HAL open science

Analyse de la part des aciers de construction dans l'impact environnemental des ouvrages en béton armé

Sébastien Maitenaz, Antoine Simon, Adélaïde Feraille

To cite this version:

Sébastien Maitenaz, Antoine Simon, Adélaïde Feraille. Analyse de la part des aciers de construction dans l'impact environnemental des ouvrages en béton armé. GC'2021 Le Génie Civil face au défi de la croissance verte, AFGC, Jun 2021, Cachan (en ligne), France. hal-03324699

HAL Id: hal-03324699

https://hal.science/hal-03324699v1

Submitted on 23 Aug 2021

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

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

ANALYSE DE LA PART DES ACIERS DE CONSTRUCTION DANS L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

Sébastien Maitenaz[1,2], Antoine Simon[3], Adélaïde Feraille[1]

[1] Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Marne-La-Vallée

[2] ISC, Vinci Construction France, Chevilly-Larue

[3] Vinci, Rueil-Malmaison

1. INTRODUCTION

Le béton est le second produit le plus consommé au monde derrière l'eau, avec une consommation d'environ 3,5 à 5,3 tonnes de béton par habitant et par an [1, 2]. Il est omniprésent dans les structures que nous bâtissons, qu'il s'agisse d'ouvrages d'arts ou de bâtiments, et particulièrement en France où l'on recourt presque systématiquement au béton. Étant donné les quantités en jeu et les procédés sous-jacents, on comprend l'impact considérable de la production de ce matériau sur l'environnement. Cet impact est souvent mesuré en termes d'émissions de gaz à effet de serre. La production de ciment est ainsi responsable de 4% des émissions de CO_2 dues aux combustibles fossiles [3, 4]. Mais, le béton est généralement utilisé sous la forme de béton armé. Il est donc également nécessaire de mesurer l'impact des aciers de construction. Ce dernier est parfois minimisé en phase de conception. En effet, on remarque souvent un écart important entre les quantités d'acier requises d'un point de vue réglementaire et les quantités réellement mises en œuvre. Comme l'ont montré Orr et *al*. [5], pour réduire les risques liés aux potentielles erreurs de mise en œuvre sur chantier, ainsi que pour simplifier cette dernière, les ingénieurs ont tendance à favoriser le surdimensionnement des éléments de structure lors des études d'exécution.

Après un rappel des spécificités méthodologiques propres à l'analyse de cycle de vie (ACV) de l'acier, nous regardons l'influence des taux de recyclage de l'acier en phase de production et de fin de vie sur l'impact sur le changement climatique, et ce pour plusieurs méthodes d'allocation. À travers l'étude de projets existants, couvrant plusieurs typologies structurelles allant des bâtiments aux ouvrages d'art, nous mettons ensuite en évidence la part importante de la production des aciers dans l'impact environnemental des ouvrages en béton armé. Les ratios alors obtenus constituent une première base pour estimer rapidement l'impact d'un ouvrage à partir du seul volume total de béton.

2. SPECIFICITES DE L'INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE DE L'ACIER

L'évaluation environnementale des aciers est réalisée en utilisant la méthode Analyse de Cycle de Vie (ACV) [6]. Cette méthode se caractérise par deux principes de base : elle est multiétapes et s'intéresse ainsi au cycle de vie complet d'un produit et multicritères, c'est-à-dire s'intéressant à plusieurs impacts environnementaux.

Deux caractéristiques de l'acier doivent être soulignées dans le cadre d'une évaluation environnementale : d'une part sa capacité à être recyclé en boucle fermée (c'est-à-dire qu'il peut être recyclé en acier de mêmes propriétés), d'autre part le fait que sa production s'accompagne de l'obtention d'une certaine quantité de coproduits qui peuvent être utilisés dans la fabrication d'autres matériaux comme le ciment par exemple. Dans

la méthode ACV ces deux caractéristiques doivent être prises en compte rigoureusement en utilisant les méthodes d'allocation. Les allocations permettent la répartition des impacts entre différents coproduits et/ou entre différents cycles (cas du recyclage). Ainsi pour l'acier de construction les allocations doivent être étudiées pour ces deux cas. Différentes méthodes d'allocation existent (physique, massique, économique, etc.); elles sont détaillées dans [7]. Dans la suite nous présentons les principes régissant les différentes méthodes d'allocation pour la prise en compte des bénéfices liés au recyclage puis à l'utilisation des coproduits dans d'autres procédés.

