

L'ACV : première étape d'une valorisation multicritère du sable recyclé dans le secteur de la construction

C. Tribout, G. Escadeillas, M. Hodroj *, J.L. Nicolas, T. Bergès

Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse cedex 4, France

ABSTRACT Dans une approche de développement durable, l'industrie de la construction tend vers la valorisation des sous-produits afin de diminuer ses impacts environnementaux. Cependant, l'utilisation de ces matériaux alternatifs n'améliore pas automatiquement la performance environnementale puisque leurs processus de recyclage imposent une charge supplémentaire au système. Par conséquent, il est important de déterminer les conditions de valorisation qui prouvent le bénéfice environnemental, ainsi que la rentabilité économique pour augmenter les chances de mise en œuvre sur le marché actuel. Dans cette optique, cette étude se concentre sur la valorisation du sable recyclé (SR) en substitution du sable naturel (SN) dans les mortiers de maçonnerie. Le SR est la partie sableuse issue du recyclage des retours de béton prêt-à-l'emploi ; cette partie est généralement mise au rebut. L'analyse environnementale du cycle de vie (ACV) est proposée comme outil d'aide à la décision avant toute étude technique approfondie afin de vérifier si cette valorisation induit un bénéfice environnemental. La substitution de SN est évaluée, montrant que le SR peut être une alternative écologique au SN. Cette composition annule même l'indicateur d'utilisation des ressources. De plus, l'ACV permet d'optimiser les activités de production et met en évidence l'avantage du SR par rapport aux autres alternatives. D'un point de vue économique, des études de coût du cycle de vie (ACC) sont réalisées pour évaluer l'application ; plusieurs scénarios économiques sont étudiés en faisant varier le prix du SR par rapport à celui du SN. Les résultats montrent un intérêt économique dans tous les scénarios considérés. Une fois les avantages environnementaux et économiques prouvés, une étude technique des mortiers d'assemblage proposés est réalisée, prouvant la robustesse globale du processus de valorisation.

Keywords Analyse du cycle de vie, coût du cycle de vie, sable recyclé, impact environnemental, construction

I. INTRODUCTION

Les agrégats minéraux de construction (sable, gravier et roche concassée) constituent le groupe de matériaux dont l'extraction est la plus volumétrique depuis le XX^{ème} siècle (Miatto et al., 2017). Cette extraction est associée à une dégradation écologique à grande échelle. En plus, les taux actuels d'extraction de sable entraînent l'apparition de pénurie de sable aux niveaux mondial et local (Bisht, 2022). Ainsi, l'industrie de la construction tend vers la valorisation des sous-

produits afin de diminuer ses impacts environnementaux (Fraj and Idir, 2017). Même si l'analyse du cycle de vie (ACV) a été de plus en plus utilisée pour évaluer la performance environnementale au cours des 25 dernières années (Lotteau et al., 2015; Yilmaz and Seyis, 2021), cette étape n'intervient souvent qu'en fin d'étude (Roberts et al., 2020). Cet aspect n'a donc souvent que très peu d'influence sur les choix de valorisation. C'est pourtant un aspect fondamental pour valider l'utilisation des sous-produits et s'assurer que leur utilisation apporte un bénéfice environnemental. Par conséquent, les conditions de valorisation bénéfiques à l'environnement devraient être déterminées avant de développer une solution technique, la valorisation des déchets ne devant pas être faite juste sous prétexte de récupérer des sous-produits (Ventura, 2022). Il est donc essentiel de mieux prendre en compte cette étape environnementale et de la faire remonter beaucoup plus en amont dans le processus de décision. C'est ce qui est proposé dans cet article, en utilisant l'ACV, non pas comme une caractérisation complémentaire d'un scénario de valorisation, mais comme un outil d'aide à la décision d'un scénario écologique de valorisation des sables recyclés.

