

Analyse du cycle de vie de nouveaux mortiers contenant des argiles calcinées comme additions : le projet CO₂REDRES

Chantrain Gaspard¹, Ka Moussa², Courard Luc², Gros Lambert Sylvie¹, Léonard Angélique¹

¹ Liège Université, Chemical Engineering – PEPs, Belgique

² Liège Université, Urban and Environmental Engineering - UEE, Belgique

ABSTRACT Depuis longtemps, le ciment Portland a prouvé son utilité dans les constructions conventionnelles en béton. Cependant, malgré ses nombreuses qualités, ce matériau est également responsable d'importantes émissions de gaz à effet de serre et d'une consommation significative d'énergie. Ces inconvénients sont liés à la production du clinker, constituant majeur du ciment. Pendant longtemps, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes ont été utilisés comme substituants partiels du clinker afin d'en diminuer l'utilisation, et réduire ainsi les impacts environnementaux du ciment. Ces matériaux secondaires se raréfient dans plusieurs zones géographiques, y compris dans la Grande Région. C'est dans ce contexte que le projet CO₂REDRES prend place, ayant pour but de démontrer la faisabilité de la production d'additions minérales ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques à partir de ressources secondaires (déchets ou sous-produits industriels). La présente étude expose l'analyse du cycle de vie de cette nouvelle production d'additions minérales, afin d'en caractériser les impacts environnementaux et de démontrer leurs avantages potentiels en substitution.

Mots clés : Analyse du cycle de vie, mortier substitué, nouvelles additions minérales

I. INTRODUCTION

Avec plus de plus de quatre milliards de tonnes annuelles, le béton est actuellement le matériau de construction ayant la production la plus importante à l'échelle mondiale. Si son coût financier peut être bas, il n'en est pas de même de son empreinte environnementale qui est conséquente. En effet, les émissions de CO₂ liées à la production du béton avoisinent 8% des émissions de CO₂ anthropiques totales. Par ailleurs, la finitude des ressources n'est plus à démontrer, et il est clair que l'exploitation des ressources (fossiles ou minérales) aura un impact sur leurs disponibilités futures. C'est pourquoi les acteurs de la construction essaient continuellement de réduire la consommation des matières premières ainsi que les émissions liées à leur production. Cette réduction passe par une attention particulière sur l'efficacité de la production, sur la possibilité d'utilisation d'autres combustibles, sur la réduction de l'utilisation des matières premières et enfin sur la possibilité d'utilisation des matières de substitutions (Miller et al., 2017).

Un des moyens pour réduire les émissions de CO₂ liées à la production du béton est de diminuer la part du clinker dans le ciment utilisé. En effet, le clinker est responsable de la grande majorité des émissions de CO₂ du ciment, que ça soit à cause de la décarbonatation de ses matières

premières lors de sa production (émissions directes de CO₂), ou d'une importante consommation de combustibles fossiles. La diminution de la part de clinker dans le ciment est souvent assurée par la substitution partielle par des matériaux cimentaires secondaires. Par exemple, certains laitiers sidérurgiques peuvent remplir ce rôle de substitut. Le laitier de haut fourneau est connu pour ses bonnes performances lorsqu'il est utilisé dans le domaine des matériaux de construction, et permet aux entreprises métallurgiques de valoriser un de leur coproduits majeurs. Ce substitut est largement utilisé sur le territoire de la Grande Région (Allemagne, Belgique, France et Luxembourg). Cependant, suite à l'arrêt de la plupart des activités sidérurgiques de la région, le laitier de haut fourneau vient à manquer localement (Duxson et al., 2007). La réouverture de certaines centrales à charbon est une mesure temporaire liée au contexte géopolitique et ne peut être considérée comme une source pérenne de cendres volantes.

C'est dans ce contexte global que prend place le projet CO₂REDRES (Interreg Grande Région IP-4-08-185, <https://co2redres.uni.lu/>). Son but est de proposer de nouvelles additions minérales (AM) pouvant être incorporées dans les ciments et les bétons de la Grande Région. Ces nouvelles AM sont obtenues essentiellement à partir de la valorisation de sous-produits ou déchets industriels locaux, et la production devrait s'accompagner d'une réduction conséquente des émissions de CO₂ par rapport à la production de ciment Portland, tout en contribuant au développement de l'économie circulaire en Europe. Une attention particulière est portée notamment aux argiles calcinées (AC).