1. Les principales méthodes d'allocation pour la prise en compte du recyclage

Ce paragraphe n'a pas vocation à présenter de manière exhaustive les méthodes d'allocation permettant de prendre en compte le recyclage. Cependant, les trois méthodes présentées ci-dessous sont majoritairement utilisées et la description de ces méthodes permettra au lecteur de bien comprendre les questions méthodologiques en jeu. Puisque l'utilisation de matière recyclée permet de ne pas produire une certaine quantité de matière neuve, chacune des trois méthodes consiste à soustraire cet impact évité de l'impact total du procédé étudié. Par la suite, on notera $ICV_{recyclage}$ l'inventaire du cycle de vie (ICV) associé à l'utilisation de ferraille. Cet ICV correspond au crédit associé à l'impact évité par la non production d'acier primaire (ICV_{pr}) moins l'impact associé à la production d'acier secondaire (ICV_{sec}) multiplié par l'efficacité Y du procédé (car il faut plus d'1kg de ferraille pour produire 1kg d'acier secondaire) :

$$ICV_{recyclage} = \left(ICV_{pr} - ICV_{sec}\right).Y$$

Ce qui différencie ces méthodes est la temporalité choisie pour prendre en compte le recyclage. En effet, dans une ACV, on s'intéresse également à la fin de vie et donc à la valorisation du produit étudié, par exemple sous la forme de recyclage. On comprend néanmoins qu'on ne peut compter deux fois les bénéfices du recyclage. Il faut donc recourir à un arbitrage entre la prise en compte du recyclage en phase de production, ou en fin de vie.

Dans la méthode **cut-off** (aussi appelée 100-0), seul le recyclage en phase amont est pris en compte. L'inventaire du cycle de vie (ICV) du produit étudié (avec prise en compte du recyclage) s'exprime de la façon suivante :

$$ICV_{r,cut-off} = ICV_n - R_{amont} ICV_{recyclage}$$

Où :

- ICV_n est l'ICV du produit étudié sans prise en compte du recyclage (comme s'il n'était produit qu'à partir d'acier primaire);
- R_{amont} est le taux de ferraille utilisé en phase de production ;

Cette méthode permet de ne se baser que sur des données vérifiables et vérifiées, puisque, dans le cas de l'acier, le taux d'incorporation de ferraille dans la fabrication d'un produit est connu. Elle permet de limiter l'impact d'hypothèses sujettes à discussion sur le taux de recyclage en fin de vie. En revanche, elle ne valorise pas ce recyclage en fin de vie. Le valoriser créerait pourtant une forte incitation à concevoir des produits plus facilement recyclables. Par ailleurs, dans le cas particulier de l'acier, l'utilisation de ferraille en amont est déjà fortement motivée par des raisons financières (produire à partir de ferraille coûte moins cher que produire à partir de minerai).

La méthode **end-of-life** (ou 0-100), prônée par l'association WorldSteel [8], propose l'exacte opposée en ne valorisant que le recyclage en aval. Pour éviter le double comptage, cette méthode considère alors que la quantité de matière neuve dont la production est évitée correspond à la différence entre la quantité de matière recyclée en fin de vie et celle utilisée en amont. Autrement dit, cela correspond à la quantité de matériau recyclé « généré » au cours du procédé. L'inventaire du cycle de vie du produit étudié s'exprime alors par :

$$ICV_{r,eol} = ICV_t - (R_{aval} - R_{amont}).ICV_{recyclage}$$

avec :

$$ICV_t = R_{amont} ICV_{sec} + (1 - R_{amont}) ICV_{pr}$$

Où :

- ICV_t est l'ICV du produit étudié. Contrairement à ICV_n, il tient compte du recyclage en amont;
- R_{aval} est le taux de recyclage en fin de vie.

Cette méthode comporte des avantages dans un contexte de croissance de la demande puisque, comme vu précédemment, elle crée une incitation à plus recycler en fin de vie, ce qui, dans le cas de l'acier, est nécessaire aujourd'hui pour satisfaire le besoin en ferraille. Néanmoins, elle comporte un défaut évident puisqu'elle limite l'intérêt d'utiliser de la ferraille en phase amont.

La méthode **50-50** [9] propose un équilibre entre les deux méthodes présentées ci-dessus. Son but est de partager les bénéfices du recyclage en amont et en aval du cycle de vie avec les cycles précédents et suivants. De manière simplifiée on peut exprimer l'inventaire du cycle de vie de la façon suivante :

$$ICV_{r,50-50} = ICV_n - \frac{R_{amont} + R_{aval}}{2}.ICV_{recyclage}$$

L'intérêt de cette méthode est d'introduire un équilibre entre la prise en compte du recyclage en phase de production ou en fin de vie. Il est en revanche clair qu'elle présente un risque de ne pas valoriser équitablement les efforts faits par certains acteurs du cycle de vie d'un produit dans le cas où tous les acteurs ne jouent pas le jeu du recyclage.