II. Revue bibliographique

Ces dernières années, la recherche s'est davantage concentrée sur de nouvelles méthodes de la gestion des déchets de construction (J. Li et al., 2019). Ces études portent essentiellement sur l'utilisation de gravier recyclé dans le béton, mais peu d'études existent sur la valorisation de la fraction fine (Ulsen et al., 2021). Pourtant, la fraction fine est inévitable lors de la production de gravier recyclé. Elle concentre la pâte cimentaire durcie, caractérisée par sa forte porosité, présentant donc une demande en eau plus élevée et une résistance plus faible, ce qui la rend plus difficile à recycler dans le béton et/ou le mortier par rapport aux graviers (L. Li et al., 2019). Ainsi, la quantité de ciment est systématiquement ajustée pour répondre aux performances requises (Marinković et al., 2010; Fraj et Idir, 2017), induisant une augmentation des impacts environnementaux (De Larrard et Colina, 2018). Il semble donc important d'adapter la solution de valorisation aux caractéristiques des matériaux et non l'inverse.

Malgré ces défis, il est reconnu que l'utilisation de cette fraction fine offre des opportunités pour réduire la consommation de ressources naturelles (Marsh et al., 2022). Trois autres utilisations sont souvent envisagées : l'incorporation directe dans le ciment, l'utilisation comme constituant autre que le clinker dans la fabrication du ciment ou comme ajout au béton (Li et al., 2022). Cependant, ces deux dernières solutions nécessitent une préparation supplémentaire du sable recyclé, c'est-à-dire un broyage important pour obtenir une poudre très fine, ce qui ne sera pas sans conséquence sur le bilan environnemental.

III. Stratégie

Dans cette étude, l'objectif est de valoriser les sables recyclés en utilisant au mieux leurs caractéristiques. Vu la faible résistance connue des sables recyclés, la solution de valorisation envisagée ne doit pas nécessiter des performances mécaniques élevées, afin de ne pas devoir ajuster les formulations par l'ajout de liant. C'est pourquoi il est proposé dans cette étude de valoriser les sables recyclés en remplacement du sable naturel dans les mortiers de montage prêt-

à-l'emploi (mortiers industriels secs). En effet, les performances requises pour une utilisation classique sont de l'ordre de seulement 10 MPa pour un mortier de classe M10 (NF EN 998-2, 2016). Ces mortiers sont des mélanges de liant, de sable et éventuellement d'additifs, pré-dosés en usine. Ils sont ensuite transportés jusqu'au chantier où ils sont stockés en sacs ou dans des silos. L'eau de gâchage est ensuite ajoutée sur le chantier en fonction du besoin. Cette méthode est très répandue compte tenu des avantages qu'elle présente : composition constante et contrôlable, propriétés et performances requises assurées, efficacité et rapidité sur chantier. Cette technique est particulièrement avantageuse pour le sable recyclé du fait de sa faible teneur en eau au moment du broyage, contrairement au sable naturel alluvionnaire qui nécessite une consommation d'énergie importante pour son séchage.

La stratégie proposée dans cette étude consiste tout d'abord à caractériser les matériaux initiaux. Ensuite, à utiliser l'ACV comme un outil d'aide à la décision pour déterminer l'intérêt de réaliser cette valorisation. Une analyse des coûts est proposée en parallèle afin de vérifier son intérêt économique. Pour traiter ce cas d'étude, des données propres à la région toulousaine sont utilisées.

1. Matériaux

- 2 sables naturels (SN) : Il s'agit de sables naturels de granulométrie 0/4 mm traditionnellement utilisés pour la fabrication du béton dans la région toulousaine. Un est semi-concassé siliceux d'origine alluvionnaire, livré humide, et l'autre est concassé calcaire issu de massif rocheux, pouvant être livré sec. L'approvisionnement est modélisé en utilisant les carrières les plus proches de Toulouse.
 - Sable recyclé (SR) : Il s'agit d'un sable industriel prélevé sur un site de recyclage toulousain qui valorise les retours de béton durci. Afin de recycler un maximum de béton, il a été décidé d'utiliser la classe granulaire 0/4mm pour ces mortiers.
 - Ciment : un CEM III/A 52,5 L contenant 36% de clinker et 64% de laitier de haut fourneau est utilisé. La densité de ce ciment est de 2,96 et sa surface Blaine est de 4315 cm²/g.
2. Formulations : Les formulations choisies sont présentées dans le tableau 1. Elles sont basées sur des études préalables (Le et al., 2019) afin de s'assurer d'atteindre la classe M10. Les deux extrêmes ont été choisis : un mélange témoin avec uniquement du sable naturel (SR_0) et un mélange dans lequel a été introduit 100% de SR en remplacement du SN (SR_R100).

