



IMT Mines Alès
École Mines-Télécom

Centre CREER, équipe ERT

Guillaume Junqua

25 août 2023

ACV comparative de toitures

Application à des structures en lauzes



Sommaire

1.	INTRODUCTION	3
1.1	CONTEXTE DE LAUBAPRO.....	3
1.2	OBJECTIFS DE LAUBAPRO	3
1.3	DEFINITION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	4
1.3.1	Méthodologie d'analyse de cycle de vie	4
1.3.2	Interprétation.....	5
1.3.3	Base de données	6
1.3.4	Logiciel utilisé	6
2.	DEFINITION DES OBJECTIFS DE L'ETUDE	6
2.1	PUBLIC CONCERNE.....	6
2.2	ACTEURS DE L'ETUDE.....	6
3.	DEFINITION DU CHAMP DE L'ETUDE	7
3.1	OBJECTIFS	7
3.2	FRONTIERES DU SYSTEME.....	8
3.3	LIMITES DU PERIMETRE CHOISI SUR LA CONSISTANCE ET LA REPRESENTATIVITE DE L'ETUDE	9
3.4	DEFINITION DU TYPE D'ACV A CONDUIRE ET DU SYSTEME D'ALLOCATION A METTRE EN PLACE	9
3.5	FONCTION, UNITE FONCTIONNELLE, DUREE DE VIE.....	10
3.6	CHOIX DE LA METHODE D'EVALUATION DES IMPACTS ET DES INDICATEURS	10
4.	INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE	11
5.	ANALYSE DES RESULTATS	18
5.1	CHOIX DES INDICATEURS	18
5.2	COMPARAISON DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TOITURE	19
5.2.1	Changements climatiques	19
5.2.2	Epuisement des ressources fossiles	20
5.2.3	Epuisement des ressources métalliques	20
5.2.4	Toxicité humaine.....	21
5.2.5	Particules dans l'air	21
5.2.6	Synthèse.....	22
5.3	ETUDE DE SENSIBILITE.....	23
5.3.1	Métal utilisé	23
5.3.2	Transports.....	25
5.3.3	Procédés de fabrication	28
6.	CONCLUSION	30
	ANNEXE	31

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE LAUBAPRO

L'Association des Bâisseurs en Pierres Sèches (APBS) vise à promouvoir l'utilisation des pierres sèches (c'est-à-dire sans mortier ou autre liant) pour la conservation du patrimoine bâti en France.

Laubapro (**lau**ziers et **bâ**isseurs **prof**essionnels) est un programme de développement (2020-2022) né d'un travail collaboratif réunissant artisans, associations, élus et institutions pour répondre aux besoins des territoires et des filières professionnelles de la lauze et de la pierre sèche. Il est soutenu par l'Agence Nationale de la Cohésion des Territoires (ANCT).

Poursuivant la dynamique initiée par le projet Laubamac (2016-2019) sur les filières de la lauze et de la pierre sèche à l'échelle du Massif Central, les actions menées au sein de Laubapro s'appuient sur un solide réseau partenarial en perpétuel développement.

Ainsi, le projet LAUBAPRO vise à développer et consolider les filières des lauziers et bâtisseurs professionnels, notamment par l'identification de gisements et l'élaboration de guides de bonnes pratiques de la production à la mise en œuvre de ces matériaux à l'échelle du Massif Central. En effet, cette région montagneuse utilise la pierre sèche pour différentes applications telles que les toitures (lauzes), les murs de bâtiments ainsi que des ponts ou des murs de soutènement des terrasses. En fonction de la localisation du site, la roche utilisée est de nature différente (calcaire, schiste, phonolithe, granite, etc). Elle peut provenir de carrières artisanales ou de gisements secondaires (réutilisations).

L'équipe ERT (Eau Ressources Territoires) de l'IMT Mines Alès travaille sur la gestion intégrée de l'eau à l'aide d'une large palette de compétences capitalisant sur des savoir-faire de recherche en biologie, chimie, mesure et développement de capteurs, écologie industrielle, analyse de cycle de vie (ACV), géologie, géostatistique, statistique et modélisations hydro(géo)logique et statistique. Elle vise notamment, dans un cadre d'économie circulaire, à proposer des démarches et des systèmes d'évaluation appropriés permettant l'adaptation des territoires devant faire face à une transition socio-écologique, sous la pression conjointe des changements globaux et de l'émergence des nouvelles technologies.

