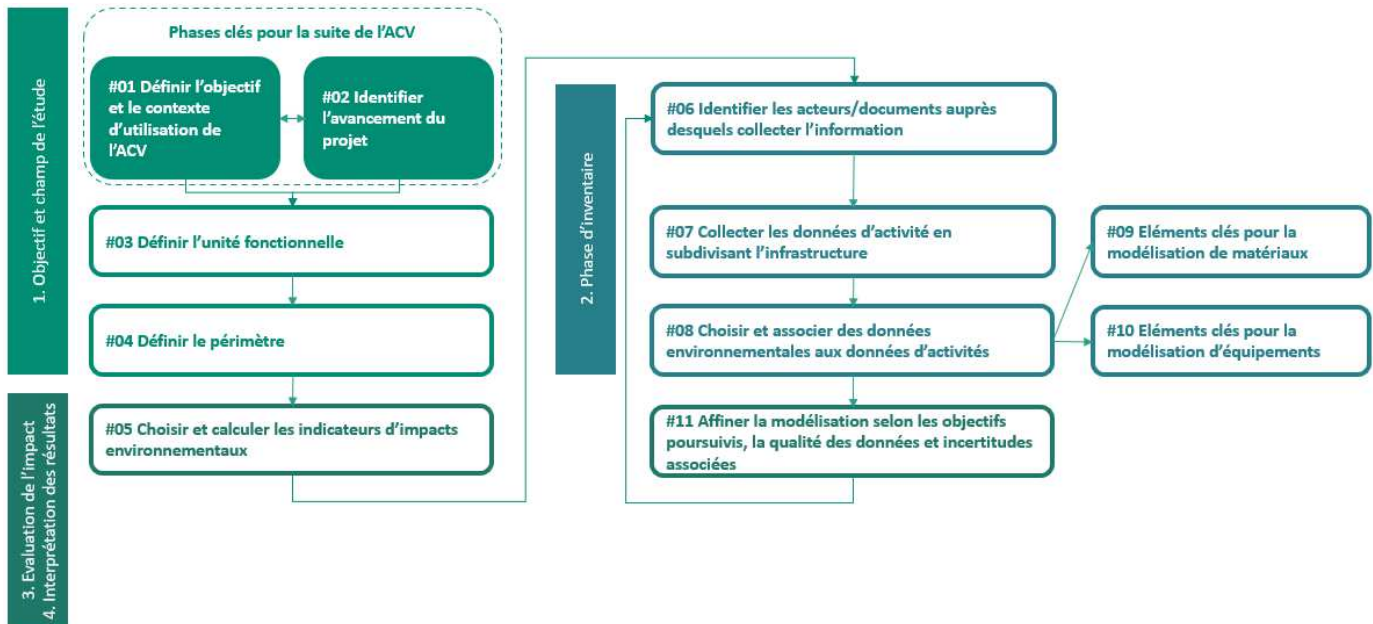


Figure 15 : Structure et chronologie des fiches outils

Les fiches outils sont structurées en onze parties :

- dans le bandeau en haut à gauche, le numéro et le nom de la fiche
- dans le bandeau en haut à droite, les quatre étapes de l'ACV sont indiquées et permettent de rattacher chaque fiche à l'étape de l'ACV à laquelle elle correspond
- la zone « Champ d'application » indique si la fiche s'applique aux infrastructures industrielles, aux infrastructures de transport ou au deux
- la zone « Description » présente de manière succincte la fiche
- la zone « Enjeux » présente les enjeux soulevés par la fiche
- la zone « Méthode/processus/guide » décrit de manière détaillée les éléments à prendre en compte et la potentielle démarche à adopter
- la zone « Fiches complémentaires » indique les fiches ayant un lien particulier avec la fiche
- la zone « Acteurs/interlocuteurs » indique les acteurs du projet d'infrastructure les plus à même de répondre aux questions soulevées par la fiche
- la zone « Limites et vigilances » présente certains points de vigilances et certaines limites des recommandations présentées
- la zone « Points clés en fonction des objectifs » permet de rattacher chaque fiche et de donner éléments complémentaires vis-à-vis des quatre objectifs de l'ACV infrastructure identifiés dans la fiche n°1
- la zone « Sources pertinentes » indique s'il y a des sources ou des exemples de documents à consulter en complément

Les fiches outils sont accompagnées d'éléments complémentaires.

5.1 Fiche n°01 : Définir l'objectif et le contexte d'utilisation de l'étude

N°1	Définir l'objectif et le contexte d'utilisation de l'ACV				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p> <p>Description Définir l'objectif de l'ACV infrastructure et les réponses qu'elle doit apporter.</p>		<p>Enjeux Périmètre de l'ACV Finesse de la collecte des données d'activités Données d'inventaires à utiliser</p>		<p>Fiches complémentaires Fiche n°02 – Avancement Fiche n°03 – Unité fonctionnelle Fiche n°04 – Périmètre Fiche n°05 – Acteurs/documents</p> <p>Acteurs/interlocuteurs Commanditaire de l'ACV</p>	
<p>Méthode/processus/guide L'objectif d'une ACV infrastructure peut-être :</p> <ol style="list-style-type: none"> Inclure les biens capitaux / infrastructures dans une ACV sur un produit (ou un service) ou créer un ICV produit Créer un ICV infrastructure / évaluer un projet d'infrastructure, par exemple pour répondre à une norme : certifications, labels (ex : BREEAM, DGNB, ...), ou réglementation (ex : RE2020 future sur les bâtiments industriels) Comparer deux systèmes dont l'infrastructure est un élément dominant dans les impacts environnementaux (exemple: produire 1 kWh d'électricité à partir d'éolienne ou de panneaux solaires) Eco-concevoir une infrastructure : prendre des décisions de conception en prenant en compte les impacts environnementaux de ces décisions <p>Il sera nécessaire de lister les documents de référence à suivre (objectif 2. en particulier) ou les PCR disponibles. La définition de l'objectif passe par l'identification des conclusions recherchées.</p>		<p>Limites et vigilances Les objectifs définissent une qualité et une précision sur les données requises et il est donc, par exemple, peu probable de pouvoir produire des pistes d'éco-conception à partir d'une ACV qui avait vocation à répondre à une réglementation.</p> <p>Points clés en fonction des objectifs</p> <ol style="list-style-type: none"> Inclusion dans une ACV produit/service L'utilisation de données de faible qualité est acceptable sous réserve d'une faible contribution au bilan total. L'approche conservatrice est à privilégier. Evaluer (certification, norme) Il est nécessaire de définir avec précision les objectifs de l'évaluation (à quelles normes / réglementation souhaite-t-on éventuellement répondre ? A quelles fins l'évaluation sera utilisée) afin d'identifier le niveau de précision requis pour l'ACV Comparer Si l'objectif unique est de comparer, l'étude peut se focaliser sur les éléments qui différencient les deux systèmes comparés Eco-concevoir Après une première phase d'identification des hotspots avec un niveau de détail suffisamment élevé permettant de s'assurer une identification fiable de ces hotspots, l'objectif de l'étude peut se focaliser sur les éléments à éco-concevoir <p>Sources pertinentes</p>			

Lorsque l'ACV est réalisée dans un but d'écoconception, elle est réalisée soit lors de la planification stratégique et de la programmation, soit lors des phases d'études. (Luisa F. Cabeza, 2014) présente l'objectif de l'ACV bâtiment en amont de la construction en fonction des usagers et des étapes du projet et remontant même au rôle des municipalités dans la définition des zones de construction.

Usager	Étape du processus	Objectif de l'ACV
Consultants conseillant les municipalités, concepteurs urbains	Phases préliminaires	Fixer des objectifs au niveau municipal Définition des zones où la construction de logements et de bureaux est encouragée ou interdite Fixer des objectifs pour les zones de développement
Promoteurs immobiliers et clients	Phases préliminaires	Choix d'un site de construction Dimensionnement d'un projet Fixer des objectifs environnementaux dans un programme
Architectes	Conception préliminaire (esquisse) et conception détaillée en collaboration avec les ingénieurs Conception d'un projet de rénovation	Comparaison des options de conception (géométrie/orientation, choix techniques)
Ingénieurs/consultants	Conception préliminaire en collaboration avec les architectes, et conception détaillée Conception d'un projet de rénovation	Comparaison des options de conception (géométrie, choix techniques)

Figure 16 : Objectifs de l'ACV en fonction de l'étape du projet ((Luisa F. Cabeza, 2014) traduit de l'anglais)

Dans le cas où l'ACV infrastructure est réalisée dans un but d'écoconception, il est nécessaire d'avoir des données précises sur les produits de construction et de considérer les conséquences du choix d'un produit de construction par rapport à un autre. Par exemple, lors du choix des éléments de toitures pour un hall industriel à charpente métallique, si le matériau A est choisi et qu'il est plus lourd que le matériau initial B, les descentes de charges seront plus importantes et les poteaux de la charpente métallique nécessiteront d'être plus résistants et donc potentiellement plus lourds.

Lorsque l'objectif de l'ACV-infrastructure est d'obtenir une certification, il existe des guides de références spécifiques à chaque certification, qui peuvent aussi servir de guide dans le cadre général. Par exemple, l'Alliance HQE-GBC France a publié un guide pratique « Intégrer le développement durable aux projets d'infrastructures » qui

5.2 Fiche n°02 : Identifier l'avancement du projet

N°02	Identifier l'état d'avancement du projet				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux Définir le niveau de précision et de complétude qui peut être attendu par l'ACV</p>		<p>Fiches complémentaires Fiche n°01 – Objectifs Fiche n°05 – Documents/acteurs</p>	
<p>Description Déterminer l'avancement du projet ainsi que la disponibilité, qualité et précision des données associées à l'étape d'avancement à laquelle l'ACV est réalisée.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs Maître d'ouvrage Maître d'œuvre</p>	
<p>Méthode/processus/guide Un projet d'infrastructure présente plusieurs phases. Il est nécessaire pour l'ACViste d'identifier l'état d'avancement du projet notamment afin de pouvoir déterminer les documents et acteurs auprès desquels les données d'activité pourront être collectées. L'avancement d'un projet d'infrastructure peut-être associé à l'une des étapes :</p> <p>Des appellations plus précises des étapes sont souvent utilisées :</p> <p>APS : Avant-Projet Sommaire ; APD : Avant-Projet Définitif ; PRO : études de PROjet</p> <p>Les appellations de ces étapes peuvent varier d'une entreprise à une autre. Les dénominations des étapes devront être identifiées à chaque projet.</p>		<p>Limites et vigilances A un instant t, le niveau d'avancement des corps d'état d'un même projet peut être différent. Par exemple, Detail engineering en Gros Œuvre et Basic Engineering en Second Œuvre.</p> <p>Points clés en fonction des objectifs</p> <ol style="list-style-type: none"> Inclusion dans une ACV produit/service Evaluer (certification, norme) La RE2020 impose une évaluation lors de la dépose de la demande de permis de construire pour les bâtiments résidentiels Comparer Pour les objectifs #1, #2, #3, l'identification de l'état d'avancement du projet permet de connaître le niveau de précision des données qui seront disponibles. Eco-concevoir Plus les choix d'éco-conception sont réalisés tôt dans l'avancement du projet, plus leur impact peut être important. Après le Basic Engineering, les choix d'éco-conception sont drastiquement réduits. <p>Sources pertinentes ISO 12720:2024</p>			

Les phases de cycle de vie sont présentées sur la frise ci-dessous. Ces appellations peuvent varier entre deux pays, mais aussi entre deux entreprises d'un même pays. Il n'y pas de consensus sur les appellations des phases (Potrč Obrecht T, 2020). L'ISO TS 12720:2014 définit une chronologie dont les termes utilisés dans cet étude sont inspirés. L'ACV d'une infrastructure est réalisée à un instant donné de cette chronologie. Les données disponibles à cet instant varient en fonction de l'avancée du projet et tendent à être davantage précises et détaillées.

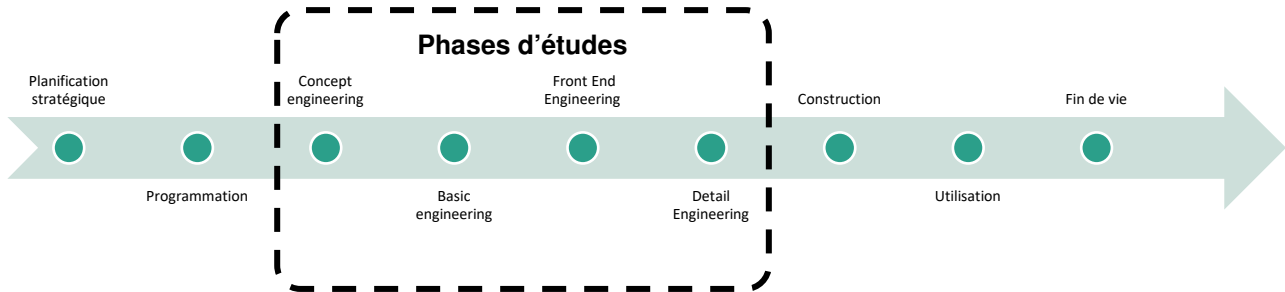


Figure 17 : Cycle de vie élargi des infrastructures

Le RCP « Buildings C-PCR-029 (TO PCR 2019:14) », publié via The International EPD System, définit quatre étapes depuis la phase d'étude de la construction d'un bâtiment à la construction de l'ouvrage. Il doit être indiqué sur quelle étape du projet se base l'ACV : « *concept design quantification, building permit quantification, detailed design quantification et as-built quantification.* » Ces étapes sont présentées dans ce RCP comme étant adaptées de l'EN 15941.

Les premières étapes d'un projet d'infrastructure sont celles où les choix ont le plus d'influence sur les impacts environnementaux de l'infrastructure. Il est donc important de permettre aux acteurs de ces étapes, notamment aux concepteurs, de prendre en compte les impacts environnementaux dans leurs décisions (J. Basbagill, 2013) (Alexander Hollberg, 2016). On peut distinguer les choix d'écoconception :

- « **macros** », lors de la **définition du projet**, par exemple, le choix de la localisation du bâtiment, le choix de l'orientation du bâtiment, le choix de la forme du bâtiment (e.g. pour une fonction de 100 unités de logement, la forme choisit peut être une barre horizontale, une barre verticale ou encore plusieurs îlots) ou le choix des éléments de structure

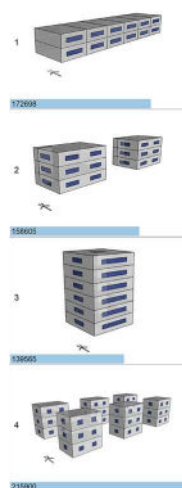


Figure 18 : Exemple de choix de forme de bâtiment à fonction constante (Alexander Hollberg, 2016)

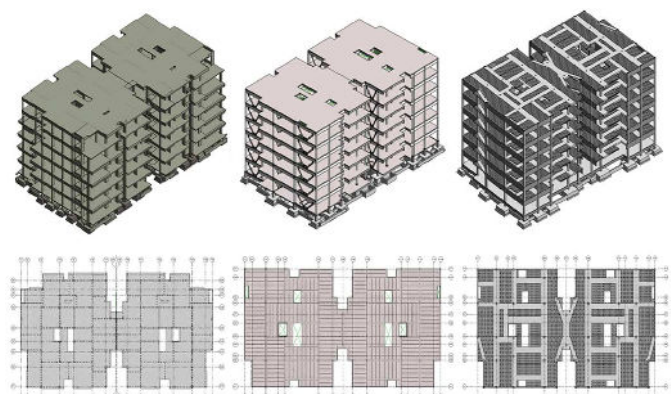


Figure 19 : Exemple de choix de structure à forme constante (Dalia M. A. Morsi, 2022)

- « **micros** », lors de la **phase d'études**, qui concernent plutôt des choix fins de matériaux ou d'équipements

La modélisation paramétrique proposée par les outils BIM (fiche n°08) permet de définir facilement dans un modèle des paramètres variables. Le rapprochement peut être fait entre les valeurs prises par ces paramètres et les scénarios d'une ACV. Couplée la modélisation paramétrique à un outil ACV simplifié permettrait donc, notamment aux architectes, de pouvoir prendre en compte les impacts environnementaux des choix géométriques de design lors des phases de définition de projet.

5.3 Fiche n°03 : Définir l'unité fonctionnelle

N°03-A	Définir l'UF (Unité Fonctionnelle)				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A)</p>		<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permettre une comparabilité pertinente avec d'autres études ACV. - L'UF conditionne le choix du périmètre, certaines données clés (durées de vie, fréquence de maintenance, ...) 		<p>Fiches complémentaires Fiche n°01 – Objectifs Fiche n°04 – Périmètre</p>	
<p>Description Définir l'unité fonctionnelle des infrastructures industrielles de manière précise aux travers de plusieurs paramètres.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs Maître d'œuvre Maître d'ouvrage</p>	
<p>Méthode/processus/guide Les paramètres recommandés à prendre en compte dans l'UF sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quels sont les services rendus par l'infrastructure ? Exemple : Incinération de déchets non dangereux • Quelle quantité ? Ex : 100 000 tonnes • Avec quelle qualité / performance ? Ex : Mettant en œuvre les meilleures technologies disponibles selon le BREF 2019 • Combien de temps ? Ex : Sur 1 an • Quelle technologie ? Ex : Four à grille <p>Les paramètres facultatifs sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quelle période temporelle ? Ex : L'incinérateur est produit en 2024 et sa durée de vie est 50 ans. • Quelle localisation ? Ex : En Île-de-France <p>Exemple d'UF : « Traiter en France 100 000 tonnes (PCI moyen des déchets 10 MJ/kg) de déchets non dangereux dans un incinérateur à four à grille mettant en œuvre les meilleures technologies disponibles selon le BREF incinération 2019 »</p>		<p>Limites et vigilances Différencier durée de vie de l'infrastructure et durée de référence est clé. Il est nécessaire de collecter les données sur la durée de vie entière de l'infrastructure et de ramener ça cela à la période de référence par la suite afin de ne pas omettre l'entretien, la réparation et le remplacement.</p>			
		<p>Points clés en fonction des objectifs Une définition précise de l'unité fonctionnelle est moins importante pour les objectifs d'inclusion de l'infrastructures dans les ACV produits et services ainsi que dans le cas d'objectif d'évaluation (sans comparaison). Cependant, si les paramètres comme la performance et la technologie ne sont pas repris dans l'UF, il doivent apparaître dans le champ de l'étude.</p>			
		<p>Sources pertinentes</p>			

N°03-B	Définir l'UF (Unité Fonctionnelle)				
<p>Champ d'application Infrastructures de transport (B)</p>	<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permettre une comparabilité pertinente avec d'autres études ACV. - L'UF conditionne le choix du périmètre, certaines données clés (durées de vie, fréquence de maintenance, ...) 	<p>Fiches complémentaires Fiche n°04 – Périmètre</p>			
<p>Description Définir l'unité fonctionnelle des infrastructures de transport de manière précise aux travers de plusieurs paramètres.</p>		<p>Acteurs/interlocuteurs Maître d'œuvre Maître d'ouvrage</p>			
<p>Méthode/processus/guide Les paramètres recommandés à prendre en compte dans l'UF sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quels sont les services rendus par l'infrastructure ? Ex : Transporter des marchandises et/ou des passagers • Quelle quantité ? Ex : Flux estimé (ex : AADT pour le transport routier), vitesse • Avec quelle qualité / performance ? Ex : Charge maximale supportée par les rails • Combien de temps ? Ex : Sur 1 an <p>Les paramètres facultatifs sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quelle période temporelle ? Ex : La ligne grande vitesse est construite en 2024 et sa durée de vie est 50 ans. • Quelle localisation ? • Quelles pentes sur le tracé ? <p>Flux de référence :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longueur • Largeur / nombre de voies 		<p>Limites et vigilances Différencier durée de vie de l'infrastructure et durée de référence est clé. Il est nécessaire de collecter les données sur la durée de vie entière de l'infrastructure et de ramener ça cela à la période de référence par la suite afin de ne pas omettre l'entretien, la réparation et le remplacement.</p>			
		<p>Points clés en fonction des objectifs Une définition précise de l'unité fonctionnelle est moins importante pour les objectifs d'inclusion de l'infrastructures dans les ACV produits et services ainsi que dans le cas d'objectif d'évaluation (sans comparaison). Cependant, si les paramètres comme la performance et la technologie ne sont pas repris dans l'UF, il doivent apparaitre dans le champ de l'étude.</p>			
		<p>Sources pertinentes E.Hoxha (2020)</p>			

Comme présenté dans l'état de l'art, plusieurs paramètres nécessitent d'être inclus dans l'unité fonctionnelle. Pour les bâtiments industriels, les paramètres à prendre en compte sont :

- Durée de vie (valeur par défaut : 50 ans),
- Surface ou volume (unité : m² ou m³),
- Service rendu :
 - « Héberger l'activité industrielle » correspond plutôt à inclure l'enveloppe du bâtiment industriel et exclure les équipements de production (machines, convoyeurs, cuves, ...),
 - « Permettre l'activité industrielle » correspond plutôt à inclure l'enveloppe du bâtiment industriel et aussi les équipements de production (machines, convoyeurs, cuves, ...).
- Localisation / climat.

Pour les infrastructures de transport, les paramètres à prendre en compte sont :

- Durée de vie (valeur par défaut : 100 ans),
- Longueur (valeur par défaut : 1 km),
- Largeur / nombre de voies (exemples : 1 m, 1 voie, 2 voies, 4 voies),
- Stratigraphie :

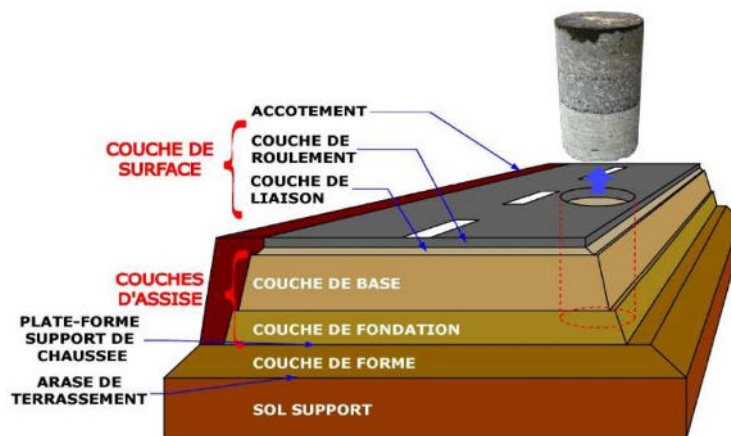


Figure 20 : Stratigraphie d'une route¹¹

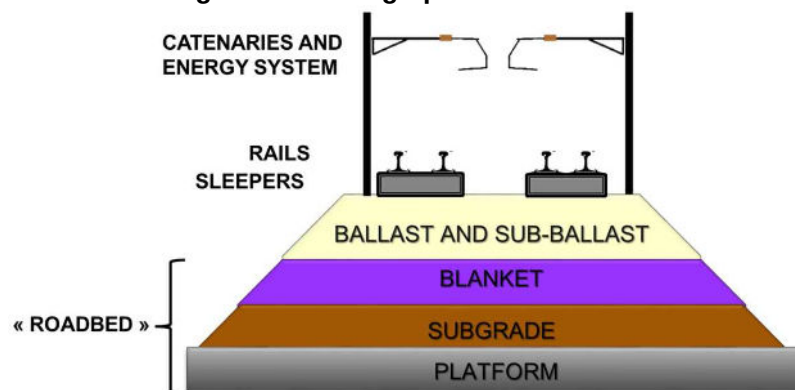


Figure 21 : Stratigraphie d'une voie ferrée (De Bortoli, Bouhaya, & Féraille Fresnet, 2020)

¹¹https://www.cerema.fr/system/files/documents/2022/02/20220201_webinaireacv_chaussees_charrier_fees_er_v3.pdf

- Répartition du linéaire à niveau, élevé ou enterré :

Table 4 : Valeurs par défaut pour les impacts d'une voie ferrée en fonction des portions à niveau, enterrées et élevées

A niveau	Enterré
941 (±168) tCO2-eq	{A niveau} × [27 (±5)]
	Elevé
	{A niveau} × [6 (±1)]

- Pente,
- Flux moyen (unité : tonnes/an ou passagers/an),
- Vitesse maximale autorisée,
- Charge maximale supportée,
- Climat (exemple : moyenne des températures annuelles des 20 dernières années),
- Propriétés du sol.

5.4 Fiche n°04 : Définir le périmètre

N°04	Définir le périmètre				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Permettre une comparabilité pertinente avec d'autres études ACV - Complétude de l'ACV 		<p>Fiches complémentaires Fiche n°01 – Objectifs Fiche n°03 – UF</p>	
<p>Description Définir les éléments inclus et exclus de l'ACV.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs Maître d'œuvre Maître d'ouvrage</p>	
<p>Méthode/processus/guide Afin de déterminer les frontières du système, il est nécessaire de :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Se référer aux documents normatifs 2. Se référer aux frontières définies dans les PCR 3. Déterminer les éléments (équipements, parkings, gares, aires de repos, signalisation, annexes, ...) à inclure ou exclure 4. Déterminer quelles consommations sont à inclure ou exclure (notamment pour chauffage, ventilation et climatisation) <p>Définir les phases de cycle de vie qui sont incluses ou exclues :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Production de matériaux - Phase de chantier - Maintenance de l'infrastructure - Fin de vie de l'infrastructure 		<p>Limites et vigilances Spécifier les potentielles coupures et les justifier soit par la masse, soit par les impacts.</p>			
		<p>Points clés en fonction des objectifs Il est nécessaire d'avoir exactement les mêmes frontières pour effectuer une comparaison. Le périmètre peut cependant se focaliser sur les différences et exclure les points communs.</p>			
		<p>Sources pertinentes EN15978</p>			

Les normes et labels définissent en général des périmètres clairs à suivre. Le périmètre physique et temporel utilisé par la RE2020 est présenté Figure 5.

Le RCP « Buildings C-PCR-029 (TO PCR 2019:14) », publié via The International EPD System, présente comme éléments à inclure ceux présentés dans le tableau ci-dessous.

Catégorie	Éléments inclus (obligatoires dans les calculs)	Éléments exclus (à comptabiliser éventuellement mais rapportés séparément)
Parties structurelles porteuses – Fondation	<ul style="list-style-type: none"> - Dalle au sol, par exemple, fondations, semelles, barres d'armature et murs de fondation - Isolation sous la fondation 	<ul style="list-style-type: none"> - Tuyauterie - Pieux et autres mesures de fondation telles que la stabilisation et les murs de soutènement (cela peut avoir un impact significatif)
Éléments porteurs – Autre charpente (poutre, solive, colonne, mur)	<ul style="list-style-type: none"> - Charpente (poutre, solive, colonne, mur) - Mur au sol - Escaliers, y compris la rampe - Escaliers intérieurs - Construction extérieure des toitures - Rampes - Balcons et couloirs avec mezzanine, y compris les garde-corps - Pièces moulées 	<ul style="list-style-type: none"> - Vérandas qui ne font pas partie de l'écran climatique du bâtiment ou de la structure porteuse - Toit-verrière
Écran climatique	<ul style="list-style-type: none"> - Mur extérieur y compris la structure du bâtiment côté intérieur - Toit et solives, y compris toits verts - Panneaux solaires intégrés ou autres technologies d'énergie renouvelable - Revêtement de façade - Enduit et peinture sur le mur extérieur - Fenêtre - Portes extérieures - Cloisons vitrées et vitrages 	<ul style="list-style-type: none"> - Couches des surfaces internes - Enduit sur le mur intérieur - Brise-soleil et protection solaire - Sécurité du toit et systèmes d'évacuation des eaux pluviales - Échelles de façade et sorties de secours externes
Cloisons intérieures	<ul style="list-style-type: none"> - Murs intérieurs jusqu'à la plaque de plâtre - Cloisons vitrées - Portes intérieures - Murs grillagés pour le stockage en appartement - Plancher fixe - Plafond suspendu - Plafond intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> - Couches de surface internes, telles que l'enduit, la peinture, la protection contre l'humidité et le papier peint, y compris l'étanchéité pour les zones humides - Plafond et moulures de plancher - Bancs muraux - Surfaces internes, par exemple pour le parquet flottant, les tapis en linoléum, les carreaux et le clinker

Figure 22 : Clarification des éléments à inclure ou à exclure des modules A1 à A3 (Buildings C-PCR-029 (TO PCR 2019:14))

5.5 Fiche n°05 : Choisir et calculer les indicateurs d'impact

N°05	Choisir et calculer les indicateurs d'impacts																																				
Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)		Enjeux Choisir les indicateurs adéquats		Fiches complémentaires Fiche n°09 – Données environnementales																																	
Description Choisir les indicateurs d'impacts environnementaux.		Acteurs/interlocuteurs																																			
Méthode/processus/guide Les indicateurs obligatoires de l'EN15804:2012+A2:2019 sont largement utilisés dans le secteur de la construction (également pour la RE2020 et la base de données INIES). Afin d'avoir la possibilité d'intégrer des données issues des FDES / DEP, il est nécessaire d'employer les mêmes catégories d'impacts pour l'ACV des infrastructures industrielles et de transport				Limites et vigilances Il est nécessaire de présenter les indicateurs sélectionnés avec un regard critique. Certaines catégories sont actuellement sujettes à discussions (e.g. utilisation des ressources minérales et métalliques).																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Catégorie d'impact</th> <th>Indicateur</th> <th>Unité</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Changement climatique – total</td> <td>Potentiel de réchauffement global- total</td> <td>kgCO₂ éq.</td> </tr> <tr> <td>Appauvrissement de la couche d'ozone</td> <td>Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)</td> <td>Kg CFC 11 éq.</td> </tr> <tr> <td>Acidification</td> <td>Potentiel d'acidification, dépassement cumulé (AP)</td> <td>mole de H⁺ éq.</td> </tr> <tr> <td>Eutrophisation aquatique, eaux douces</td> <td>Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final eaux douces (EP-eaux douces)</td> <td>Kg PO₄ éq.</td> </tr> <tr> <td>Eutrophisation aquatique marine</td> <td>Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final marine (EP-marine)</td> <td>kgN éq.</td> </tr> <tr> <td>Eutrophisation terrestre</td> <td>Potentiel d'eutrophisation, dépassement cumulé (EP-terrestre)</td> <td>mole de N éq.</td> </tr> <tr> <td>Formation d'ozone photochimique</td> <td>Potentiel de formation d'ozone troposphérique (POCP)</td> <td>Kg COVNM éq.</td> </tr> <tr> <td>Epuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux</td> <td>Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (ADP-minéraux+métaux)</td> <td>Kg Sb éq.</td> </tr> <tr> <td>Epuisement des ressources biotiques – combustibles fossiles</td> <td>Potentiel d'épuisement pour les ressources fossiles (ADP-fossile)</td> <td>MJ, pouvoir calorifique inférieur</td> </tr> <tr> <td>Besoin en eau</td> <td>Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)</td> <td>m³ de privation éq. dans le monde</td> </tr> </tbody> </table>				Catégorie d'impact	Indicateur	Unité	Changement climatique – total	Potentiel de réchauffement global- total	kgCO ₂ éq.	Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)	Kg CFC 11 éq.	Acidification	Potentiel d'acidification, dépassement cumulé (AP)	mole de H ⁺ éq.	Eutrophisation aquatique, eaux douces	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final eaux douces (EP-eaux douces)	Kg PO ₄ éq.	Eutrophisation aquatique marine	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final marine (EP-marine)	kgN éq.	Eutrophisation terrestre	Potentiel d'eutrophisation, dépassement cumulé (EP-terrestre)	mole de N éq.	Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone troposphérique (POCP)	Kg COVNM éq.	Epuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux	Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (ADP-minéraux+métaux)	Kg Sb éq.	Epuisement des ressources biotiques – combustibles fossiles	Potentiel d'épuisement pour les ressources fossiles (ADP-fossile)	MJ, pouvoir calorifique inférieur	Besoin en eau	Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)	m ³ de privation éq. dans le monde	Points clés en fonction des objectifs
Catégorie d'impact	Indicateur	Unité																																			
Changement climatique – total	Potentiel de réchauffement global- total	kgCO ₂ éq.																																			
Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)	Kg CFC 11 éq.																																			
Acidification	Potentiel d'acidification, dépassement cumulé (AP)	mole de H ⁺ éq.																																			
Eutrophisation aquatique, eaux douces	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final eaux douces (EP-eaux douces)	Kg PO ₄ éq.																																			
Eutrophisation aquatique marine	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final marine (EP-marine)	kgN éq.																																			
Eutrophisation terrestre	Potentiel d'eutrophisation, dépassement cumulé (EP-terrestre)	mole de N éq.																																			
Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone troposphérique (POCP)	Kg COVNM éq.																																			
Epuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux	Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (ADP-minéraux+métaux)	Kg Sb éq.																																			
Epuisement des ressources biotiques – combustibles fossiles	Potentiel d'épuisement pour les ressources fossiles (ADP-fossile)	MJ, pouvoir calorifique inférieur																																			
Besoin en eau	Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)	m ³ de privation éq. dans le monde																																			
				Sources pertinentes EN15804+A2:2019																																	

5.6 Fiche n°06 : Identifier les acteurs/documents auprès desquels collecter l'information

N°06	Identifier les acteurs/documents auprès desquels collecter l'information			Objectif et périmètre	Inventaire de cycle de vie	Evaluation de l'impact	Interprétation		
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux Identifier les données (d'activité) disponibles</p>		<p>Fiches complémentaires Fiche n°02 – Avancement</p>					
<p>Description Permettre une collecte de données plus fluides en identifiant les acteurs et documents auxquels faire référence lors de la collecte de données.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs Maître d'œuvre Maître d'ouvrage</p>					
<p>Méthode/processus/guide Le maître d'œuvre sera le plus à même d'orienter le praticien ACV vers les informations cherchées et les documents pertinents.</p>					<p>Limites et vigilances</p> <ul style="list-style-type: none"> • En fonction des entreprises et des projets, les appellations des acteurs et de certains documents peuvent changer. • Il est en général difficile de disposer de données massiques fines et agrégées à l'échelle d'un bâtiment. • Il existe différents niveaux de granulométrie pour les MTOs en fonction de l'avancement et du type de lots (ex : différence entre Gros Œuvre et Clos-Couverts). • La traçabilité et la compétence du praticien ACV ne permettra pas toujours d'identifier précisément les données à utiliser. Il convient d'échanger avec les interlocuteurs pour clarifier les termes techniques. 				
Documents	Détenant	Données	Occurrences lors des projets	<p>Points clés en fonction des objectifs Le « Programme du bâtiment » ou « Design basis » (ils existent d'autres appellations en fonction des domaines) est le premier document fixant certains éléments et permettant d'identifier les degrés de liberté pour l'éco-conception</p>					
CCTP*	Maître d'œuvre	Réglementations et Documents Techniques Unifiées à suivre, références de certains matériaux, dimensions de certains éléments	Documents définis et figés à partir de la fin de la phase de définition du projet	<p>Bibliographie pertinente exemple de CCTP - lot Gros Œuvre exemple de DQE exemple de DOE – lot Electricité</p>					
DQE* MTO* BoM*	Maître d'œuvre, BIM Manager, Concepteurs	Quantitatifs des matériaux et éléments mis en œuvre	Les DQE évoluent jusqu'à la fin de la phase de construction. Pendant la phase d'études techniques, ils sont scindés par lots. On parle alors de DPGF (Décomposition du Prix Global ou Forfaitaire).						
DEP FDES	Fournisseurs	Impacts environnementaux d'un matériau ou équipement	Sont mis à jour tous les 5 ans						

DOE*	Maître d'œuvre	Plans d'exécution conformes aux ouvrages exécutés, notices de fonctionnement et prescriptions de maintenance	Documents définis et figés à partir de la fin de la phase de construction	
* Acronymes explicités dans les explications accompagnant la fiche.				