2. Les méthodes d'allocation pour la gestion des coproduits

La production d'acier, qu'il s'agisse d'acier primaire ou secondaire, s'accompagne de la production de déchets ou coproduits. La plupart de ces coproduits sont valorisés et permettent d'éviter la production de certains autres matériaux. Le laitier de haut-fourneau permet, entre autres et dans une certaine mesure, de remplacer du ciment Portland, les laitiers provenant des convertisseurs et des fours électriques permettent notamment de remplacer des granulats, etc. Il convient donc de prendre en compte cette valorisation pour mesurer les bénéfices liés à la production évitée de matériaux neufs. Plusieurs méthodes d'allocation existent. Trois d'entre elles sont présentées ci-dessous avec leurs intérêts et leurs limites.

Par la suite, nous retenons les notations suivantes :

- ICV_{cp} est l'inventaire du cycle de vie du coproduit cp ;
- ICV_t est l'inventaire du cycle de vie de l'ensemble des coproduits obtenus (acier compris) ;
- m_{cp} est la masse de coproduit cp ;
- p_{cp} est le prix massique du coproduit cp.

L'allocation **économique** distribue l'impact de la production d'une quantité de matériau donné et de ses coproduits en fonction de leurs prix respectifs. Ainsi, l'inventaire du cycle de vie d'un coproduit co s'exprime de la façon suivante :

$$ICV_{cp} = \frac{m_{cp}p_{cp}}{\sum_i m_{cp,i}p_{cp,i}}.ICV_t$$

L'utilisation de cette méthode d'allocation est recommandée par la norme NF EN 15804 [10] lorsque la différence de revenus générés par les coproduits ne peut être considérée comme faible. La norme précise que « les contributions au revenu global de l'ordre de 1% ou moins sont considérées comme très faibles » et qu'une « différence de revenu de plus de 25% est considérée comme élevée ». Dans le cas précis du laitier de haut fourneau, le choix de l'allocation économique n'est pas adéquat à cause du manque de transparence sur le prix du laitier vitrifié granulé notamment. Ce manque de transparence s'explique par un marché dominé par des situations de monopole entre aciéristes et cimentiers.

L'allocation **massique** fait partie de la catégorie des allocations physiques (au même titre que l'allocation énergétique non détaillée dans cet article). Elle distribue l'impact de la production d'une quantité de matériau donné et de ses coproduits en fonction des masses de produit et de coproduits obtenues. Ainsi, l'inventaire du cycle de vie d'un coproduit cp s'exprime de la façon suivante :

$$ICV_{cp} = \frac{m_{cp}}{\sum_i m_{cp,i}}.ICV_t$$

D'un point de vue physique, il s'agit de la méthode la plus pertinente. Néanmoins, un rapide calcul d'ordre de grandeur montre qu'avec cette méthode, l'utilisation de laitier de haut fourneau perdrait de son intérêt pour les cimentiers. En effet, faisons l'hypothèse que la production d'une tonne d'acier primaire s'accompagne de la production de 300kg de laitier de haut fourneau et que la production d'une tonne d'acier primaire et de ses coproduits conduit à l'émission d'environ 2300 kgCO_2eq. Les émissions dues à la production du laitier de haut fourneau s'élèvent alors à 530 kgCO_2 eq. Cette valeur est plus de dix fois supérieure à la valeur généralement affichée [11, 12] et du même ordre de grandeur que les émissions associées à la production de ciment de clinker. Pourtant, il semble évident qu'il faut continuer à promouvoir l'utilisation du laitier et des autres coproduits de l'acier en remplacement de ciment de clinker par exemple, ne serait-ce que pour ne pas laisser un produit non utilisé.