Dans le cadre du développement durable, l'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil scientifique permettant d'étudier les impacts environnementaux liés à l'ensemble du cycle de vie du produit ou procédé étudié, c'est à dire depuis l'extraction des ressources, la production de matériaux, la construction, l'utilisation, l'exploitation et la fin de vie (Gomes et al., 2013 et ISO, 2006a et b). En plus d'être multi-étapes, l'ACV est multicritères, l'étude des impacts portant sur un large panel de problèmes environnementaux potentiels. Cette approche holistique s'avère ainsi un outil efficace pour aider à concevoir, construire et entretenir des produits ayant, entre autres, une empreinte carbone nettement plus faible. Le but de la présente étude est d'appliquer la méthodologie de l'ACV à la production des nouvelles additions minérales telles qu'envisagées dans le projet CO₂REDRES afin d'en étudier les impacts et d'en évaluer les avantages environnementaux potentiels.

II. MÉTHODOLOGIE ACV APPLIQUÉE À LA PRODUCTION DE NOUVELLES ADDITIONS MINÉRALES ET DE MORTIERS

La présente ACV est réalisée conformément aux normes ISO 14040:2006 (ISO, 2006a) et 14044:2006 (ISO, 2006b) ainsi qu'à la norme sectorielle EN 15804:2012+A2:2019 (CEN, 2019) régissant l'évaluation environnementale des matériaux de construction. Les quatre étapes clés obligatoires définies par les normes sont respectées.

A. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Les **objectifs** sont d'étudier les impacts environnementaux des nouvelles additions minérales développées dans le cadre du projet CO₂REDRES, ainsi que des mortiers dans lesquels elles sont intégrées. Des comparaisons entre les performances environnementales des mortiers

conventionnels (avec du ciment Portland, ou CEM I) et de ceux incluant ces nouvelles additions sont également réalisées. Les compositions des différents mortiers secs correspondent à celles établies dans le cadre du projet CO₂REDRES, et qui ont obtenu de bons résultats aux niveaux de leurs propriétés physiques (Table 1), la comparaison se fait ainsi à performances équivalentes.

Les argiles calcinées (AC) sont le produit principalement caractérisé, mais une option d'addition non calcinée (notée addition fraîche, AF) est également considérée, dans la mesure où certains matériaux étudiés dans le projet ne comprennent que très peu d'argile. Dans ce cas, la calcination n'apporte aucun bénéfice au niveau des propriétés physique des mortiers lorsqu'on utilise ces matériaux secondaires peu argileux en tant que fillers.

TABLE 1. Composition des mortiers secs étudiés (

Mortiers secs	Sable (kg)	Ciment (CEM I) (kg)	Argile calcinée (kg)	Addition fraîche (kg)	Calcaire (kg)	Gypse (kg)
Conventionnel	0.75	0.25	0	0	0	0
Addition calcinée	0.75	0.175	0.075	0	0	0
Addition non-calcinée	0.75	0.175	0	0.075	0	0
Mix	0.75	0.125	0.038	0	0.075	0.0125

Le **champ de l'étude** considère l'ensemble des étapes de production des mortiers secs étudiés, comprenant l'extraction des matières premières, les procédés de production de chacun des composants du mortier, ainsi que l'étape de production du mortier en lui-même avec le mélange des composants sur site. La Figure 1 illustre les frontières de l'ACV préliminaire pour la production des mortiers.

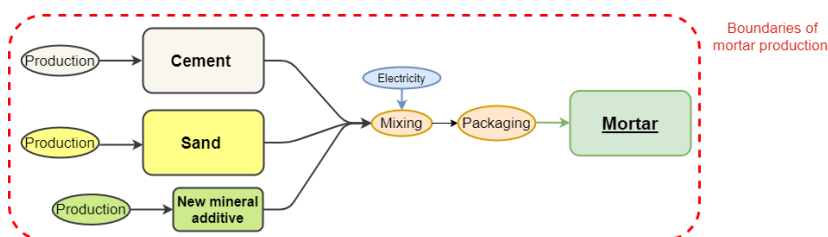


FIGURE 1. Frontières de l'ACV préliminaire des mortiers secs

Concernant les matières minérales de substitution développées lors du projet, l'ACV prend en compte l'entièreté de leur production. Elle comprend les étapes de séchage, de broyage et la calcination pour les argiles calcinées, et les étapes de séchage et de broyage pour les additions non-calcinées. Les frontières de l'ACV sont illustrées par la Figure 2.