Acronymes présentés dans la fiche :

- CCTP : Cahier des Charges Techniques Particulières
- DQE : Dossier Quantitatif Estimatif
- MTO : Material Take-Off
- BoM : Bill of Materials
- DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés

5.7 Fiche n°07 : Collecter les données d'activité en subdivisant l'infrastructure

N°07	Collecter les données d'activité en subdivisant l'infrastructure		Objectif et périmètre	Inventaire de cycle de vie	Evaluation de l'impact	Interprétation
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déterminer le niveau de décomposition auquel l'ACV s'arrête - Etablir un bilan matériaux-masse 		<p>Fiches complémentaires</p> <p>Fiche n°05 – Documents/acteurs Fiche n°07 – Données environnementales Fiche n°11 – Incertitude</p>		
<p>Description Décomposer et hiérarchiser l'infrastructure en plusieurs composants. Définir le seuil auquel seront collectées les données d'activité et les données environnementales.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs</p> <p>Maître d'œuvre BIM Manager</p>		
<p>Méthode/processus/guide L'objectif est de découper l'infrastructure en vue d'obtenir un bilan matériaux-masse (avec si possible les procédés de transformation). A chaque itération du découpage, soit une donnée environnementale à une précision convenable existe à ce niveau, soit on poursuit le découpage jusqu'à atteindre le niveau du matériau. Les données d'activité associées à chaque élément identifié lors du découpage sont en général collectées par lot ou par corps d'état.</p>				<p>Limites et vigilances La décomposition doit se faire en cohérence avec les données d'inventaires disponibles.</p>		
				<p>Points clés en fonction des objectifs Plus le niveau de précision recherché est grand, plus de découpage pourra être fin</p>		
				<p>Sources pertinentes (Soust-Verdaguer, 2023)</p>		

La figure ci-dessous est un exemple de découpage d'un bâtiment industriel

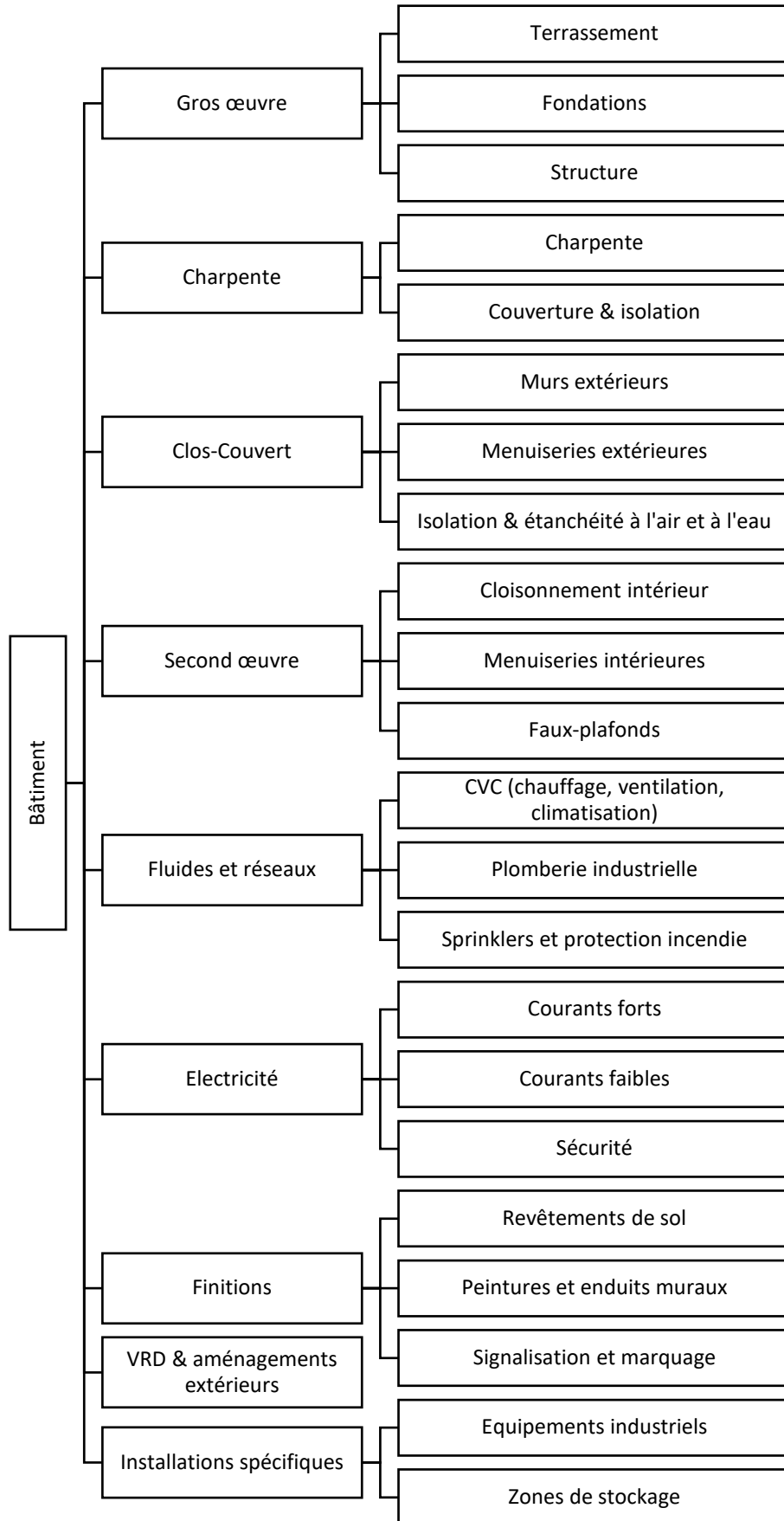


Figure 23 : Exemple de décomposition d'un bâtiment par lots

L’outil d’évaluation CIOGEN (Calcul des Impacts environnementaux des Ouvrages de GENie civil), est un outil, basé principalement sur la base de données DIOGEN (Données d’Impacts environnementaux des Ouvrages de GENie civil) qui **permet de calculer les impacts environnementaux d’un ouvrage d’art courant (ponts cadres et portiques, ponts-dalles, ponts à poutres)**, notamment les ponts et passerelles en béton, acier ou béton et acier. L’outil CIOGEN a été développé pour répondre aux exigences de la norme NF EN 15804+A2. Il offre la possibilité de réaliser une évaluation à trois stades du projet, en prenant en compte des données de plus en plus détaillées au fur et à mesure de l’avancement du projet. L’outil s’appuie sur des données génériques correspondant au Détail Estimatif (DE) de "Ouvrages d’Art Neufs" de PETRA 2022 (Cerema), avec des procédés organisés en sept grandes catégories : prix généraux (installations de chantier, étaieage de la traverse et du tablier de l’ouvrage, ...), aciers/bétons/coffrages, ossature métallique du tablier, fondations de soutènements, appareils d’appui/bossages/dés de vérinage, équipements, et travaux divers. Le périmètre pris en compte comporte : la production des matières premières, le transport des matériaux et personnes jusqu’au chantier, la mise en œuvre, la vie en œuvre (maintenance) et la fin de vie.

Phase	Données utilisées pour construire ces données
Production des matériaux	Base de données DIOGEN (reposant sur des données spécifiques et des données environnementales ecoinvent)
Transport	ecoinvent avec adaptation du mix énergétique pour les moyens de transport électriques
Mise en œuvre	Documents techniques des engins et ecoinvent
Vie en œuvre	Etablis pour CIOGEN v1 par Yannick Tardivel
Fin de vie	ecoinvent 3.8 (cut-off)

L’éco-comparateur Seve-TP¹² permet de comparer d’un point de vue environnemental, pour les projets de Travaux Publics, plusieurs solutions. Il permet :

- aux industriels des travaux publics (e.g. usine d’enrobés ou unité de production de béton) de comparer les formulations de produits qu’ils fabriquent,
- aux bureaux d’études de travaux publics de modéliser des projets au sein desquels comparés des solutions techniques.

Il existe donc plusieurs outils ayant des cibles différentes au sein du secteur du bâtiment.

Données associées à la phase de chantier

Consommation d’énergie en phase de chantier:

Dans les données “building, construction”, données réemployées par ecoinvent dans de nombreux inventaires d’infrastructures, on trouve des consommations d’électricité et de diesel (market for diesel, burned in building machine, GLO) qu’on suppose associées à la phase de chantier.

Nom de la donnée d’inventaire	Unité de la donnée d’inventaire	Electricité (kWh)	Diesel (MJ)
building construction, hall, steel construction	m ²	10.5	238
building construction, hall, wood construction	m ²	10.5	238

¹² <https://acteurspourlaplanete.fntp.fr/seve-tp/>

Une étude américaine de 2012¹³ a tenté d'établir des consommations de diesel à partir d'informations disponibles dans les études d'impacts de projets de construction en Californie. Les estimatifs se basent sur le nombre de machines / véhicules, les puissances, durées de fonctionnement et consommations. Pour les constructions de nouveaux centres commerciaux (et un centre de distribution), les auteurs indiquent une plage de variation entre 145 et 440 MJ / m² (cependant, certains estimatifs montent à 2200 MJ/m²). Par ailleurs, pour la construction d'un site de gestion de déchet, la consommation de diesel est estimée à 3000 MJ / m².

Ainsi les donnéesecoinvent semblent utiliser un ordre de grandeur équivalent à l'étude identifier. Toutefois, selon les projets, il est probable que la consommation soit multipliée par 10.

Production de déchets en phase de chantier:

Un second poste associé à la phase chantier est la production de déchets.

C'est généralement l'impact de production du produit ou du matériau mis au rebut qui domine les contributions par rapport au traitement du déchet. Ainsi, l'ACV des infrastructures pourra suivre la logique suivante :

- Etablissement d'un ou plusieurs inventaires « types » sur des éléments (production et fin de vie) dissociés des matériaux mis en œuvre sur le site final
- Estimation des pertes des matériaux mis en œuvres. Les pertes devraient être estimées le plus précisément possible, mais une approche par type de matériau pourrait déjà constituer une approche suffisante.
- Identification des cas particuliers, en particulier liés à la préparation du site (démolitions de structures existantes, excavation, terrassement)

Le tableau suivant présente un exemple fictif des types de déchets de chantier et leurs origines. La dernière colonne indique si la quantité de déchets peut être associée aux quantitatifs de matériaux mis en œuvre sur le site de construction (estimation, possible via l'application d'un taux de pertes)

Type de déchet	Origine	Associable aux quantitatifs ?
Déchets inertes		
Béton	Démolition de structures, dalles, fondations	Non
Gravats (pierres, briques, tuiles)	Maçonnerie, démolition	Non
Terre, cailloux	Terrassement, excavation	Non (mais les données d'excavation peuvent être collectées)
Enrobés bitumineux non goudronnés	Réfection de voirie	Oui
Déchets non dangereux non inertes		
Bois	Coffrage, palettes, charpente	Uniquement pour le bois rentrant dans les quantitatifs
Plastiques	Emballages, gaines électriques	Uniquement pour le plastique rentrant dans les quantitatifs
Métaux (fer, acier, cuivre, aluminium)	Armatures, canalisations, huisseries	Oui
Verre	Fenêtres, cloisons vitrées	Oui
Plâtre	Cloisons, doublages	Oui
Déchets verts	Aménagements extérieurs	Non
Cartons, papiers	Emballages de matériaux	Non
Enrobés bitumineux	Réfection de voirie	Oui
	Suppression de voiries	Non

¹³Valerie A. Peters, Dawn K. Manley, 2012, Sandia National Laboratories An examination of fuel consumption trends in construction projects, Energy Policy Volume 50, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.048>

Déchets dangereux		
Peintures, solvants	Finitions, entretien des outils	Oui
Amiante	Anciennes toitures, ancien calorifugeages	Non
Huiles de coffrage	Coffrages béton	Non
Colles, résines	Pose de revêtements	Si repris dans les quantitatifs
Déchets électroniques ou piles	Outils, éclairage temporaire	Non
Déchets d'équipements et de chantier		
EPI usagés	Utilisation par les ouvriers	Non
Déchets ménagers (emballages, restes alimentaires)	Vie sur le chantier	Non
Films plastiques	Protection des matériaux, bâchage	Non

5.8 Fiche n°08 : Choisir et associer des données environnementales aux données d'activités

N°08	Choisir et associer des données environnementales aux données d'activité				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>	<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Etablir l'inventaire de cycle de vie du bâtiment - Déterminer la qualité des données environnementales 	<p>Fiches complémentaires</p> <p>Fiche n°06 – Données d'activités Fiche n°11 – Incertitude</p>			
<p>Description</p> <p>La méthode de travail itérative vise à produire des premiers résultats très rapidement puis à affiner le travail pour les enjeux significatifs. Elle peut aussi répondre aux différentes phases d'un projet.</p>		<p>Acteurs/interlocuteurs</p> <p>Maitre d'œuvre / Ingénierie technique / Fournisseurs pour l'accès au FDES / DEP</p>			
<p>Méthode/processus/guide</p> <p>L'étape #1 sera peut être la seule option lorsqu'on se situe très en amont du projet alors que l'étape #2 pourra être réalisée sans passer par la première étape dans les phases plus aval du projet.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluation macro, éventuellement mono-indicateur (changement climatique) <i>Après un découpage de l'infrastructure par lot (voir sous-lots), associé le budget (en euros) à chaque lot avec un facteur d'impacts par unité monétaire (en kg CO2-eq / euros par exemple)</i> 2. Evaluation screening pour les lots significatifs de la première étape (< 5% de la contribution au résultat total) <i>Récupérer les quantitatifs du projet tel quel et associer des modélisations environnementales par défaut conservatrices.</i> 		<p>Limites et vigilances</p> <p>Mettre en place une évaluation de la qualité des données pendant la réalisation de la phase d'inventaire.</p> <p>L'utilisation des DEP de différentes sources engendre généralement des problèmes de cohérence méthodologique (Périmètre de la données, bases de données d'arrière plan, choix méthodologiques...). Retravailler la donnée d'inventaire par exemple en ne considérant qu'un périmètre restreinte (phases A1 – A3 : Fabrication).</p>			

<p>3. Affiner l'ensemble des données de manière cumulative contribuant au moins 80% de l'évaluation screening</p> <p><i>Affiner la description des données d'activité en collectant systématiquement les masses</i></p> <p>Pour les éléments « mono-matériaux » (béton, acier, aluminium...), détailler selon la typologie, l'origine, le contenu en recyclé si possible ainsi que la forme (pour une meilleure approximation des processus de transformation)</p> <p>Pour les éléments « multi-matériaux » ou les équipements (câbles, ventilateurs, machines industrielles), décrire les principaux composants, les principales caractéristiques (par exemple le puissance du ventilateur, le nombre de fils dans les câbles et épaisseur)</p> <p><i>Affiner le choix des données d'inventaire en se basant sur le descriptif des données d'activité ou en utilisant des FDES / DEP</i></p>	<p>Points clés en fonction des objectifs</p> <p>Selon les objectifs de l'étude, le niveau de précision de l'étape 3 peuvent être redéfinis (ex : affiner uniquement 50% des données)</p> <p>En cas d'objectifs de comparaison ou d'écoconception, on peut uniquement se concentrer sur les données qui différencient les deux systèmes. Par ailleurs, une analyse de la qualité des données est clé pour identifier les écarts significatifs dans les comparaisons réalisées.</p>
	<p>Sources pertinentes</p> <p>Bases de données INPUT / OUTPUT</p> <p>BIM (Building Information Modelling) (cf. partie 3.5.2)</p> <p>Bases de données ACV</p> <p>Programmes DEP (ex : INIES, PEP Ecopassport)</p>

Identifier les données d'activité dans le BIM

Le BIM (Building Information Modelling) est une méthode de travail améliorant la collaboration en s'appuyant sur une maquette numérique représentant l'ouvrage en trois dimensions. Le BIM, en plus de la représentation 3D, permet d'apporter des informations sur chaque pièce en complément. Ces informations peuvent être des propriétés physiques (matériau, masse), techniques (puissance nominale, ...), ou organisationnelles (lot auquel l'élément appartient, date d'arrivée prévue sur le chantier).

En théorie le modèle BIM est un outil complet regroupant la majorité des données du projet. En pratique, l'extensivité de l'usage du BIM dépend du choix des acteurs du projet et il est possible qu'il ne présente pas plus de données qu'un modèle 3D.

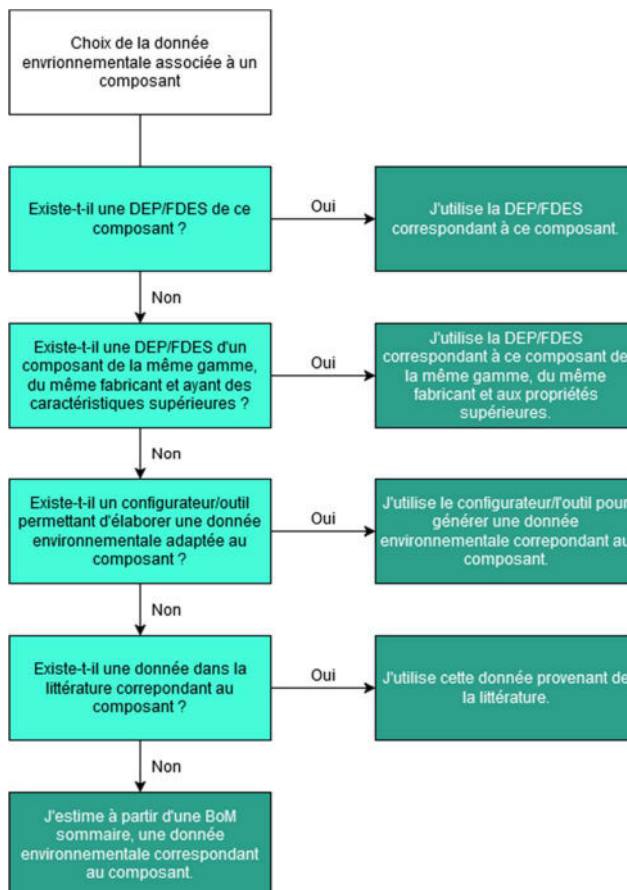
Même si certains plugins le font quasi-automatiquement, il est en général toujours nécessaire d'associer aux données d'activité les données d'inventaires pertinentes.

Le BIM peut aider à réaliser des ACV :

- En exportant les BoM (masses et matériaux) du BIM et en utilisant ces données en entrée d'un logiciel ACV
- En associant les données environnementales directement dans le modèle BIM puis en exportant le tout
- Avec un plugin ACV directement dans le logiciel BIM (e.g. One Click LCA Integration for Autodesk Revit)
- Le BIM permet de réaliser des modèles paramétriques. Cela est un atout pour l'éco-conception.

Rechercher des données d'inventaire

Procédure de recherche de données d'inventaires (inspirée de la procédure de la base de données INIES) pour l'ACV des bâtiments résidentiel dans le cadre de la RE2020



5.9 Fiche n°09 : Eléments clés pour la modélisation de matériaux

N°09	Eléments clés pour la modélisation de matériaux				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Finesse de modélisation - Méthode d'allocation des co-produits (laitiers de hauts fourneaux) 		<p>Fiches complémentaires Fiche n°10 – Eléments clés – équipements</p>	
<p>Description Certains matériaux (aciers, bétons, isolants, ...) interviennent quasi-systématiquement dans les infrastructures. Il est nécessaire d'identifier les paramètres clés de modélisation associés à ces matériaux.</p>		<p>Limites et vigilances Cadres méthodologiques différents (e.g. pour la co-production d'acier et de laitiers de hauts fourneaux, les inventaires Worldsteel utilisent la méthode d'expansion du système et non une allocation économique telle qu'imposée par la Base INIES)</p> <p>Points clés en fonction des objectifs Il est rappelé l'importance d'étudier les différents matériaux à fonction égale et non pas à volume ou masse égale (comme cela peut parfois être fait pour le béton) en cas d'objectif d'écoconception.</p>		<p>Acteurs/interlocuteurs Fournisseurs</p>	
<p>Méthode/processus/guide Un élément de bâtiment peut être soit un matériau, soit un équipement/package. Pour les matériaux, il est nécessaire d'identifier la catégorie de matériau et le matériau en particulier. Un matériau est en général défini par ses caractéristiques physiques (ou par un grade les prenant en compte).</p> <p>Cette identification permet de modéliser le plus justement chaque matériau et de lui associer la DEP la plus pertinente.</p> <p>Il est aussi nécessaire d'identifier les enjeux méthodologique (méthode d'allocation des co-produits, pour les laitiers de hauts fourneaux par exemple) afin de conserver une cohérence.</p> <p>Exemples de paramètres clés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bétons : ratio clinker-ciment (i.e. composition, classe CEM), ajouts d'autres constituants, résistance à la compression à 28 jours (e.g. classe C25/30) • Aciers : usage/exigences, profilé • Isolants : matériau (laine de verre, laine de roche, ...), résistance thermique, épaisseur 		<p>Sources pertinentes Données Worldsteel (et rapport méthodologique correspondant) BETle</p>			

5.10 Fiche n°10 : Eléments clés pour la modélisation d'équipements

N°10	Eléments clés pour la modélisation d'équipements		Objectif et périmètre	Inventaire de cycle de vie	Evaluation de l'impact	Interprétation
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>		<p>Enjeux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Finesse de modélisation - Identification de « coldspots » qui ne devraient pas en être 		<p>Fiches complémentaires Fiche n°09 – Eléments clés – matériaux</p>		
<p>Description Des catégories d'équipements sont récurrentes dans les infrastructures. Il est nécessaire d'identifier les paramètres clés de modélisation associés à ces équipements.</p>				<p>Acteurs/interlocuteurs Fournisseurs</p>		
<p>Méthode/processus/guide Les équipements récurrents (pompes, cuves, moteurs, ...) peuvent être modéliser par des sous-modèles avec des caractéristiques par défaut en étape de screening et ajuster si un élément présente des différences majeures par rapport aux données par défaut. Un travail de construction d'une base de données d'équipements spécifiques aux infrastructures peut être nécessaire pour gagner en efficacité dans le processus.</p> <p>Un sous-modèle d'équipement peut contenir les informations ci-dessous</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Matériaux</u> : acier carbone, acier inox, aluminium, ... • <u>Caractéristiques physiques</u> : masse, dimensions (largeur, longueur, diamètre, épaisseur, hauteur, ...) • <u>Caractéristiques techniques/fonctionnelles</u> : puissance, débit, ... • <u>Composants particuliers d'attention</u> : éléments avec forts impacts à faible masse • <u>Lieu de production</u> : transport et mix électrique • <u>Document</u> : General Arrangement Drawing (Plan d'ensemble) 				<p>Limites et vigilances Cadres méthodologiques différents entre les bases de données.</p>		
				<p>Points clés en fonction des objectifs</p>		
				<p>Sources pertinentes</p>		

5.11 Fiche n°11 : Affiner la modélisation selon les objectifs poursuivis, la qualité des données et incertitudes associées

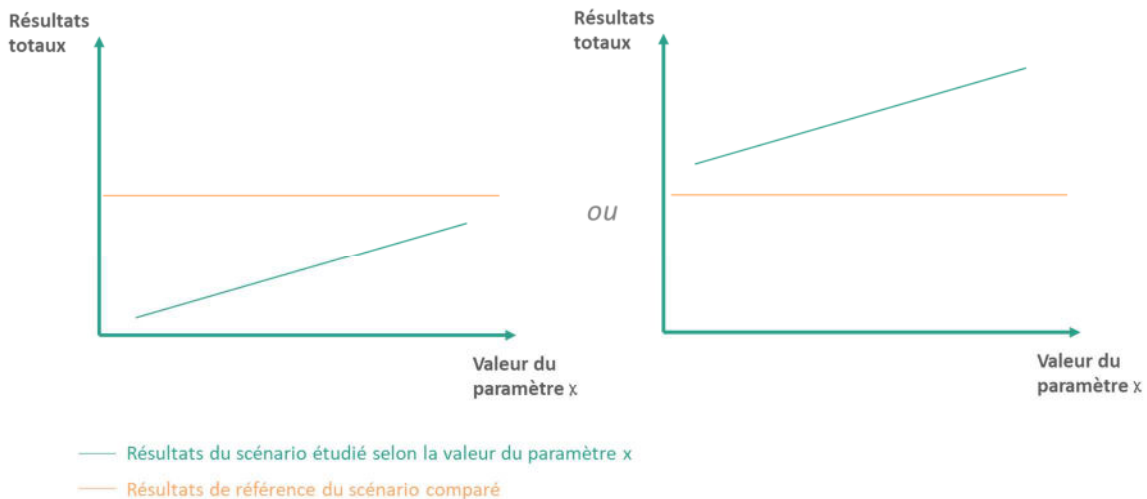
N°11	Affiner la modélisation selon les objectifs poursuivis, la qualité des données et incertitudes associées				
<p>Champ d'application Infrastructures industrielles (A) et infrastructures de transport (B)</p>	<p>Enjeux - Fiabilité des résultats</p>	<p>Fiches complémentaires</p>			
<p>Description Les infrastructures étant des systèmes complexes, la somme des incertitudes de ses composants peut-être élevés, notamment lors de l'utilisation de proxies.</p>		<p>Acteurs/interlocuteurs</p>			
<p>Méthode/processus/guide Une qualité peut être qualifier et quantifier pour les données d'activité et les données d'inventaires. Les sources d'incertitudes sur les résultats peuvent être ainsi déterminées. Les éléments les plus incertains doivent être retravaillés afin de consolider les résultats.</p> <p>Si l'incertitude globale sur les résultats peut changer les conclusions de l'ACV, il sera nécessaire de modéliser plus finement l'infrastructure.</p> <p>Exemples de sources d'incertitudes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Proxies (inventaire ne correspondant pas exactement au composant) - Nombreux inventaires ecoinvent d'infrastructures datent d'avant 2010 et présentent un message explicite sur la forte incertitude de ces données - Quantités employées incertaines (notamment en phases de Définition du projet et d'Etudes d'avant-projet) 		<p>Limites et vigilances</p> <p>Points clés en fonction des objectifs L'analyse de la qualité permet d'associer une incertitude globale au modèle afin de faire varier l'impact de l'infrastructure dans l'ACV produit / service</p> <p>Dans le cas de comparaison et d'écoconception, cela permet de qualifier le niveau de fiabilité des conclusions (écarts significatifs).</p>			
		<p>Sources pertinentes (Feng, et al., 2022)</p>			

L'analyse du cycle de vie est un processus itératif. Il convient de modéliser avec les données disponibles et d'évaluer l'influence des données sur les résultats.