L'évaluation environnementale de ce type de toiture et sa comparaison par rapport à des systèmes conventionnels doit permettre de vérifier si les pratiques traditionnelles d'approvisionnement en circuit court et de réutilisation aboutissent à des solutions environnementalement viables. L'étude ACV initiale a été conduite par Zhixiang Hou, élève-Ingénieur de seconde année de l'IMT Mines Alès sous la supervision de Guillaume Junqua et en lien avec Tara Soleimani en support expert en ACV (méthodologie et logiciel), puis approfondie par Guillaume Junqua, notamment au niveau des études de sensibilité.

1.2 OBJECTIFS DE LAUBAPRO

LAUBAPRO comporte 13 actions concrètes portées par 10 partenaires répartis sur le territoire du Massif Central et s'inscrivent dans une dynamique collaborative.

Ces actions ont été retenues pour leur caractère innovant et leur capacité à inspirer d'autres acteurs aux niveaux local, régional et national afin de développer l'économie au sein des territoires. Une de ces actions vise à :

- ▶ Comparer l'impact environnemental de différents systèmes d'ouvrages en pierres sèches vs conventionnels ;
- ▶ Modéliser l'ensemble du cycle de vie d'ouvrages en pierres sèches pour analyser le poids de chaque étape dans son impact environnemental et de réaliser une étude de sensibilité afin de suggérer des optimisations.

Ces modèles simplifiés seront intégrés dans un outil d'aide à l'approvisionnement en lauzes d'un chantier faisant l'objet d'une autre action (réalisée par Yannick Igor Fogue Djombou, Mine de talents - MP d'Oc).

1.3 DEFINITION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

1.3.1 Méthodologie d'analyse de cycle de vie

L'ACV est une méthode normalisée (série des normes ISO 14 040¹ et ISO 14 044²) permettant de réaliser une évaluation environnementale d'un produit, ou, d'une manière plus générale, d'un système, selon différents critères environnementaux qui sont choisis. Le cycle de vie d'un produit ou d'un service « du berceau à la tombe » inclue :

- ▶ L'extraction des matières premières ;
- ▶ La transformation de ces matières premières et la fabrication du produit ou du système ;
- ▶ L'utilisation du produit ou du système ;
- ▶ Sa fin de vie ;
- ▶ Les différentes étapes de transport associées.

Dans le cas d'un système, ce sont l'ensemble des cycles de vie des différents produits, procédés ou services composant ce système qui sont pris en compte. Dans cette étude, « système » sera donc utilisé en lieu et place de « produit » pour désigner la filière de production et d'approvisionnement et de mise en œuvre des lauzes.

Une ACV comporte 4 étapes de réalisation, chacune détaillée dans les paragraphes suivants :

- ▶ Définition de l'objectif et du champ de l'étude ;
- ▶ Réalisation de l'inventaire ;
- ▶ Evaluation des impacts ;
- ▶ Interprétation.

Définition des objectifs et du périmètre de l'étude

Lorsqu'on réalise une ACV, les **objectifs** sont préalablement définis. Les objectifs peuvent désigner les raisons qui conduisent à réaliser l'étude. Ces raisons peuvent être très diverses et concerner une entreprise et son environnement (management environnemental, communication environnementale...) ; une organisation et un domaine d'étude (gestionnaire d'une filière de production ou gestion en fin de vie...) ... Les applications directes d'une ACV peuvent être le développement et amélioration de système ; la planification stratégique ; la politique publique ; le marketing ; autres.

Il convient de clarifier également si l'étude elle-même est destinée à être publiée ou non, auquel cas elle devra faire l'objet d'une revue critique d'expertise extérieure. Une revue critique n'est pas nécessaire pour une utilisation en interne.