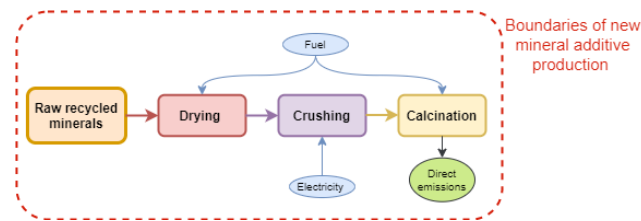


FIGURE 2. Détail des frontières de la production de nouvelles additions minérales.

L'approche cut-off est utilisée dans la définition des frontières du système étudié ici, en stricte application du principe de pollueur-payeur tel qu'exigé par la norme EN 15804:2012+A2:2019 (CEN, 2019). Ceci induit le fait qu'aucun impact environnemental n'est attribué aux déchets pour leur utilisation antérieure (ici les matériaux argileux ou minéraux secondaires), seuls les impacts des étapes de traitement (séchage, broyage et calcination) et de transport sont pris en compte.

L'unité fonctionnelle (UF) retenue est "1 kg de matériau" (matière minérale de substitution, ou mortier sec). Le choix de cette unité fonctionnelle massique se justifie par le fait que cette étude doit pouvoir être utilisée de façon générique pour l'évaluation des impacts environnementaux de différents substituts ou mortiers. La mise en relation de cette grandeur physique (massique) avec les performances mécaniques (kg → MPa par exemple) lorsqu'elles seront établies pourra se faire aisément via une pondération selon les formulations établies pour assurer des performances mécaniques équivalentes. On notera que les propriétés mécaniques des formulations considérées dans la présente étude, telles qu'évaluées par les partenaires universitaires du projet qui les développent, se sont avérées satisfaisantes, raison pour laquelle elles ont fait l'objet d'une ACV, et justifiant ainsi par ailleurs le choix d'une UF massique.

B. Inventaire du cycle de vie

La modélisation du traitement des additions minérales argileuses est réalisée avec les données générique de la base de données commerciale Ecoinvent 3.7 (<http://www.ecoinvent.org>) (Wernet 2016), et plus particulièrement l'entrée « Calcined clay production ». Cette entrée décrit le procédé de calcination et de broyage basé sur une production brésilienne pour l'évaluation des consommations énergétique, mais nécessite une adaptation au cas européen. Les argiles calcinées ont une teneur initiale en eau d'environ 30%¹ et sont broyées après l'étape de calcination. Cette calcination se fait en consommant des coques de pétrole. La consommation du coke est de 0.063 kg de coke par kg d'argile calciné. Cette valeur a été utilisée pour calculer la dépense énergétique grâce au pouvoir calorifique inférieur (PCI) du coke de pétrole afin de trouver une consommation énergétique de 2051.5 kJ par kg d'argile calciné. Ces données de consommation énergétique comprennent une perte d'environ 30%. Une consommation électrique de 0.025 kWh/kg en moyen voltage est également comprise pour le broyage des argiles calcinées. Ces données provenant d'Ecoinvent ont été validées en les comparant avec celles pouvant être trouvées dans la littérature (Pilal et al., 2019, Teklay et al., 2016, Wu et al., 2019) et de données industrielles (Argeco et Imerys), afin de vérifier que les ordres de grandeurs sont représentatifs des procédés étudiés.

L'électricité nécessaire au broyage de l'addition fraîche séchée est identique (0.025 kWh/kg).

¹ les pourcentages sont des pourcentages massiques (%wt)

La consommation de gaz naturel est modélisée par l'entrée Ecoinvent 3.7 « Heat, central or small-scale, natural gas {Europe without Switzerland} » et les consommations électriques sont toutes modélisées selon le mix électrique Belge de 2019.