Enfin, notons que WorldSteel [8] propose une autre méthode dite d'**expansion du système**. Cette méthode permet de soustraire, à l'impact de la production d'une quantité donnée d'un produit en acier, l'impact de la production évitée d'un autre produit grâce à son remplacement par l'un des coproduits de la production d'acier. Les coproduits de l'acier sont par exemple, des gaz qui permettent d'éviter la production d'une certaine quantité d'énergie ; les laitiers qui permettent d'éviter la production de ciment, de granulats ou encore de fertilisants, etc. Pour appliquer la méthode d'expansion du système, il faut estimer la production évitée, c'est-à-dire savoir quelle quantité q d'un produit peut ne pas être produite en remplaçant ce produit par une quantité q_{cp} d'un des coproduits de l'acier. Dans le cas du laitier, WorldSteel estime qu'une tonne de laitier de haut fourneau permet de remplacer une tonne de ciment. En France, le paramètre pertinent pour mesurer la quantité de ciment qui peut être remplacé par une quantité donnée de laitier est le coefficient d'activité k défini dans la norme NF EN 206 [13]. Il conditionne la quantité d'addition autorisée pour assurer une durabilité équivalente. Dit autrement, l'EN 206 oblige à remplacer une quantité réglementaire c de ciment par une quantité $c' + k \times a$ de ciment c' et d'addition a. Dans le cas de laitier granulé moulu de haut fourneau utilisé dans un béton dont le ciment est de type CEM I ou CEM II/A, la norme préconise pour k une valeur de 0.6. Donc, la NF EN 206 autorise à remplacer 0.6 tonnes de ciment par une tonne de laitier. Le complément national à la norme NF EN 206 [8] permet, sur la base de certains critères de résistance équivalente décrits dans les norme NF EN 206/CN et NF EN 15167-1 [14], de prendre pour k une valeur de 0.9, ce qui revient à remplacer 0.9 tonne de ciment par une tonne de laitier. Ceci est valable dans le cas où le laitier remplace un ciment de type CEM I ou CEM II/A. Le modèle WorldSteel n'est donc pas compatible avec la NF EN 206.

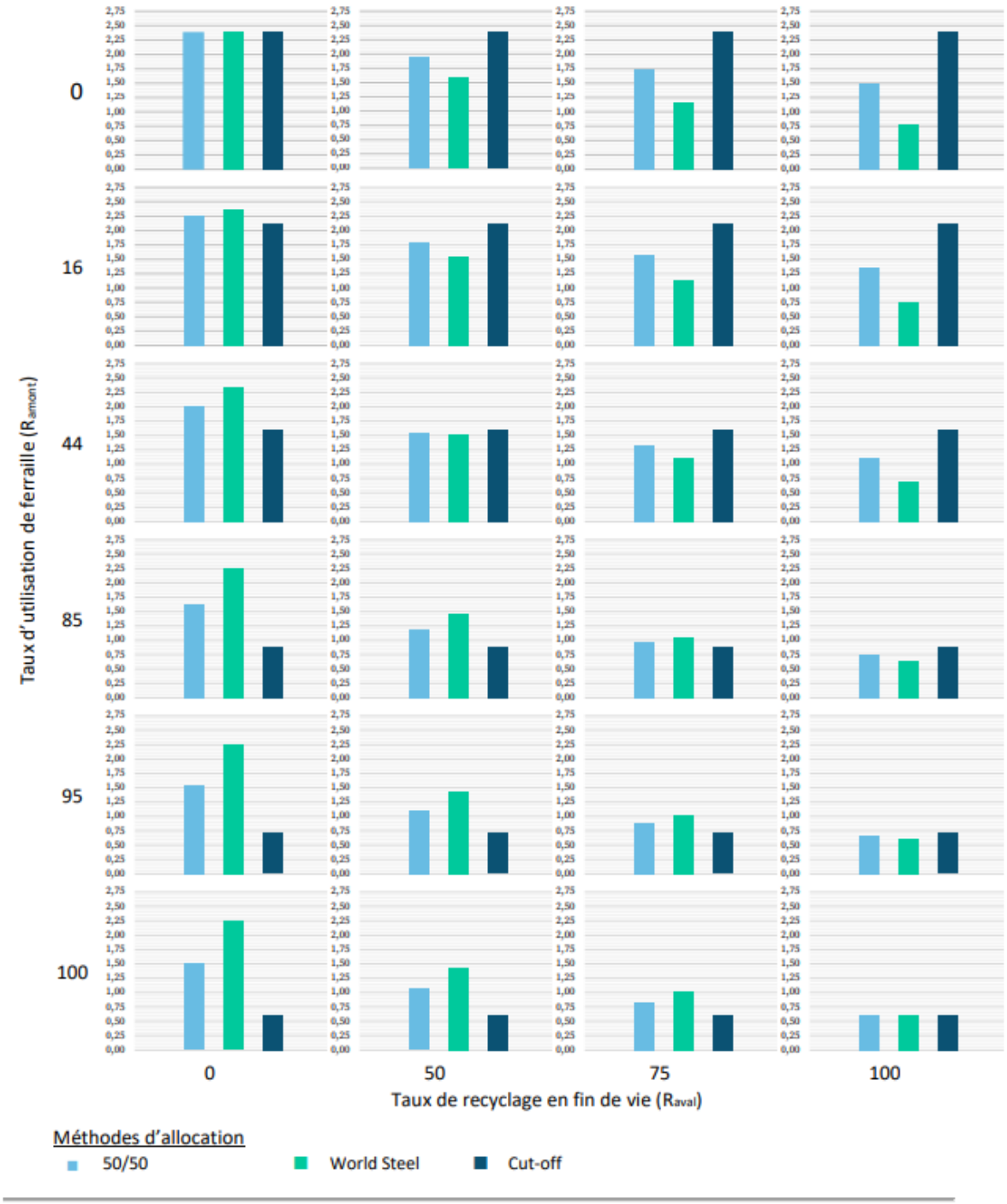
Par ailleurs, il est important de noter que la NF EN 15804 interdit l'utilisation la méthode d'expansion du système. Une FDES qui étudierait les impacts d'une quantité donnée d'armatures devrait donc présenter une autre méthode, une allocation physique par exemple. Dans les FDES de produits en béton armé, les armatures peuvent être prises en compte de deux manières différentes. Dans le cas de produits préfabriqués, les impacts liés à la production des armatures rentrent dans les catégories A1-A3. Une méthode d'allocation spécifique doit donc être utilisée (massique, économique, etc.) Dans le cas où il s'agit d'éléments coulés en place, les armatures sont parfois vues comme des produits complémentaires, entrant en jeu en phase A5. En tant que tel, il est possible d'utiliser directement les résultats d'un modèle, tel que le modèle WorldSteel qui utilise la méthode d'expansion.