Tableau 1 : Formulations pour 1 m³ de mortier

1 m ³	SN (kg) (Alluv ou Roche)	SR (kg)	Ciment (kg)	Eau efficace (kg)	E _{eff} /C	Eau de saturation (kg)
SR_0	1816.1	0.0	300.0	213.0	0.71	16.7
SR_R100	0.0	1712.8	300.0	213.0	0.71	175.2

IV. Étude environnementale

A. Méthode et hypothèses de modélisation

L'analyse du cycle de vie est une méthodologie basée sur les normes ISO 14040 et ISO 14044.

L'objectif de cette étude ACV est d'évaluer l'influence du remplacement du sable naturel par du sable recyclé sur les impacts environnementaux de la production de mortier de maçonnerie. L'unité fonctionnelle est "la production sur site de 1 m³ de mortier de maçonnerie prêt-à-l'emploi appartenant à la classe M10 et fabriqué avec un taux de liant fixe". Ainsi, les résistances à la compression (Rc 28) des formulations ci-dessus ont été testées pour s'assurer que les mortiers répondent aux critères de l'unité fonctionnelle ; Rc 28 de SR_0 (Alluv), SR_0 (Roche) et SR_R100 dépassent les 10 MPa requis. La figure 1 montre le système et ses frontières, avec la production des constituants (ciment, sables et eau), leur transport et la fabrication du mortier.

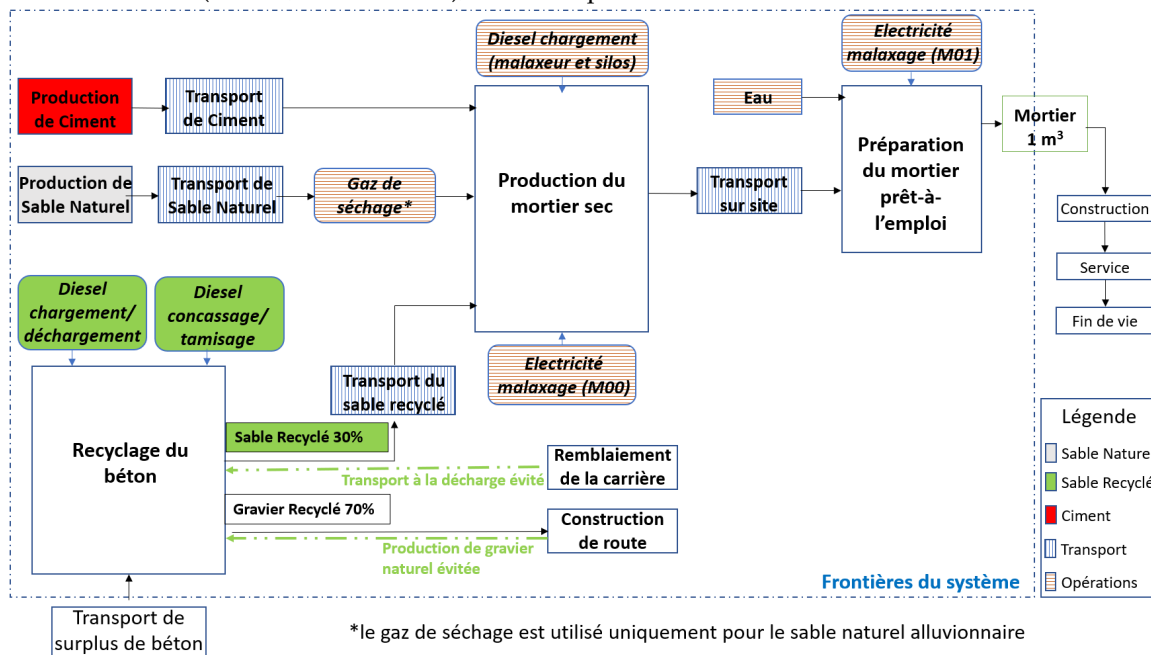


Figure 1 : Système et frontières

La modélisation des scénarios et le calcul ont été réalisés à l'aide du logiciel SimaPro, associé à la base de données Ecoinvent V3.6, à des données bibliographiques et à des données collectées sur la plateforme de recyclage représentatives de ce qui se fait dans la région de Toulouse. Parmi les méthodes disponibles, la méthode "EN 15804 + A2 Method V1. 00", conforme à la norme européenne "EN 15804 + A2:2019" pour la déclaration environnementale des produits (DEP), services et processus de construction, a été utilisée pour évaluer les différents indicateurs d'impact. L'analyse d'incertitude a été réalisée à l'aide de la méthode Monte-Carlo avec 1000 passages. L'évaluation couvre les différents cycles de vie du système, de l'acquisition de la matière première à la distribution (« du berceau à la porte »).