Les données utilisées pour la production du mortier sec proviennent de l'entrée Ecoinvent « Cement mortar production CH » modélisant une production de mortier prêt à l'emploi en Suisse. Elles sont modifiées pour correspondre à une production belge (les entrées pour le mix électrique, le sable et le ciment sont adaptées en remplaçant les valeurs suisses par des valeurs belges ou européennes selon la disponibilité). Ces données comprennent la production des matières premières (sable et ciment), le transport sur un tapis roulant et l'utilisation des engins de chantiers sur site, l'électricité nécessaire au mélange des constituants ainsi que l'emballage du mortier sec (estimé identique à celui classique pour le ciment).

La modélisation du calcaire utilisée dans la formulation "Mix" se base sur l'entrée Ecoinvent 3.7 « Lime production, milled, loose Europe without Switzerland » modifiée pour correspondre au cas belge. Il en va de même pour le gypse qui a été modélisé à partir de l'entrée modifiée Ecoinvent 3.7 « Gypsum quarry operation CH ».

Le transport des matériaux est pris en compte grâce aux moyennes par régions présentes dans les entrées Ecoinvent 3.7 correspondantes. Le transport des argiles calcinés a quant à lui été pris égal à 100 km par camion EURO6 par défaut.

Remarque : Les formulations des mortiers intégrant des matériaux de substitution comprennent également un adjuvant (superplastifiant de type Ultibat) à hauteur de 0.90%wt (de la masse de ciment). Cet élément, en raison de sa faible proportion relative dans le mortier, est négligé dans la présente ACV, mais pourra être intégré dans les prochaines études lorsque les formulations définitives seront établies par les partenaires.

C. *Évaluation des impacts environnementaux*

L'évaluation des impacts environnementaux est réalisée dans le logiciel Simapro 9.3 avec la méthode de la norme EN 15804:2012+A2:2019 (CEN, 2019) telle qu'implémentée dans Simapro.

Pour la suite de l'étude, seule une sélection d'indicateur environnementaux est présentée. Cette sélection est pertinente avec le sujet de l'étude, et tient compte des incertitudes (parfois élevées) existant sur le calcul d'impact de certaines catégories. Les catégories liées à la toxicité sont pour cette raison écartées de l'étude (ILCD Handbook, EC-JRC 2010). Celles traitant de l'utilisation des sols et de l'eau seront également écartées par manque de pertinence avec le sujet traité.

III. **RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

La section suivante présente les éléments les plus importants des résultats de l'évaluation des impacts environnementaux pour les scénarios envisagés.

A. *Impacts environnementaux de la production des argiles calcinés et des additions fraîches*

Trois options de modélisation sont envisagées pour l'évaluation des impacts environnementaux de la production d'argiles calcinées en fonction de la teneur en eau initiale des argiles. La première option correspond à un matériau départ ayant une teneur en eau de 20%wt, qui

correspond au cas de base du projet CO₂REDRES, la teneur en eau des matériaux étudiés se situant aux alentours de cette valeur. Le deuxième cas modélise la production d'argiles calcinées à partir d'argiles fraîches particulièrement humides, ayant une teneur en eau de 30%wt. Le dernier cas traite d'une production d'argiles calcinées à partir d'argiles fraîches ayant une teneur en eau de 10%wt. Cette dernière option a pour but de modéliser une production à partir d'un matériau particulièrement sec, qui pourrait par exemple être obtenu en faisant un pré-séchage des argiles en utilisant la chaleur des gaz d'échappement du calcinateur, ou la chaleur résiduelle d'un autre procédé situé à proximité.

Le résumé des consommations énergétiques (chaleur) pour la production d'argiles calcinées pour ces différentes options est présenté dans la Table 2, ainsi que pour le séchage de l'addition fraîche (à 20% d'eau initiale).

TABLE 2. Consommations énergétiques spécifiques (en kJ/kg) pour la production d'argiles calcinées (AC) en fonction de la teneur en eau initiale (%massique), et de l'addition fraîche (AF).