3. INFLUENCE DES TAUX DE RECYCLAGE SELON LA METHODE D'ALLOCATION

Dans ce paragraphe, une analyse comparative des impacts de la production d'acier sur l'indicateur réchauffement climatique obtenus selon la méthode d'allocation utilisée est présentée. La modélisation est réalisée sur OpenLCA appuyée sur la base de données Ecoinvent v3.6 cut-off. Les méthodes d'allocation étudiées sont les méthodes cut-off, end-of-life (WorldSteel) et 50-50. Les coproduits seront ici traités comme des déchets. L'étude est basée sur trois procédés Ecoinvent : *steel, low alloyed, electric (GLO)*, *steel, low alloyed, converter (GLO)* et *hot rolling steel (GLO)* qui modélisent respectivement la production d'acier secondaire et primaire, ainsi que le laminage à chaud. Plusieurs valeurs sont étudiées pour le taux d'utilisation de ferraille (R_{amont}) : 0, 16 (ce qui correspond au pourcentage d'acier secondaire sur lequel se base le procédé *reinforcing steel* de la base Ecoinvent), 44 (ce qui correspond au taux d'utilisation de ferraille du modèle WorldSteel pour les armatures), 85, 95 et 100%. De même, nous regardons l'influence du taux de recyclage en fin de vie (R_{aval}) en prenant quatre valeurs : 0, 50, 75 et 100%. L'impact sur l'indicateur réchauffement climatique de ces 24 modèles, calculé selon la méthode de la NF EN 15804, est présenté dans le graphique ci-dessous.

Il illustre l'indépendance de la méthode cut-off au taux de recyclage en fin de vie mais il montre surtout le peu d'influence du taux de recyclage amont sur les valeurs d'impact dans le cas d'une allocation end-of-life. Par ailleurs, cette étude met en avant la très grande variabilité des résultats obtenus selon la méthode d'allocation choisie. Ainsi dans le cas (R_{amont} = 0, R_{aval} = 100), la méthode cut-off donne un impact 3.1 fois supérieur à celui

obtenu avec la méthode WorldSteel. Inversement dans le cas (R_{amont} = 0, R_{aval} = 100) c'est la méthode WorldSteel qui donne un impact 3.6 fois supérieur à celui obtenu avec la méthode cut-off et 1.5 fois supérieur à celui obtenu avec la méthode 50-50.



Etude de la variation de l'impact sur le réchauffement climatique (kg CO2 eq.) de la production d'une tonne d'armatures selon la méthode d'allocation choisie

Ces écarts soulignent l'importance qui doit être accordée au choix et à la vérification des valeurs prises pour les taux de recyclage amont et aval, ainsi que la justification nécessaire du choix de telle ou telle méthode d'allocation.