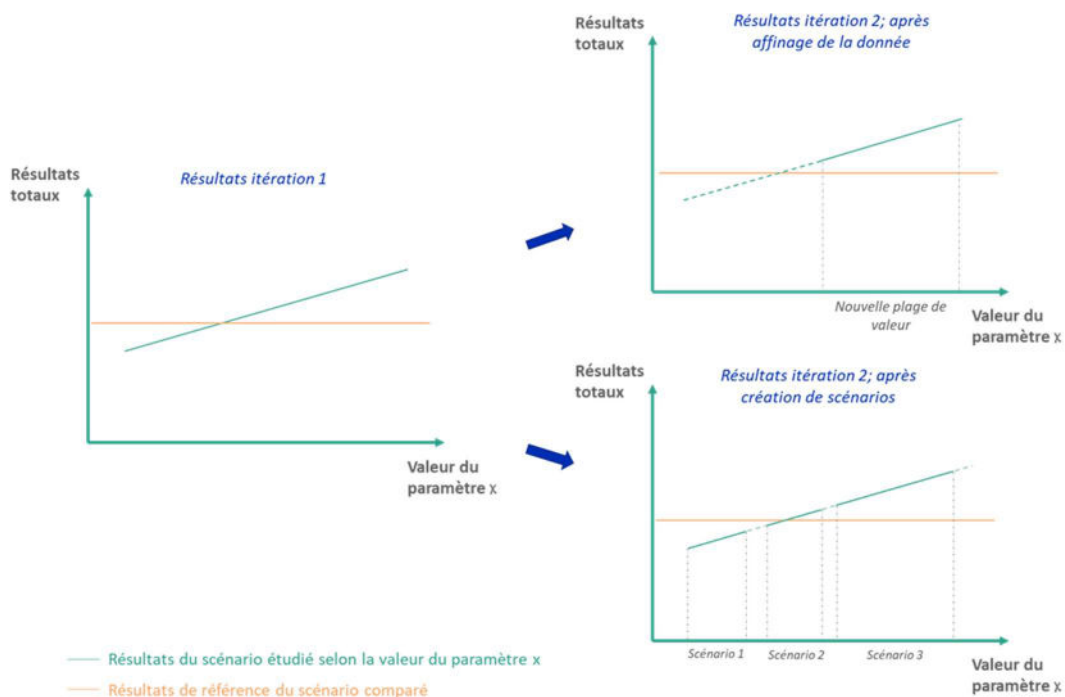
Il est important de considérer tout manque de données précises, en particulier si une donnée (point chaud ou « hotspot ») est identifiée comme influente alors qu'elle est qualifiée de qualité insuffisante.

On passe par l'analyse de sensibilité pour qualifier l'influence de la donnée sur les résultats :

- Dans le cas où **l'écart avec la réalité est considéré non significatif** (faible variation de la donnée sur les résultats), la donnée est acceptée telle quelle.
- Dans le cas où **l'écart avec la réalité est significatif**
 - La donnée est fortement variable et influence les résultats mais ne change pas les conclusions, la variabilité peut être conservée, la donnée n'est pas affinée



- La donnée est fortement variable et change les conclusions :
 - **Choix 1** - Affiner la donnée en répétant le processus de collecte de données
 - **Choix 2** - Créer plusieurs scénarios. C'est particulièrement pertinent quand l'imprécision est liée à une variation intrinsèque de la situation



6 Cas d'études

Les cas d'études sont réalisés afin de tester les guidances proposées dans ce document.

La collecte de données a été réalisée par Artelia sur base de projets réels qui ont été confidentialisés.

Selon les objectifs poursuivis, la collecte de données d'une ACV sur les infrastructures peut être très chronophage. En particulier lorsque des pistes d'éco-conception sont recherchées. En effet, pour cela, il est nécessaire de connaître en détail les matériaux avec une description précise (grade de matériaux, origine, contenu en recyclé, procédés de transformation mis en œuvre, durée de vie...) mais également une description des alternatives qui peut influencer les éléments attenants (le choix d'un matériau alternatif, peut entraîner une modification des fondations par exemple). Ainsi, les cas d'études ne pourront rentrer dans le détail pour les objectifs #3 et #4 cités dans la fiche n°1, à savoir :

- Comparer deux systèmes dont l'infrastructure est un élément dominant
- Eco-concevoir une infrastructure

Les résultats obtenus ne constituent pas un objectif en soi. Ici, c'est la démarche qui est importante. Les **objectifs des études de cas** sont (fiche n°01) :

- Mettre en pratique les recommandations formulées dans les différentes fiches,
- Affiner les recommandations selon le retour d'expérience.

Le travail réalisé est plus particulièrement focalisé sur la manière dont la collecte de données a été possible (et quantifier le temps nécessaire pour obtenir un certain niveau de précision) ainsi que l'influence des principaux choix de modélisation : comparaison avec l'inventaire infrastructure correspondant dans ecoinvent, approche conservatrice et influence de celle-ci sur les matériaux clés identifiés préalablement (ciment/béton, acier, aluminium).

Catégories d'impacts calculées (fiche n°5) :

Les indicateurs obligatoires de l'EN15804:2012+A2:2019 sont largement utilisés dans le secteur de la construction. Cependant, par simplification, deux catégories d'impacts sont étudiées ici :

- Le changement climatique en kg CO₂-eq (approche 0/0 pour le CO₂ biogénique¹⁴)
- L'utilisation des ressources minérales et métallique avec deux indicateurs
 - o ADP 2002 en kg Sb-eq (indicateur du package EF 3.1)
 - o Socio-economic assets (SEA) Future Welfare Loss (FWL)¹⁵ (version des facteurs de caractérisation publiée par Life Cycle Initiative à travers les travaux du GLAM¹⁶)

La méthode FWL évalue la valeur des ressources naturelles pour le bien-être humain. Elle est basée sur le prix du marché (moyennés sur 10 ans) pour évaluer les ressources du sous-sol dans le cadre de l'analyse coûts-bénéfices environnementale et de l'évaluation du cycle de vie. Le prix du marché incorpore les informations privilégiées des agents du marché, anticipant

¹⁴ L'EN 15 804 impose l'approche -1/+1

¹⁵ https://www.researchgate.net/publication/330417730_The_Social_Cost_of_Sub-Soil_Resource_Use

¹⁶ Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators (GLAM) <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/life-cycle-assessment-data-and-methods/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-and-methods-glam/>

explicitement ou implicitement les applications futures de la ressource, les technologies d'appui futures, les potentiels de recyclage, l'évolution des réserves et les coûts d'extraction. Le prix du marché est donc considéré comme la meilleure information intégrée disponible reflétant les valeurs réelles de ces paramètres. La méthode est basée sur la règle de Hotelling et sur le fait que les agents privés actualisent les coûts et bénéfices futurs à un taux plus élevé que la société dans son ensemble.

6.1 Chimie fine

6.1.1 Périmètre d'évaluation

Description du projet (fiche n°02)

Cette étude de cas est réalisée pour une infrastructure de chimie fine dont la construction est finie. Le projet a utilisé une enveloppe de bâtiment préexistante. Les équipements et les structures les supportant considérés tiennent dans un parallélépipède d'environ 20x8x12 mètres.

L'**unité fonctionnelle** (fiche n°03) est définie en suivant le questionnaire suivant :

Quels sont les services rendus par l'infrastructure ?	Permettre la production de composés chimiques dans un secteur industriel de la chimie fine. Plusieurs composés sont produits par le site industriel.
Quelle quantité ?	5500 tonnes environ annuellement
Avec quelle qualité / performance ?	Non pertinent ou ne peut être décrit sans révéler l'identité du projet
Combien de temps ?	L'installation est prévue pour durer 20 années.
Quelle période temporelle ?	Le site a été construit dans les années 2020.
Quelle localisation ?	France Le projet utilise un bâtiment préexistant.

Ainsi l'unité fonctionnelle est « Permettre la production d'environ 5500 tonnes de composés chimiques annuellement pendant 20 années ».

Frontières du système (fiche n°04)

Le périmètre ne prend en compte que les éléments internes et bâtiment et exclut l'enveloppe préexistante.

Les phases de vie prises en compte sont la production des matériaux, le chantier (dans une moindre mesure) et la fin de vie des matériaux. La phase de maintenance est omise par manque de données pertinentes.

Tableau 11 : Eléments inclus et exclus dans le cas d'étude sur la chimie fine

Catégorie	Eléments inclus	Eléments exclus
Parties structurelles porteuses – Fondation	- Les structures supportant les équipements listés ci-dessous sont incluses (charpente, passerelle, garde-corps et caillebotis).	- L'enveloppe bâimentaire est exclue car est réutilisée d'un bâtiment préexistant.
Éléments porteurs – Autre charpente (poutre, solive, colonne, mur)		
Cloisons intérieures		
Menuiseries intérieures et extérieures		
Tuyauterie	- La tuyauterie relative au processus de production est incluse.	- Le reste de la tuyauterie est exclu.
Équipements	- Les équipements de transformation et toutes les infrastructures permettant leur fonctionnalité	- Les communs industriels et tertiaires avec l'autre unité de industrielle de l'usine

	<ul style="list-style-type: none"> - Les équipements qui permettent le conditionnement du produit fini - Les équipements de production d'utilités dédiés au processus - Les équipements de traitement d'effluents dédiés au processus - Les équipements (HVAC¹⁷) permettant la mise en conditions de type salle blanche 	<ul style="list-style-type: none"> - Les armoires de commande d'automatisme (précisée comme négligeables dans cette section par Artelia)
Consommations		<ul style="list-style-type: none"> - Les consommations d'électricité relatives à l'HVAC et aux équipements de production sont exclues.

L'ACV de l'usine de chimie fine a été réalisée en 3 itérations :

- **Itération 1** : modélisation grossière basée uniquement sur ecoinvent ;
- **Itération 2** : modélisation simplifiée basée sur les quantitatifs des disciplines les plus lourds (en masse) associés au matériau principal (de l'acier par exemple) ;
- **Itération 3** : modélisation affinée avec modélisation des éléments spécifiques de chaque discipline avec leur matériau principal et affinage pour les éléments électroniques (moteurs et instrumentation).

6.1.2 Inventaire de cycle de vie

Principales sources de données (fiche n°6)

Les données ont été collectées par Artelia.

Ces données sont principalement issues :

- Des DOE : dossiers constructeurs pour les lots équipements (plans d'ensemble et notices) ;
- Des CCTP et MTO : dossiers de consultation des marchés de travaux et MTO associés pour les lots tuyauteries, charpente et instrumentations ;
- P&ID (Process & Instrumentation Drawings) « tel que construits » pour le dénombrement, ainsi que catalogue vendeurs pour les instrumentations.

La démarche de collecte employée est la suivante :

1. Pour chaque éléments :
 - a. Identifier le matériau principal ;
 - b. Identifier la masse de l'élément (soit directement, soit par conversion à partir de longueurs notamment pour la tuyauterie) ;
2. Catégoriser cela par corps de métiers (équipements, tuyauterie, infrastructure, EIA (Électricité, Instrumentation, Automatisme), HVAC).

¹⁷ HVAC : heating, ventilation, and air conditioning. Aussi appelé en France, CVC : chauffage, ventilation et climatisation

Les résultats de la collecte de données sont présentés sous forme :

- D'un diaporama (non-annexé au rapport) présentant le contexte du projet, le périmètre de la collecte de données, les paramètres clés (durée de vie, localisation, capacité de production), ainsi que les difficultés rencontrées pour collecter certaines données,
- D'un tableau principal (cf. *Annexe G : Résultats des collectes de données pour les cas d'études*) avec des catégorisations par corps de métier et par ensemble d'éléments. La masse et le matériau principal sont indiqués soit par ensembles d'éléments, soit pour chaque élément dans des tableaux complémentaires (exemple ci-dessous).

Tableau 12 : Exemple fictif de tableau complémentaire

Description du matériel	Qté	Type de matériau	Puissance (kW)	Poids à vide (kg) - Unitaire	Documents de référence
Cuve	1	Acier inox	-	600	Plan tel que construit du fabricant
Vis sans fin	2	Acier inox	-	100	Dossier constructeur fabricant
Motoréducteur	2	-	0.75	-	Dossier constructeur fabricant

Itération 1 – grossière

La première itération consiste à utiliser un inventaire disponible dans une base de données ACV (ici ecoinvent). Par cette première itération on cherche donc à :

- Qualifier la pertinence d'utiliser des données d'inventaires des bases de données lorsque l'objectif de l'étude ne nécessite pas une grande précision (comme l'inclusion de l'infrastructure dans une ACV produit/service) ;
- Adapter la donnée d'inventaire de manière à se rapprocher du système étudiée.

Tableau 13 : Inventaires de cycle de vie « infrastructure » disponibles dans ecoinvent et qui peuvent être associés à des usines du secteur Chimie

Nom de la donnée d'inventaire	Unité
Chemical factory, organics {RER} chemical factory construction, organics	Unit*
Methanol factory {GLO} methanol factory construction	Unit*
Vegetable oil esterification facility {CH} vegetable oil esterification facility construction	Unit*
Vegetable oil refinery {GLO} vegetable oil refinery construction Cut-off, U	Unit*

Unit signifie l'infrastructure dans sa globalité

Tableau 14 : Autres inventaires ecoinvent « partiels » identifiés

Nom de la donnée d'inventaire	Unité
Chemical factory {RER} chemical factory construction	kg de produits chimiques fabriqués
Liquid storage tank, chemicals, organics {CH} liquid storage tank production, chemicals, organics	Unit*

Partiels car il ne prennent pas en compte l'entièreté d'un site de production.

L'inventaire jugé comme le plus approprié pour le présent cas d'étude est cité et décrit dans le tableau suivant

Tableau 15 : Description de l'inventaire ecoinvent identifié pour la réalisation du cas d'étude chimie fine

Nom	Chemical factory, organics {RER} chemical factory construction, organics	
Description du jeu de données	<p>Technology Based on informations from two chemical plant sites in Germany and their respective pictures, estimations about occupation of area are made. The weight of the facilities is based on personal information from one of these sites and on literature.</p> <p>Product information This is an immobile infrastructure, representing the construction of chemical factory, organics. The infrastructure is based on information from two chemical plant sites and its lifetime is assumed to be 50 years. This process includes land use, buildings and facilities of an average chemical plant.</p> <p>Geography comment Estimation, based on data from two german chemical plant sites</p> <p>Time period Comment Estimation, based on information from 2002</p>	
Echanges intermédiaires	building, hall, steel construction	1.05e+4 m2
	building, multi-storey	1.58e+5 m3
	chemical factory	1.26e+7 kg
	decommissioned chemical production facilities	-1.26e+7 kg
Flux élémentaires	Occupation, construction site :	8.40e+4 m2*year
	Occupation, industrial area :	2.73e+6 m2*year
	Transformation, from unspecified :	5.45e+4 m2
	Transformation, to industrial area :	5.45e+4 m2

Ainsi, les résultats de la première itération pourront être exprimés :

- En retirant le « building, hall, steel construction » et le « building, multi-storey » car ils sont hors périmètre ;
- En retirant le « building, hall, steel construction » et le « building, multi-storey » et en appliquant un facteur correctif à l'inventaire pour l'adapter au cas d'étude :
 - Sur base de la surface ;
 - Sur base de la quantité produite annuellement.

Facteur correctif basé sur la surface :

$$\frac{\text{surface site cas d'étude}}{\text{surface site ICV}} = \frac{160}{5,45e + 4} = 2,93e - 3$$

Le facteur correctif basé sur la surface est de 2,93e-3.

Facteur correctif basé sur la quantité produite :

$$\frac{\text{quantité annuelle produite site cas d'étude}}{\frac{\text{quantité totale produite site de l'ICV}}{\text{durée de vie du site de l'ICV}}} = \frac{5500}{\frac{1,26e + 7}{50}} = 2,18e - 2$$

Le facteur correctif basé sur la quantité produite est de 2,18e-2.

Tableau 16 : Temps de travail associé à l'itération 1 sur le cas chimie fine

Discipline	Temps de collecte et de tri + Temps de modélisation
Ensemble du projet	0.5 j

Itération 2 – simplifiée

L'itération 2 prend en compte quatre familles d'éléments dont les masses ont été collectées par Artelia, la maîtrise d'œuvre pour ce projet (fiche n°06).

Tableau 17 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur la chimie fine en itération 2

Discipline	Exemple d'éléments	Masse totale (tonnes)
Bâtiment	Hors scope, car le projet utilise une enveloppe de bâtiment préexistante.	-
Structures	Charpente, passerelle, garde-corps, ...	25
Equipements	Trémies, cuves, pompes, agitateurs, ...	26
Piping	Tuyaux	29

Les inventaires de cycle de vie (ICV) employés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 18 : ICV employés pour la modélisation du cas d'étude sur la chimie fine en itération 2

Discipline	Masse totale (tonnes)	Inventaire – matériau	Inventaire – processus de transformation
Bâtiment	-	-	-
Structures	25	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté*	« section bar rolling, steel – RER »
Equipements	26	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté*	« section bar rolling, steel – RER »
Piping	29	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté*	« drawing of pipe, steel – RER »

* l'inventaire est adapté afin de prendre en compte un contenu en matière recyclée de 56%¹⁸.

Le scénario de fin de vie (décommissionnement de l'infrastructure est le suivant :

- 97% de l'acier est envoyé en recyclage ;
- 3% est envoyé en enfouissement (Sansom & Meijer, 2002).

Le temps associé à la collecte des données est de 4.5 jours. Celui associé à la modélisation et l'analyse des résultats est de 1.5 jours. La répartition par pôle est la suivante :

Tableau 19 : Temps de travail associé à l'itération 2 sur le cas chimie fine

Discipline	Temps de collecte et de tri (jours)	Temps de modélisation (jours)
Bâtiment	Hors scope, car le projet utilise une enveloppe de bâtiment préexistante.	
Structures	0,5	1.5
Equipements	2	
Piping	2	

¹⁸ <https://www.eurofer.eu/issues/environment/circular-economy>

Itération 3 – affinée

L'itération 3 considère deux pôles en plus de l'itération 2. La liste des pôles pour l'itération 3 est la suivante :

Tableau 20 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur la chimie fine en itération 3

Discipline	Exemple d'éléments	Masse totale (tonnes)
Bâtiment	Hors scope, car le projet utilise une enveloppe de bâtiment préexistante.	-
Structures	Charpente, passerelle, garde-corps, ...	25
Equipements	Trémies, cuves, pompes, agitateurs, ...	26
Moteurs	Moteurs pour les différents équipements	46e-3
Piping	Tuyaux	29
Instrumentation	Electricité, instrumentation, automatisme	0.2
Transport	Transport des matériaux jusqu'au chantier	-

Production des matériaux

Tableau 21 : ICV employés pour la modélisation du cas d'étude sur la chimie fine en itération 3

Discipline	Masse totale (tonnes)	Inventaire – matériau	Inventaire – processus de transformation
Bâtiment	-	-	-
Structures	25	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté	« section bar rolling, steel – RER »
Equipements	26	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté	« section bar rolling, steel – RER »
Moteurs	46e-3	Modélisation détaillée ci-après	-
Piping	29	« steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté	« drawing of pipe, steel – RER »
Instrumentation	0.2	50% de « steel production, electric, chromium steel 18/8 » adapté	« sheet rolling, steel – RER »
		50% de « electronics production, for control units – RER »	-

Pour cette itération 3, les moteurs ont été modélisés. L'inventaire choisi est « pump production 40W » qui modélise une unité d'une pompe de 1,9 kg. Cependant le projet contient des moteurs de 350 W à 14800 W. Une régression linéaire a été faite sur base des puissances et des masses de servomoteurs Schneider Electric (de 5500 W à 90 kW) disponible dans les PEP Ecopassport. La relation ainsi obtenue a été appliquée aux puissances des moteurs du projet afin d'en déduire leurs masses et de les associer à l'inventaire « pump production 40W ». Pour la modélisation de la fin de vie, les moteurs sont considérés comme étant fait uniquement d'acier inoxydable (approche simplifiée dans le cadre de cet exercice).

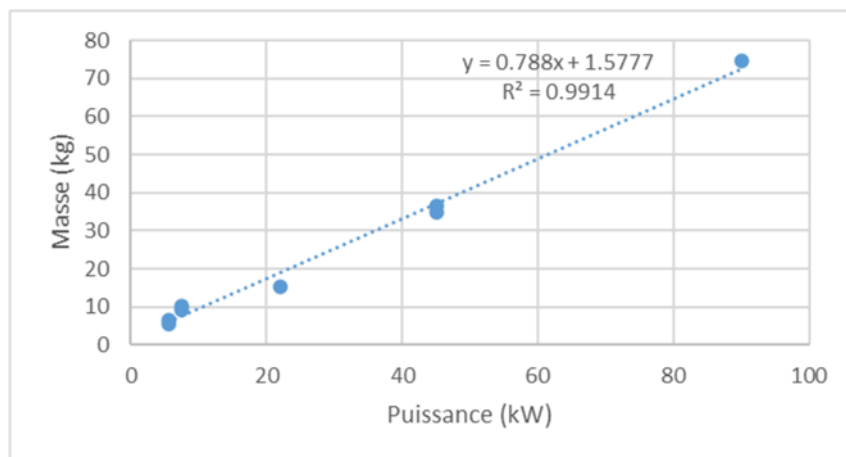


Figure 24 : Régression linéaire entre la masse et la puissance de pompes (analyse RDC sur base de données PEP Ecopassport Schneider Electric)

Le temps associé à la collecte des données est de 5,5 jours. Celui associé à la modélisation et l'analyse des résultats est de 2 jours. La répartition par pôle est la suivante :

Tableau 22 : Temps de travail associé à l'itération 3 sur le cas chimie fine

Discipline	Temps de collecte et de tri (jours)	Temps de modélisation (jours)
Bâtiment	Hors scope, car le projet utilise une enveloppe de bâtiment préexistante.	
Structure	0,5	2
Equipements (dont moteurs)	2	
Piping	2	
Instrumentation	1	
Transport	Ces données n'ont pas pu être collectées ou estimées par Artelia. L'hypothèse de modélisation provient de RDC Environment.	

6.1.3 Résultats

Résultats totaux des itérations

Les résultats des impacts totaux par itération sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 23 : Résultats totaux par itération sur le cas d'étude chimie fine

	Changement climatique <i>kg CO₂-eq</i>	Utilisation des ressources, minérales & métalliques	
		ADP 2002 (EF3.1) <i>kg Sb-eq</i>	FWL (GLAM 3) \$
Itération 1	8.05E+07	9820	6.37E+07
Itération 1 – Correction sur base de la production	1.76E+06	214	1.39E+06
Itération 1 – Correction surfacique	2.36E+05	28.8	1.87E+05
Itération 2	2.46E+05	5.20	1.35E+05
Itération 3	2.55E+05	6.37	1.41E+05

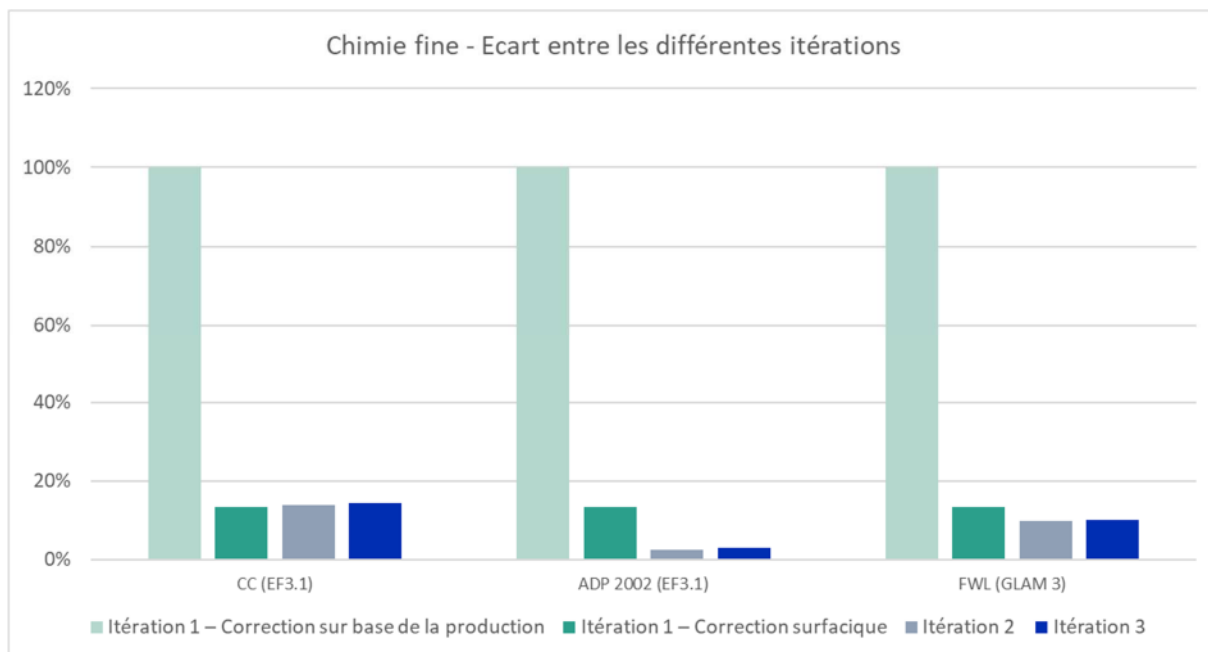


Figure 25 : Comparaison des résultats selon l'itération de calcul sur le cas chimie fine

Remarque : pour la lisibilité du graphique, l'itération 1 sans correction n'est pas présente dans le graphique.

Dans le cas présent, la correction surfacique présente des résultats plus proches de ceux de l'itération 3 que l'itération avec la correction sur base de la production. Les ordres de grandeurs obtenus avec la correction surfacique sur les catégories d'impacts « Changement climatique » et « Utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss » sont les mêmes que ceux des itérations 2 et 3. Pour l'indicateur ADP, un facteur 5 persiste.

L'itération 1 sans facteur correctif présente un écart de deux ordres de grandeur (facteur 100 à minima) sur chaque indicateur. Cependant après correction de l'inventaire ecoinvent sur base des capacités de production ou de la surface du cas d'étude permet de diminuer l'écart significativement (ordre de grandeur équivalent ou 1 ordre de grandeur d'écart) par rapport aux itérations 2 et 3.

C'est l'indicateur ADP 2002 qui présente encore un écart d'un facteur 10 après correction surfacique alors que ce n'est pas le cas des deux autres. Cet indicateur est très sensible à l'utilisation de certaines ressources (parfois/souvent modélisées grossièrement dans les données d'arrière-plan).

Entre les itérations 2 et 3, 1 jour a été investi en plus en collecte de données et 0,8 jours en modélisation, soit 36% de temps en plus pour un écart de 4% sur l'indicateur d'impact sur le changement climatique. Cela illustre que la modélisation de l'itération 2 qui considère que chaque pôle est constitué d'un unique matériau est une approximation acceptable permettant un gain de temps considérable.

Principaux postes de contribution (hotspots)

Les résultats par poste sont présentés dans les tableaux et graphiques ci-dessous :

Tableau 24 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – changement climatique (EF3.1)

kg CO ₂ -éq	Itération 2	Itération 3
Total	2.46E+05	2.55E+05
Bâtiment	Hors périmètre	Hors périmètre
Structures	7.54E+04	7.54E+04
Equipements	7.69E+04	7.59E+04
Piping	9.33E+04	9.36E+04
Instrumentation		3.80E+03
Transport		6.02E+03

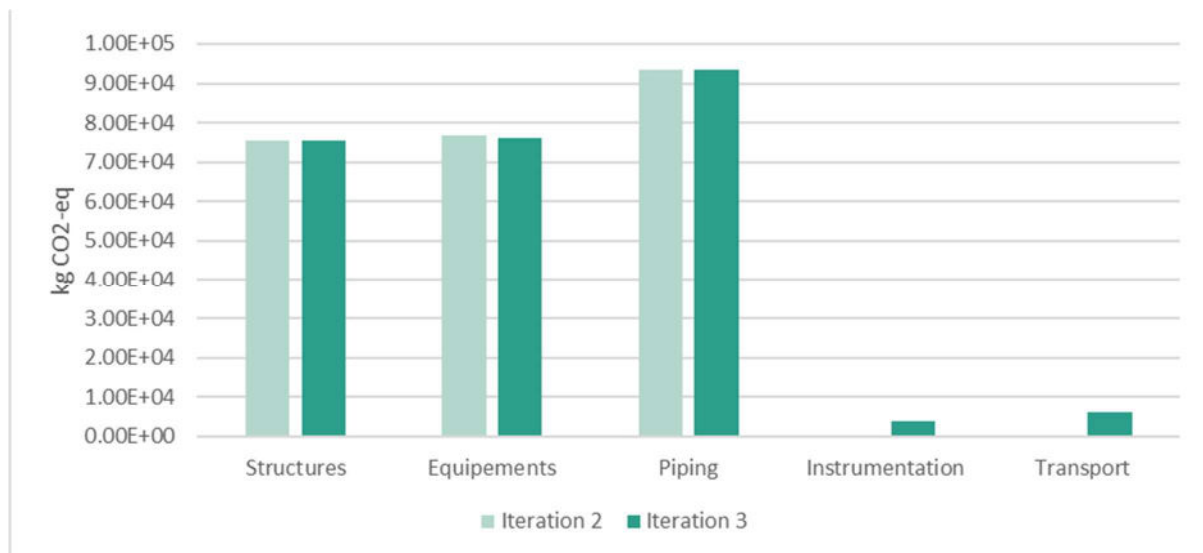


Figure 26 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – changement climatique (EF3.1)

Tableau 25 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

kg Sb-ég	Itération 2	Itération 3
Total	5.20E+00	6.37E+00
Bâtiment	Hors périmètre	Hors périmètre
Structures	1.62E+00	1.62E+00
Equipements	1.65E+00	1.62E+00
Piping	1.92E+00	1.92E+00
Instrumentation		1.18E+00
Transport		2.19E-02

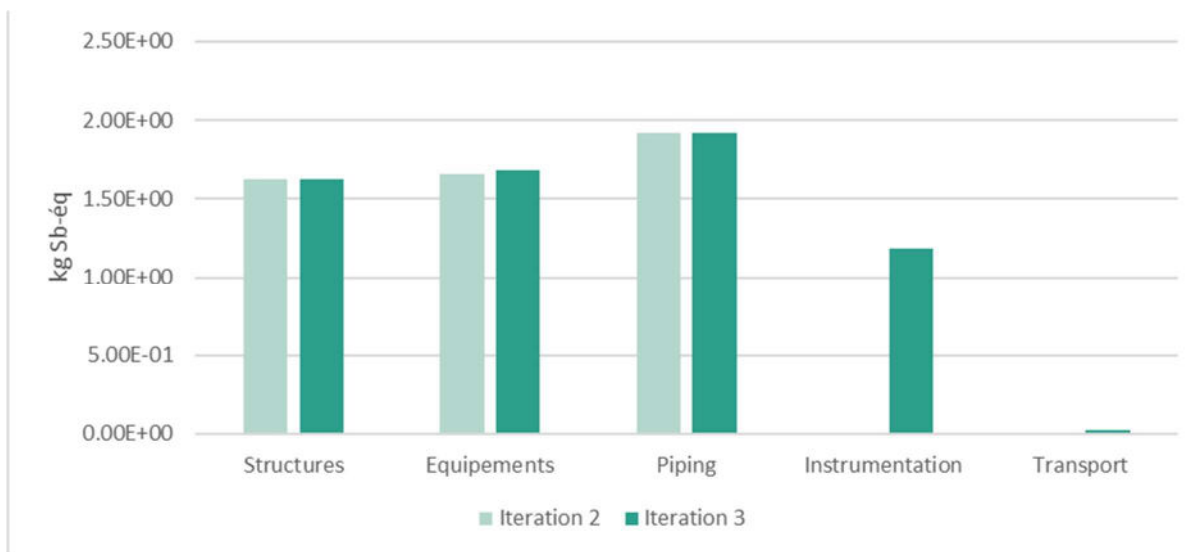


Figure 27 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

Tableau 26 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss (GLAM 3)

Dollars (\$)	Itération 2	Itération 3
Total	1.35E+05	1.41E+05
Bâtiment	Hors périmètre	Hors périmètre
Structures	3.77E+04	3.77E+04
Equipements	3.85E+04	3.78E+04
Piping	5.92E+04	5.93E+04
Instrumentation	-	4.27E+03
Transport	-	1.84E+03

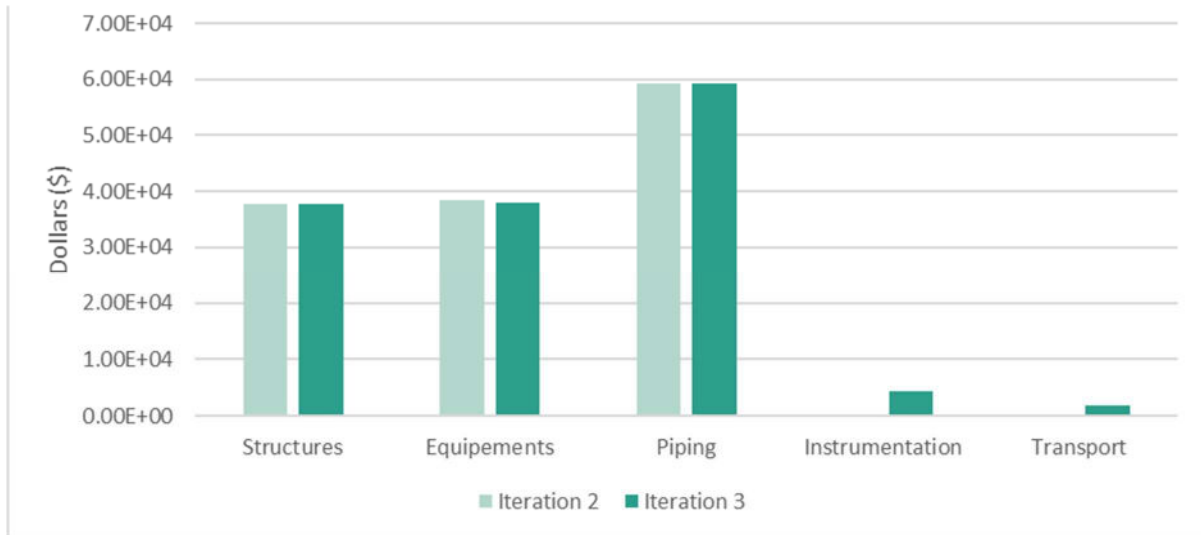


Figure 28 : Résultats de l'étude de cas chimie fine par poste – utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss (GLAM 3)

La plupart des pièces étant fait d'acier inoxydable, environ 85% de l'impact sur le changement climatique est dû à ce matériau (hors processus de transformation de l'acier).