Énergie nécessaire	Teneur en eau initiale AC			Addition fraîche
	30%wt	20%wt	10%wt	20%wt
Énergie séchage (kJ/kg)	1115.8	519.0	259.8	
Énergie calcination (kJ/kg)	775.2	775.2	775.2	
Énergie pertes (kJ/kg)	567.3	388.3	310.5	
Énergie totale (kJ/kg)	2458.3	1682.5	1345.5	741.4

La Figure 3 présente la caractérisation des impacts environnementaux estimés pour la production d'1 kg d'argiles calcinées (1 UF) à partir d'argiles ayant une teneur en eau de 20%wt.

La majorité des impacts environnementaux peut être attribué à la consommation du gaz naturel (en orange) sur la quasi-totalité des indicateurs étudiés. Seule la catégorie des radiations ionisante est majoritairement impactées par la consommation électrique (en bleu), en raison de la part de nucléaire dans le mix électrique belge de 2019 (environs 50%).

Une normalisation des impacts (permettant d'établir une hiérarchie relative de l'importance des impacts dans les différentes catégories en les comparant à une référence pour une certaine région et pour une année de référence – ici les facteurs de normalisation EF 3.0 ; Sala 2018 – résultats non montrés) indique que les catégories les plus impactées sont l'épuisement des ressources fossiles (Resource use, fossils) et le changement climatique (Climate change), en raison de la consommation de gaz naturel. Par clarté, seules ces catégories sont présentées en valeurs absolues dans les tables de résultats, ainsi que l'épuisement des ressources minérales en raison de sa pertinence dans le contexte de l'étude.

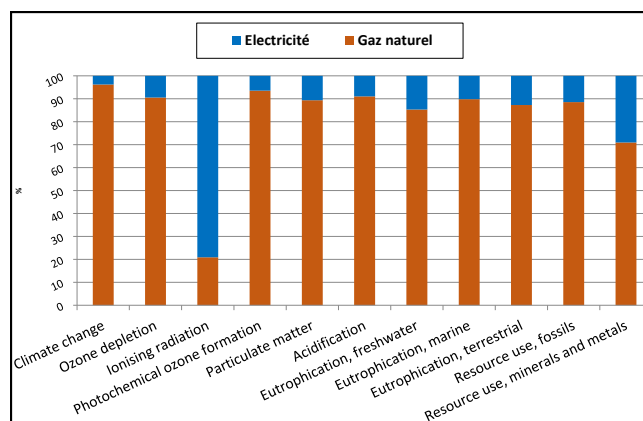


FIGURE 3. Impacts environnementaux pour la production d'1 kg d'argiles calcinées à partir d'argiles ayant une teneur en eau de 20% - Caractérisation EN 15804+A2:2019

La même démarche est faite pour la production d'argiles calcinées à base d'argiles fraîches ayant des teneurs en eau de 10 et 30%. Une comparaison des impacts environnementaux estimés pour ces trois productions est présentée à la Figure 4 et à la Table 3.

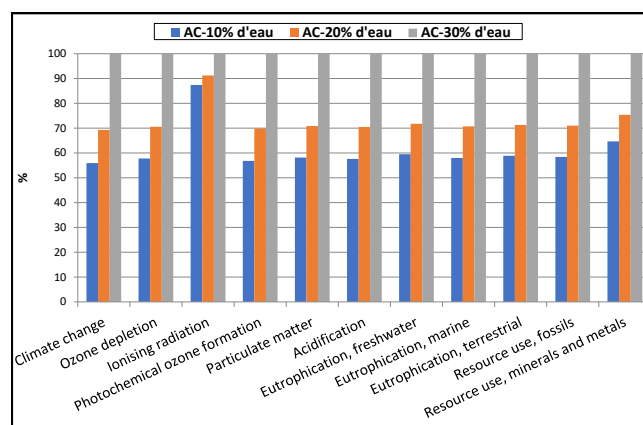


FIGURE 4. Comparaison des impacts environnementaux de la production de 1 UF = 1 kg d'argiles calcinées (AC) à partir d'argiles fraîches ayant une teneur en eau de 10, 20 et 30%wt - Caractérisation EN 15804+A2:2019

L'augmentation de la teneur en eau de l'argile fraîche de 20% à 30% provoque une augmentation des impacts environnementaux d'environ 30% sur l'ensemble des catégories étudiées mise à part sur celle des radiations ionisantes (l'électricité utilisée pour le broyage reste constante) (Table 3). La diminution de la teneur en eau de 20% à 10% permet de réduire les impacts environnementaux de la production d'un peu moins de 20% sur l'ensemble des catégories mise à part sur celle des radiations ionisantes. Il s'avère intéressant de présécher l'argile si de la chaleur résiduelle "gratuite" est disponible.