Les objectifs désignent aussi ce qui doit sortir de l'étude. Le premier objectif concerne la détermination des impacts environnementaux à considérer. Les impacts à évaluer peuvent être globaux et/ou localisés. Les impacts évalués peuvent concerner les ressources ; le climat ; les milieux aquatiques et terrestres (acidification, eutrophisation...) ; la santé humaine (toxicité...) ; etc. Des impacts environnementaux pouvant être évalués avec une ACV, celle-ci peut avoir pour autre objectif de déceler des pistes de réduction d'impact. Enfin, l'ACV est une méthode qui peut évaluer les conséquences pour l'environnement d'éventuelles modifications entre systèmes alternatifs. Un troisième objectif est donc l'évaluation de différents scénarios.

La définition du **périmètre de l'étude** nécessite une description préalable claire du système étudié, ainsi que du contexte afin de définir les fonctions et les frontières du système. Cette

¹ ISO 14040:2006, Environmental management: life cycle assessment: principles and framework. Vol. ISO, 14040

² ISO 14044 :2006, Environmental management: life cycle assessment; requirements and guidelines (Vol. 14044). Geneva, Switzerland: ISO

description permet d'appréhender le cadre dans lequel se situe le système et d'avoir un regard critique sur le niveau de dématérialisation de l'analyse.

La description du système permet à la fois d'en décrire les **fonctions**, mais également aux relecteurs de clairement identifier le sujet d'étude. Ce système se caractérise par sa fonction, pouvant être comprise comme le service qu'il nous rend. Une ACV doit clairement considérer les fonctions du ou des systèmes étudiés. Cette étape est essentielle car elle constitue une base de comparaison entre les différents systèmes. Une comparaison quantifiée l'est à l'aide d'une unité de référence que l'on appelle **unité fonctionnelle** ou UF. Cette unité fonctionnelle doit par conséquent être clairement définie, cohérente avec les objectifs de l'étude et mesurable. Le **flux de référence** induit les quantités de matières et d'énergie utilisées par un système pour remplir sa fonction, autrement dit le flux de référence est la quantité de « système » nécessaire pour remplir une unité fonctionnelle.

Les **frontières du système** consistent à déterminer quels sont les processus qui vont être intégrés ou exclus de l'analyse puis, pour les processus inclus, voir comment gérer les affectations avec le système amenant au flux de référence et jusqu'à quel niveau de détail par processus. Cela nécessite de connaître les catégories de données à étudier, leur qualité, mais aussi d'explicitier les hypothèses retenues, ainsi que leurs limites.

Inventaire de cycle de vie

La **phase d'inventaire** dans une ACV consiste à chercher toutes les informations nécessaires pour faire un bilan des éléments entrants et sortants aux frontières du système. L'inventaire amène à un bilan de flux élémentaires qui sont des flux de matière ou d'énergie prélevés dans l'environnement sans transformation humaine préalable ou rejetés dans l'environnement sans transformation humaine ultérieure (ressources prélevées, rejets dans l'air, rejets dans l'eau, rejets dans les sols). Il est très difficile de boucler un inventaire complet sans outil. Il existe pour cela des bases de données d'inventaire qui permettent de prendre en compte des phases amont de composants de systèmes.

Evaluation des impacts

Les flux élémentaires inventoriés peuvent être de plusieurs centaines, et sont donc difficilement exploitables en l'état. Ils génèrent différents impacts environnementaux potentiels globaux, régionaux ou locaux. Ces impacts permettent une exploitation plus aisée des résultats. Les principaux sont l'effet de serre, l'épuisement des ressources naturelles, la pollution atmosphérique particulaire, l'acidification atmosphérique ou terrestre, l'eutrophisation, la formation d'oxydants photochimiques, la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, la toxicité, l'écotoxicité.

Dans le principe, un flux peut être à l'origine de plusieurs impacts et un impact peut être dû à plusieurs flux. Ainsi le dioxyde de carbone est à l'origine de l'acidification des océans en particulier et de l'effet de serre, lui-même induit également par différents composés (N_2O , vapeur d'eau, méthane...). Les impacts sont alors donnés en équivalent d'une substance, par exemple, en équivalent CO_2 pour l'effet de serre. Le méthane aura alors sa contribution en équivalent CO_2 pour l'effet de serre. Chaque flux ayant une contribution (nulle ou certaine) à un impact, il faut donc sommer pour chaque impact les contributions de chaque flux, en intégrant un coefficient multiplicatif d'équivalence.