L'ajout de la modélisation de l'instrumentation a une influence significative sur l'utilisation de ressources minérales et métalliques (en particulier avec ADP 2002)

L'impact du transport reste peu significatif malgré une distance de 1000 km appliquée à l'ensemble des matériaux.

6.1.4 Analyses de sensibilité

Contenu en recyclé

Comme indiqué ci-dessus, la majorité de la masse totale du projet est de l'acier inoxydable. Sa juste modélisation est donc critique, notamment le contenu en recyclé des différents éléments. L'itération 3 a été modélisée en cas de base avec 56% de contenu en recyclé. Cette analyse de sensibilité étudie le cas extrême où l'acier présente 0% de contenu en recyclé.

L'impact de l'ensemble du projet sur le changement climatique passe de 2.55e5 à 4.84e5 de kgCO₂eq. Cela double presque les impacts sur le changement climatique. Les résultats sont donc très sensibles au pourcentage de matière recyclé dans l'acier. De manière générale, il est donc nécessaire de modéliser avec précision les matériaux majoritaires du projet.

Modélisation des moteurs

Les moteurs sont des éléments complexes pouvant comporter des matériaux critiques comme le cuivre. La présente analyse de sensibilité compare trois modélisations/compositions de moteurs :

Tableau 27 : Composition d'un moteur selon différentes sources

Matériau (en %)	ecoinvent	PEP Ecopassport Schneider Electric	Modélisation sur base des données de RDC Environnement
Plastiques	2	20	32
Métaux	98	51	45
<i>dont cuivre</i>	<i>10</i>	<i>0</i>	<i>7</i>
Composants électroniques	0	29	23

Pour les trois catégories d'impacts sélectionnées, le changement de composition des moteurs changent les résultats de moins de 1% entre l'itération 3 (cas de base) et les spécifiques basées sur une DEP PEP Ecopassport ou des données de RDC Environnement.

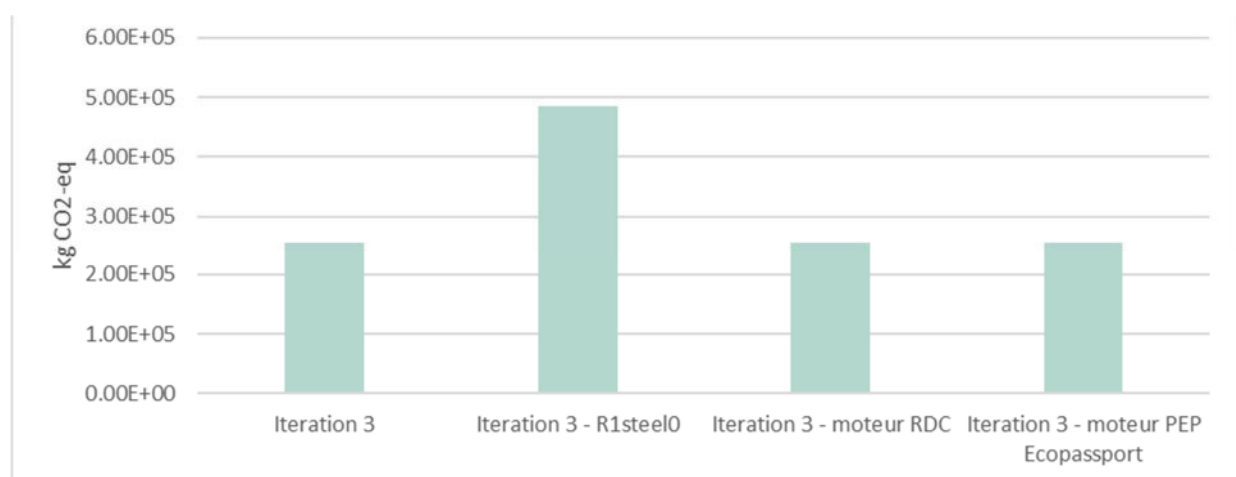


Figure 29 : Résultats des analyses de sensibilité sur le cas chimie fine sur le changement climatique (EF3.1)

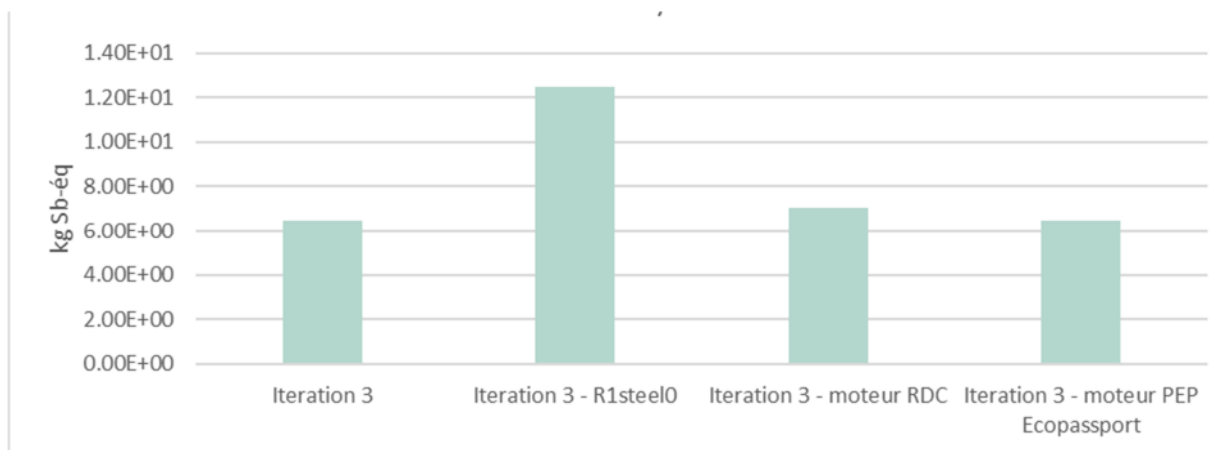


Figure 30 : Résultats des analyses de sensibilité sur le cas chimie fine sur l'utilisation des ressources minérales et métalliques (ADP 2002 – EF3.1)

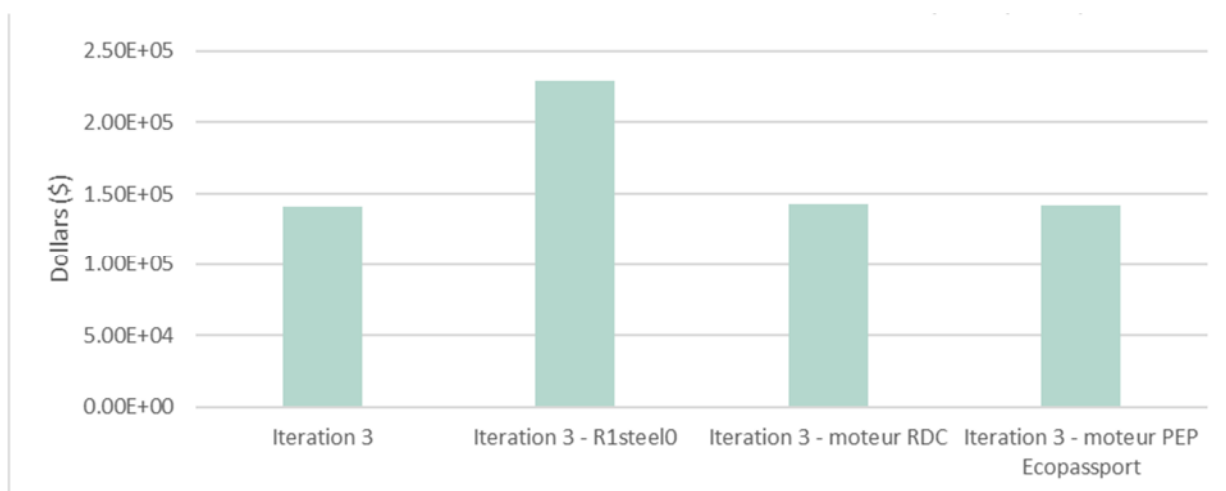


Figure 31 : Résultats des analyses de sensibilité sur le cas chimie fine sur l'utilisation des ressources minérales et métalliques (FLW – GLAM 3)

6.2 Cas d'études – usine de batteries

6.2.1 Périmètre d'évaluation

Description du projet (fiche n°02)

Cette étude de cas est réalisée pour un projet d'usine de batteries sur un site industriel de plus de 90 000 m² en cours d'étude ou de construction. Ce projet comprend la réalisation de l'ensemble des travaux de génie civil, la mise en place des clôtures périphériques, la construction des bâtiments industriels (charpentes, les étages supérieurs, toitures, murs extérieurs, ...). La réalisation des travaux de second œuvre comprend les finitions des toitures, des parois murales et des plafonds.

L'**unité fonctionnelle** (fiche n°03) est définie en suivant le questionnaire suivant :

Quels sont les services rendus par l'infrastructure ?	Fabriquer des batteries
Quelle quantité ?	Inconnue
Avec quelle qualité / performance ?	Non pertinent ou ne peut être décrit sans révéler l'identité du projet

Combien de temps ?	L'installation est prévue pour durer 30 années.
Quelle période temporelle ?	Le site est en cours d'études ou de construction.
Quelle localisation ?	France

Ainsi l'unité fonctionnelle est « Fabriquer des batteries pendant 30 ans sur un site en France ».

Frontières du système (fiche n°04)

Le périmètre prend en compte les travaux de génie civil, la structure du bâtiment (éléments porteurs, toitures, circulations verticales, façades extérieurs, menuiseries et cloisons intérieures) et les finitions intérieures (revêtements mureux, revêtements de sol et plafonds). La phase de maintenance est omise par manque de données pertinentes.

Tableau 28 : Eléments inclus et exclus dans le cas d'étude sur l'usine de batterie

Catégorie	Eléments inclus	Eléments exclus
Structure – fondations	<ul style="list-style-type: none"> - Remblayage - Fondations en béton - Isolation des poutres au sol - Dalle en béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Réservoirs souterrains - Siphons au sol
Structure – pieux et amélioration du sol	<ul style="list-style-type: none"> - Pieux en béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Excavation du sol
Structure – éléments porteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Poutres et poteaux préfabriqués en béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Poutres en bois lamellé-collé - Bardage
Etages supérieurs	<ul style="list-style-type: none"> - Dalle de compression - Sols ignifuges 	<ul style="list-style-type: none"> - Béton pour autres éléments
Toiture	<ul style="list-style-type: none"> - Laine de roche - Etanchéité bitumineuse (quantifiée) - Bouclier de protection incombustible en plomb - Filets de sécurité - Garde-corps - Pare-vapeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Etanchéité bitumineuse (non quantifiée) - Chemins de visites en toiture - Fenêtres pour éclairage zénithal et extraction des fumées et système asservissement de ces fenêtres - Couverture d'acrotère - Accessoires - Bande-soline
Escaliers et rampes		<ul style="list-style-type: none"> - Echelle crinoline - Garde-corps - Accès au toit - Echelle intérieure pour accès au puits de lumière - Cages d'escaliers intérieures et extérieures
Murs extérieurs	<ul style="list-style-type: none"> - Panneaux sandwichs - Bardage 	<ul style="list-style-type: none"> - Joint d'expansion - Linteau - Moteur de grille de ventilation - Autres accessoires
Fenêtres et portes extérieures	<ul style="list-style-type: none"> - Fenêtres (cadre aluminium et verre) - Rideaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Portes métalliques - Portes coulissantes
Murs intérieurs et cloisons	<ul style="list-style-type: none"> - Partitions intérieures - Salles de réunions et partitions en verre - Isolation intérieure 	<ul style="list-style-type: none"> - Partitions mobiles - Cadres de portes

	<ul style="list-style-type: none"> - Murs maçonnés - Pares-feux 	
Portes intérieures	<ul style="list-style-type: none"> - Rideaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Portes des bureaux - Portes battantes - Portes coupe-feu - Cloisons et portes des sanitaires
Finitions des murs	<ul style="list-style-type: none"> - Peintures - Carreaux - Joints 	
Finitions des sols	<ul style="list-style-type: none"> - Peintures - Carreaux (ciment, marbre, PVC) - Joints - Plinthes 	
Finitions des plafonds	<ul style="list-style-type: none"> - Panneaux de placo - Isolation - Structure en béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Peinture - Plafond pare-feu
Chauffage et climatisation		<ul style="list-style-type: none"> - Conduits d'air en acier - Systèmes de climatisation réversibles
Éléments annexes	<ul style="list-style-type: none"> - Clôture périphérique 	<ul style="list-style-type: none"> - Barrières d'accès - Abris vélos - Cages d'ascenseur

Cette catégorisation est celle transmise par Artelia et traduite de l'anglais vers le français. Seulement avec le nom, la matériau et la quantité, le rôle de chaque élément est parfois flou.

L'ACV de l'usine de batteries a été réalisée en 3 itérations :

- Itération 1 : modélisation grossière basée uniquement sur ecoinvent ;
- Itération 2 : modélisation simplifiée basée ne prenant en compte que les disciplines « Structure – fondations », « Structure – pieux et amélioration du sol » et « Structure – éléments porteurs » qui représentent les principales masses d'acier et de béton ;
- Itération 3 : modélisation affinée avec modélisation des éléments spécifiques de chaque discipline avec leur matériau principal et affinage pour les éléments électroniques (moteurs et instrumentation).

6.2.2 Inventaire de cycle de vie

Principales sources de données (fiche n°6)

Les données ont été collectées par Artelia. Ces données sont issues :

- Des DQE (Devis Quantitatifs et Estimatifs) des différents lots des études de détails

La démarche de collecte employée est la suivante :

1. Pour chaque éléments, par discipline :
 - a. Relever le nom de l'élément, son matériau principal et sa quantité (en kg, en mètres linéaires, en m², etc.) ;
 - b. Compléter certains éléments sur base d'hypothèses (e.g. pour convertir de m³ en kg, faire une hypothèse sur la densité du matériau ou même parfois faire un hypothèse sur

les matériaux composants un élément si les matériaux ne sont pas explicités dans les DQE.

Les résultats de la collecte de données sont présentés sous forme :

- D'un diaporama présentant le contexte du projet, le périmètre de la collecte de données, les paramètres clés (durée de vie, localisation, surfaces et longueur des différents ensembles), ainsi que les difficultés rencontrées pour collecter certaines données ;
- D'un tableau avec le détails des éléments ainsi que de leur matériau principal et des hypothèses faites.

Itération 1 – grossière

Comme pour l'étude des deux autres études de cas, la première itération consiste à utiliser un inventaire disponible dans une base de données ACV (ici ecoinvent). Par cette première itération on cherche donc à :

- Qualifier la pertinence d'utiliser des données d'inventaires des bases de données lorsque l'objectif de l'étude ne nécessite pas une grande précision (comme l'inclusion de l'infrastructure dans une ACV produit/service) ;
- Adapter la donnée d'inventaire de manière à se rapprocher du système étudié.

Tableau 29 : Inventaires de cycle de vie « infrastructure » disponibles dans ecoinvent et qui peuvent être associés à des usines de batteries

Nom de la donnée d'inventaire	Unité
electronic component factory construction {GLO} electronic component factory construction	Unit*
anode factory construction {RER} anode factory construction	Unit*

Unit signifie l'infrastructure dans sa globalité

L'inventaire le plus approprié pour le présent cas d'étude est cité et décrit dans le tableau suivant

Tableau 30 : Description de l'inventaire ecoinvent identifié pour la réalisation du cas d'étude sur l'usine de batteries en itération 1

Nom	electronic component factory construction {GLO} electronic component factory construction	
Description du jeu de données	<p>Technology This dataset represents the production site for the production of electronic components. It is based on information from AMD's Fab36 in Dresden, Saxony (Germany), supported/extended by literature and/or assumptions. The production site is taken as representative for all production plants due to the fact, that components are produced in clean rooms. A total life-span of 25 years is assumed. The AMD site in Saxony is taken as representative of a typical electronic components plant. This module includes land use, buildings and facilities (machinery, cables, etc.) as well as the respective disposal activities of a microprocessor production site, used as example for a electronic component plant.</p> <p>Product information This is an immobile infrastructure, representing the construction of electronic component factory. The infrastructure is assumed to have a total life-span of 25 years. The construction process includes land use, buildings and facilities (machinery, cables, etc.) as well as the respective decommission activities of a microprocessor production site.</p> <p>Geography comment This module relates to the global situation.</p>	
Echanges intermédiaires	building, hall building, multi-storey cable, data cable in infrastructure cable, three-conductor cable	8.56e+4 m2 3.28e+5 m3 8.75e+6 m 1.50e+6 m

	cable, unspecified clay brick {EC} clay brick {RoW} concrete, medium strength concrete, normal strength drawing of pipe, steel electronic component machinery, unspecified reinforcing steel road, company, internal steel, chromium steel 18/8, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled wastewater treatment facility, capacity 1.6E8l/year used industrial electronic device used industrial electronic device	1.97e+6 kg 1.24e+4 kg 6.68e+5 kg 2.03e+5 m3 1.63e+5 m3 8.36e+6 kg 500 unit 2.60e+7 kg 2.05e+6 m2*year 4.43e+6 kg 3.94e+6 kg 1.00 unit -0.153 kg -1.25e+6 kg
Flux élémentaires	Occupation, construction site Occupation, industrial area Transformation, from unspecified Transformation, to industrial area	1.09e+6 m2*year 9.11e+6 m2*year 3.64e+5 m2 3.64e+5 m2

Ainsi, les résultats de la première itération pourront être exprimé :

- Sans changement
- En appliquant un facteur correctif sur base de la surface du site du cas d'étude

Facteur correctif basé sur la surface :

$$\frac{\text{surface site cas d'étude}}{\text{surface site ICV}} = \frac{8e4}{3.64e5} = 0.22$$

Le facteur correctif basé sur la surface est de 0.22.

La quantité de batteries produites étant inconnue pour le site de l'étude de cas, il est impossible d'établir un facteur correctif basé sur cette donnée.

Tableau 31 : Temps de travail associé à l'itération 1 sur l'usine de batteries

Pôles	Temps de collecte et de tri + Temps de modélisation (jours)
Ensemble du projet	0,5

Itération 2 – simplifiée

L'itération 2 prend en compte les disciplines « Structure – fondations », « Structure – pieux et amélioration du sol » et « Structure – éléments porteurs » qui représentent les principales masses d'acier et de béton.

Tableau 32 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur l'usine de batteries en itération 2

Disciplines	Exemple d'éléments	Masse totale (tonnes)
Structure – fondations	Remblayage, fondations en béton, isolation des poutres au sol, dalle en béton .	216 000
Structure – pieux et amélioration du sol	Pieux en béton	10 000
Structure – éléments porteurs	Poutres et poteaux préfabriqués en béton	47 000

Tableau 33 : ICV employés pour la modélisation du cas d'étude sur l'usine de batteries en itération 2

Pôles	Masse totale (tonnes)	Inventaire – matériau
Fondations	1,5 t de sable	« market for sand – CH »
	1,5 t de gravier	« gravel production, crushed »
	20 000 m ³ de béton (soit 48 000 t de béton)	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
Pieux et amélioration du sol	4 300 m ³ de béton	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
Eléments porteurs	20 500 m ³ de béton	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »

Tableau 34 : Temps de travail associé à l'itération 2 sur le cas usine de batteries

Discipline	Temps de collecte et de tri (jours)	Temps de modélisation (jours)
Structure	6,6	1

Itération 3 – détaillée

L'itération 3 prend en compte les disciplines présentés dans le Tableau 28.

Tableau 35 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur l'usine de batteries en itération 3 (non exhaustif)

Pôles	Masse totale (tonnes)	Inventaire – matériau
Fondations	1,5 t de sable	« market for sand – CH »
	1,5 t de gravier	« gravel production, crushed »
	20 000 m ³ de béton (soit 48 000 t de béton)	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
Pieux et amélioration du sol	4 300 m ³ de béton	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
Eléments porteurs	20 500 m ³ de béton	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
Etages supérieurs	3 500 m ³ de béton	50 % « concrete, all types to generic market for concrete, normal strength » 50 % «concrete, all types to generic market for concrete, medium strength »
	160 000 m	« insulation spiral-seam duct production, rockwool, DN 400, 30 mm »
	420 t	« bitumen seal production »
Toiture	680 t	« market for lead » (écran de protection)
	870 t	« sheet rolling, steel » Acier avec contenu en recyclé de 40%
Murs extérieurs	870 t	« sheet rolling, steel » Acier avec contenu en recyclé de 40%
Fenêtres et portes extérieures	10 t	« sheet rolling, steel » Acier avec contenu en recyclé de 40%
Murs intérieurs et cloisons	24 000 m	« insulation spiral-seam duct production, rockwool, DN 400, 30 mm »
	7.7e6 kg	« clay brick production, extruded »
Portes intérieures	47 t	33% acier avec contenu en recyclé de 40% 33% « board, hardwood, raw, kiln drying to u=10% »

		33% « market for polyethylene, high density, granulate »
Finitions des murs	23 t	« alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60% solution state »
Finitions des sols	31 t	« market for polyvinylchloride, flakes, recycled »
	60 m ³	« concrete, all types to generic market for concrete, normal strength »
	55 t	« ceramic tile production »
Finitions des plafonds	3 t	« concrete, all types to generic market for concrete, normal strength »
	27 t	« market for wood wool »

En itération 3, les masses sont parfois estimées sur base de mètres linéaires ou de surface.

Il a été nécessaire de faire des estimations d'épaisseurs et de densité de matériaux. Le tableau ci-dessous présente un exemple de d'estimatifs sur les épaisseurs prises en compte pour le projet.

Tableau 36 : Exemple d'estimatifs réalisés pour établir les masses étudiées en itération 3

Sous-catégorie	Détails	Matériau	Unité	Épaisseur estimée (m)	Volume estimé (m ³)	Source de l'épaisseur
Travaux de fondation	Béton de propreté	Béton	m ²	0,10	Surface × 0,10	Norme de construction locale
Travaux de fondation	Dalle de fondation	Béton	m ²	0,30	Surface × 0,30	Cahier des charges du projet
Dalle béton	Rez-de-chaussée	Béton	m ²	0,25	Surface × 0,25	Spécifications techniques du bâtiment
Cloisons internes	Cloisons	Bois, aluminium, acier	m ²	0,10	Surface × 0,10	Cahier des charges architecturales
Isolation intérieure	Isolation interne	Fibres	m ²	0,08	Surface × 0,08	Spécifications d'isolation
Structures en maçonnerie	Murs en maçonnerie	Maçonnerie	m ²	0,20	Surface × 0,20	Documentation des murs
Sol vinyle	Vinyle	Vinyle	m ²	0,005	Surface × 0,005	Spécifications des revêtements de sol

La phase de chantier est modélisée en prenant en compte des pertes (10%) sur le matériau principal qu'est le béton par hypothèse. Ce scénario n'est pas basé sur la réalité mais permet de souligner l'importance de la prise en compte des pertes de fabrication dans l'étude.

Le temps associé à la collecte des données total est de 19 jours. Celui associé à la modélisation est de 3 jours.

Tableau 37 : Temps de travail associé à l'itération 3 sur le cas sur l'usine de batteries

	Temps de collecte et de tri (jours)	Temps de modélisation (jours)
Structure	6,6	1
Etages supérieurs	0,75	0,5
Toiture	3,5	1
Murs extérieurs	1,25	0,2
Fenêtres et portes extérieures	2,3	0,1
Murs intérieurs et cloisons	0,75	0,5
Portes intérieures	1,25	0,1
Finitions des murs	0,75	0,2
Finitions des sols	1,25	0,2
Finitions des plafonds	0,75	0,2
Total	19,15	3

6.2.3 Résultats

Résultats totaux des itérations

Les résultats des impacts totaux par itération sont présentés dans le tableaux ci-dessous.

Tableau 38 : Résultats totaux par itération sur le cas d'étude sur l'usine de batteries

	Changement climatique <i>kg CO₂-eq</i>	Utilisation des ressources, minérales & métalliques	
		ADP 2002 (EF3.1) <i>kg Sb-eq</i>	FWL (GLAM 3) \$
Itération 1	4.03E+08	42 000	3.00E+08
Itération 1.1	8.86E+07	9 220	6.59E+07
Itération 2	1.63E+07	81.7	7.96E+06
Itération 3	3.62E+07	1 380	3.19E+07

Le passage de l'itération 1 à 1.1 montre une diminution des impacts d'un ordre de grandeur pour les trois indicateurs. Le passage à l'itération 2 et 3 permet essentiellement de gagner en précision du la catégorie d'utilisation des ressources minérales et métalliques.

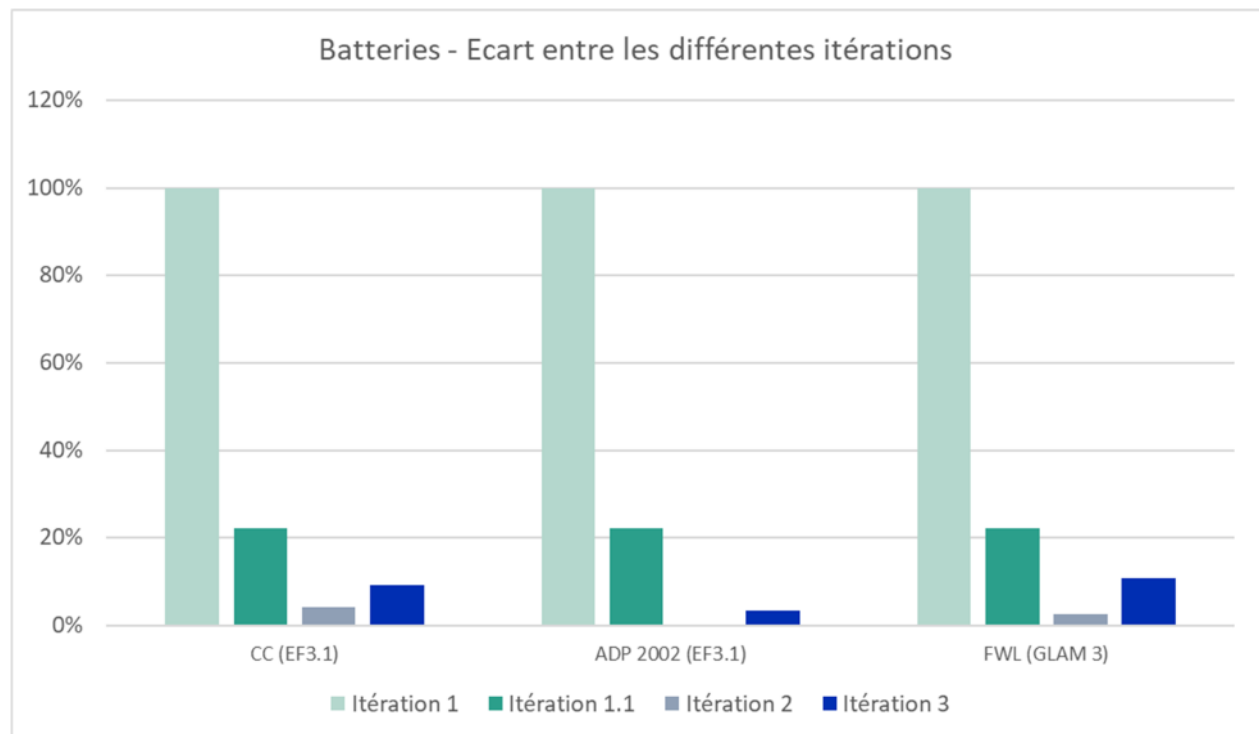


Figure 32 : Comparaison des résultats selon l'itération de calcul sur le cas usine de batteries

Tableau 39 : Résultats de l'étude de cas sur les batteries par poste – changement climatique

kgCO ₂ -éq	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	4.03E+08	8.86E+07	1.63E+07	3.62E+07
Structure – fondations			7.41E+06	8.48E+06
Structure – pieux et amélioration du sol			1.33E+06	1.53E+06
Structure – éléments porteurs			6.37E+06	7.33E+06
Etages supérieurs				1.27E+06
Toiture				6.75E+06
Murs extérieurs				1.51E+06
Fenêtres et portes extérieures				2.80E+04
Murs intérieurs et cloisons				6.56E+06
Portes intérieures				7.33E+04
Finitions des murs				1.11E+05
Finitions des sols				1.16E+05
Finitions des plafonds				8.21E+05
Éléments annexes				1.18E+05
Chantier			1.23E+06	1.52E+06

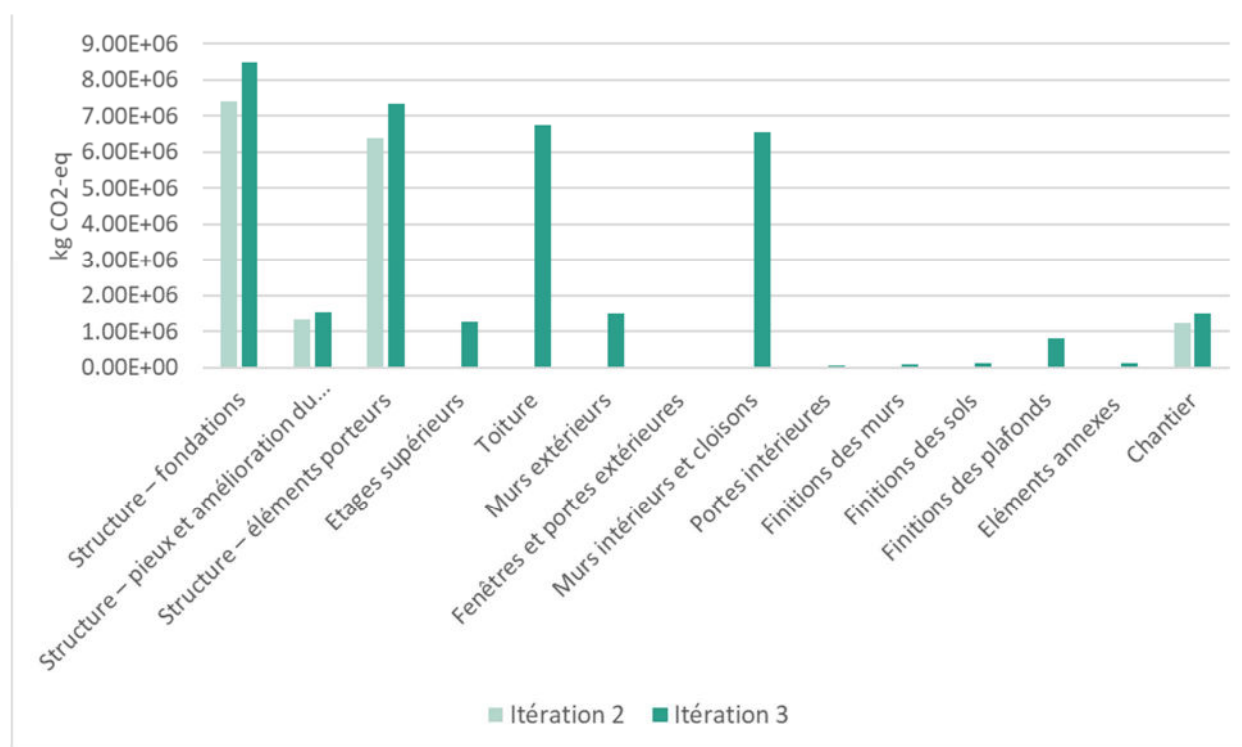


Figure 33 : Résultats de l'étude de cas usine de batteries par poste – changement climatique (EF3.1)