Le tableau 2 résume les données de modélisation du système de production du mortier, et le tableau 3 explicite la modélisation du recyclage du béton permettant de produire le sable recyclé.

Tableau 2 : Données de modélisation du système

PROCESSUS	MODULE	HYPOTHÈSE	ÉCHELLE GÉOGRAPHIQUE	SOURCE
-----------	--------	-----------	----------------------	--------

Production de Sable Naturel (Alluvionnaire)	Sand {ROW} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, S	Fourni par producteur	Montauban (82), France	Ecoinvent©
Production de Sable Naturel (Massif Rocheux)	Gravel, round {ROW} gravel and sand quarry operation Cut-off, S	Fourni par producteur	Mazères-sur-Salat (31), France	Ecoinvent©
Séchage du Sable Naturel alluvionnaire	Heat, central or small-scale, natural gas {RER} market group for cut-off, S	0.42 kWh/t de sable naturel	Muret (31), France	Ecoinvent©
Production de Sable Recyclé	/		Portet-sur-Garonne (31), France	Données industrielles (Tab. 3)
Production de Ciment CEM III	Cement, blast furnace slag 36-65% {Europe without Switzerland} market for cement production, blast furnace slag 36-65% cut-off, S	Fourni par producteur	Martres Tolosane (31), France	Ecoinvent©
Production d'eau	Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, S	Réseau français	France	Ecoinvent©
Malaxage (M00) / (M01)	Electricity, medium voltage {FR} market for Cut-off, S	Pour (M00) = 1.23 kWh/m ³ Pour (M01) = 0.23 kWh/m ³	Mix énergétique français	Données industrielles et Ecoinvent©
Chargement (malaxeur ou silos)	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, S	2.75 MJ/t	Muret (31), France	Ecoinvent©

Tableau 3 : Données d'inventaire pour produire 0.3 t de sable recyclé à partir de 1 t de béton recyclé

PROCESSUS	FLUX	MODULE D'ECOINVENT®	QUANTITÉ
Chargement dans le concasseur	Flux entrant : Consommation de Diesel	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, S	6.02 MJ
Concassage et tamisage	Flux entrant : Consommation de Diesel	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, S	3.02 MJ
Chargement dans le camion	Flux entrant : Consommation de Diesel	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, S	4.73MJ
Transport à la décharge évité	Flux entrant : Transport en camion > 32t, euro5	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO 5 {RER} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5	30 km 0.3 t
Production de Gravillon Naturel évitée	Flux entrant : Gravillons concassés	Gravel, crushed {CH} market for gravel, crushed Cut-off, S	0.7 t
Sable Recyclé	Flux sortant produit		0.3 t

B. Résultats

Le tableau 4 montre les impacts environnementaux de la production de 1 m³ de mortier avec du sable naturel alluvionnaire (SR_0 (Alluv)), du sable naturel rocheux (SR_0 (Roche)) et du sable recyclé (SR_R100). La présence d'une valeur d'impact négative dans la catégorie d'impact "Utilisation des ressources, minéraux et métaux" indique que l'impact des processus évités (production de gravillon naturel et transport vers la carrière) est plus important que l'impact des restants.

Tableau 4 : Impacts environnementaux de la production de 1 m³ de mortier prêt-à-l'emploi