L'AF (20%) est moitié moins impactante que l'AC (20%) (Table 3). À titre de comparaison, la production de 1 kg de ciment Portland (BE) a un impact de 0.854 kg CO₂ eq/kg pour le

changement climatique, et celle de 1 kg de clinker est de 0.937 kg CO₂ eq/kg (contre 0.131 kg CO₂ eq/kg pour l'AC 20% d'humidité soit 8x moins).

TABLE 3. Comparaison des impacts environnementaux de la production de 1 UF = 1 kg d'argiles calcinés (AC) à partir d'argiles fraîches ayant une teneur en eau de 10, 20 et 30% et AF (20% eau)- méthode EN 15804 + A2.

Catégorie d'impact ²	Unité	AC - 10% d'eau	AC - 20% d'eau	AC - 30% d'eau	AF – 20% d'eau
Climate change	kg CO ₂ eq/UF	1.06E-01	1.31E-01	1.89E-01	6.19E-02
Resource use, fossils	MJ/UF	1.67E+00	2.02E+00	2.85E+00	1.08E+00
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq/UF	5.42E-09	6.32E-09	8.38E-09	5.66E-10

B. Comparaison des impacts environnementaux des mortiers

Les formulations des différents mortiers sont présentées à la Table 1. Le mortier conventionnel (référence) ne comporte que du ciment Portland (CEM I). Le mortier 30% additions calcinées (noté Mortier 30% AC) comprend une substitution de 30% de CEM I par des argiles calcinées, le mortier 30% additions fraîches (noté Mortier 30% AF) comprends une substitution de 30% de CEM I par des additions minérales faiblement argileuses et non calcinées, et le Mortier Mix comprend une substitution de 50% de CEM I par un mélange d'additions minérales (AC, calcaire, gypse). Les taux de substitution sont des % massiques.

La Table 4 présentent la comparaison des impacts environnementaux estimés pour la production de 1 kg de mortier sec (1 UF) pour les différentes formulations étudiées.

La Figure 5 indique que les substitutions de CEM I dans les mortiers apportent un avantage environnemental dans toutes les catégories par rapport au mortier conventionnel (en gris). Les mortiers avec une substitution de 30% du CEM I par des AC (en bleu) ou des AF (en orange) présentent une réduction d'environ 25% des impacts dans la catégorie du changement climatique, avec un léger avantage pour les AF dans la mesure où elles ne demandent qu'un broyage et un séchage, sans calcination (donc avec une réduction de la consommation de gaz naturel). Les AF ont un impact environ deux fois moins importants que les AC, mais leur contribution ne représente qu'une faible partie de l'impact total du mortier (le CEM I est responsable de 86% de l'impact pour le changement climatique, soit 0.152 kg CO₂ eq/UF pour les mortiers 30% AC et AF). La différence entre les mortiers réalisés avec ces deux substituants n'est dès lors que relativement faible.

Le Mortier Mix (en jaune) présente des impacts environnementaux significativement moins importants que les autres cas étudiés. Cela peut s'expliquer par la substitution supérieure (50%wt) permise par le mix utilisé en tant que substituant (calcaire, argiles calcinées et gypse) par rapport à des AC ou AF seules. Pour rappel, les formulations retenues sont celles qui permettent d'atteindre des performances similaires au mortier conventionnel (ce qui conditionne le taux de substitution acceptable).