Tableau 40 : Résultats de l'étude de cas chimie fine – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

kg Sb-ég	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	4.20E+04	9.22E+03	8.17E+01	1.38E+03
Structure – fondations			3.86E+01	4.15E+01
Structure – pieux et amélioration du sol			6.51E+00	7.05E+00
Structure – éléments porteurs			3.13E+01	3.39E+01
Etages supérieurs				5.88E+00
Toiture				1.23E+03
Murs extérieurs				3.10E+00
Fenêtres et portes extérieures				1.53E-01
Murs intérieurs et cloisons				3.74E+01
Portes intérieures				2.73E-01
Finitions des murs				1.09E+00
Finitions des sols				2.29E+00
Finitions des plafonds				9.00E+00
Eléments annexes				8.41E-01
Chantier			5.32E+00	6.54E+00

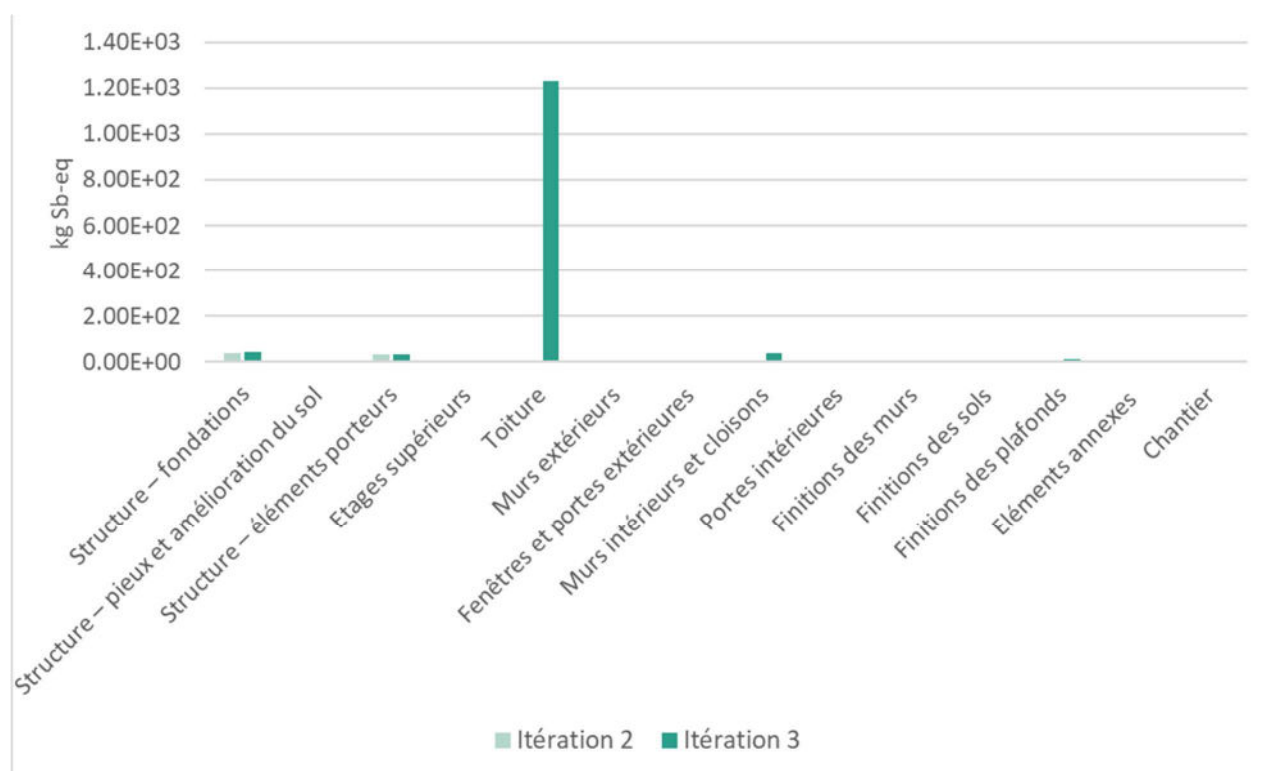


Figure 34 : Résultats de l'étude de cas usine de batteries par poste – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

Tableau 41 : Résultats de l'étude de cas chimie fine – utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss (GLAM 3)

Dollars (\$)	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	3.00E+08	6.59E+07	7.96E+06	3.19E+07
Structure – fondations			4.70E+06	5.19E+06
Structure – pieux et amélioration du sol			4.70E+05	5.60E+05
Structure – éléments porteurs			2.26E+06	2.69E+06
Etages supérieurs				4.67E+05
Toiture				1.73E+07
Murs extérieurs				4.17E+05
Fenêtres et portes extérieures				1.42E+05
Murs intérieurs et cloisons				3.17E+06
Portes intérieures				3.43E+04
Finitions des murs				3.71E+05
Finitions des sols				1.87E+05
Finitions des plafonds				3.59E+05
Eléments annexes				3.60E+05
Chantier			5.25E+05	6.45E+05

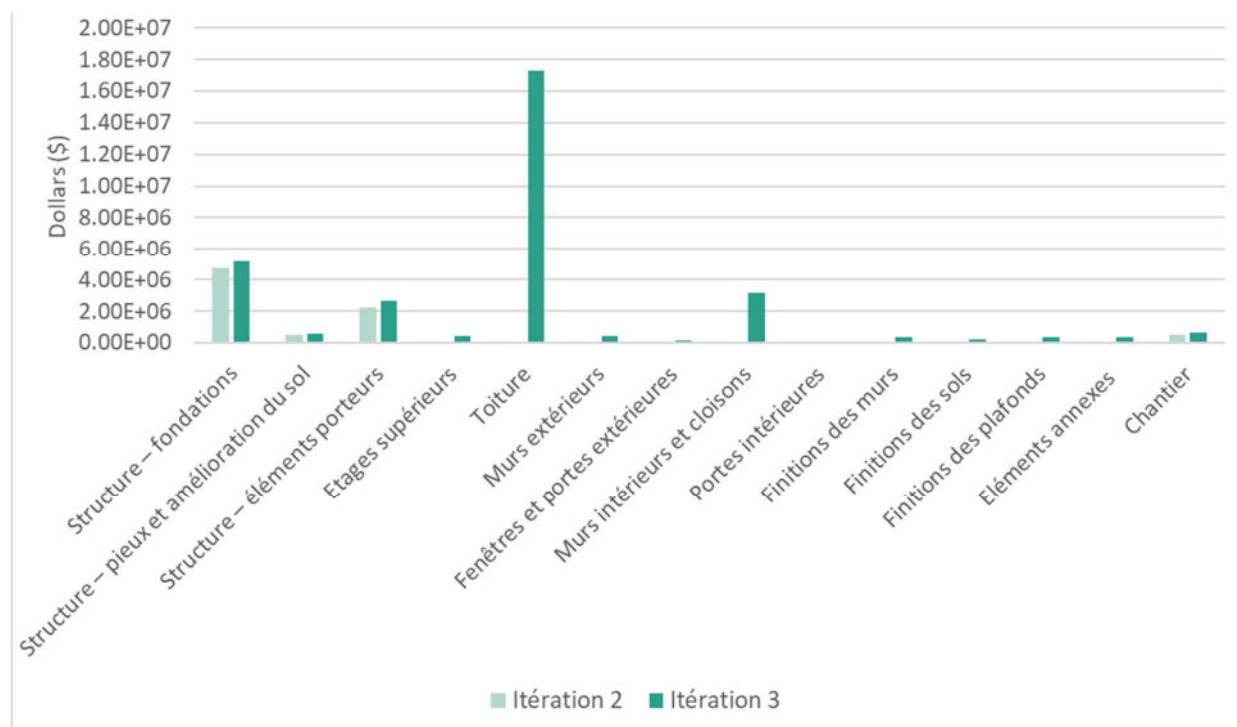


Figure 35 : Résultats de l'étude de usine de batteries par poste – utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss (GLAM 3)

La corrélation entre les masses de matériaux mis en œuvre et leur contribution sur l'indicateur de changement climatique est forte.

En itération 3, on observe que la prise en compte d'un élément qui ne faisait pas partie des éléments les plus lourds de l'infrastructure et utile la mise en place d'un dispositif spécifique à l'usine de batterie (utilisation d'une ressource métallique non ferreuse) augmente considérablement la contribution à l'utilisation des ressources minérales et métalliques.

La phase de chantier, si les pertes sont importantes (ici 10%), peut avoir une contribution non négligeable sur les résultats (lié à la production des matériaux plutôt qu'à la gestion des déchets).

6.2.4 Analyse de sensibilité

Consommation de diesel en phase de chantier

En plus des déchets générés sur chantier (et en particulier ceux associés à des pertes de matériaux), un estimatif de la consommation d'énergie sur site de construction est testé ici.

ecoinvent utilise 240 MJ de diesel / m² dans certains inventaires d'infrastructures. Cette donnée est du même ordre de grandeur qu'une étude américaine étudiée en section 5.7. Ainsi, on applique cette valeur au 90 000 m² de site.

L'impact sur le changement climatique de cette consommation d'énergie est de 1.93E+06 augmentant l'itération 3 de 6%.

6.3 Cas d'études – ligne de tramway

L'ACV de la ligne de tramway a été réalisée en 3 itérations :

- Itération 1 : modélisation grossière basée uniquement sur ecoinvent
- Itération 2 : modélisation simplifiée basée sur les quantitatifs des ensembles les plus lourds (en masse) associés au matériau principal (béton et acier)
- Itération 3 : modélisation affinée avec modélisation des éléments spécifiques de chaque ensemble avec leur matériau principal

6.3.1 Périmètre d'évaluation

Description du projet

Cette étude de cas est réalisée pour un projet de tramway en cours de construction.

L'**unité fonctionnelle** est « permettre la circulation de tramways sur 15 km pour transporter 25 000 passagers par jour pendant 30 ans ».

Quels sont les services rendus par l'infrastructure ?	Permettre la circulation de tramways sur 15 km
Quelle quantité ?	25 000 passagers par jour
Avec quelle qualité / performance ?	Non pertinent ou ne peut être décrit sans révéler l'identité du projet.
Combien de temps ?	L'installation est prévue pour durer 30 années.
Quelle période temporelle ?	L'infrastructure est en cours de construction.
Quelle localisation ?	France

Les **frontières du système** prennent en compte :

- La plateforme : axe principal du projet d'une longueur de 15 km. Support pour les voies de tramway et pour l'ensemble des équipements nécessaires au bon fonctionnement du réseau.
- Un ouvrage d'art : une passerelle métallique pour les piétons et cyclistes.
- Un centre de maintenance : implanté sur une parcelle cadastrale de 25 000 m² incluant
 - une surface végétalisée de 5300 m² (considérée comme préexistante)
 - une voie ferrée interne au centre de maintenance d'une longueur de 1600 m pour la stationnement et les essais techniques en dehors du tracé principal
 - une voirie interne couvrant une surface de 7300 m²

Le matériel roulant (wagons de tramway) est exclu des frontières du système. Les phases de vie prises en compte sont la production des matériaux, le chantier (dans une moindre mesure) et la fin de vie des matériaux. La phase de maintenance est omise par manque de données pertinentes.

Tableau 42 : Eléments inclus et exclus dans le cas d'étude sur la ligne de tramway

Catégorie	Eléments inclus	Eléments exclus
Infrastructures générales	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de remblais et petits ouvrages de soutènement - Mise en place des réseaux électriques : fourreaux individuels, chambres de tirage, massifs pour poteaux et potences - Pose de bordures, dallages et pavés pour les aménagements urbains - Construction de chaussées et trottoirs 	
Infrastructures ferroviaires	<ul style="list-style-type: none"> - Construction de la plateforme tramway - Fourniture et pose des voies ferrés : traverses, platelages - Réalisation des massifs pour la ligne aérienne de contact (massifs de tête, de fondation, micropieux) - Rails 	<ul style="list-style-type: none"> - Rames de tramway
Ouvrage d'art	<ul style="list-style-type: none"> - Fondations profondes : micropieux, pieux, etc. - Ouvrage d'art et structure de génie civil : béton, structures métalliques, etc. - Travaux d'étanchéité et pose d'équipements : revêtement, garde-corps, appareils d'appui en néoprène 	
Consommation		<ul style="list-style-type: none"> - Consommation électrique pour la circulation des tramways
Chantier	<ul style="list-style-type: none"> - Transport jusqu'au chantier - Pertes (acier, ciment et grave) lors de la mise en œuvre - Consommations d'énergie et utilisation de machines 	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes (autres)

6.3.2 Inventaire de cycle de vie

Principales sources de données (fiche n°6)

Les données ont été collectées par Artelia. Ces données sont issues :

- Des DQE (Devis Quantitatifs et Estimatifs) des différents lots (infrastructures, ouvrage d'art et ferroviaire) des études de détails

La démarche de collecte employée est la suivante :

1. Pour chaque éléments, par discipline :
 - a. Identifier le matériau principal ;
 - b. Identifier la masse de l'élément (soit directement, soit par conversion à partir de longueurs notamment pour la tuyauterie).
2. Catégoriser cela par ensemble (plateforme du tramway, énergie, ouvrage d'art, centre de maintenance).

Les résultats de la collecte de données sont présentés sous forme :

- D'un diaporama (non-annexé au rapport) présentant le contexte du projet, le périmètre de la collecte de données, les paramètres clés (durée de vie, localisation, capacité de transport, surfaces et longueur des différents ensembles), ainsi que les difficultés rencontrées pour collecter certaines données ;

- D'un tableau avec le détails des éléments ainsi que de leur matériau principal détaillé et d'un tableau résumé par catégorie de matériau par ensemble (cf. *Annexe G : Résultats des collectes de données pour les cas d'études*).

Itération 1 – grossière

Comme pour l'étude de cas « Chimie fine », la première itération consiste à utiliser un inventaire disponible dans une base de données ACV (ici ecoinvent). Par cette première itération on cherche donc à :

- Qualifier la pertinence d'utiliser des données d'inventaires des bases de données lorsque l'objectif de l'étude ne nécessite pas une grande précision (comme l'inclusion de l'infrastructure dans une ACV produit/service) ;
- Adapter la donnée d'inventaire de manière à se rapprocher du système étudié.

Tableau 43 : Inventaires de cycle de vie « infrastructure » disponibles dans ecoinvent et qui peuvent être associés à une ligne de tramway

Nom de la donnée d'inventaire	Unité
tram track construction {CH} tram track	m*année
railway track construction {CH} railway track	m*année

L'inventaire le plus approprié pour le présent cas d'étude est cité et décrit dans le tableau suivant

Tableau 44 : Description de l'inventaire ecoinvent identifié pour la réalisation du cas d'étude sur la ligne de tramway en itération 1

Nom	tram track construction {CH} tram track	
Description du jeu de données	<p>Technology The module track construction and renewal accounts for double track concrete stretch (width = 6.5m) and a bitumen layer of 3 cm on top Maibach et al. (1999). In addition, steel expenditures for railway tracks and bracing are included. Alternative constructions of tram-infrastructure (e.g. green stretches) are not accounted for. The life span is estimated at 15 years. The inventory of the energy use and combustion emissions for operation and maintenance of tram infrastructure is limited to the energy consumption for signals (79.5 kWh/ma) and land use. For the operation of signals a electricity consumption of 79.5 kWh/ma is accounted for Maibach et al. (1999).</p> <p>Product information This is delivering the service of construction, operation, maintenance and end-of-life of 1 meter *year tram track. The infrastructure includes a double track concrete stretch (width=6.5m) and a bitumen layer of 3 cm on top. Its life span is estimated at 15 years.</p> <p>Geography comment Data refers to average conditions in Switzerland. The data of the energy use and combustion emissions refers to average conditions in Switzerland. For de icing activities, a recent Austrian has been applied.</p>	
Echanges intermédiaires	concrete, 37MPa <i>diesel, burned in building machine</i> <i>electricity, medium voltage</i> <i>excavation, skid-steer loader</i> gravel, crushed pitch reinforcing steel steel, low-alloyed, hot rolled decommissioned tram track	0.111 m ³ 390 MJ 79.5 kWh 0.300 m ³ 23.5 kg 1.20 kg 0.0858 kg 12.1 kg -1.00 m*year
Flux élémentaires	NMVOC, non-methane volatile organic compounds Occupation, traffic area, road network Transformation, from unspecified Transformation, to traffic area, road network	1.24 kg 6.50 m2*year 0.00650 m2 0.00650 m2

Remarque : En italique, éléments associés à la phase de chantier

La donnée d'inventaire ecoinvent est déjà amortie sur 15 ans, ce qui signifie que les matériaux, les procédés de construction, la consommation de diesel, ont été répartis linéairement sur 15 ans.

L'unité m.an reflète un mètre de ligne de tramway utilisé pendant un an.

Dans ce cas d'étude, la durée de vie prévue est 30 ans. Ainsi, le facteur de pondération de la donnée ecoinvent sera de 0.5.

Ainsi, les résultats de la première itération pourront être exprimés :

- Avec un facteur de 225 000 m.année (15 000 m * 30 ans * 0.5) (la largeur de la ligne étant de 6.5 m comme dans ecoinvent, il n'y a pas besoin de facteur pour cela) ;
- En modélisant le centre de maintenance avec l'inventaire « building, hall, steel construction {CH}| building, hall, steel construction », cette modélisation sera appelée « Itération 1.1 » dans les résultats.

Tableau 45 : Temps de travail associé à l'itération 1 sur la ligne de tramway

Pôles	Temps de collecte et de tri + Temps de modélisation
Ensemble du projet	0.5 j

Itération 2 – simplifiée

L'itération 2 prend en compte les matériaux détaillés (béton, acier et ballast) pour la plateforme du tramway, ainsi qu'une modélisation ecoinvent « building, hall, steel construction {CH}| building, hall, steel construction » pour le centre de maintenance.

Tableau 46 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur la ligne de tramway en itération 2

Ensemble	Exemple d'éléments	Masse totale (tonnes)
Plateforme de tramway	Support pour les voies et l'ensemble des équipements nécessaires au bon fonctionnement du réseau de tram.	130 000
Ouvrage d'art	Non modélisé pour cette itération	-
Energie	Non modélisé pour cette itération	-
Centre de maintenance	Bâtiment principal. La voirie et la voie ferrée interne au centre de maintenance ne sont pas modélisées dans cette itération.	5 800 tonnes 12 000 m ²

Tableau 47 : ICV employés pour la modélisation du cas d'étude sur la ligne de tramway en itération 2

Ensemble	Donnée d'activité	Inventaire – matériau	Inventaire – processus de transformation
Plateforme de tramway	6 500 d'acier	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	« section bar rolling, steel »
	110 000 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	-
	14 000 t de grave	« gravel production, crushed »	-
Ouvrage d'art	-	Non modélisé pour cette itération	
Energie	-	Non modélisé pour cette itération	
Centre de maintenance	12 000 m ²	« building construction, hall, steel construction »	-

Le temps associé à la collecte des données est de 1,5 jours. Celui associé à la modélisation et l'analyse des résultats est de 1 jour. La répartition par pôle est la suivante :

Tableau 48 : Temps de travail associé à l'itération 2 sur le cas ligne de tramway

Pôles	Temps de collecte et de tri (jours)	Temps de modélisation (jours)
Plateforme de tramway	1.5	1
Centre de maintenance		
Ouvrage d'art	Non modélisé pour cette itération	
Energie	Non modélisé pour cette itération	

Itération 3 – affinée

L'itération 3 modélise deux pôles en plus de l'itération 2. La liste des pôles pour l'itération 3 est la suivante :

Tableau 49 : Principaux éléments et masses du cas d'étude sur la ligne de tramway en itération 3

Ensemble	Exemple d'éléments	Masse totale (tonnes)
Plateforme de tramway	Support pour les voies et l'ensemble des équipements nécessaires au bon fonctionnement du réseau de tram.	130 000
Ouvrage d'art	Passerelle métallique destinée aux piétons et cyclistes.	120
Energie	Ligne Aérienne de Contact (caténaires, poteaux de support).	3 100
Centre de maintenance	Bâtiment principal, voirie et voie ferrée interne à la parcelle du centre de maintenance.	13 000 tonnes Bâtiment principal : 12 000 m ² Voirie : 7 300 m ² Voie ferrée : 1 600 m
Chantier – transport, pertes, énergie & machines	Transport des matériaux jusqu'au chantier Pertes Consommation d'énergie et de machines	-

Production des matériaux

Tableau 50 : ICV employés pour la modélisation du cas d'étude sur la ligne de tramway en itération 3

Ensemble	Donnée d'activité	Inventaire – matériau	Inventaire – processus de transformation
Plateforme de tramway	6 500 t	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	« section bar rolling, steel »
	110 000 t	« market for concrete, 37MPa »	-
	14 000 t de ballast assimilé à de la grave non traitée	« gravel production, crushed »	-
Ouvrage d'art	30 t d'acier	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	
	90 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	
Energie	600 t d'acier	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	
	2 500 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	

	5 t de cuivre	« market for copper, cathode »	« wire drawing, copper »
Centre de maintenance – bâtiment principal	100 t d'acier	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	
	3 000 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	
	2 000 t de grave non traitée	« gravel production, crushed »	
	700 t de béton armé	70% de « market for concrete, 37MPa » 30% de « reinforcing steel production »	
Centre de maintenance – voie ferrée	300 t d'acier	60% « steel production, converter, unalloyed » adapté 40% « steel production, electric, low-alloyed » adapté	« section bar rolling, steel »
	800 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	-
	1 400 t de grave non traitée	« gravel production, crushed »	-
Centre de maintenance – voirie	2 000 t de béton CEM II	« market for concrete, 37MPa »	-
	40 t de granit	« gravel production, crushed »	-
	600 t d'enrobé bitumineux	« market for bitumen adhesive compound, hot »	-
	1 600 t de grave bitume	« gravel production, crushed »	-
Chantier	Modélisation détaillée ci-dessous.		

Phase de chantier

Une distance moyenne de 1000 km est considérée (parcourue en camion de charge utile 24 t) pour le béton, l'acier et la grave.

Des pertes de fabrication et de mise en œuvre sur chantier sont prises en compte : 10% de pertes pour le béton, l'acier et la grave. De plus, les consommations d'énergie et de machines présentes dans l'inventaire ecoinvent de l'itération 1 sont reprises.

L'acier est modélisé avec les mêmes hypothèses que pour l'itération 2.

Le temps associé à la collecte des données est de 10,5 heures soit 1,5 jours. La personne d'Artelia ayant réalisé la collecte de données est une personne ayant déjà fait des collectes de données pour des ACV. En pratique, le temps de modélisation a aussi été réduit grâce à l'expérience de l'étude de cas « chimie fine ». Celui associé à la modélisation et l'analyse des résultats est de 2 jours. La répartition par ensemble est la suivante :

Tableau 51 : Temps de travail associé à l'itération 3 sur le cas sur la ligne de tramway

Pôles	Temps de collecte et de tri (heures)	Temps de modélisation (heures)
Plateforme de tramway	6.5	15 h
Centre de maintenance	2.5	
Ouvrage d'art	1	
Energie	0.5	
Chantier	Ces données n'ont pas pu être collectées ou estimées par Artelia. L'hypothèse de modélisation provient de RDC Environment.	

6.3.3 Résultats

Résultats totaux des itérations

Les résultats des impacts totaux par itération sont présentés dans le tableaux ci-dessous.

Tableau 52 : Résultats totaux par itération sur le cas d'étude sur la ligne de tramway

	Changement climatique <i>kg CO₂-eq</i>	Utilisation des ressources, minérales & métalliques	
		ADP 2002 (EF3.1) <i>kg Sb-eq</i>	FWL (GLAM 3) \$
Itération 1 (ICV ecoinvent corrigé de la durée de vie du cas étudié)	2.15E+07	8.55E+01	5.55E+06
Itération 1.1 (ajout du centre de maintenance)	2.64E+07	1.91E+02	8.92E+06
Itération 2	2.70E+07	1.87E+02	1.50E+07
Itération 3	3.09E+07	1.59E+02	1.53E+07

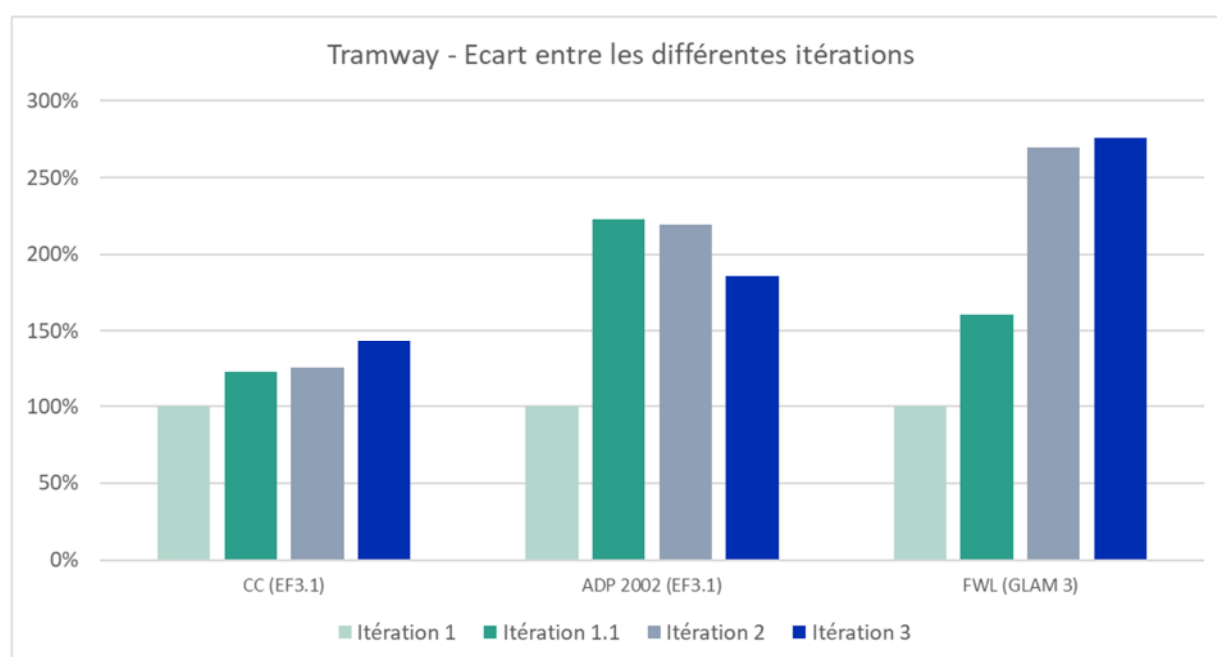


Figure 36 : Comparaison des résultats selon l'itération de calcul sur le cas ligne de tramway

L'itération 1.1 est similaire à l'itération 1, avec en complément une modélisation du bâtiment principal du centre de maintenance avec l'inventaire « building, hall, steel construction {CH} building, hall, steel construction ».

Contrairement aux cas d'étude sur la chimie fine, l'inventaire ecoinvent sans adaptation n'est pas présenté. Etant donné une durée de vie de 15 ans pour ecoinvent par rapport au présent cas d'étude, on peut s'attendre à un doublement des impacts de l'itération 1.

L'écart entre la première itération et la troisième itération est d'un ordre de grandeur. Cette différence s'explique principalement par la quantité de matériaux employés pour la plateforme. Par ailleurs, il y a une différence de périmètre d'évaluation : la donnée ecoinvent (itération 1) ne prend pas en compte le centre de maintenance et l'ouvrage d'art (contrairement aux itérations 2 et 3).

Ce cas d'étude permet de souligner la spécificité des situations pour les infrastructures de transport. Il est donc essentiel de vérifier le périmètre des données d'inventaires des bases de données.