Cependant, cette évaluation d'impacts potentiels n'est pas une évaluation quantitative des conséquences environnementales liées à un impact.

1.3.2 Interprétation

Cette phase se réalise tout au long d'étude d'ACV. Elle constitue une prise de recul, visant à analyser les informations obtenues dans les différentes phases, et à reconsidérer le cas échéant la pertinence des données recueillies ou la validité des hypothèses formulées initialement. Elle vise aussi à identifier les processus du système les plus impactants. Des **analyses de sensibilité** peuvent permettre de caractériser les paramètres clés ayant une

forte influence sur les résultats. Les **analyses d'incertitude** permettent de caractériser l'influence cumulée des incertitudes et de la variabilité des données d'entrée sur les résultats. Ainsi, la phase d'interprétation permet d'améliorer la robustesse du modèle proposé.

1.3.3 Base de données

La base de données d'inventaire utilisée est Ecoinvent 3.5. Certains procédés ont été modifiés afin de tenir compte de spécificités locales.

La base de données Ecoinvent³ est une base de données commerciale développée par le Centre suisse Ecoinvent, avec des données provenant principalement d'informations statistiques ainsi que de la littérature technique.

La base de données Ecoinvent est l'une des bases de données les plus utilisées dans le domaine international de l'ACV et l'une des bases de données de base spécifiées par de nombreuses institutions.

1.3.4 Logiciel utilisé

. Le logiciel utilisé est Open LCA 1.10.3 qui est un logiciel en open source.⁴

2. DEFINITION DES OBJECTIFS DE L'ETUDE

2.1 PUBLIC CONCERNE

Le public concerné concerne en premier lieu les différents partenaires du projet Laubapro et leurs financeurs. Cette étude n'a pas l'objet de revue critique, ce qui limite son utilisation et sa diffusion à un usage interne

2.2 ACTEURS DE L'ETUDE

Les acteurs de l'étude sont les partenaires et les financeurs du projet Laubapro.

³ Site internet de la base de données : <https://ecoinvent.org/>

⁴ Site internet du logiciel : <https://www.openlca.org/>

3. DEFINITION DU CHAMP DE L'ETUDE

3.1 OBJECTIFS

Cette étude comporte deux objectifs :

- comparer l'impact environnemental de différents systèmes de toiture en analysant l'ACV de Lauze de Cayrol (dite « lauze schiste »), Ardoise CUPA (« Ardoise espagnole », Lauze calcaire (« lauze calcaire ») et tuiles céramiques de TERREAL (usine de Castelnaudary ; « tuile »).
- modéliser l'ensemble du cycle de vie de différentes toitures pour analyser le poids de chaque étape dans son impact environnemental et de réaliser une étude de sensibilité afin de suggérer des optimisations pour différents matériaux de toiture.

L'ACV a modélisé l'utilisation de la Lauze du Cayrol comme matériau de toiture pour le projet de la Maison Médicale Intercommunale de Saint Come D'Olt (Figure 1) et trois autres matériaux alternatifs, la Lauze calcaire, l'Ardoise CUPA⁵, leader sur le marché français et Tuiles les céramiques de TERREAL du site de production de Castelnaudary⁶ qui fournit des tuiles utilisées pour la rénovation de monuments historiques⁷.

⁵ CUPA PIZARRAS, Fiche de déclaration environnementale et sanitaire, Ardoise naturelle CUPA 6,85 mm, N° enregistrement INIES : 4-203:2019, 19 pages.

⁶ TERREAL, Tuile Terreal Languedocienne & Languedocienne Vieux Pays, Fiche produit, 8 pages.