² Par convention, les noms des catégories d'impact sont conservés en anglais

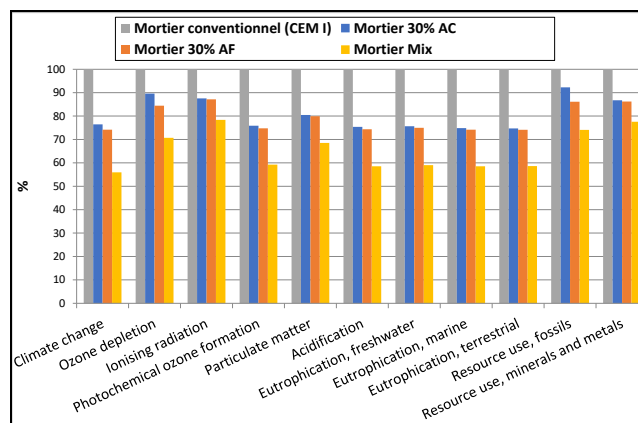


FIGURE 5. Comparaison des impacts environnementaux pour 1 UF (1 kg de mortier sec) avec les quatre compositions étudiées (conventionnel, 30% AC, 30% AF, Mix) – Caractérisation EN 15804+A2:2019

TABLE 4. Comparaison des impacts environnementaux pour 1 UF (1 kg de mortier sec) avec les quatre compositions étudiées (conventionnel, 30% AC, 30% AF, Mix)– Caractérisation EN 15804+A2:2019

Catégorie d'impact ²	Unité	Mortier conventionnel	Mortier 30% AC	Mortier 30% AF	Mortier Mix
Climate change	kg CO ₂ eq/UF	2.31E-01	1.77E-01	1.72E-01	1.30E-01
Resource use, fossils	MJ/UF	1.22E+00	1.12E+00	1.05E+00	9.02E-01
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq/UF	3.40E-08	2.95E-08	2.93E-08	2.63E-08

IV. CONCLUSIONS

L'analyse du cycle de vie de mortiers caractérisés par l'utilisation d'additions minérales en substitution du ciment CEM I démontre le bénéfice environnemental de ces formulations. Ce bénéfice est lié au fait que la production de ces additions minérales, argiles calcinées ou additions fraîches, est moins impactante que celle du ciment Portland, ce dernier étant le principal responsable des impacts du mortier conventionnel.

Pour le changement climatique, le bénéfice est de l'ordre de 25% pour les mortiers avec 30%wt de substitution par des additions calcinées ou minérales fraîches.

Remerciements – Les auteurs souhaitent remercier le projet CO₂REDRES (Interreg Grande Région, n° IP-4-08-185), financé partiellement par les Fonds Européens de Développement Régional, et la Région Wallonne.

V. REFERENCES

CEN (European Committee for Standardization). (2019). Sustainability of construction works—Environmental product declarations—Core rules for the product category of construction products. European Standard EN 15804:2012+A1:2013+A2:2019. Brussels: European Committee for Standardization

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete.” *Cement and Concrete Research*, 37(12), 1590–1597. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>

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

Gomes, F., Brière, R., Feraille, A., Habert, G., Lasvaux, S., & Tessier, C. (2013). Adaptation of environmental data to national and sectorial context: Application for reinforcing steel sold on the French market. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 926–938. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0558-4>

ISO (2006a) ISO 14040:2006 – environmental management – life cycle assessment – principles and framework. International Standard Organisation, Geneva, Switzerland

ISO (2006b) ISO 14044:2006 – environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines. 2006. International Standard Organisation, Geneva, Switzerland

Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114(September 2017), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>

Pillai, R. G., Gettu, R., Santhanam, M., Rengaraju, S., Dhandapani, Y., Rathnarajan, S., & Basavaraj, A. S. (2019). Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 118(March 2018), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019>

Sala S., Cerutti A.K., Pant R., (2018) Development of a weighting approach for the Environmental Footprint, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-68042-7, EUR 28562, doi 10.2760/945290

Teklay, A., Yin, C., & Rosendahl, L. (2016). Flash calcination of kaolinite rich clay and impact of process conditions on the quality of the calcines: A way to reduce CO₂ footprint from cement industry. *Applied Energy*, 162, 1218–1224. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.127>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B. et al. (2016) The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Wu, W. N., Liu, X. Y., Hu, Z., Zhang, R., & Lu, X. Y. (2019). Improving the sustainability of cement clinker calcination process by assessing the heat loss through kiln shell and its influencing factors: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 224, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.209>