Principaux postes de contribution (hotspots)

Les résultats par poste sont présentés dans les tableaux et graphiques ci-dessous :

Tableau 53 : Résultats de l'étude de cas voie de tramway par poste – changement climatique

kgCO ₂ -éq	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	2.15E+07	2.64E+07	2.70E+07	3.09E+07
Plateforme	2.15E+07	2.15E+07	2.21E+07	2.21E+07
Ouvrage d'art				1.54E+06
Centre de maintenance		4.87E+06	4.87E+06	3.60E+06
Energie (caténaires)				3.04E+05
Chantier – transport				9.46E+05
Chantier – pertes				2.38E+06
Chantier – énergie & machines	Inclus dans la phase « Plateforme »	Inclus dans la phase « Plateforme »	4.11E+01	4.11E+01

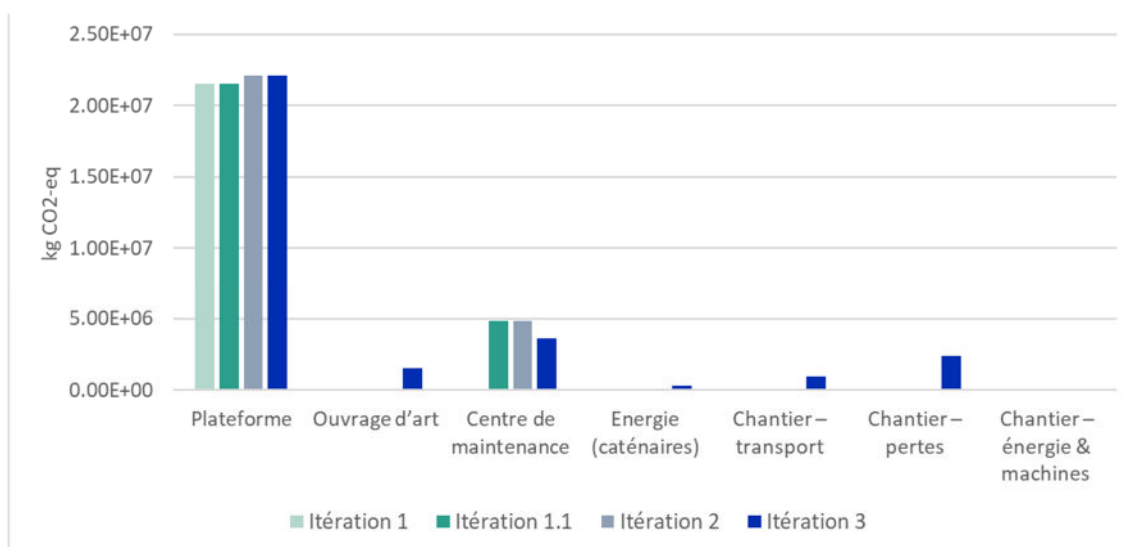


Figure 37 : Résultats de l'étude de cas ligne de tramway par poste – changement climatique (EF3.1)

Tableau 54 : Résultats de l'étude de cas voie de tramway – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

kg Sb-éq	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	8.55E+01	1.91E+02	1.87E+02	1.59E+02
Plateforme	8.55E+01	8.55E+01	8.22E+01	8.22E+01
Ouvrage d'art				1.34E+01
Centre de maintenance		1.05E+02	1.05E+02	1.25E+01
Energie (caténaires)				3.85E+01

Chantier – transport				3.44E+00
Chantier – pertes				8.77E+00
Chantier – énergie & machines	Inclus dans la phase « Plateforme »	Inclus dans la phase « Plateforme »	6.25E-05	6.25E-05

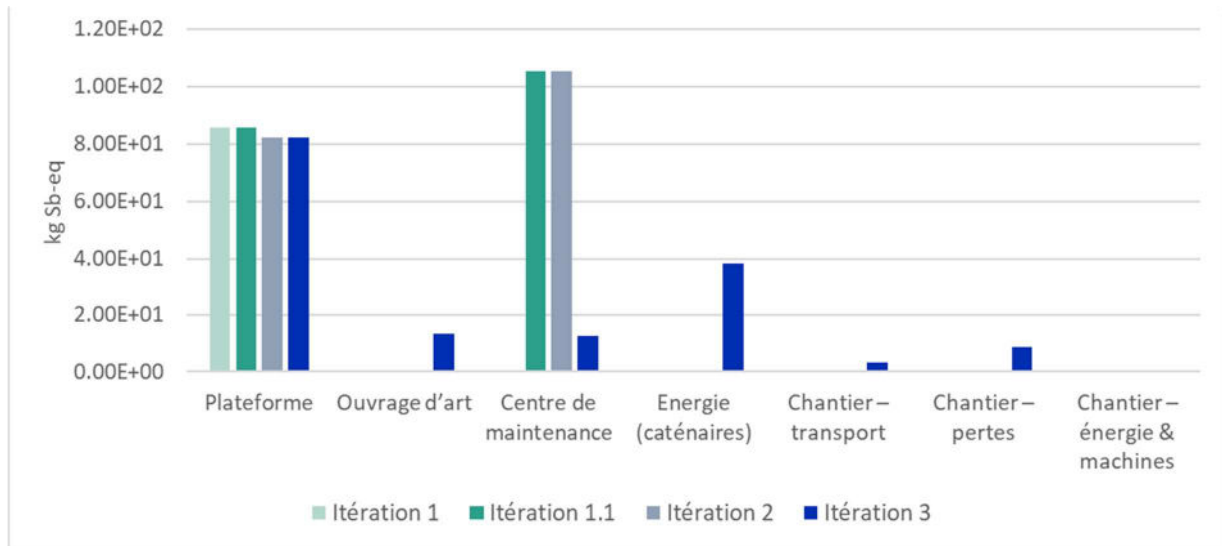


Figure 38 : Résultats de l'étude de cas ligne de tramway par poste – épuisement des ressources, minérales et métalliques, ADP 2002 (EF3.1)

Tableau 55 : Résultats de l'étude de cas voie de tramway – utilisation des ressources minérales, Future Welfare Loss (GLAM 3)

Dollars (\$)	Itération 1	Itération 1.1	Itération 2	Itération 3
Total	5.55E+06	8.92E+06	1.50E+07	1.53E+07
Plateforme	5.55E+06	5.55E+06	1.16E+07	1.16E+07
Ouvrage d'art				6.83E+05
Centre de maintenance		3.37E+06	3.37E+06	1.32E+06
Energie (caténaires)				1.90E+05
Chantier – transport				2.89E+05
Chantier – pertes				1.22E+06
Chantier – énergie & machines	Inclus dans la phase « Plateforme »	Inclus dans la phase « Plateforme »	2.98E+00	2.98E+00

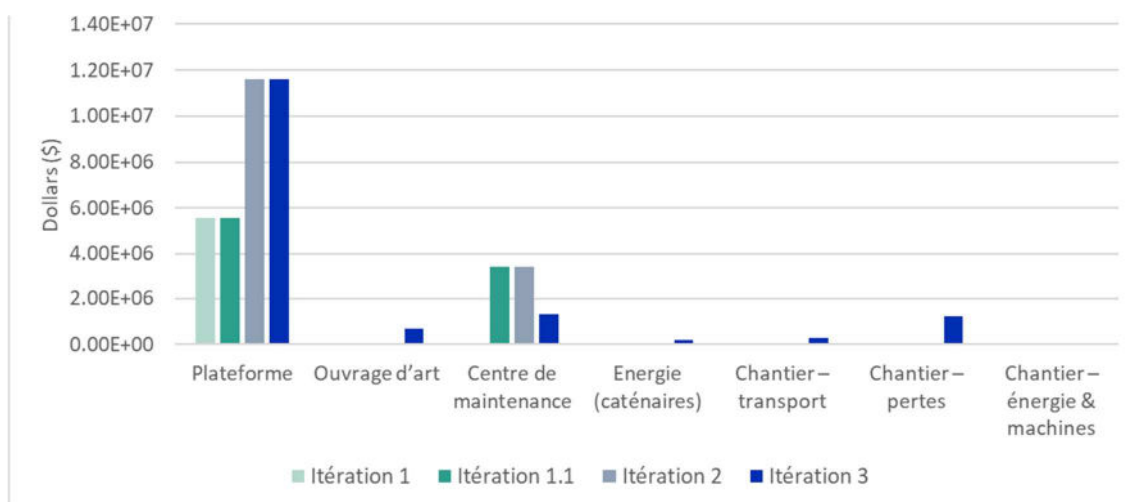


Figure 39 : Résultats de l'étude de ligne de tramway par poste – utilisation des ressources minérales et métalliques, Future Welfare Loss (GLAM 3)

- Dans l'itération 3, le béton associé à la plateforme du tramway représente plus de 66% des impacts totaux et le béton au global représente plus de 75% des impacts totaux, l'acier étant responsable de la majorité des impacts restants.
- Un facteur 3 existe entre l'itération 1 et l'itération 3. La différence majeure provient des impacts de la plateforme de tramway qui sont plus élevés dans l'itération 3.
- L'écart entre les itérations est également lié à la prise en compte d'éléments non contenus dans l'inventaire ecoinvent de base de la ligne de tramway.
- La modélisation du centre de maintenance avec l'inventaire « building construction, hall, steel construction » présente une différence très élevée (surestimation) par rapport aux itérations 2 et 3. Cet inventaire est indiqué comme étant de mauvaise qualité par ecoinvent.

6.3.4 Analyse de sensibilité

Inclusion/exclusion du cuivre des caténaires

Dans le document de collecte de données transmis par Artelia à RDC Environment, une première feuille détaille tous les éléments et une seconde feuille résume cela avec les matériaux principaux et leurs masses (bétons, aciers, grave, bitume). Cependant le cuivre des caténaires (env. 5 tonnes) n'était pas

pris en compte dans ce résumé car l'expérience d'Artelia à la réalisation d'analyse focalisées sur le bilan carbone indiquait que le cuivre pouvait être assimilé à de l'acier. Cependant, en ACV, d'autres indicateurs que l'indicateur d'impact sur le changement climatique sont pris en compte et ils peuvent être plus sensibles à certains éléments. Le cuivre étant un métal, son influence sur les indicateurs d'épuisement des ressources minérales et métalliques est peut-être non négligeable. Dans cette analyse de sensibilité, l'influence de la prise en compte des cinq tonnes de cuivre présentes dans les caténaires est étudiée. La prise en compte du cuivre des caténaires augmente de 31% l'indicateur d'impact ADP et de moins de 1% l'indicateur d'impact FWL (GLAM 3). Les deux indicateurs ne sont pas sensibles de manière similaire à la prise en compte du cuivre.

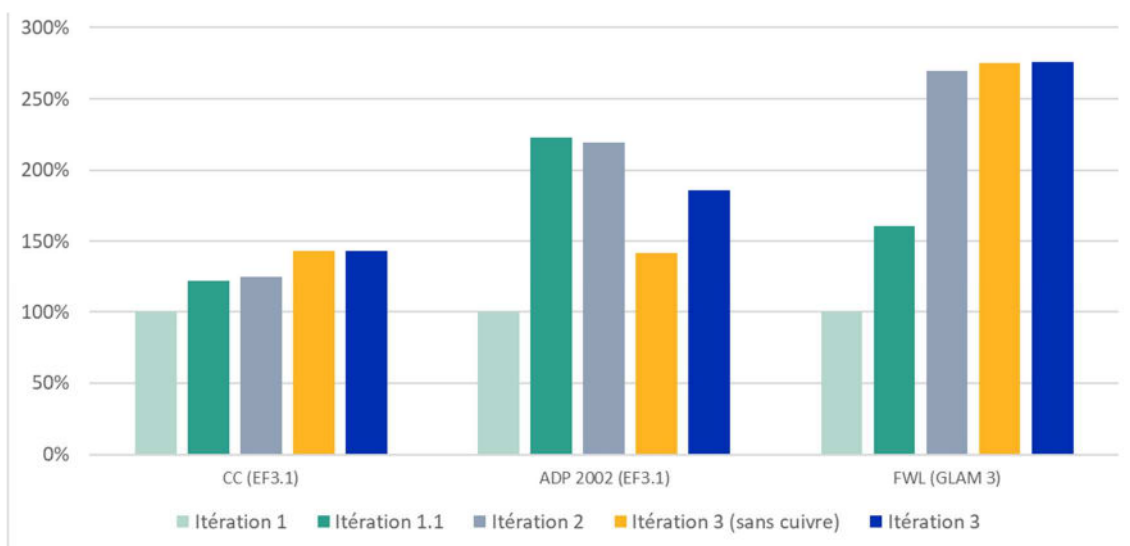


Figure 40 : Résultats de l'analyse de sensibilité sur le cas ligne de tramway

6.4 Conclusions générales des études de cas

Conclusion 1 : Les fiches méthodologiques développées dans le rapport se sont révélées globalement applicables aux cas d'études

Qu'il s'agisse d'infrastructures industrielles ou de transport. Elles ont permis de guider la définition des objectifs, la structuration des données, la modélisation des impacts et l'interprétation des résultats. Les fiches liées à la collecte de données spécifiques (fiches 6 à 8) n'ont pu être retranscrites que partiellement :

- par rapport à l'effort de collecte de données réalisé par Artelia étant donné la confidentialité des données employées. En annexe, les tableaux établis sous Excel sont présentés dans leur format complet ;
- Par rapport au temps disponible pour la réalisation des études de cas. En situation réelle, la modélisation ACV pourrait être plus poussée :
 - o Via une modélisation des matériaux selon leur grades, leur contenu en recyclé et procédés de transformation des matériaux différenciés selon les éléments modélisation ;
 - o Via une recherche systématique de DEP.

Vu le temps nécessaire à ces étapes : collecte de données + modélisation, la **construction d'un modèle par défaut avancé** (basé sur la production d'ACV des infrastructures antérieures) permettrait de gagner du temps pour l'évaluation de nouveaux projets.

Par ailleurs, la qualité de la modélisation dépend du degré d'avancement du projet : plus celui-ci est avancé, meilleure est la précision des données obtenues, ce qui améliore significativement la qualité et la fiabilité de l'étude.

Conclusion 2 : Les données ecoinvent sont pertinentes en première itération et suffisent en général pour les ACV produits à condition d'adapter l'inventaire à la situation étudiée.

La **modélisation initiale (itération 1)** reposant exclusivement sur ecoinvent constitue une **base rapide et facilement mobilisation**.

Les études de cas confirment que l'adaptation des données ecoinvent (itérations appelées 1.1 et 1.2) permet déjà une meilleure approximation des impacts des infrastructures à la situation ciblée. Il est donc nécessaire de détailler la modélisation réalisée par ecoinvent pour y faire les adaptations nécessaires.

Cependant, les limites de ces données génériques deviennent délicates, voire inacceptables, lorsque l'on passe à des analyses plus approfondies. De plus, elles introduisent une incertitude importante sur l'indicateur d'utilisation des ressources minérales et métalliques (sensible au type de métaux ou d'alliages employés).

Conclusion 3 : Les modélisations avec des données de terrain pour l'itération 2 (et 3 pour l'indicateur d'utilisation des ressources minérales et métalliques) permettent de réduire significativement l'incertitude en représentant mieux la diversité des éléments de l'infrastructure.

L'**itération 2**, qui intègre des quantités de matériaux pour les ensembles lourds, et l'**itération 3**, avec une modélisation affinée par élément, montrent que l'usage de **données spécifiques de terrain** pour les éléments lourds améliore significativement la précision.

Le passage à l'itération 3, montre des écarts plus faible sur l'indicateur de changement climatique confirmant que le passage à l'itération 2 pourrait suffire à remplir les objectifs de quantification simple d'un projet.

Tableau 56 : Temps de travail par itération et effet sur les résultats pour les trois cas d'études

	CC (EF3.1)	ADP 2002 (EF3.1)	FWL (GLAM 3)	Temps supplémentaire pour passer à l'itération suivante
Chimie fine				
Itération 1	100%	100%	100%	1 h
Itération 1.1 – Correction sur base de la production	2%	2%	2%	quelques heures supplémentaires (total itération 1 : 0.5 j)
Itération 1.2 – Correction surfacique	0.3%	0.3%	0.3%	
Itération 2	0.3%	0.1%	0.2%	×10
Itération 3	0.3%	0.1%	0.2%	×2.5
Batteries				
Itération 1	100%	100%	100%	1 h
Itération 1.1	22%	22%	22%	quelques heures supplémentaires (total itération 1 : 0.5 j)
Itération 2	4%	0.2%	3%	
Itération 3	9%	3%	11%	×2.3
Tramway				
Itération 1	100%	100%	100%	1 h
Itération 1.1	123%	223%	161%	quelques heures supplémentaires (total itération 1 : 0.5 j)
Itération 2	493%	464%	405%	
Itération 3	628%	477%	499%	×2

L'itération 3 est pertinente pour préciser le contenu en recyclé¹⁹, l'origine (si influence du mix électrique) ou le grade (si utilisation d'alliage). La présence de métaux non-ferreux peut avoir une influence notable sur l'indicateur d'utilisation des ressources minérales et métalliques ainsi que le poste « instrumentation » dans une moindre mesure.

De manière générale, le tableau ci-après présente les principaux matériaux couramment retrouvés dans les infrastructures ainsi que les paramètres clés pour les modéliser.

Matériau	Paramètres clés
Béton	<ul style="list-style-type: none"> • Classe de ciment (i.e. ratio clinker-ciment et autres composants) • Ratio ciment-béton • Pays de production
Acier (dont acier inoxydable)	<ul style="list-style-type: none"> • Filière de production (hauts-fourneaux ou à arc électrique) • Contenu en recyclé • Pays de production • Grade exact d'acier
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> • Contenu en recyclé • Pays de production

Conclusion 4 : Même avec une collecte de données à bonne source, il reste des éléments manquants significatifs dans la collecte de données

Dans le cadre des trois études de cas présentées, la collecte des données présente les manquements suivants :

- **Caractéristiques techniques détaillées des équipements et matériaux** : type précis d'acier (cette information est quand même parfois précisée), classe exacte de ciment (cette information est quand même parfois précisée), composition détaillée des matériaux composites, contenu en recyclé, composition des systèmes multi-matériaux
- **Précision sur les techniques de mise en œuvre des matériaux** : consommations énergétiques réelles pendant les phases de construction
- **Estimations insuffisamment intégrées des pertes sur chantier** et de la logistique détaillée : transport, méthodes de pose. Si les pertes sur chantier peuvent être prises en compte, il faut être vigilant à ne pas les doubles comptées. On peut soit avoir des données « d'approvisionnement de matériaux » qui contiennent déjà les pertes, soit des données de « mise en œuvre » qui ne contiennent pas les pertes. Si on utilise des données « d'approvisionnement de matériaux », il ne faut pas ajouter en plus des pertes puisqu'elles sont déjà prises en compte.
- **Informations sur les conditions réelles de maintenance et de remplacement des équipements** sur toute la durée de vie de l'infrastructure. Dans les CAPEX estimés par la maîtrise d'œuvre, la maintenance courante est incluse (e.g. maintenance légère nécessaire tous les 4 à 6 ans pour les infrastructures de procédés industriels). Cependant la maintenance de grande envergure est exclue des CAPEX estimés (e.g. maintenance nécessaire tous les 20 à 30 ans pour les infrastructures de procédés industriels).

Conclusion 5 : Même avec une collecte de données à bonne source, des étapes sont difficiles à intégrer

Pour être complètes, les études auraient dû :

¹⁹ En particulier, le cas d'étude 1 a permis de démontrer que l'adaptation du taux de contenu recyclé de l'acier (de 56% à 0%) a fait augmenter la contribution de l'infrastructure au changement climatique de 75 %.

- intégrer **l'ensemble des phases de vie**, notamment l'exploitation et la maintenance ;
- caractériser davantage **les services rendus** (performance, durabilité, fiabilité) ;
- prendre en compte **les équipements techniques et les composants secondaires** (câblage, réseaux, mobilier technique), souvent négligés.
- **Analyser plus en profondeur la fin de vie des infrastructures** pour identifier les parties pouvant être recyclées.
- **Prendre en compte les aspects dynamiques, essentiellement** le fait que la fin de vie n'aura lieu que dans plusieurs dizaines d'années ; cela influence le scénario (réutilisation, recyclage ou autre) mais aussi les technologies de traitement et les impacts évités grâce au recyclage.

Une ACV d'un projet d'infrastructure devrait être réalisée en prenant en compte les recommandations de l'étude ScoreLCA 2023-02 : Dimension dynamique en ACV.

- **Prendre en compte des impacts locaux** (biodiversité, eau et nuisances locales comme le bruit).

Conclusion générale : il y a un intérêt majeur à approfondir la modélisation des infrastructures, quand elles sont l'objet même de l'ACV

Les études de cas confirment l'intérêt majeur d'une démarche ACV structurée pour la modélisation des infrastructures. Elles soulignent aussi clairement que la fiabilité et l'utilité des résultats obtenus dépendent de la qualité et de la précision des données utilisées ainsi que de la pertinence du cadre méthodologique adopté. Ces points constituent les axes prioritaires à intégrer dans les futures démarches ACV des infrastructures pour les rendre réellement utiles à la prise de décision, l'éco-conception et l'optimisation environnementale des projets.

7 Recommandations

Recommandation 1 : Adopter une démarche itérative progressive

Il est recommandé d'utiliser une première itération simplifiée avec des hypothèses majorantes de l'impact (notamment via les bases de données ACV) pour identifier les postes à fort impact. Les données d'inventaires des bases de données pourront être adaptées via l'utilisation de facteurs correctifs basés sur le paramètre le plus pertinent pour l'étude (surface, longueur de voie, quantité produite annuellement...). Cette première modélisation sert de base pour des itérations suivantes plus détaillées, intégrant des données spécifiques et de meilleure qualité là où nécessaire.

La seconde itération intégrera les données spécifiques du projet pour les ensembles lourds (béton, ciment, acier, aluminium, machines) et l'itération 3 focalisera sur l'affinage des éléments lourds comme le grade de matériau, l'origine, la quantité de matériaux recyclés incorporés.

L'approche itérative est présentée en figure à la fin de ce chapitre.

Recommandation 2 : Une définition claire des objectifs et du champ de l'étude permet de calibrer l'effort à fournir pour l'ACV des projets et infrastructures

L'unité fonctionnelle doit refléter le service réel de l'infrastructure (transport, hébergement d'activité, traitement, etc.), en intégrant des paramètres tels que durée de vie, intensité d'usage, localisation et performance attendue.

Les infrastructures fournissent des services qui doivent être quantifiés dès les premières étapes de l'étude. Ces informations sont trop peu détaillées dans les bases de données, ce qui rend donc difficile toute comparaison et réutilisation ultérieure des données.

La durée de vie de l'infrastructure est également clé. Cette information est généralement disponible dans les documents à disposition du maître d'œuvre. Afin de ne pas négliger la maintenance, dont les principaux impacts se situent au moment du remplacement de l'élément de l'infrastructure, des durées de vie différenciées par grands éléments de l'infrastructure pourront être établies au moment de la collecte de données.

Recommandation 3 : Travailler avec une vision multi-indicateurs en utilisant prioritairement les catégories d'impacts recommandées par l'EN 15804 :2012 + A2 2019, ainsi que l'indicateur Future Welfare Loss pour les ressources

De nombreuses DEP sont publiées par les fabricants de matériaux et équipements du bâtiment. Afin de pouvoir utiliser les impacts environnementaux de ces éléments, l'étude doit employer les mêmes méthodes.

Par ailleurs, la vision multi-indicateur permet de ne pas passer à côté de certains contributeurs forts qui n'apparaîtraient pas avec l'indicateur de changement climatique.

C'est particulièrement vrai avec l'indicateur d'utilisation des ressources minérales et métalliques qui sera particulièrement sensible à l'utilisation de ressources métalliques non ferreuses qui sont rarement quantifiées dans les premières itérations de calcul. L'utilisation d'un second indicateur (comme l'indicateur Future Welfare Loss diffusé par le GLAM 3²⁰ pour les études de cas) permet également de renforcer (améliorer) l'interprétation de cette catégorie d'impact très sensible à certaines hypothèses de modélisation dans les bases de données.

²⁰ <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/life-cycle-assessment-data-and-methods/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-and-methods-glam/>

Recommandation 4 : Limiter l'usage des données des bases de données aux cas où leur impact est marginal

Les données ecoinvent infrastructures, souvent anciennes et peu détaillées, peuvent être utilisées uniquement si l'infrastructure ne représente qu'une faible part des impacts globaux. Ce sera donc le cas dans la plupart des ACV produits.

Les études de cas sur les infrastructures industrielles ont montré que l'utilisation des données ecoinvent par défaut produit une surestimation des impacts de 1 à 2 ordres de grandeur (par rapport à la réalité quantifiée dans les études de cas avec les itérations 2 ou 3). L'adaptation des données ecoinvent via un facteur correctif pour obtenir une infrastructure amortie sur la même quantité de produits sortants ou la même surface produit une surestimation de 0 à 1 ordre de grandeur.

Cette recommandation ne peut être établie pour le cas des infrastructures de transport en se basant sur le cas d'étude de la ligne de tramway qui montre une sous-estimation d'un facteur 5 de la donnée ecoinvent par rapport à la réalité.

Recommandation 5 : Structurer la collecte de données par phase projet et collaborer étroitement avec les acteurs techniques

La collecte des données lors d'une ACV d'infrastructure implique généralement une grande diversité de sources (CCTP, DQE, DOE, maquettes BIM...) et une multiplicité d'acteurs impliqués (maîtres d'œuvre, maîtres d'ouvrage, fournisseurs).

Les documents disponibles (et donc la granulométrie des données disponibles) dépendent du stade d'avancement du projet (APS, APD, PRO, construction, etc.).

La collecte de données sera facilitée par la mise en place d'un référentiel commun de données ou un tableau de correspondance systématique entre les formats techniques des équipes d'ingénierie (volumes, mètres linéaires, etc.) et les formats requis pour l'ACV (masses, type et grade des matériaux, contenu en recyclé, origine).

Une infrastructure pouvant être constituée de très nombreux petits éléments, il est nécessaire de passer par une phase de regroupement par catégories, sous-catégories afin de faire l'effort de collecte de données détaillée sur un élément représentatif de la sous-catégorisation créée.

Recommandation 6 : Hiérarchiser les efforts de collecte de données selon les hotspots

La phase d'inventaire étant chronophage, il convient de concentrer les efforts sur les éléments ayant le plus d'influence environnementale et d'utiliser des approximations ou des valeurs génériques pour les postes mineurs ou communs à plusieurs alternatives. L'approche itérative doit donc être précédée d'une analyse des hotspots et d'analyses de sensibilité simples à priori afin de valider si les efforts de collecte de données supplémentaires permettront un réel gain en précision dans les résultats finaux.

Recommandation 7 : intégrer l'écoconception des infrastructures dès les premières phases du projet.

L'écoconception des infrastructures est grandement facilitée lors des toutes premières phases du projet (programmation, conception préliminaire, esquisse), c'est-à-dire tant que les marges de manœuvre sont maximales et que les grandes orientations ne sont pas figées.

Une fois que le projet est entré dans des phases d'avant-projet ou de projet détaillé, la capacité à influencer sur la conception et donc sur les impacts environnementaux est fortement réduite.

Il est indispensable d'adopter une approche globale :

- Les choix de conception doivent être évalués à l'échelle du système (et pas élément par élément), car la modification d'un paramètre (par exemple, un changement de matériau) peut avoir des conséquences sur les autres éléments (structure, maintenance, usages, coût global, etc.).
- Les arbitrages doivent donc porter sur des ensembles cohérents d'options techniques, et non sur des modifications ponctuelles.

Le recours à des modélisations simplifiées sera donc nécessaire et devra être renforcé par l'analyse de sensibilité pour identifier si les choix d'écoconceptions pourraient être remis en cause lors d'obtention de données plus précises en phases aval du projet.

Recommandation 8 : Structurer les données de projet pour faciliter l'ACV et renforcer l'utilisation d'outils numériques avancés (BIM)

Les maîtres d'œuvre doivent être encouragés à structurer les données dès la conception selon les besoins de l'ACV (masses, types de matériaux, spécificités techniques), via des DQE ou exports BIM normalisés, pour éviter des allers-retours coûteux et limiter les hypothèses.

Il est nécessaire de développer l'interopérabilité entre les maquettes BIM et les outils d'ACV existants, pour gagner en précision, rapidité et efficacité des évaluations. Dans un premier temps, les maquettes BIM pourraient à minima permettre de quantifier les équipements récurrents/normés (fondations, tuyauterie, ...) et les équipements spécialisés seraient quantifiés « à la main ».

A terme, l'ACV pourrait être directement intégrée au sein des outils de modélisation numérique du bâtiment (BIM), facilitant ainsi la mise à jour rapide des résultats d'impact environnemental au fur et à mesure de l'évolution du projet.

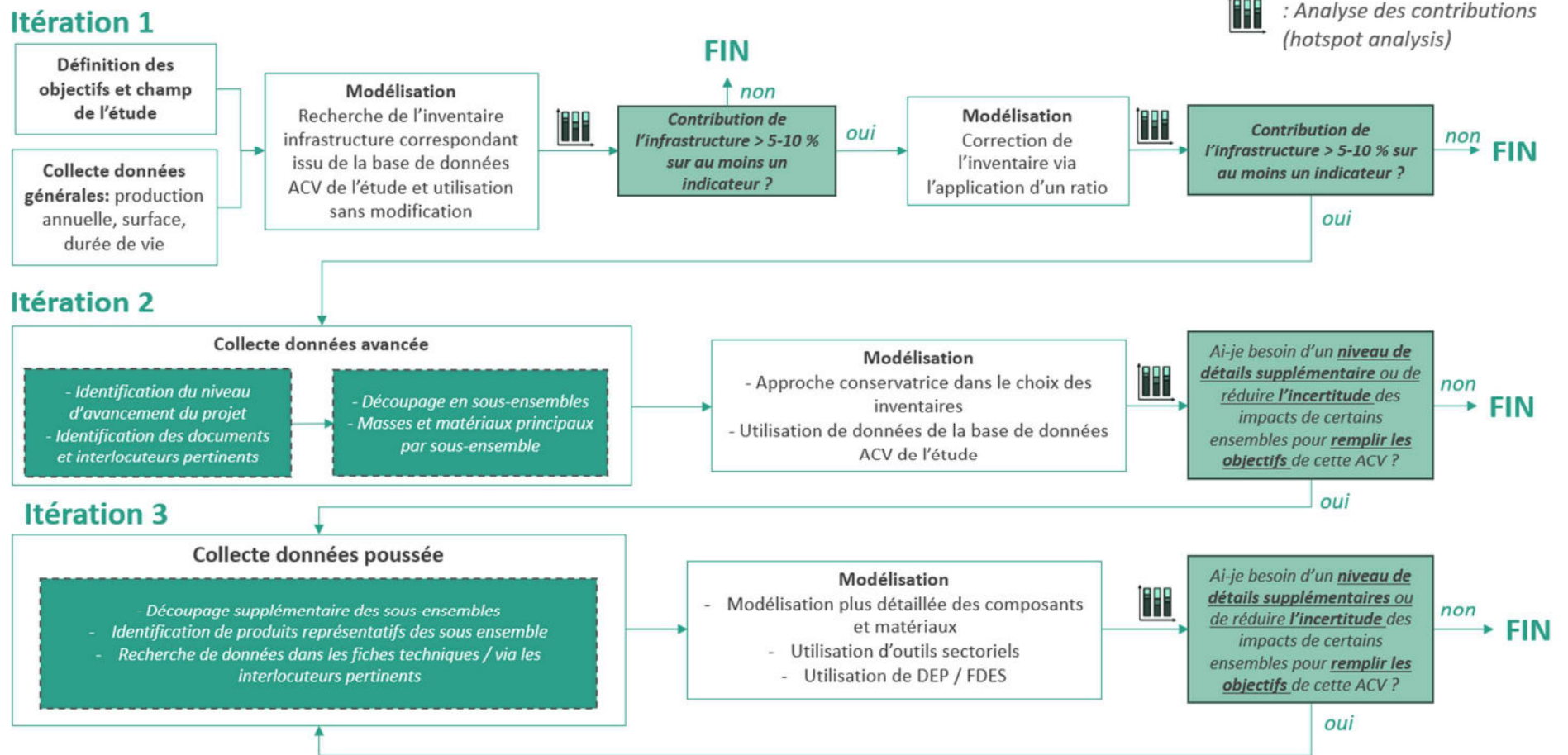


Figure 41 : L'approche itérative pour la modélisation des infrastructures en ACV

8 Bibliography

- A. Feraille, T. D. (2022). L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton. *JACV*.
- AACE International. (s.d.). *AACE International Recommended Practice No. 18R-97 : COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES*.
- ADEME. (2016). *BASE IMPACTS@ DATA DOCUMENTATION - CATEGORY: METALS*.
- ADEME. (2022). *Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre*.
- ADEME. (2022). *Principes généraux pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation - Partie 0 : Principes généraux et cadre méthodologique - Rapport Final*. Consulté le 10 30, 2024
- Advenser. (s.d.). *Understanding BIM LOD, Levels and LOI: Navigating the Depths of Building Information Modeling*. Consulté le 11 04, 2024, sur <https://www.advenser.com/2023/09/28/understanding-bim-lod-levels-and-loi-navigating-the-depths-of-building-information-modeling/>
- Alexander Hollberg, J. R. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 943-960. doi:10.1007/s11367-016-1065-1
- Alyson Kim, P. R.-D. (2022). OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. doi:10.1088/2634-4505/ac8a6d
- (2012). *Arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments autres que ceux concernés par l'article 2 du décret du 26 octobre 2010 relatif aux* . Récupéré sur <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- ARUP. (s.d.). *Gas and LNG Storage - The Future of Modular LNG Tanks*. Consulté le 01 2025, sur https://www.academia.edu/35739516/Gas_and_LNG_Storage
- Association du P.E.P. (2021). *PCR Règles de définition des catégories de produits relatives aux équipements électriques, électroniques et de génie climatique*. Récupéré sur <https://register.pep-ecopassport.org/documents/public/PCR-4-FR>
- Audi, Y. (2016). *Développement d'une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains*. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-02990862>
- Autodesk. (s.d.). *Levels of Development in BIM: Enabling coordination and collaboration*. Consulté le 10 31, 2024, sur <https://www.autodesk.com/solutions/bim-levels-of-development>
- Bonnet, R., Hallouin, T., Lasvaux, S., & Galdric, S. (2014). Simplified and reproducible building Life Cycle Assessment: Validation tests on a case study compared to a detailed LCA with different user's profiles. *World SB14 Barcelona Conference*. Barcelona.
- BSI. (2011). *PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the*.
- CEN/CENELEC. (s.d.). *EN 15804:2012+A2:2019 - Contribution des ouvrages de construction au développement*.
- Centre d'Information sur les Emballages Recyclés en Acier. (s.d.). *L'acier, c'est quoi ?* Consulté le 11 05, 2024, sur https://packaging.arcelormittal.com/repository2/fce/Fiche_1_acier_cest_quoi.pdf
- CEREMA. (2021, 12 03). *RE2020, EN ROUTE VERS LA FUTURE*. Consulté le 11 02, 2024, sur CEREMA: https://www.cerema.fr/system/files/documents/2021/12/ctt_re2020.pdf
- CEREMA Méditerranée, Ministère de la Transition Ecologique. (2024). *Guide RE2020 : Eco-construire pour le confort de tous*. Consulté le 10 16, 2024, sur https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/guide_re2020_version_janvier_2024.pdf
- CERIB. (2022, 07 01). Consulté le 11 05, 2024, sur <https://www.cerib.com/impact-carbone-des-laitiers-de-haut-fourneau-utilises-dans-les-ciments/>
- Chirjiv Kaur Anand, B. A. (2017, January). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 408-416. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Ciments Calcia. (s.d.). *Les classes de ciments*. Consulté le 10 23, 2024, sur <https://www.ciments.heidelbergmaterials.fr/fr/produits-services/classes-de-ciments>