Catégories d'impact	Unité	SR_0 (Alluv)	SR_0 (Roche)	SR_R100
Changement climatique	kg CO ₂ équiv.	2,42E+02	2,18E+02	1,75E+02
Appauvrissement de l'ozone	kg CFC 11 équiv.	2,28E-05	1,93E-05	1,16E-05
Rayonnements ionisants	kBq U235 équiv.	1,57E+01	1,54E+01	8,40E+00
Formation d'ozone photochimique	kg COVNM équiv.	6,93E-01	6,00E-01	4,01E-01
Matières particulaires	disease inc.	9,18E-06	7,61E-06	4,22E-06
Acidification	mole H ⁺ équiv.	8,35E-01	7,72E-01	5,34E-01
Eutrophisation, eau douce	kg P équiv.	3,10E-02	3,23E-02	2,29E-02
Eutrophisation, marine	kg N équiv.	2,24E-01	1,96E-01	1,34E-01
Eutrophisation, terrestre	mole N équiv.	2,49E+00	2,18E+00	1,42E+00
Ecotoxicité, eau douce	CTUe	2,66E+03	2,61E+03	1,83E+03
Utilisation des sols	sans dimension	53,3E+02	9,74E+02	1,21E+02
Utilisation d'eau	m ³ de privation équiv.	4,21E+01	13,5E+01	2,76E+01
Utilisation des ressources, fossiles	MJ	2,11E+03	1,77E+03	1,12E+03

Utilisation des ressources, minéraux et métaux	kg Sb équiv.	2,15E-03	2,36E-03	-2,28E-03
--	--------------	----------	-----------------	-----------

C. Interprétation

Des études comparatives sont réalisées afin de mieux comprendre les impacts environnementaux des mélanges proposés et d'améliorer la crédibilité de la modélisation. Différents facteurs sont examinés : contribution des différents processus, taux de production de sable recyclé, distance de transport du sable recyclé. Une analyse d'incertitude est aussi réalisée simultanément à chaque comparaison de scénarios en utilisant la méthode Monte-Carlo. Les catégories d'impact présentant une incertitude supérieure à 5% sont écartées de l'interprétation et des conclusions. Les figures 2 et 3 présentent les contributions des processus au "changement climatique" et à "l'utilisation des ressources, minéraux et métaux". La figure 2 est choisie pour représenter les tendances remarquées dans les catégories d'impact tandis que la figure 3 est la catégorie la plus impactée. Les résultats sont présentés relativement par rapport à SR_0 (Alluv) qui est la solution de référence.

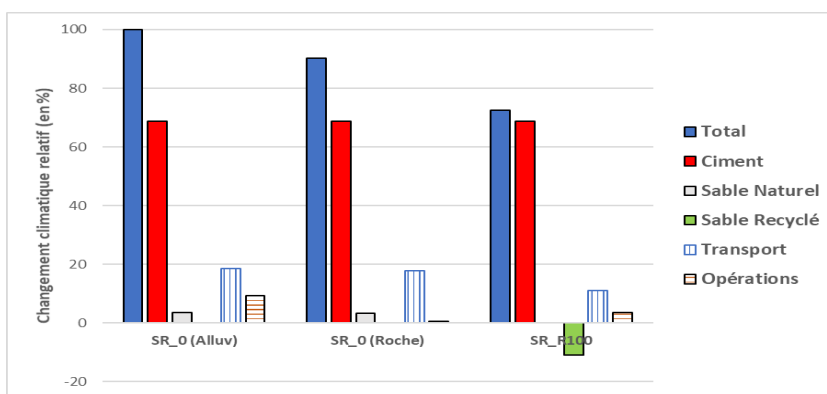


Figure 2 : Contribution des processus au changement climatique

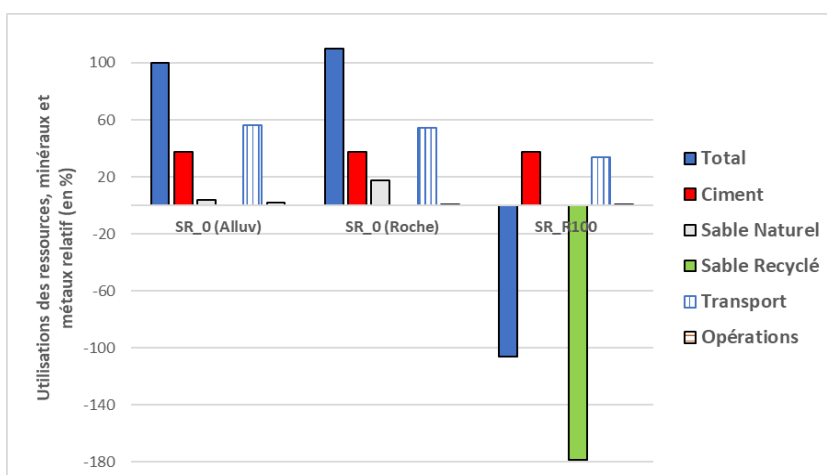


Figure 3 : Contribution des processus à l'utilisation des ressources, minéraux et métaux