⁷ Les tuiles canal : <https://www.culture.gouv.fr/Media/Regions/Drac-Paca/Files/Aides-demarches/Demarches-et-conseils-architecture-patrimoine/Fiches-conseil/Stap-des-Alpes-Haute-Provence/Tuiles-canal>

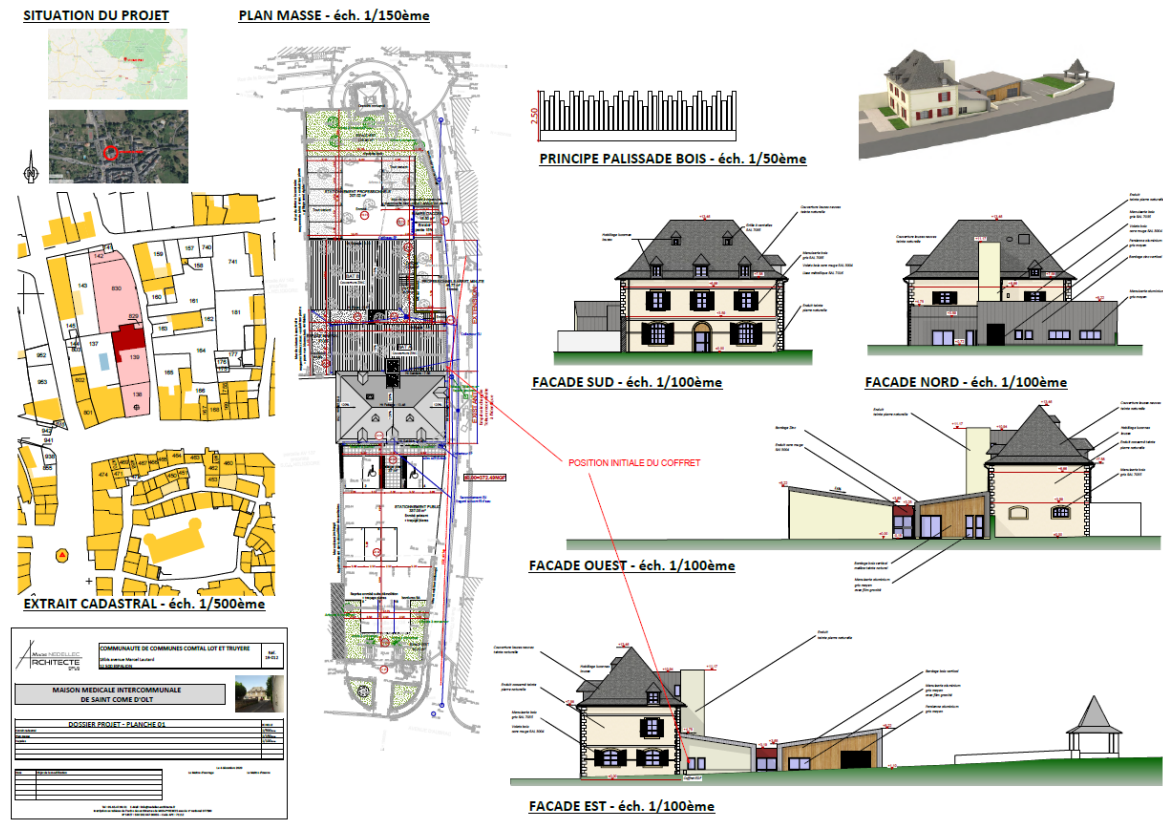


Figure 1. Localisation et présentation de la toiture étudiée

Ces différents systèmes de toiture ont été modélisés et calculés pour analyser l'impact environnemental des différents matériaux. Pour ce faire, du fait des masses très différentes de ces matériaux ainsi que des poses également très différentes, le dimensionnement de la charpente et des supports (chevrons, voliges) ont été adaptés.

Par ailleurs, une analyse des hotspots environnementaux de chaque système a été réalisée afin d'aller plus loin dans l'analyse de chaque système, et d'identifier les pistes d'améliorations, notamment pour les lauzes.

3.2 FRONTIÈRES DU SYSTÈME

Cette analyse du cycle de vie a été réalisée du berceau à la tombe (Figure 2).