4. ETUDE DE CAS

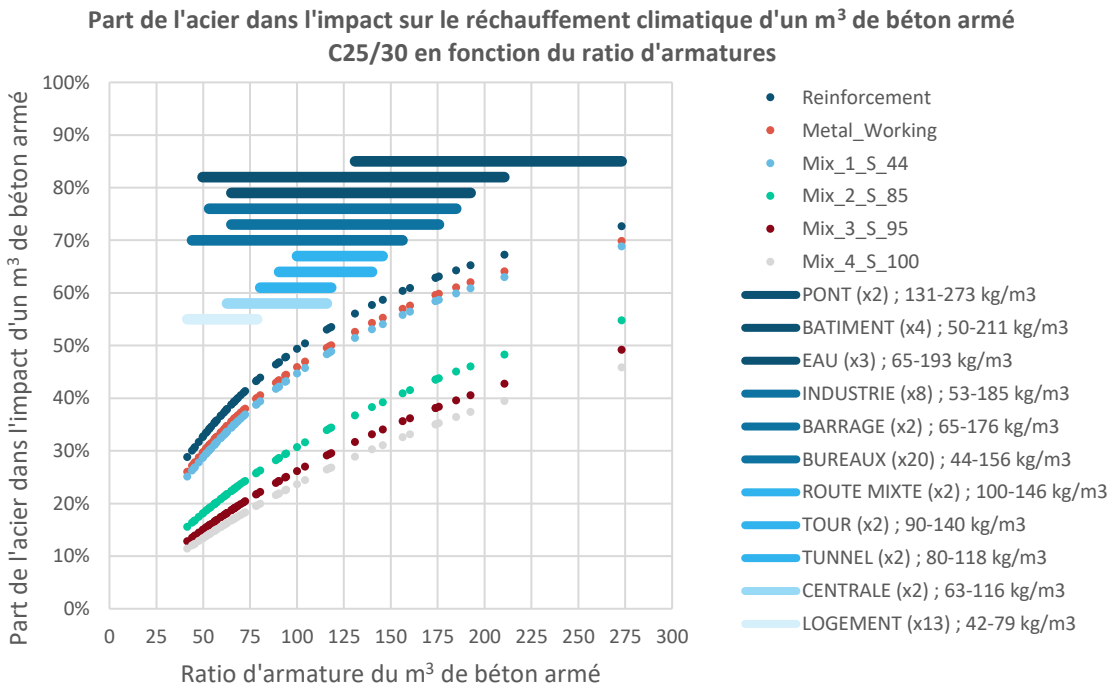
Les deux parties précédentes ont montré que de nombreux paramètres intervenaient dans la méthodologie et l'inventaire du cycle de vie de l'acier. Nous avons mené une étude de cas pour illustrer l'influence de ces paramètres sur l'impact environnemental de l'acier par rapport au béton dans une structure en béton armé

d'une part. Pour cela nous avons collecté et exploité des données de soixante ouvrages construits représentant des bâtiments - logements, bureaux et tours - ainsi que des ouvrages de génie civil : des ponts, des tunnels, des barrages, des ouvrages industriels, des centrales et des stations d'épuration. Ces données nous ont été transmises pour partie par VCGP ; nous les avons complétées par des données bibliographiques. Cet échantillon permet d'avoir un aperçu significatif de l'influence des choix de modélisation sur l'ACV des ouvrages réels.

Six modèles d'acier ont été sélectionnés : le modèle 01_Reinforcement (Ecoinvent *reinforcing steel, GLO*), le modèle 02_Metal_Working (Ecoinvent *metal working, GLO*) qui correspond à des données moyennées pour la production de métaux, ainsi que quatre modèles choisis parmi ceux présentés en partie 3 (avec une allocation cut-off): 03_Mix_1_S_44, 04_Mix_2_S_85, 05_Mix_3_S_95, 06_Mix_4_S_100 (correspondant respectivement à des valeurs de R_{amont} de 44, 85, 95 et 100%). Deux modèles de béton ont également été pris en compte : un béton C25/30 (modèle Ecoinvent *concrete, 25MPa*) et un béton C45/55 (modèle Ecoinvent *concrete, 45MPa*). Neuf indicateurs ont été calculés pour chacun de ces modèles avec la méthode de la NF EN 15804. Cependant, dans le cadre de cet article nous ne présentons que les résultats pour l'indicateur réchauffement climatique. L'impact sur l'indicateur réchauffement climatique de chacun des modèles acier et béton est rappelé ci-dessous.