Sur la base des résultats, les conclusions tirées sont résumées ci-dessous :

- Les sables naturels alluvionnaire et rocheux ont des impacts environnementaux du même ordre de grandeur pour les catégories d'impact présentées dans le Tableau 4 sauf au

niveau de 2 indicateurs ; Le sable rocheux présente une réduction de 80% de la catégorie "utilisation des sols" et une augmentation de 70% de la catégorie "utilisation d'eau" par rapport à l'alluvionnaire. Ceci étant directement lié à leurs modes de production.

- La substitution des sables naturels par du sable recyclé permet de réduire l'impact environnemental des mélanges de mortiers prêts à l'emploi. Ainsi, le sable recyclé peut être une alternative appropriée aux sables naturels (alluvionnaire et rocheux) d'un point de vue environnemental.
- Le ciment est le plus grand contributeur à l'impact environnemental de chaque mélange, suivi par l'impact des processus de transport (entre 10 et 40%), tandis que les processus de production en usine (opérations) sont ceux qui ont le moins d'impact (< 10%).
- La contribution du sable recyclé présente une valeur négative dans toutes les catégories d'impact. Ceci est principalement lié à la production évitée de gravillon naturel et au transport évité vers la carrière. Cette valeur compense la charge environnementale causée par les autres groupes de la catégorie d'impact "Utilisation des ressources, minéraux et métaux".
- La distance de rentabilité écologique pour SR_R100 est de 200 km. C'est la distance limite à partir de laquelle l'impact de SR_R100 dépasse celui de SR_0 (Alluv). Elle est calculée pour chaque catégorie d'impact et il s'est avéré que la plus petite valeur (200 km) correspond à l'appauvrissement de la couche d'ozone.
- Le taux de production de sable lors du recyclage du béton est actuellement de 30% selon les données industrielles. Ce taux pourrait être facilement ajusté sur site selon les besoins. Ainsi, le taux correspondant à l'annulation de l'impact sur "l'utilisation des ressources, minéraux et métaux" serait égal à 53%.

Il convient de noter que ces conclusions dépendent des choix effectués lors de la modélisation et des calculs (unité fonctionnelle, frontières du système, règles d'allocation, caractéristiques géographiques). Par conséquent, les résultats et les conclusions doivent être systématiquement réévalués avant toute généralisation d'une application similaire.

V. Étude économique

A. Critères et hypothèses de modélisation

L'aspect économique est un élément crucial dans le développement de l'industrialisation de tout produit. En effet, même si le système de production est plus vertueux d'un point de vue environnemental, il doit avoir une certaine rentabilité économique, sinon il ne sera ni viable ni mis en œuvre. Par conséquent, un outil d'aide à la décision qui prend en compte l'aspect économique est un atout indéniable.

Dans cette étude, l'ACV est couplée à un calcul du coût du cycle de vie (ACC). L'ACC est une méthode permettant d'estimer le coût total d'un système tout au long de son cycle de vie (Larsen et al., 2022). Les conditions limites et les processus du système sont considérés comme identiques à ceux utilisés dans l'évaluation environnementale. Cette méthode est utilisée pour estimer la rentabilité économique de l'utilisation du sable recyclé du point de vue des deux entités

économiques : le producteur de sable recyclé et le producteur de mortier prêt-à-l'emploi, qui sont effectivement deux entreprises distinctes dans notre cas. Ainsi, les études de ces sous-systèmes sont menées séparément. Les prix des matériaux, du transport, de l'énergie et de l'exploitation ont été estimés sur la base des prix du marché de la région toulousaine durant le mois de mars 2022. Pour le sable recyclé, une ACC est réalisée pour la production du point de vue de son producteur. SR a ensuite été modélisé comme une matière première acquise par le producteur de mortier prêt-à-l'emploi. Le coût total de la production de sable recyclé est calculé comme étant égal à 30 % du coût total des processus de recyclage du béton. Son prix « brut » de production s'avère ainsi être égal à 17 % du prix du marché du sable naturel. Comme il n'existe pas encore de marché mature dans la région toulousaine, 4 hypothèses ont été prises pour estimer son prix représentant différents scénarios et n'affectant que le prix de SR_R100. Ces hypothèses vont du prix le plus bas au prix le plus élevé du SR.