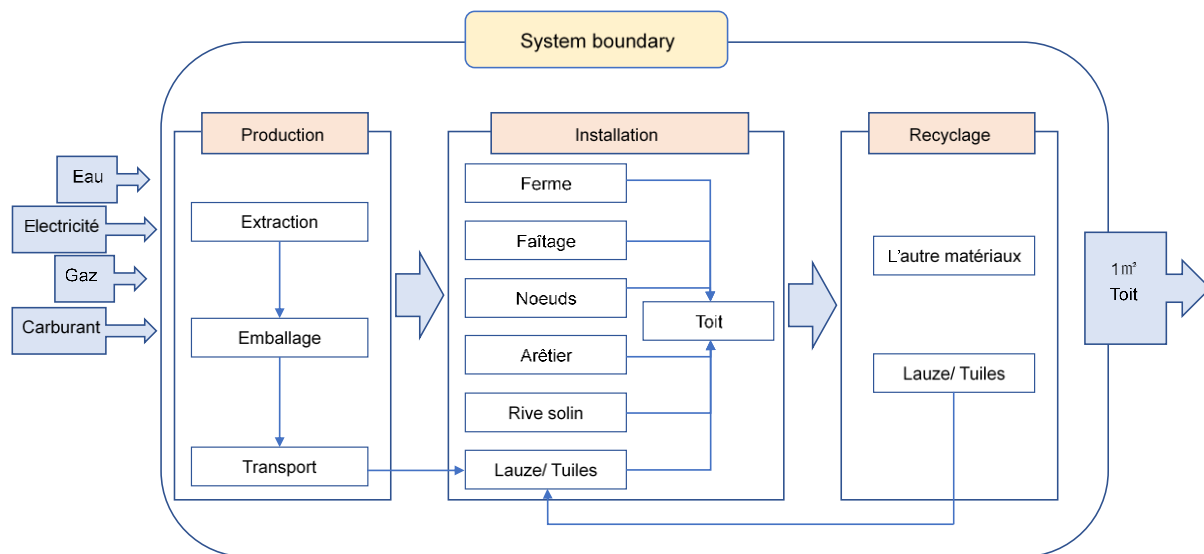


Figure 2. Frontières du système étudié

3.3 LIMITES DU PERIMETRE CHOISI SUR LA CONSISTANCE ET LA REPRESENTATIVITE DE L'ETUDE

Cette étude dépend fortement de la localisation du chantier et des sources d'approvisionnement. Ces résultats ne peuvent donc pas être directement généralisés à d'autres cas. Afin de pouvoir surmonter ce point faible, une étude de sensibilité a été réalisée pour tester les hypothèses et identifier les paramètres influant le plus sur les résultats.

3.4 DEFINITION DU TYPE D'ACV A CONDUIRE ET DU SYSTEME D'ALLOCATION A METTRE EN PLACE

Il est important de définir le type d'ACV car le choix des systèmes d'allocation utilisés seront différents.

Cette étape reste un challenge pour les praticiens de l'ACV, car plusieurs guides de recommandations et experts scientifiques donnent des avis divergents, tout en restant conformes à la norme ISO 14 044 (Schrijvers et al., 2020)⁸.

Les allocations visent à répartir la charge environnementale du procédé sur les différents co-produits sortant d'un système et donc à prendre en compte la multifonctionnalité d'un système (par exemple, les lauzes, graviers, blocs de pierre dans le cas d'une carrière artisanale). Le choix de ces systèmes d'allocation fait l'objet de vifs débats depuis plus de 20 ans. Il faut garder en tête que ces allocations ne sont pas « objectives » mais sont plutôt des jugements de valeur du praticien d'ACV⁹. De ce fait, il n'y a pas de système d'allocation idéal. Pour choisir le type d'ACV à effectuer (attributionnelle ou conséquentielle) et le type d'allocation (partition, expansion ou substitution), la procédure de Schrijvers et al., 2020, qui semble la plus robuste en l'état actuel des connaissances, a été appliquée.