Modèle acier (1 kg)	Reinforcement	Metal_Working	Mix_1_S_44	Mix_2_S_85	Mix_3_S_95	Mix_4_S_100	**Modèle béton (1 m³)**	C25	C45
Réchauffement climatique (kg CO_2 eq)	1.94	1.69	1.61	0.884	0.706	0.618		200	329

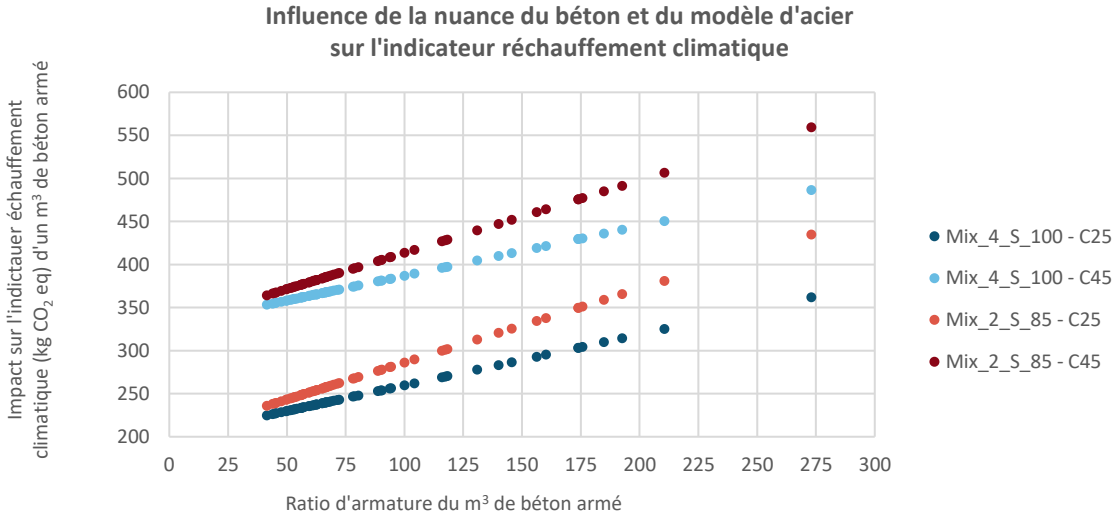
Pour visualiser la part de l'acier par rapport au béton dans l'impact du béton armé, on calcule pour chacun des ouvrages l'impact de l'acier I_a et l'impact du béton I_b pour chaque combinaison de modèle acier et béton, soit 6x2 modèles. On a alors la part de l'acier $I_a/(I_a+I_b)$ dans l'impact total du béton armé. La part de l'impact acier exprimée en % est représentée sur le graphique suivant pour le modèle béton C25/30. Chaque série de point correspond à un modèle acier, et chaque point a pour ordonnée la part de l'impact due à l'acier, et pour abscisse le ratio d'armature du projet. On représente également à titre informatif la plage de ratios d'armature qui correspond à chaque catégorie d'ouvrage. Par exemple pour les logements, nous avons 13 références dont les ratios varient entre 42 et 79 kg/m³. Ces plages ont principalement une valeur illustrative, et permettent de donner du sens au ratio d'armature du m³ de béton armé.



Ce graphique permet de mettre en avant deux premiers résultats. Tout d'abord on vérifie bien sûr que plus les ratios d'armature sont élevés plus la part de l'impact due à l'acier est importante. Pour des projets faiblement armés autour de 75kg/m³, l'acier représente entre 18 et 41% de l'impact selon le modèle acier. Pour des projets fortement armés à 200kg/m³, la part de l'acier représente entre 46 et 73% de l'impact. Le ferraillage contribue donc fortement à l'impact environnemental total. On constate par ailleurs que pour un même projet, le choix du modèle acier modifie très significativement la part de l'acier dans l'impact total. Pour un ratio de 150kg/m³, en fonction du modèle acier la part de l'acier varie entre 60% et 30% de l'impact total. Toutes choses égales par

ailleurs, dans le cadre d'une allocation cut-off, le taux d'incorporation de ferraille influe très fortement sur l'impact environnemental total de la structure.

Nous avons mené une seconde étude avec un modèle de béton C45/55, afin de voir la sensibilité des résultats vis-à-vis de la classe de béton. L'impact de ce béton sur l'indicateur réchauffement climatique est supérieur de 65% à celui du C25/30. Le graphique ci-dessous présente, pour deux modèles d'acier (Mix_2_S_85 et Mix_4_S_100) les valeurs de l'impact sur l'indicateur réchauffement climatique de chaque projet, calculées avec les deux modèles bétons. On note que, pour un modèle d'acier donné, l'écart entre les impacts mesurés avec les deux modèles de béton varie de 34% à 57% selon le ratio, tandis que pour un modèle de béton donné, l'écart entre les impacts mesurés avec les deux modèles d'acier varie de 0.2% à 15%. Les résultats sont donc sensibles à la nuance de béton choisie. Néanmoins, cette sensibilité est assez peu dépendante du ratio d'armature d'une part. Par ailleurs, il est évidemment plus simple de connaître en avance la nuance de béton utilisée pour un projet que de sourcer la provenance des aciers et de connaître le taux de ferraille utilisé pour leur production.