- LCC1 : le prix du SR est le même que le coût de sa production. Il est égal à 17% du prix du SN tel que mentionné ci-dessus.
- LCC2 : le prix du SR est égal au prix du SN auquel on retire le coût de l'élimination et du transport : nous considérons que le producteur de SR peut offrir un prix compétitif pour le SR tout en gardant la même marge bénéficiaire. Il est alors égal à 34% du prix du SN.
- LCC3 : le prix du SR est égal au prix du SN : nous considérons que le SR peut remplacer le SN et a donc le même prix de marché.
- LCC4 : le prix du SR est le prix du SN auquel on rajoute le coût du processus de recyclage du béton. Il est égal à 117% du prix du SN ; le producteur de SR peut monétiser les avantages environnementaux du recyclage du béton et obtenir ainsi un bénéfice net égal au bénéfice brut du producteur de SN.

Les autres coûts opérationnels, y compris l'administration, la main-d'œuvre, les machines et l'équipement, sont exclus de cette étude car ils sont estimés être égaux dans tous les scénarios comparatifs.

B. Résultats

La figure 4 montre la contribution de chaque catégorie aux coûts totaux par rapport à SR_0 (Alluv).

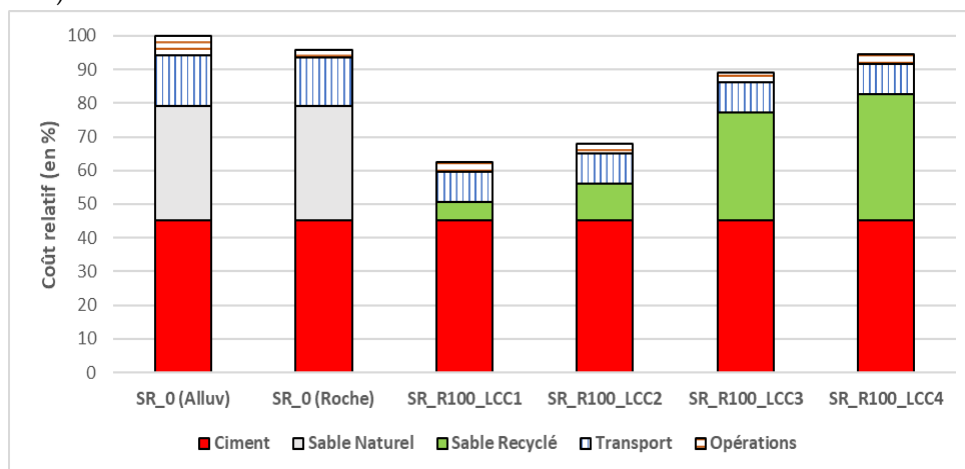


Figure 4 : Coûts relatifs totaux et contribution aux coûts par catégories

C. Interprétation

- La substitution du sable naturel (alluvionnaire ou rocheux) par du sable recyclé entraîne une réduction du coût total des mélanges de mortiers prêts-à-l'emploi.
- La catégorie des matières premières est celle qui contribue le plus au coût total de chaque mélange (entre 79 et 88% selon le mélange), suivie par le transport (entre 10 et 15%), tandis que les processus de production en usine sont les moins coûteux (entre 3 et 7%).
- Le coût du SR est le principal paramètre affectant la variation du coût total des mélanges. Mais même lorsque le coût du SR est égal à 117% du SN, son utilisation montre des avantages économiques par rapport au SN : ceci est lié à la réduction de la distance d'acheminement et à l'absence du processus de séchage. Ceci met en lumière l'importance de la sobriété énergétique et de l'approvisionnement local. Suite à ces résultats, des calculs ont été effectués pour déterminer le prix à associer au SR pour atteindre un seuil de rentabilité par rapport à SR₀ : Le prix de SR peut atteindre jusqu'à 174% de celui de SN sans augmenter le coût de production de SR_{R100} relativement à SR₀.