- Commission Européenne. (2021). *Recommendation on the use of Environmental Footprint methods - Annex 1 to 2*.
- Commission Européenne. (s.d.). *Recommendation on the use of Environmental Footprint methods - Annex 3 to 4*.
- Cristiane Bueno, M. M. (2018). Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. *Automation in Construction*, 90, 188-200. doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>
- CSTB. (s.d.). *BENEFIS : Pour des analyses de cycle de vie (ACV) des bâtiments fiables, simples et reproductibles - Adapter la méthodologie aux acteurs*. Consulté le 11 04, 2024, sur https://www.construction21.org/france/community/action/file/download?file_guid=20738
- Dalia M. A. Morsi, W. S. (2022). BIM-based life cycle assessment for different structural system scenarios of a residential building. *Ain Shams Engineering Journal*, 13. doi:10.1016/j.asej.2022.101802
- De Bortoli, A., Bouhaya, L., & Féraillé Fresnet, A. (2020). *A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France*. doi:10.1007/s11367-019-01727-2
- (2021). *Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine*. Récupéré sur <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>
- Définition des exigences RE2020 applicables à de nouvelles typologies de bâtiments (tertiaire hors bureaux, industriel)*. (2023, 03 27). Consulté le 10 29, 2024, sur <https://rt-rebatiment.developpement-durable.gouv.fr/definition-des-exigences-re2020-applicables-a-de-a702.html>
- DRAGOPAINT. (2021). *B-EPD n° 21-0127-011-00-00-EN*. Federal Public Service of Health, Food Chain Safety and Environment.
- E. Hoxha, R. R. (2020). Life cycle assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of urban roads: a literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi:10.1088/1755-1315/588/3/032032
- Ecopassport, P. (2022). *PSR0001 - Fils, câbles et matériels de raccordement*. EN 15804. (s.d.).
- énergétique, M. d. (s.d.). *Panorama français des gaz à effet de serre*. Consulté le 11 26, 2024, sur <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/en/9-french-overview-of-greenhouse-gases>
- EPD Norge. (2019). *General Programme Instructions*. Récupéré sur <https://www.epd-norge.no/getfile.php/1340010-1685100696/Dokumenter/GPI%20Det%20norske%20EPD%20programmet%20approved%20240419%20-%20ver3%20updated%20250523.pdf>
- Fabian Prideaux, K. A. (2024). Integrating life cycle assessment into the building design process - a review. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 4(2). doi:10.1088/2634-4505/ad3577
- Fazio S., Zampori L., De Schryver A., Kusche O., Thellier L., Diaconu E. (2020). *Guide for EF compliant data sets*.
- Fédération Française du Bâtiment. (2021, 10 19). *Qu'est-ce que le BIM ?* Consulté le 10 30, 2024, sur <https://www.ffbatiment.fr/techniques-batiment/bim-transformation-numerique/accompagnement-mise-en-pratique-bim/dossier/qu-est-ce-que-le-bim>
- Fédération Française du Bâtiment. (2024). *Le bâtiment en chiffres 2023*.
- Feng, H., Jianfeng, Z., Haonan, Z., Shiyao, Z., Dezhi, L., & Niraj, T. (2022). Uncertainties in whole-building life cycle assessment: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. doi:10.1016/j.jobe.2022.104191
- Gervasio, H., & Dimova, S. (s.d.). *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*. JRC Technical Reports. Récupéré sur https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC110082/report_d1_online_final.pdf
- GHG Protocol. (s.d.). *Technical Guidance for Calculating Scope 3 Emissions (version 1.0)*.

- Haibo Feng, J. Z. (2022). Uncertainties in whole-building life cycle assessment: A systematic review. *Journal of Building Engineering*. doi:10.1016/j.jobee.2022.104191
- Hugo Henrique de Simone Souza, P. P.-i.-P. (2021). Functional unit influence on building life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(3), 435-454. doi:10.1007/s11367-020-01854-1
- InfoCiments. (2019, 05). *La cuisson*. Consulté le 11 05, 2024, sur <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/la-cuisson>
- InfoCiments. (2022, 08). *Fenêtre sur... l'Ecole Française du Béton (EFB) : le broyage du ciment*. Consulté le 11 04, 2024, sur <https://www.infociments.fr/ciments/fenetre-sur-lecole-francaise-du-beton-efb-broyer>
- InfoCiments. (2022, 03). *Les ciments "bas carbone" : de nouveaux mélanges ternaires*. Consulté le 11 20, 2024, sur <https://www.infociments.fr/ciments/les-ciments-bas-carbone>
- INIES. (s.d.). *Autres données de la base INIES*. Consulté le 11 02, 2024, sur <https://www.inies.fr/inies-et-ses-donnees/autres-donnees-de-la-base-inies/>
- INIES. (s.d.). *Comment demander la création et/ou la mise à jour d'une Donnée Environnementale par Défaut (DED) ?* Consulté le 11 04, 2024, sur <https://www.inies.fr/faq/comment-demander-la-creation-et-ou-la-mise-a-jour-dune-donnee-environnementale-par-defaut-ded/>
- INIES, B. (2022, 12 15). *Règlement du programme de vérification INIES*. Récupéré sur Base INIES: https://www.inies.fr/wp-content/uploads/2021/06/Reglement_du_programme_INIES_novembre2022_valide_pour_diffusion.pdf
- INRS. (2019). *Travailler dans une ambiance thermique froide*.
- INRS. (2022). *Hygrométrie inférieure à 10% : quels sont les risques pour la santé*.
- Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU). (2022). *Product Category Rules for building products Part A (EN 15804+A1) - Part A: Calculation Rules for the Life Cycle Assessment and Requirements on the Project Report*. Récupéré sur <https://epd-online.com/EpdInformation/Download?type=1>
- Investopedia. (2024, 06). *Capital Goods: Types, Examples, vs. Consumer Goods*. Consulté le 12 2024, sur <https://www.investopedia.com/terms/c/capitalgoods.asp>
- ISO. (s.d.). *ISO 14025 - Marquage et déclarations environnementaux - Déclarations environnementales de Type III - Principes et modes opératoires*.
- J. Basbagill, F. F. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 81-92.
- Josefine A. Olsson, S. A. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619>
- Julia Martínez-Blanco, S. F. (2020). Challenges of organizational LCA: lessons learned from road testing the guidance on organizational life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(2), 311-331. doi:10.1007/s11367-019-01699-3
- Karen Saavedra-Rubio, N. T. (2022). Stepwise guidance for data collection in the life cycle inventory (LCI) phase: Building technology-related LCI blocks. *Journal of Cleaner Production*(366). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132903>
- Lebert, A. S. (2013). Toward an accurate, simple and reproducible, energy and environmental assessment of buildings: the Benefis project. *[avniR] 3rd International LCA conference*.
- Luisa F. Cabeza, L. R. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 394-416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037
- Majid Bahramian, K. Y. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings*, 219. doi:10.1016/j.enbuild.2020.109917
- Martin Röck, A. H. (2018). LCA and BIM: Integrated Assessment and Visualization of Building Elements' Embodied Impacts for Design Guidance in Early Stages. *Procedia CIRP*, 69, 218-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.087>
- Matthias Buyle, J. B. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 379-388. doi:10.1016/j.rser.2013.05.001

- Maxime Agez, E. M.-J.-B. (2022). Correcting remaining truncations in hybrid life cycle assessment database compilation. *Journal of Industrial Ecology*, 121-133.
- Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires. (2023). *Procédure de développement de données environnementales par défaut (DED) relatives aux produits de construction et équipements pour une utilisation dans la méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs*.
- Ministère de la Transition Energétique. (s.d.). *Global overview of GHG emissions*. Consulté le 11 26, 2024, sur <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/en/5-global-overview-of-ghg-emissions>
- Ministère du Partenariat avec les territoires et de la décentralisation. (2024, 06 04). *Définition des exigences RE2020 applicables à de nouvelles typologies de bâtiments (tertiaire hors bureaux, industriel)*. Consulté le 10 31, 2024, sur <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/definition-des-exigences-re2020-applicables-a-de-a702.html>
- Mohammad Najjar, K. F. (2017). Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *Journal of Building engineering*, 14, 115-126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2017.10.005>
- Mohammad Najjar, K. F. (2017). Integration of BIM and LCA: evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *Journal of Building Engineering*, 115-126. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2017.10.005>
- NF EN 15978. (s.d.).
- Olubanjo Olugbenga, N. K. (2019). *Embodied emissions in rail infrastructure: a critical literature review*. doi:10.1088/1748-9326/ab442f
- Olubukola Tokede, R. R. (2023). Problematic consequences of the inclusion of capital goods inventory data in Environmental Product Declarations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Volume 29, 1-24.
- PEP Ecopassport. (2023). *PSR0008 - Équipements de ventilation, de traitement d'air, de filtration et de désenfumage mécanique*.
- PEP Ecopassport. (2023). *PSR0019 - Systèmes de Sécurité Incendie*.
- Pittsburgh Corning Europe. (2020). *B-EPD n° 200010_001_EN*. Federal Public Service of Health, Food Chain Safety and Environment.
- Potrč Obrecht T, R. M. (2020). BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su12145534>
- (2024). *Product Category Rules for Building-Related Products and Services - Part A: Calculation Rules for the Life Cycle Assessment and Requirements on the Project Report according to EN15804+A2:2019*. Récupéré sur <https://epd-online.com/EpdInformation/Download?type=2>
- R. Navia, B. R. (2006). Recycling contaminated soil as alternative raw material in cement facilities: Life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(4), 339-356. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.01.007>
- Rolf Frischknecht, H.-J. A. (2007, 08). The Environmental Relevance of Capital Goods in Life Cycle Assessments of Products and Services. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12. doi:10.1065/lca2007.02.309
- RT-RE-bâtiment . (2024, 06 13). *Evaluation des logiciels*. Consulté le 11 02, 2024, sur <https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/evaluation-des-logiciels-a619.html>
- Sansom, M., & Meijer, J. (2002). *Life-cycle assessment (LCA) for steel construction*. European Commission.
- Sante publique, sécurité de la chaîne alimentaire et environnement. (2017). *B-EPD Principes Généraux (v1.1)*. Récupéré sur <https://www.health.belgium.be/fr/b-epd-principes-generaux-du-programme-epd-belge-du-spf-sante-publique-v11>
- SCORE LCA. (2022). *Usages des sols en ACV : Indicateurs et prise en compte de la ressource foncière*.
- SCORE LCA. (2023). *Dimension dynamique en ACV*.
- Sebastian Theißen, J. H.-B. (2020). Using Open BIM and IFC to Enable a Comprehensive Consideration of Building Services within a Whole-Building LCA. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su12145644>

- Sébastien Lasvaux, G. H. (2015). Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1473–1490.
- Sébastien Maitenaz, A. S. (2021). Analyse de la part des aciers de construction dans l'impact environnemental des ouvrages en béton armé. *GC'*. Cachan.
- Sibué, H. (2020, 03 03). Consulté le 10 31..., 2024, sur <https://www.mydigitalbuildings.com/blog/definir-le-niveau-de-detail-lod-de-sa-maquette-bim>
- Sibué, H. (2020, 03 03). *Définir le niveau de détail (LOD) de sa maquette BIM*. Consulté le 10 31, 2024, sur <https://www.mydigitalbuildings.com/blog/definir-le-niveau-de-detail-lod-de-sa-maquette-bim>
- Silvia Forin, J. M.-B. (2019). Facts and figures from road testing the guidance on organizational life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24.
- Soust-Verdaguer, B. (2023). Using systematic building decomposition for implementing LCA: The results of a comparative analysis as part of IEA EBC Annex 72. *Journal of Cleaner Production*.
- Statista. (s.d.). *Production de béton prêt à l'emploi en France 2013-2021*. Consulté le 11 04, 2024, sur <https://fr.statista.com/statistiques/867598/production-beton-fini-france/>
- Takuma Watari, Z. C. (2022). Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. *Nature Communications*. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-022-31806-2>
- The EPD International. (2022). PCR 2013:20 - HIGHWAYS, STREETS AND ROADS.
- The EPD International. (2024). C-PCR-022 (TO PCR 2019:14) - ROAD INFRASTRUCTURE.
- The EPD International. (2024). *General Programme Instructions for The International EPD System (v5.0)*.
- UNEP. (2018). *International Energy Agency and the United Nations Environment Programme (2018): 2018 Global Status Report*.
- UNEP SETAC. (2011). *Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases*. Consulté le 12 2024, sur <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Global%20Guidance%20Principles.pdf>
- United Nations Environment Programme. (s.d.). *Guidance on Organizational Life Cycle Assessment*.
- Vinicius Rodrigues, A. A. (2018). LCA of constructing an industrial building: focus on embodied carbon and energy. *5th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2018, 23-27 July 2018*, (pp. 420-425). Prague. doi:10.1016/j.egypro.2018.10.018
- Wikipedia. (s.d.). *Production d'acier*. Consulté le 11 05, 2024, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_d%27acier

Table des tableaux

TABLEAU 1 : DEFINITIONS DES TERMES « BATIMENT » ET « INFRASTRUCTURE »	9
TABLEAU 2 : DEFINITIONS DU TERME « BIENS CAPITAUX ».....	10
TABLEAU 3 : INCLUSION DES REFERENTIELS DANS LES REFERENTIELS ACV CLES	12
TABLEAU 4 : PART DES IMPACTS CAUSES PAR LA FABRICATION DE BIENS D'EQUIPEMENT SUR LES TOTAUX CUMULES	13
TABLEAU 5 : NOMBRE D'INVENTAIRES CLASSES "INFRASTRUCTURE" DANS SIMAPRO PAR SOUS-CATEGORIE...	15
TABLEAU 6 : EXTRAIT DU (AAACE INTERNATIONAL RECOMMENDED PRACTICE NO. 18R-97) (TRADUIT DE L'ANGLAIS)	27
TABLEAU 7 : CONTENU EN CIMENT DANS LES INVENTAIRES BETON ECOINVENT.....	33
TABLEAU 8 : PRINCIPAUX INVENTAIRES WORLDSTEEL DISPONIBLES DANS SIMAPRO.....	36
TABLEAU 9 : CONTRIBUTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DES PRINCIPAUX INVENTAIRES WORLDSTEEL SELON LA ZONE GEOGRAPHIQUE.....	38
TABLEAU 10 : CONTRIBUTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DES ICV SUR LA PRODUCTION D'ALUMINIUMS PRIMAIRE ET SECONDAIRE	40
TABLEAU 11 : ELEMENTS INCLUS ET EXCLUS DANS LE CAS D'ETUDE SUR LA CHIMIE FINE	74
TABLEAU 12 : EXEMPLE FICTIF DE TABLEAU COMPLEMENTAIRE	76
TABLEAU 13 : INVENTAIRES DE CYCLE DE VIE « INFRASTRUCTURE » DISPONIBLES DANS ECOINVENT ET QUI PEUVENT ETRE ASSOCIES A DES USINES DU SECTEUR CHIMIE	76
TABLEAU 14 : AUTRES INVENTAIRES ECOINVENT « PARTIELS » IDENTIFIES	76
TABLEAU 15 : DESCRIPTION DE L'INVENTAIRE ECOINVENT IDENTIFIE POUR LA REALISATION DU CAS D'ETUDE CHIMIE FINE	77
TABLEAU 16 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 1 SUR LE CAS CHIMIE FINE	78
TABLEAU 17 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR LA CHIMIE FINE EN ITERATION 2	78
TABLEAU 18 : ICV EMPLOYES POUR LA MODELISATION DU CAS D'ETUDE SUR LA CHIMIE FINE EN ITERATION 278	
TABLEAU 19 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 2 SUR LE CAS CHIMIE FINE	78
TABLEAU 20 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR LA CHIMIE FINE EN ITERATION 3	79
TABLEAU 21 : ICV EMPLOYES POUR LA MODELISATION DU CAS D'ETUDE SUR LA CHIMIE FINE EN ITERATION 379	
TABLEAU 22 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 3 SUR LE CAS CHIMIE FINE	80
TABLEAU 23 : RESULTATS TOTAUX PAR ITERATION SUR LE CAS D'ETUDE CHIMIE FINE	80
TABLEAU 24 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE (EF3.1) .	82
TABLEAU 25 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1)	83
TABLEAU 26 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3)	84
TABLEAU 27 : COMPOSITION D'UN MOTEUR SELON DIFFERENTES SOURCES	85
TABLEAU 28 : ELEMENTS INCLUS ET EXCLUS DANS LE CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIE	87
TABLEAU 29 : INVENTAIRES DE CYCLE DE VIE « INFRASTRUCTURE » DISPONIBLES DANS ECOINVENT ET QUI PEUVENT ETRE ASSOCIES A DES USINES DE BATTERIES	89
TABLEAU 30 : DESCRIPTION DE L'INVENTAIRE ECOINVENT IDENTIFIE POUR LA REALISATION DU CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIES EN ITERATION 1.....	89
TABLEAU 31 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 1 SUR L'USINE DE BATTERIES	90
TABLEAU 32 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIES EN ITERATION 2	90
TABLEAU 33 : ICV EMPLOYES POUR LA MODELISATION DU CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIES EN ITERATION 2	91
TABLEAU 34 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 2 SUR LE CAS USINE DE BATTERIES	91
TABLEAU 35 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIES EN ITERATION 3 (NON EXHAUSTIF).....	91
TABLEAU 36 : EXEMPLE D'ESTIMATIFS REALISES POUR ETABLIR LES MASSES ETUDIEES EN ITERATION 3	92
TABLEAU 37 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 3 SUR LE CAS SUR L'USINE DE BATTERIES	92

TABLEAU 38 : RESULTATS TOTAUX PAR ITERATION SUR LE CAS D'ETUDE SUR L'USINE DE BATTERIES	93
TABLEAU 39 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS SUR LES BATTERIES PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE ..	94
TABLEAU 40 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1).....	95
TABLEAU 41 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3).....	96
TABLEAU 42 : ELEMENTS INCLUS ET EXCLUS DANS LE CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY.....	99
TABLEAU 43 : INVENTAIRES DE CYCLE DE VIE « INFRASTRUCTURE » DISPONIBLES DANS ECOINVENT ET QUI PEUVENT ETRE ASSOCIES A UNE LIGNE DE TRAMWAY.....	100
TABLEAU 44 : DESCRIPTION DE L'INVENTAIRE ECOINVENT IDENTIFIE POUR LA REALISATION DU CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY EN ITERATION 1	100
TABLEAU 45 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 1 SUR LA LIGNE DE TRAMWAY.....	101
TABLEAU 46 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY EN ITERATION 2	101
TABLEAU 47 : ICV EMPLOYES POUR LA MODELISATION DU CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY EN ITERATION 2	101
TABLEAU 48 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 2 SUR LE CAS LIGNE DE TRAMWAY	102
TABLEAU 49 : PRINCIPAUX ELEMENTS ET MASSES DU CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY EN ITERATION 3	102
TABLEAU 50 : ICV EMPLOYES POUR LA MODELISATION DU CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY EN ITERATION 3	102
TABLEAU 51 : TEMPS DE TRAVAIL ASSOCIE A L'ITERATION 3 SUR LE CAS SUR LA LIGNE DE TRAMWAY.....	103
TABLEAU 52 : RESULTATS TOTAUX PAR ITERATION SUR LE CAS D'ETUDE SUR LA LIGNE DE TRAMWAY	104
TABLEAU 53 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS VOIE DE TRAMWAY PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE	105
TABLEAU 54 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS VOIE DE TRAMWAY – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1)	105
TABLEAU 55 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS VOIE DE TRAMWAY – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3)	107
TABLEAU 56 : TEMPS DE TRAVAIL PAR ITERATION ET EFFET SUR LES RESULTATS POUR LES TROIS CAS D'ETUDES	109
TABLEAU 57 : LISTE DES PCR ETUDIES ET ISSUS DU PROGRAMME THE EPD INTERNATIONAL SYSTEM	128
TABLEAU 58 : LISTE DES RCP ETUDIES ET ISSUS DU PROGRAMME EPD ITALY.....	128

Table des figures

FIGURE 1 : ILLUSTRATION DES ETAPES DU CYCLE DE VIE ET MODULES POUR L'ÉVALUATION DES OUVRAGES (EN 15804)	6
FIGURE 2 : NOMBRE D'INVENTAIRES CLASSES "INFRASTRUCTURES" DANS SIMAPRO PAR SECTEUR	16
FIGURE 3 : VALEUR DE $I_{c,CONSTRUCTION_MAXMOYEN}$ REPRESENTANT LA VALEUR DU SEUIL MAXIMAL STANDARD DE LA RE2020 QUI EST ENSUITE PONDERE PAR DES FACTEURS COMPLEMENTAIRES ($M_{i,COMBLES}$, $M_{i,SURF}$, $M_{i,VRD}$, ...)	20
FIGURE 4 : LOGIGRAMME POUR LE CHOIX DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES DANS LE CADRE DE LA RE2020 (CEREMA MEDITERRANEE, MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2024)	20
FIGURE 5 : PERIMETRE PHYSIQUE ET TEMPOREL POUR LA REALISATION D'ACV DANS LE CADRE DE LA RE2020 (CEREMA, 2021)	21
FIGURE 6 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE TROIS OPTIONS DE SIMPLIFICATION (LEBERT, 2013) (SEULES LES OPTIONS 1 ET 2 SONT DEVELOPPEES DANS (BONNET, HALLOUIN, LASVAUX, & GALDRIC, 2014))	22
FIGURE 7 : FREQUENCE D'APPARITION DES VALEURS DE CHAQUE PARAMETRES PARMI LES 47 PUBLICATIONS ETUDIEES (E. HOXHA, 2020)	24
FIGURE 8 : REPARTITION DE LA DUREE D'AMORTISSEMENT D'INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES	25
FIGURE 9 : ILLUSTRATION DU BESOIN DE "CONVERSION" ENTRE LES DONNEES EMPLOYEES PAR L'INGENIERIE BATIMENT ET LES DONNEES EXPLOITABLES PAR L'ACV	28
FIGURE 10 : COMPOSITION DES CIMENTS (HORS GYPSE), SELON LES FAMILLES DE LA NF EN 197-1 (INFOCIMENTS, 2022)	31
FIGURE 11 : IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET PART DE MARCHE DES CLASSES DE CIMENTS (EUROPE SANS SUISSE) (RDC SUR BASE DES DONNEES ECOINVENT 3.9.1 AVEC LA METHODE EF3.1).....	32
FIGURE 12 : IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DES CLASSES DE CIMENT DES ADHERENTS DE FRANCE CIMENT (INFOCIMENTS, 2022).....	33
FIGURE 13 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR PLUSIEURS GRADES DE BETONS (RESISTANCE A LA COMPRESSION A 28 JOURS) SUR BASE DES DONNEES GABI (GERVASIO & DIMOVA)	34
FIGURE 14 : CONTRIBUTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DES DIFFERENTS TYPES D'ACIER SUR LE PERIMETRE MONDE (BASE SUR LES INVENTAIRES WORLDSTEEL ; CALCULE AVEC LA METHODE EF 3.1)	38
FIGURE 15 : STRUCTURE ET CHRONOLOGIE DES FICHES OUTILS	46
FIGURE 16 : OBJECTIFS DE L'ACV EN FONCTION DE L'ETAPE DU PROJET ((LUISA F. CABEZA, 2014) TRADUIT DE L'ANGLAIS)	48
FIGURE 17 : CYCLE DE VIE ELARGI DES INFRASTRUCTURES	50
FIGURE 18 : EXEMPLE DE CHOIX DE FORME DE BATIMENT A FONCTION CONSTANTE (ALEXANDER HOLLBERG, 2016)	50
FIGURE 19 : EXEMPLE DE CHOIX DE STRUCTURE A FORME CONSTANTE (DALIA M. A. MORSI, 2022)	50
FIGURE 20 : STRATIGRAPHIE D'UNE ROUTE	54
FIGURE 21 : STRATIGRAPHIE D'UNE VOIE FERREE (DE BORTOLI, BOUHAYA, & FERAILLE FRESNET, 2020)	54
FIGURE 22 : CLARIFICATION DES ELEMENTS A INCLURE OU A EXCLURE DES MODULES A1 A A3 (BUILDINGS C-PCR-029 (TO PCR 2019:14)).....	57
FIGURE 23 : EXEMPLE DE DECOMPOSITION D'UN BATIMENT PAR LOTS.....	62
FIGURE 24 : REGRESSION LINEAIRE ENTRE LA MASSE ET LA PUISSANCE DE POMPES (ANALYSE RDC SUR BASE DE DONNEES PEP ECOPASSPORT SCHNEIDER ELECTRIC)	80
FIGURE 25 : COMPARAISON DES RESULTATS SELON L'ITERATION DE CALCUL SUR LE CAS CHIMIE FINE	81
FIGURE 26 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE (EF3.1)....	82
FIGURE 27 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1)	83
FIGURE 28 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS CHIMIE FINE PAR POSTE – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3)	84
FIGURE 29 : RESULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITE SUR LE CAS CHIMIE FINE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE (EF3.1).....	85

FIGURE 30 : RESULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITE SUR LE CAS CHIMIE FINE SUR L'UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES (ADP 2002 – EF3.1)	86
FIGURE 31 : RESULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITE SUR LE CAS CHIMIE FINE SUR L'UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES (FLW – GLAM 3)	86
FIGURE 32 : COMPARAISON DES RESULTATS SELON L'ITERATION DE CALCUL SUR LE CAS USINE DE BATTERIES	93
FIGURE 33 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS USINE DE BATTERIES PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE (EF3.1)	94
FIGURE 34 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS USINE DE BATTERIES PAR POSTE – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1)	95
FIGURE 35 : RESULTATS DE L'ETUDE DE USINE DE BATTERIES PAR POSTE – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3)	96
FIGURE 36 : COMPARAISON DES RESULTATS SELON L'ITERATION DE CALCUL SUR LE CAS LIGNE DE TRAMWAY	104
FIGURE 37 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS LIGNE DE TRAMWAY PAR POSTE – CHANGEMENT CLIMATIQUE (EF3.1)	105
FIGURE 38 : RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS LIGNE DE TRAMWAY PAR POSTE – EPUISEMENT DES RESSOURCES, MINERALES ET METALLIQUES, ADP 2002 (EF3.1)	106
FIGURE 39 : RESULTATS DE L'ETUDE DE LIGNE DE TRAMWAY PAR POSTE – UTILISATION DES RESSOURCES MINERALES ET METALLIQUES, FUTURE WELFARE LOSS (GLAM 3)	107
FIGURE 40 : RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE SUR LE CAS LIGNE DE TRAMWAY	108
FIGURE 41 : L'APPROCHE ITERATIVE POUR LA MODELISATION DES INFRASTRUCTURES EN ACV	115
FIGURE 42 : EXEMPLE DE MISE EN FORME DES INFORMATIONS RELATIVES A UN BATIMENT UTILISANT DIFFERENTS NIVEAUX D'AGREGATION	134
FIGURE 43 : CONTRIBUTIONS DES INDICATEURS DE LA RE2020 A CHAQUE ETAPE DU CYCLE DE VIE (CEREMA MEDITERRANNEE, MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2024)	135
FIGURE 44 : EXEMPLE FICTIF DE LA DIMENSION DYNAMIQUE D'UNE ACV AVEC LE CAS D'UNE POUTRE EN BOIS (CEREMA MEDITERRANNEE, MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, 2024)	136
FIGURE 45 : COMPARAISON DES MASSES DES ELEMENTS DE DEUX INFRASTRUCTURES (ARUP)	137

Annexes

Annexe A : Inclusion des infrastructures dans les ACV de produits et de services

Normes internationales et européennes

Le socle méthodologique de toute ACV est formé par les normes ISO 14040 et ISO 14044, qui fournissent les principes et exigences pour mener une ACV. Ces normes établissent les principes fondamentaux, comme la définition du périmètre, la sélection des indicateurs environnementaux, et l'interprétation des résultats. Ces normes s'appliquent à toutes les ACV, y compris celle des infrastructures, sans donner de guidances précises sur un secteur, une catégorie de produits ou plus généralement sur les objectifs et le champ de l'étude.

L'ISO 14040, au chapitre 5.2.3 Frontières du système, précise « Lors de la définition des frontières du système, il convient que plusieurs étapes du cycle de vie, processus élémentaires et flux soient pris en compte, par exemple [...] la fabrication, l'entretien et la désaffectation du matériel d'équipement, ».

La norme ISO 14025 régit les règles relatives aux déclarations environnementales de type III, notamment les DEP. Cette norme précise que « *Si les aspects considérés comme pertinents ne couvrent pas l'ensemble du cycle de vie, cela doit alors être mentionné et justifié* ».

L'ISO 14067 spécifie les exigences et les lignes directrices pour quantifier l'empreinte carbone des produits. Elle oblige à l'évaluation des émissions et captations de GES résultant d'un changement direct d'affectation des sols (dLUC). Les infrastructures, notamment celles sur des parcelles vierges, contribuent particulièrement au changement d'affectation des sols.

La norme EN 15804 définit les règles pour établir des déclarations environnementales de produits (DEP) dans le secteur de la construction, en fournissant un cadre commun pour évaluer et communiquer les impacts environnementaux des matériaux de construction sur l'ensemble de leur cycle de vie. Bien que l'EN15804 ne définisse pas de règles quant à l'inclusion des infrastructures dans les DEP, certains RCP obéissant à l'EN15804 présentent des choix plus tranchés sur ces questions (section 0).

La norme « NF EN 50693 - Règles de définition des catégories de produits pour l'analyse du cycle de vie des produits et systèmes électriques et électroniques » précise que « **Les biens capitaux, tels que les bâtiments, les machines, les outils et les infrastructures, les emballages pour le transport interne (c'est-à-dire les boîtes utilisées pour le transport de pièces et de composants vers le point d'assemblage) et les activités de frais généraux administratifs (par exemple, les voyages d'affaires, le marketing et la publicité...), qui ne peuvent être attribués directement à la production du produit de référence, peuvent être exclus de la frontière du système** ».

Ainsi, pour cette norme :

- L'inclusion des infrastructures est donc possible mais non obligatoire ;
- La définition des biens capitaux est basée sur des exemples et n'est pas délimitée de manière détaillée
- La notion « attribués directement à la production du produit de référence » vague et sujette à interprétation.