Ici, la raison première de l'ACV étant de comparer les impacts engendrés par la consommation d'un produit et d'alternatives, nous sommes dans une perspective orientée produit. La perspective de cette étude ACV est de comptabiliser des impacts. Enfin, l'unité fonctionnelle

⁸ Schrijvers D. Loubet Ph., Sonneman G. (2020). Archetypes of Goal and Scope Definitions for Consistent Allocation in LCA, Sustainability, 12(14), 5587. <https://doi.org/10.3390/su12145587>

⁹ Frischknecht R. (2000). Allocation in Life cycle inventory analysis for joint production, The International Journal of Life Cycle Assessment, 5(2), 85-95, <https://doi.org/10.1007/BF02979729>.

est centré sur un produit (la lauze) et non sur l'ensemble des produits générés par une carrière artisanale (lauzes, graviers, blocs).

L'ACV conduite sera donc attributionnelle et la méthode d'allocation utilisée afin d'allouer les impacts en sortie de carrière en fonction des différents produits sera une méthode par partition. Le choix d'une allocation dite par partition (économique, massique, ...) fait aussi l'objet de débats scientifiques.

Une approche de partition basée sur les sciences naturelles peut être appliquée selon des paramètres physiques permettant de traduire une causalité physique (Shrijvers et al., 2020). Ici, la masse a été sélectionnée afin d'allouer la charge environnementale aux différents produits en sortie de carrière, car elle est facilement applicable et rend compte des propriétés physiques des différents produits de carrière. Elle permet aussi d'éviter les problématiques de foisonnement qui seraient présentes si le volume était sélectionné.

Par contre, suite aux travaux de Zhixiang Hou¹⁰ permettant de montrer la faible contribution de certains éléments (palettes, films plastiques de packaging), ces éléments ont été négligés dans ce rapport : il s'agit d'une troncature.

3.5 FONCTION, UNITE FONCTIONNELLE, DUREE DE VIE

La fonction est la réalisation d'une toiture à Saint Côme d'Olt. L'unité fonctionnelle est la réalisation de 1 m² de toiture d'une durée de vie de 100 ans.

3.6 CHOIX DE LA METHODE D'EVALUATION DES IMPACTS ET DES INDICATEURS

La méthode Recipe 2016 a été sélectionnée car elle est adaptée au contexte européen et permet une analyse en End Point et en Mid Point. Les indicateurs vont être choisis en utilisant les résultats agrégés de la méthode Recipe EndPoint (H,A) et en vérifiant que les indicateurs contribuant le plus au score global pour chaque système sont similaires.

¹⁰ Rapport de Zhixiang

4. INVENTAIRE DE CYCLE DE VIE

Suite aux travaux de Zhixiang Hou¹¹, certains éléments ont été négligés de par leur faible contribution aux impacts : il s'agit des éléments de packaging (palettes, films plastiques). L'étanchéité à base de bandes de goudron n'a pas non plus été comptabilisée.

De plus, le bois a un caractère orthotrope engendrant des variations possibles de résistance mécanique en fonction de son sciage, de son séchage et de sa pose et nécessitant la prise en compte de multiples contraintes pour son dimensionnement précis. Cette complexité a conduit à proposer un dimensionnement sommaire des éléments de ferme, établi à l'aide d'un ex-dirigeant de scierie et ex-enseignant à la retraite de l'Ecole du Bois de Luchon (Jean-Charles Marchand) et prenant en compte les produits standard de scierie. Du fait de cette approche, il est possible que les fermes soient surdimensionnées.

Le Tableau 1 présente l'inventaire proposé pour les ardoises espagnoles. La CUPA4 a été sélectionnée car elle est recommandée par les Monuments historiques de France.¹² Afin de modéliser la production des ardoises espagnoles et faute de données précises sur la Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) de cette ardoise, le procédé "natural stone plate production, cut | natural stone plate, cut | APOS, U » a été sélectionné afin de rendre compte au mieux des impacts finaux donnés par la FDES et de la présence indiquée dans cette fiche d'opérations de sciage. Il a ensuite été modifié de la manière suivante :

- Une quantité de diesel, tirée du procédé « limestone square operation » a été ajoutée (0,018MJ) ;
- L'électricité est ajustée en tenant compte des résultats finaux sur les émissions de carbone et de fossil depletion : une consommation électrique de 0.28 kWh/kg de produit a ainsi été définie en sélectionnant le mix espagnol.

A noter que l'indicateur d'émissions des particules dans l'air n'a pas été pris en compte dans la FDES.