VI. Conclusion

L'analyse environnementale a montré qu'il y a des avantages environnementaux associés au remplacement du sable naturel par du sable recyclé dans la production de mortier de maçonnerie prêt-à-l'emploi. En outre, l'analyse approfondie a fourni des informations pour aider à la prise de décision concernant l'adoption, l'organisation ou même l'optimisation de cette activité de production afin d'annuler la valeur de certains indicateurs. Ainsi, comme les ressources naturelles sont soumises à une forte pression pour répondre aux besoins actuels, l'annulation de la valeur de l'indicateur d'impact associé serait très bénéfique. La méthode ACV montre ainsi sa valeur en tant qu'outil d'aide à la décision qu'il est important de placer au début de la chaîne de décision. Si un intérêt environnemental n'est pas prouvé pour les mélanges proposés, cette méthode peut être utilisée pour orienter les choix en ajustant les différents paramètres, encore nombreux à ce stade. De même, l'analyse économique permet de vérifier la rentabilité de l'utilisation du SR dans les scénarios envisagés. Ces résultats soulignent la nécessité d'une collaboration entre les producteurs de SR et de mortier prêt-à-l'emploi pour maximiser les avantages de cette situation gagnant-gagnant avec la mise en place d'un marché rentable à tous points de vue : environnemental, économique et également social avec la création d'emplois associés.

Ainsi, dans notre cas, au vu des études environnementale et économique réalisées, il semble pertinent de poursuivre l'étude de cette valorisation, avec la mise en place d'une étude technique afin d'optimiser les formulations. Vu que la résistance à la compression requise est bien dépassée, SR_{R100} peut être ajustée surtout en réduisant la quantité de ciment utilisée permettant de réduire encore l'impact environnemental et le coût de la production.

REFERENCES

- Bisht, A., 2022. Sand futures: Post-growth alternatives for mineral aggregate consumption and distribution in the global south. *Ecological Economics* 191, 107233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107233>
- De Larrard, F., Colina, H., 2018. Le béton recyclé. <https://www.ifsttar.fr/ressources-en-ligne/librairie/collections-ifsttar/ouvrages-edites-par-ifsttar/le-beton-recycle/>
- Fraj, A.B., Idir, R., 2017. Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis: A case study of paris' region. *Construction and Building Materials* 157, 952–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>

- Larsen, V.G., Tollin, N., Sattrup, P.A., Birkved, M., Holmboe, T., 2022. What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, *LCSA. Journal of Building Engineering* 50, 104203. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104203>
- Le, M.T., Tributou, C., Escadeillas, G., 2019. Durability of mortars with leftover recycled sand. *Construction and Building Materials* 215, 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.179>
- Li, J., Xiao, F., Zhang, L., Amirkhanian, S.N., 2019. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production* 233, 1182–1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>
- Li, L., Zhan, B.J., Lu, J., Poon, C.S., 2019. Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars. *Construction and Building Materials* 209, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.044>
- Li, Z., Bian, Y., Zhao, J., Wang, Y., Yuan, Z., 2022. Recycled concrete fine powder (RFP) as cement partial replacement: Influences on the physical properties, hydration characteristics, and microstructure of blended cement. *Journal of Building Engineering* 62, 105326. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105326>
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufresnes, E., Sonnemann, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment* 93, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., Ignjatović, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management, Special Thematic Section: Sanitary Landfilling* 30, 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Marsh, A.T.M., Velenturf, A.P.M., Bernal, S.A., 2022. Circular Economy strategies for concrete: implementation and integration. *Journal of Cleaner Production* 362, 132486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132486>
- Miatto, A., Schandl, H., Fishman, T., Tanikawa, H., 2017. Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction. *Journal of Industrial Ecology* 21, 924–937. <https://doi.org/10.1111/jiec.12471>
- NF EN 998-2, 2016. Specification for mortar for masonry—Part 2: Masonry mortar.
- Roberts, M., Allen, S., Coley, D., 2020. Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review. *Building and Environment* 185, 107274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107274>
- Ulsen, C., Antoniassi, J.L., Martins, I.M., Kahn, H., 2021. High quality recycled sand from mixed CDW – is that possible? *Journal of Materials Research and Technology* 12, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.057>
- Ventura, A., 2022. Valorisation des déchets et bénéfices environnementaux : un long fleuve pas si tranquille. *AJCE*, vol.40.
- Yılmaz, Y., Seyis, S., 2021. Mapping the scientific research of the life cycle assessment in the construction industry: A scientometric analysis. *Building and Environment* 204, 108086. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108086>