Enfin, pour fixer les ordres de grandeur, nous présentons un tableau donnant la valeur de l'impact sur l'indicateur réchauffement climatique d'un m³ de béton armé pour chacun des modèles d'aciers présentés dans cette partie avec le modèle de béton C25/35, et pour plusieurs ratios cibles.

		Modèle acier (1 kg)					
		Reinforcement	**Metal_Working**	**Mix_1_S_44**	**Mix_2_S_85**	**Mix_3_S_95**	**Mix_4_S_100**
Ratio (kg/m³)	**75**	344	325	319	264	251	244
	100	391	366	358	286	268	259
	150	487	450	438	329	302	289
	200	583	533	517	372	336	319
	250	679	616	596	415	370	348

Tableau 1 - Impact sur l'indicateur réchauffement climatique (en kg CO2 eq) d'un m3 de béton armé en fonction du ratio de ferraillage et du choix du modèle ACV de l'acier

Les principaux enseignements de cette étude de cas sont que le choix du modèle d'acier modifie fortement la contribution de l'acier à l'impact total d'un m³ de béton armé, même pour des ratios de ferraillage faibles. L'impact global du m³ de béton armé est plus sensible au taux de ferraille incorporé qu'à la classe de résistance du béton, toutes choses égales par ailleurs. Enfin le choix des modèles aciers modifie très significativement l'impact total du m³ de béton armé, de 10% à taux d'incorporation de ferraille équivalent, et jusqu'à 45% en moins si l'acier est d'origine 100% recyclée.

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

Ce travail a permis de clarifier la sensibilité des différents paramètres intervenant dans l'impact environnemental des aciers de ferraillage. Nous rappelons au passage que l'étude a été mené sur l'ensemble des indicateurs de la norme NF EN 15804 mais que nous avons choisi de ne présenter que l'indicateur réchauffement climatique par soucis de clarté. En effet, les fiches FDES et les déclarations environnementales ne détaillent pas toujours

explicitement les choix méthodologiques qui ont été faits concernant les allocations, la prise en compte de l'incorporation de ferraille, le taux de recyclage en fin de vie, ou les hypothèses énergétiques. Les paragraphes 2 et 3 ont présenté en détail les points d'attention. Or les déclarations environnementales collectées couvrent des gammes d'impact identiques aux modèles aciers bâtis pour notre étude. A l'heure où le secteur doit évaluer son impact environnemental et identifier ses leviers d'actions, cette étude contribue à améliorer nos connaissances de l'impact environnemental des aciers de ferraillage.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier VCGP pour la mise à disposition des données de projets, ainsi que Bruno Peuportier pour ses conseils et retours précieux.

REFERENCES

[1] 'Cement – Analysis', *IEA*. https://www.iea.org/reports/cement (accessed Sep. 14, 2020).
[2] C. R. Gagg, 'Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis', *Engineering Failure Analysis*, vol. 40, pp. 114–140, May 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
[3] R. Andrew, 'Global CO2 Emissions From Cement Production'. Zenodo, Jul. 18, 2017. doi: 10.5281/ZENODO.831455.
[4] P. Friedlingstein *et al.*, 'Global Carbon Budget 2019', *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, no. 4, pp. 1783–1838, Dec. 2019, doi: 10.5194/essd-11-1783-2019.
[5] J. Orr, M. P. Drewniok, I. Walker, T. Ibell, A. Copping, and S. Emmitt, 'Minimising energy in construction: Practitioners' views on material efficiency', *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 140, pp. 125–136, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.015.
[6] 'ISO 14040: Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre', International Organization for Standardization, 2006.
[7] O. Jolliet, M. Saadé, and P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR Presses polytechniques, 2010.
[8] 'LCA Methodology Report', World Steel Association, 2011.
[9] B. Polster, B. Peuportier, I. Blanc Sommereux, P. Diaz Pedregal, C. Gobin, and E. Durand, 'Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design', *Solar Energy*, vol. 57, no. 3, pp. 219–230, Sep. 1996, doi: 10.1016/S0038-092X(96)00071-0.
[10] 'NF EN 15804: Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits'. 2012.
[11] Ecocem, 'Vision 2020: Sustainability Report'. Ecocem group, 2017.
[12] 'EPD A1-A3 Ecocem'. MRPI, 2014.
[13] 'NF EN 206 + A1: Béton - Spécification, performance, production et conformité'. Nov. 2016.
[14] 'NF EN 15167-1: Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1: définitions, exigences et critères de conformité'. Sep. 2006.