Programmes d’affichage environnemental PEF

Le PEF (Product Environmental Footprint) est une méthode développée par la Commission Européenne pour évaluer et comparer l’empreinte environnementale des produits tout au long de leur cycle de vie, avec l’objectif d’harmoniser les pratiques d’évaluation et de communication environnementales en Europe. Elle recommande l’exclusion des infrastructures ainsi que leur fin de vie (Recommendation on the use of Environmental Footprint methods - Annex 1 to 2) :

Chapitre « 4.4.4. Capital goods – infrastructure and equipment » : « Capital goods (including infrastructure) and their EoL should be excluded, unless there is evidence from previous studies that they are relevant. If capital goods are included, the PEF report shall include a clear and extensive explanation on why they are relevant, reporting all assumptions made. »

La section « 4.2.3 Distribution » présente cependant une liste d’éléments à inclure dont les « routes et les camions ».

A contrario, le (Guide for EF compliant data sets) publié par la Commission Européenne indique que les biens capitaux et leurs fins de vies doivent être inclus sauf s’il peuvent être exclus avec la règle de coupure à 3,0% :

Chapitre « 6. Modelling requirements » : « Capital goods (including infrastructures) and their end of life: They shall be included unless they can be excluded based on the 3.0% cut-off rule. The eventual exclusion has to be clearly documented and checked by the reviewer »

Le PEF précise, de plus, que « Les études PEF doivent utiliser des jeux de données secondaires conformes aux normes EF, lorsqu’ils sont disponibles. »

Affichage environnemental en France

En ce qui concerne l’affichage environnemental en France, les (Principes généraux pour l’affichage environnemental des produits de grande consommation, 2022) précisent dans la partie « C.3 Infrastructure » de l’Annexe C, relative aux données secondaires (i.e. données de la Base Impacts), que « les inventaires de cycle de vie incluent dans la mesure du possible les infrastructures ». Cependant cette information concerne les données de la Base Impacts. L’affichage environnemental ne présente donc pas de recommandations quant à l’inclusion ou l’exclusion des infrastructures.

Programmes de DEP

Dans les programmes DEP et les RCP, des règles sont parfois présentées sur l’inclusion ou l’exclusion des biens capitaux dont les infrastructures font parties. Cette partie présente les mentions d’inclusion ou d’exclusion des biens capitaux dans plusieurs programmes DEP : The EPD International, EPD Italy, PEP Ecopassport, EPD Norvège, IBU et B-EPD. Les programmes DEP ont été sélectionnés parmi les programmes ayant publiés le plus grand nombre d’EPD²¹.

The EPD International System

Le (General Programme Instructions for The International EPD System (v5.0)) précise dans la partie « A.3.1.2 Infrastructure and capital goods » que « en général, les processus de production et de fin de vie des infrastructures et des biens capitaux utilisés dans le système de produits ne sont pas inclus dans les limites du système » (traduit de l’anglais). Quatre exceptions sont détaillées dans la suite de ce document. On peut de plus distinguer une évolution de la prise en compte des infrastructures dans

²¹ Nombre de DEP publiées par programme : <https://www.eco-platform.org/the-eco-epd-programs.html>

les versions du General Programme Instructions puisque, dans les deux versions précédents la v5.0 (v3.01 et v4.0), les infrastructures et les biens capitaux ne faisaient pas le sujet d'une partie à part entière. Leur inclusion était présentée dans la partie « A.3.1.2 Core processes » qui précisait « building (or dismantling) of a production site, infrastructure, production of manufacturing equipment, and personnel activities if they make up a significant share of the overall attributable environmental impact (e.g. for photovoltaic equipment or electricity from wind power) ».

Une évolution est aussi constatable dans la rédaction des RCP du programme The EPD International System. Les RCP antérieures à 2023 présentent principalement l'indication « *The technical system shall not include manufacturing of production equipment, buildings and other capital goods.* ». Cela traduit donc une exclusion obligatoire des biens capitaux. Les RCP publiées en 2023 et ultérieures présentent quant à elles une section à part entière concernant les biens capitaux et n'obligent pas, mais recommandent l'exclusion des biens capitaux.

Titre	Numéro	Valide jusqu'au	Prise en compte des infrastructures
Sauces, mixed condiments and mustard	PCR 2010:19	19/10/2026	Exclusion obligatoire
Grain mill products	PCR 2013:04	30/05/2025	Exclusion obligatoire
Yachts, small crafts, other vessels, and components thereof	PCR 2015:06	23/11/2027	Exclusion obligatoire (sauf exceptions) ET recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs
Trousers, shorts and slacks and similar garments	PCR 2019:06	01/08/2024	Exclusion obligatoire
Basic products from forestry	PCR 2020:05	27/10/2024	Exclusion obligatoire
Air-conditioning machines	PCR 2021:02	08/04/2025	Exclusion obligatoire
Basic chemicals	PCR 2021:03	03/05/2025	Exclusion recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs
Dairy products	PCR 2021:08	15/10/2025	Exclusion obligatoire
Bearings, bearings units and parts thereof	PCR 2023 :03	04/05/2027	Exclusion recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs
Fabricated metal products, except construction products	PCR 2023:01	06/01/2027	Exclusion obligatoire (sauf si les infrastructures sont environnementalement significatives)
Glass products used in automotive and transport industry	PCR 2023:04	16/05/2027	Exclusion recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs

Apparel, except fur and leather apparel	PCR 2024:03	28/05/2028	Exclusion recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs
Footwear	PCR 2024:04	19/06/2028	Exclusion recommandée Inclusion autorisée si les biens capitaux ont des impacts environnementaux significatifs

Tableau 57 : Liste des PCR étudiées et issues du programme The EPD International System

EPD Italy

Les PCR étudiés provenant de EPD Italy spécifient aussi majoritairement que les biens capitaux, dont les bâtiments, doivent être exclus.

Tableau 58 : Liste des RCP étudiés et issus du programme EPD Italy

PCR	Numéro	Valide jusqu'au	Citation
Indoor and outdoor furniture	PCR EPDItaly033	01/03/2029	Pas de mention des biens capitaux ou infrastructures
Valves – Multifunctional controls for gas burning appliances	PCR-2021-0002	23/02/2027	Exclusion obligatoire
Safety glass	PCR-2022-0002	11/05/2028	Exclusion obligatoire
Transport services of general cargo	PCR-2021-0001	17/11/2026	Exclusion obligatoire

EPD Norge

Le programme EPD Norge spécifie dans la partie « 2.3 System boundaries » du (General Programme Instructions) : « *The following two rules apply to cut-off and data variation: [...] Production of capital, buildings and equipment that are not included shall be justified. This justification shall be based on quantitative assessments to the cut-off criteria. Conservative assumptions can be used when data is missing and is always better than leaving out activities in the inventory.* ». Une obligation ou une recommandation n'est pas explicitement spécifiée. Cependant ce programme tend vers une inclusion des bâtiments et biens capitaux.

IBU

Dans (Product Category Rules for Building-Related Products and Services - Part A, 2024), le programme IBU (Institut Bauen und Umwelt) ne donne aucune guidance sur l'inclusion des infrastructures. Cependant, une guidance générique pourrait s'appliquer à l'infrastructure par extrapolation : « *All inputs and outputs of a (unit) process shall be included in the calculation, for which data are available. Data gaps may be filled by conservative assumptions with average or generic data. Any assumptions for such choices shall be documented;* ».

B-EPD

En Belgique, le Service Public Fédéral – Santé Public, Sécurité de la Chaîne Alimentaire et Environnement n'apporte pas de précision quant à l'inclusion ou l'exclusion des biens capitaux et infrastructures (B-EPD Principes Généraux (v1.1)). Deux DEP de la base de données fédérale belge précisent cependant qu'elles excluent les biens capitaux et les infrastructures (B-EPD n° 200010_001_EN) (B-EPD n° 21-0127-011-00-00-EN).

PEP Ecopassport

Le programme du PEP Ecopassport (PCR-ed4-FR-2021 09 06), concernant les équipements électriques, électroniques et de génie climatique, spécifie dans la section « 2.2.9. Exclusions par rapport aux frontières du système » que « *Les flux suivants sont toutefois généralement exclus de l'analyse, en raison des difficultés à les associer à un flux de référence particulier :*

- *L'éclairage, le chauffage, les sanitaires et le nettoyage des infrastructures, [...]*
- *La fabrication et la maintenance des installations et des machines de production si elles ne sont pas proportionnelles au flux de référence,*
- *La construction et la maintenance de l'infrastructure si elles ne sont pas proportionnelles au flux de référence,*
- *Les systèmes et les infrastructures de transport s'ils ne sont pas proportionnels au flux de référence, [...]*
- *Les installations de restauration destinées au personnel. »*

Les (PSR0001 - Fils, câbles et matériels de raccordement), (PSR0008 - Équipements de ventilation, de traitement d'air, de filtration et de désenfumage mécanique) et (PSR0019 - Systèmes de Sécurité Incendie) ont aussi été étudiés et n'apportent pas de complément au PCR.

Conclusion

Il n'existe pas de tendance générale quant à l'inclusion ou l'exclusion des biens capitaux dont les infrastructures font parties. Certaines RCP ne mentionnent pas ce sujet et d'autres obligent à fournir une justification si les biens capitaux sont exclus.

Annexe B : Inclusion des infrastructures dans les ACV organisationnelles

Normes internationales et européennes

L'ISO 14072:2024, définissant les exigences et lignes directrices pour l'analyse du cycle de vie organisationnelle, indique que « *en général, les actifs tels que les bâtiments, les usines et les équipements sont utilisés sur une période qui peut différer de la période fixée par l'ACV. Il convient que le mode opératoire de calcul de l'ICV de ces actifs tienne compte de la période pendant laquelle ils sont utilisés. Dans ce cas, le mode opératoire de calcul doit être explicitement justifié et documenté* ». Cette norme spécifie, de plus, dans la partie « 5.2.2 Frontières du système » que « *il convient d'inclure les flux correspondant à chaque étape d'utilisation si les produits consomment de l'énergie ou génèrent des émissions de façon directe dans le cadre de leur utilisation (par exemple les automobiles, les avions, les centrales électriques, les bâtiments)* ».

L'ISO 14069 explique les principes, concepts et méthodes liés à la quantification et à la déclaration des émissions directes et indirectes de GES par une organisation. La section « 5.4.10 Category 10 - Capital equipment » présente la catégorie 10 qui inclut les biens capitaux. « *This category includes all upstream emissions from the production of capital goods purchased or acquired by the reporting organization. Capital equipment consists of capital goods which are used by the organization to manufacture a product, provide a service, or sell, store, and deliver merchandise, have an extended lifetime and are not transformed nor sold to another organization or to consumers.* » Des précisions sont apportées, notamment sur la différence entre « produits achetés » et « biens capitaux ». Les produits achetés sont acquis pour la transformation ou la vente (en général dans l'année à venir), tandis que les biens capitaux sont acquis pour des usages de durée plus longues (environ 5 à 50 ans). L'ISO 14069 indique qu'il est nécessaire d'amortir les émissions liées des biens capitaux et que la méthode d'amortissement recommandée est celle utilisée dans la comptabilité financière de l'entreprise. Une précision est aussi apportée sur les consommations des biens capitaux : « *GHG Emissions from the use or operation of capital goods by the reporting organization should be accounted for in either direct emissions (e.g., for fuel use) or energy indirect emissions (e.g., for electricity use), rather than in category 10.* »

Le (GHG Protocol) spécifie dans l'introduction qu'au minimum « *Toutes les émissions amont (du berceau à la porte) des biens capitaux achetés* » doivent être prises en compte. Page 36, des exemples de biens capitaux sont donnés et incluent « *les équipements, les machines, les bâtiments, les installations de production et les véhicules* ».

La méthode OEF (Organisation Environmental Footprint), de même que le PEF cité précédemment, recommande l'exclusion des infrastructures, sauf si une étude précédente a montré que leur inclusion est pertinente (Recommendation on the use of Environmental Footprint methods - Annex 3 to 4).

La méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre (ADEME, 2022) spécifie que les infrastructures sont à prendre en compte dans la sous-catégorie « 4.2 Immobilisations de biens ».

Le PAS 2050 (UK), norme pour calculer l'empreinte carbone de biens et services des entreprises, indique que « *The GHG emissions and removals arising from the production of capital goods used in the life cycle of the product shall be excluded from the assessment unless provided for in supplementary requirements in accordance with the principles set out in 4.3* » (PAS 2050:2011). Cette norme présente donc une obligation d'exclusion des biens capitaux. Néanmoins les règles complémentaires pour

certains secteurs et catégories de produits peuvent autoriser ou obliger l'inclusion des biens capitaux si cela est jugé pertinent.

Publications scientifiques

(Julia Martínez-Blanco, 2020) et (Silvia Forin, 2019) présentent certains challenges méthodologiques rencontrés lors de l'application des lignes directrices pour l'Analyse du Cycle de Vie Organisationnelle (ACV-O). Douze entreprises ont testé la méthode (Guidance on Organizational Life Cycle Assessment). Dans cette méthode, les équipements capitaux (machines pour les procédés de production, bâtiments, équipements de bureaux, véhicules de transports et infrastructures de transport) sont présents dans une liste d'exemples d'activités indirectes amont à potentiellement inclure. Cependant il ressort de la pratique des douze entreprises-tests que les biens capitaux (infrastructures, équipements) sont souvent exclus en raison des difficultés à quantifier les infrastructures. Malgré cela, leur inclusion est recommandée, particulièrement pour les organisations du secteur des services (partie 3.3.3 de (Julia Martínez-Blanco, 2020)).

Annexe C : Présence des infrastructures par secteur ecoinvent

Secteur ecoinvent	Nombre d'inventaires présentant le mot « construction »	
	En comptant les redondances géographiques	Pour la géographie Rest-of-World
Infrastructure & machinery	565	225
Electricity	167	63
Heat	72	34
Cement & concrete	70	9
Waste treatment & recycling	60	25
Fuels	55	22
Resource extraction	46	15
Agriculture & animal husbandry	40	19
Wood	22	8
Chemicals	21	10
Fishing & aquaculture	20	8
Metals	20	10
Water supply	20	6
Minerals	18	8
Transport	14	7
Electronics	8	4
Pulp & paper	8	1
Land Use	0	0
Forestry	0	0
Textiles	0	0
Batteries	0	0

Annexe D : NF EN 15978 – Caractéristiques du bâtiment

La norme NF EN 15978 présente, dans la partie « 7.5.2 Description des caractéristiques physiques du bâtiment » les caractéristiques du bâtiment qui doivent être pris en compte :

- la forme et la taille du bâtiment ;
- le nombre d'étages ;
- la hauteur des étages et les dimensions totales (aire de plancher) ;
- l'ossature structurelle et les fondations ;
- les fondations ;
- les éléments de structure (poutres, colonnes, dalles) ;
- les éléments non porteurs ;
- les murs extérieurs ;
- les fenêtres ;
- la toiture ;
- les cloisons intérieures ;
- les portes et les escaliers ;
- le plancher ;
- le plafond ;
- les systèmes techniques ;
- les systèmes sanitaires (eau, eaux usées, canalisations, pompes et équipements fixes) ;
- les systèmes fixes de lutte contre l'incendie ;
- les systèmes de chauffage et d'eau chaude ;
- la ventilation mécanique et la climatisation ;
- les systèmes fixes d'éclairage ;
- les systèmes de communication et de sécurité ;
- le transport à l'intérieur du bâtiment (ascenseurs, escalators) ;
- le réseau d'évacuation ;
- la mise en place de l'implantation ;
- l'aménagement paysager ;
- l'éclairage extérieur ;
- le parking extérieur ;
- les réseaux d'évacuation sur site ;
- les systèmes de traitement des eaux.
- un certains nombres d'éléments à prendre en compte dans la modélisation du bâtiment

Ces éléments sont de plus illustrés dans un exemple, présenté ci-dessous, de mise en forme des informations relatives au bâtiment en utilisant des niveaux d'agrégation.

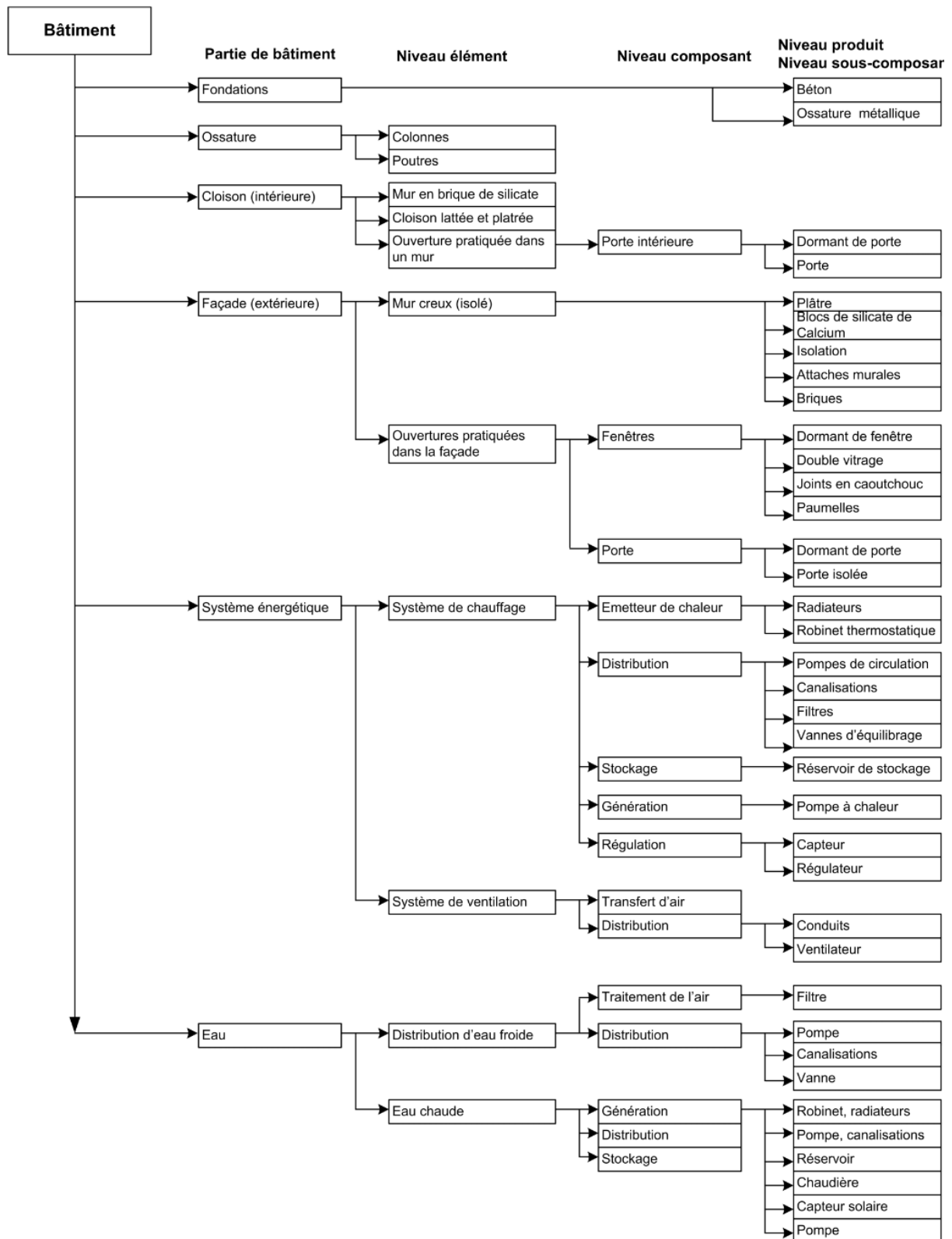


Figure 42 : Exemple de mise en forme des informations relatives à un bâtiment utilisant différents niveaux d'agrégation

Annexe E : Eléments complémentaires concernant la RE2020

En France, la RT2012 a introduit des standards pour réduire la consommation énergétique des bâtiments neufs, hormis certaines exceptions « Bâtiment ou parties de bâtiment qui, en raison de contraintes spécifiques liées à leur usage, doivent garantir des conditions particulières de température, d'hygrométrie ou de qualité de l'air, et nécessitant de ce fait des règles particulières » et les « Bâtiments ou parties de bâtiment chauffés ou refroidis pour un usage dédié à un procédé industriel » (Arrêté du 28 décembre 2012). Elle impose des exigences en matière d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air et de confort d'été, encourageant ainsi des systèmes de chauffage et de production d'énergie plus performants. La RE2020, qui remplace la RT2012 depuis 2022, va plus loin en intégrant également l'impact environnemental des bâtiments. Elle vise non seulement à diminuer encore la consommation d'énergie, mais aussi à réduire les émissions de CO₂ grâce à une analyse du cycle de vie du bâtiment. Elle privilégie les énergies renouvelables et impose des critères plus stricts de confort d'été pour anticiper le réchauffement climatique.

L'indicateur I_c bâtiment est la somme de plusieurs indicateurs : I_c composants, I_c énergie, I_c chantier, I_c eau. Ces indicateurs interviennent à différentes phases du cycle de vie du bâtiment présentées ci-dessous.

Performance environnementale du bâtiment sur son cycle de vie						
		Phase de production (étape 1)	Phase de Construction (étape 2)	Phase d'exploitation (étape 3)	Phase de fin de vie (étape 5)	Bénéfices et charges : valorisation en fin de vie et export d'énergie (étape 5)
Contributions	Composants	✓	✓	✓ Entretien et maintenance	✓	✓
	Énergie			✓		
	Eau			✓		
	Chantier		✓			✓
	Parcelle	✓	✓	✓	✓	✓

Figure 43 : contributions des indicateurs de la RE2020 à chaque étape du cycle de vie (CEREMA Méditerranée, Ministère de la Transition Ecologique, 2024)

La durée de vie du bâtiment à employer est de 50 ans. De plus, les exigences réglementaires de la RE2020 doivent être appliquées à des valeurs d'impact sur le changement climatique qui sont calculées de manière dynamique. Cela signifie que plus une émissions de GES a lieu tôt, plus elle a un impact fort (cf. étude ScoreLCA 2023-02 : Dimension dynamique en ACV). Deux coefficients de pondérations sont mis à disposition dans le cadre de la RE2020 : $f_{CO_2}(t)$ et $f_{fluide\ frigorig\ne}(t)$. Le (Guide RE2020) présente les deux coefficients de pondérations et illustre la dimension d'ACV dynamique avec l'exemple ci-dessous.

Données environnementales statiques		ACV dynamique : application des coeff. de pondération	
Étapes d'ACV	kg de CO ₂ éq		kg de CO ₂ éq
Production	- 600	année 0, coeff 1 x - 600	- 600
Processus de construction	30	année 0, coeff = 1 x 30	30
Utilisation	0	année 1 à 49, coeff = 0,984 à 0,587 x 0	0
Fin de vie	700	année 50, coeff 0,578 x 700	404,6
Total cycle de vie	130		- 165,4

Figure 44 : Exemple fictif de la dimension dynamique d'une ACV avec le cas d'une poutre en bois (CEREMA Méditerranée, Ministère de la Transition Ecologique, 2024)

La réalisation d'ACV dans le cadre de la RE2020 est restreinte à l'utilisation de logiciels approuvés par le ministre chargé de l'énergie et le ministre chargé de la construction (RT-RE-bâtiment , 2024).

Annexe F : Exemple de données couramment utilisées par l'ingénierie infrastructure

Item	9% Ni Modular LNG Tank		Membrane Modular LNG Tank	
	Total (te)	Transport (te)	Total (te)	Transport (te)
Outer Tank				
Shell	504	504	544	544
Base	74	74	74	74
Roof	107	107	107	107
Inner Tank				
Shell	467	467	45	45
Base	66	66	12	12
Insulation				
Bottom	502	502	234	234
Wall	368		300	300
Roof	50	50	54	54
Pump Platform	350	350	350	350
Grillage				
Concrete	990	990	990	990
Steel	212	212	212	212
Sub-total	3,690	3,323	2,922	2,922
Contingency	554	498	438	438
Total	4,244	3,821	3,360	3,360

Figure 45 : Comparaison des masses des éléments de deux infrastructures (ARUP)

Annexe G : Résultats des collectes de données pour les cas d'études

	Catégories	WP	Matériaux	CAPEX				Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
Equipements	Réceptiers, réservoirs							<p>Voir onglet "Liste d'équipements"</p> <p>Simplification basée sur matériaux principaux + quantitatifs associés en tons ou en kW (moteurs)</p> <p>Temps de collecte associé des données ~ 2 jours</p>
	Trémies	120-0405	Inox					
	Assiettes de micronisation	120-0401	Inox					
	Compresseurs, pompes							
	Echangeurs thermiques							
	Générateurs de vapeur							
	Fours							
	Dispositifs de refroidissement							
	Torches							
	Sécheur							
	Ventilateurs							
	Agitateurs	120-0406	Inox					
	Malaxeurs							
	Filtres							
	Tamis							
	Centrifugeuses							
	Séparateurs							
	Doseurs							
	Engins de levage, de convoyage							
	Broyeur							
Machines de façonnage								
Moteurs								
	click droit → insérer							

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
Piping	Tuyaux	100-0493	Inox	4 200 m			21.400 ton	<p>Directement reporté dans le tableau via quantitatifs présents dans les MTO Piping développés pour les marchés de travaux.</p> <p>Temps de collecte associé des données et tri ~2 jours</p>
	Brides	100-0493	Inox	274 unit			1.100 ton	
	Coudes	100-0493	Inox	649 unit			1.100 ton	
	Réductions	100-0493	Inox	19 unit			0.007 ton	
	Tés	100-0493	Inox	137 unit			0.600 ton	
	Supports	100-0493	Inox	1 122 unit			1.400 ton	
	Colliers	100-0493	Inox	1 122 unit			0.100 ton	
	Détendeurs	100-0493	Inox	53 unit			0.060 ton	
	Soupapes	100-0493	Inox	13 unit			0.030 ton	
	Disques de rupture	100-0493	Inox	7 unit			0.005 ton	
	Vanne à écluse (à brides)	100-0493	Inox	5			0.500 ton	
	Vannes d'aiguillage (à brides)	100-0493	Inox	10 unit			0.200 ton	
	Robinets à boisseau sphérique	100-0493	Inox	327 unit			2.100 ton	
	Clapets de non retour	100-0493	Inox	20 unit			0.010 ton	
	Filtres type Y	100-0493	Inox	2 unit			0.020 ton	
	Flexibles	100-0493	Rislan	60 m			0.020 ton	
	Soupapes de sûreté							
	Robinetterie							
	Raccords							
	Calorifuge							
Support mécanique								
	click droit → insérer							

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
Infrastructure	Charpente	100-0493	Acier				17.000 ton	<p>Directement reporté dans le tableau via quantitatifs présents dans les MTO Structure développés pour les marchés de travaux.</p> <p>Temps de collecte associé des données et tri ~0.5 jours</p>
	Passerelle	100-0493	Acier	40 m			5.000 ton	
	Garde-corps	100-0493	Acier	119 m			1.884 ton	
	Caille-botis	100-0493	Acier	40 m			1.268 ton	
	Structure							
	Génie Civil							
	Voirie & Réseaux Divers							
	Peinture							
	Ignifuge							
		click droit → insérer						

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
Bâtiment	Structure							<p>Non applicable - réutilisation d'un bâtiment existant</p>
	Génie Civil							
	Voirie & Réseaux Divers							
	Peinture							
	Ignifuge							
	click droit → insérer							

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
EIA	Electricité							<p>Focus sur le fonctionnel donc "Instrumentation" uniquement. Voir l'onglet "Liste Instrumentation"</p> <p>Décompte via P&ID et liste d'instrumentation. Quantitatifs via catalogue fournisseurs.</p> <p>Temps de collecte associé des données et tri ~1 jour.</p>
	Instrumentation							
	Automatisme							
		click droit → insérer						

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
Construction	Transport							<p>N'a pas pu être estimé</p>
	Montage							
	Bungalows, base vie chantier							
	Moyens de lutte contre le feu							
		click droit → insérer						

	Catégories	WP	Matériaux	Métré		Unit		Commentaire général sur la collecte de données
				Métré	Unit	Métré	Unit	
HVAC								<p>Inclus dans Equipements et Instrumentation</p>

Zone	Caractéristiques	Quantitatifs	Valeur	Unité	
Plateforme tramway	Travaux au droit de la plateforme Longueur = 15 km Largeur moyenne = 6,5 m	Acier (40% issu du recyclé)	6 500	t	
		Béton CEM II	110 000	t	
		Ballast (Assimilé à de la Grave Non Traité)	14 000	t	
Energie	Ligne Aérienne de Contact (caténaires, poteaux de support) Longueur = 15 km 300 poteaux de support	Acier (40% issu du recyclé)	600	t	
Ouvrage d'art	Passerelle métallique avec fondation (pour piétons et cyclistes) Longueur = 40 m Largeur = 3 m	Béton CEM II	2 500	t	
		Acier (40% issu du recyclé)	30	t	
Centre de maintenance	Bâtiment principal (bureaux, aire de maintenance, ateliers, zone déchets); Sous station; Sablière	Béton CEM II	90	t	
		Acier (40% issu du recyclé)	100	t	
		Béton CEM II	3 000	t	
		Grave Non Traité, Couche de forme	2 000	t	
		Béton armé	700	t	
	Voie ferrée	Longueur = 1600 m	Acier (40% issu du recyclé)	300	t
			Béton CEM II	800	t
	Vorie	Surface = 7300m ²	Grave Non Traité, Couche de forme	1 400	t
			Béton CEM II	2 000	t
			Granit	40	t
			Enrobé Bitumineux	600	t
		Grave Bitume	1 600	t	

Category	Subcategory	Details	Material	Unit	Quantity	Estimated Thickness (m)	Volumes Computed (m3)	Estimated Mass density (kg/m3)	Mass (kg)	
Facilitated works	Urban furniture / fences	Peripheral fence	Galvanized steel	lm	3000.00			6.66	19968.00	
		Lifting barrier	Metal	u	4.00					
		Pedestrian gate	Galvanized steel	u	6.00					
		Swing gate	Aluminium	u	1.00					
	Demolition	Bicycle shelter	Aluminium	u	3.00					
		Backfilling of trenches	Soil, sand, crushed stone	m3	7300.00					
Substructure	Earthworks	Filling openings in front of awning concrete blocks and asphalt repair	Coarse sand, crushed gravel	m3	3700.00					
		Earthwork, backfill and slicer	Soil, sand, crushed stone	m3	7000.00					
	Foundation work	Blinding concrete	Concrete	m2	2300.00	0.100	2300.00	2600.00	5900000.00	
		Pile heads	Concrete	u	100.00					
		Shallow foundations	Concrete	u	4500.00					
		Ground beams	Reinforced concrete	lm	5000.00					
		Insulation on ground beams	PIR foam	m2	600.00	0.060	36.00	50.00	1800.00	
	Concrete slab	Foundation slab	Concrete	m2	1200.00	0.300	360.00	2600.00	936000.00	
		Thermal insulation	Fibers, foams							
	Miscellaneous	Concrete slab	Ground floor	Concrete	m2	82 000.00	0.250	20500.00	2600.00	53300000.00
			Upstands	Quartz, Granite, Composite materials	lm	400.00				
		Miscellaneous	Lift shafts	Aluminium, steel	u	10.00				
			Door sills	Wood, metal, concrete	Ls	1.00				
			Floor siphons	Stainless steel	u	100.00				
			Cover of expansion joints on offices	Aluminium, stainless steel, flexible rubber	Ls	1.00				
			Work for weighbridge	Concrete	Ls	4.00				
			Caulking, opening, incorporation	Acrylic, latex, silicone	Ls	1.00				
Underground tanks			PE, fibreglass, concrete, stainless steel	u	3.00					
Retaining wall			Concrete	lm	30.00					
Stairs			Concrete	u	15.00					
NMP retention			-	Ls	1.00					
Electrolyte retention	-	Ls	1.00							
Hot oil retention	-	Ls	1.00							