Pour le transport, compte tenu de la localisation des chantiers, un approvisionnement uniquement par camion est privilégié, ce qui va augmenter légèrement les impacts par rapport à la FDES. En effet, cette dernière considère que 35% des ardoises destinées au marché français sont expédiées par la mer (Vigo à Saint Nazaire). La FDES indique que ces ardoises sont destinées au marché régional autour de Saint Nazaire. Nous avons donc éliminé cette alternative.

Le taux de chute de cette ardoise (2,5% mentionné dans la FDES) est pris en compte ainsi que le taux de réutilisation (22%).

¹¹ Zhixiang Hou, Économie circulaire ACV d'une filière de construction d'ouvrages en pierres sèches, rapport de stage d'ingénieur adjoint de 3^{ème} année, IMT mines Alès, 2022, 36 pages.

¹² Site internet du fabricant : https://www.cupapizarra.com/fr/ardoise-naturelle-couverture/ardoises/?gclid=CjwKCAjwoqGnBhAcEiwAwK-Okcbf05Oi6loP_PvdI2KQsN46pIR3eh-M6yCemDkxEumpieDTWMhoARoC9oiQAvD_BwE

Tableau 1. Inventaire des flux et procédés EcolInvent mobilisés pour les ardoises espagnoles

Ardoise CUPA Monuments historiques (ardoise la plus épaisse)				
1m ² d'ardoise, durée de vie 100 ans				
Flow	Amount	Unit	Provider	Description
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	56.54	t*km	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 APOS, U - RER	Transport par semi remorque; 1068 km des carrières CUPA au chantier de Saint Côme d'Olt
lime, packed	2.039	kg	lime production, milled, packed lime, packed APOS, U - Europe without Switzerland	Hypothèse de 5 kg par mètre linéaire de faîtage, solin, noue, etc; chaux utilisée pour ses propriétés mécaniques de souplesse
zinc	0.38982	kg	market for zinc zinc APOS, U - GLO	Hypothèse de 1,5 kg par mètre linéaire de plaque de 333 mm de large, utilisée pour faîtage, noues, solins, etc le cas échéant
sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed	0.0261096	m3	planing, beam, softwood, u=10% sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed APOS, U - CH	Charpente en bois raboté car apparente. Production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%)	0.027	m3	board, hardwood, raw, kiln drying to u=10% sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%) APOS, U - CH	Volige en bois non raboté de 20 mm, production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
steel, chromium steel 18/8	0.199	kg	market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 APOS, U - GLO	Crochets en acier inoxydable
natural stone plate production, cut natural stone plate, cut APOS, U - ES	52,94	kg	natural stone plate production, cut natural stone plate, cut APOS, U - ES	Procédé de production de pierres au fil de diamant; la consommation électrique a été ajustée pour retrouver les valeurs de la FDES de l'ardoise CUPA concernant les indicateurs fossil depletion et climate change (ajout de consommation de carburant et mix électrique espagnol)

Les tuiles canal utilisées en rénovation de monuments historiques semblent provenir préférentiellement de trois usines, d'après un document de la DRAC précédemment cité. Il s'agit :

- Réabilis Domitia d'IMERYS (ou équivalent)¹³. Le site de production indentifié serait à Saint Geours d'Auribat situé à 401 km de Saint Côme d'Olt (chemin le plus court) ;
- Languedocienne Vieux-pays Castelveil de TERREAL (ou équivalent)¹⁴. Le site de production a été localisé à Castelnaudary situé à 187 km de Saint Côme d'Olt (chemin le plus court) ;
- Canal Midi patinée Nuances du sud de MONIER (ou équivalent), fabriquée à Limoux¹⁵, situé à 234 km du chantier (chemin le plus court).

Le site de production de Castelnaudary a été sélectionné car étant le moins éloigné.

Le procédé de fabrication d'EcolInvent a été repris tel quel car il donne des résultats très proches de la FDES des tuiles canal¹⁶.

Tableau 2. Inventaire des flux et procédés EcolInvent mobilisés pour les ardoises espagnoles

Tuile TERREAL, Castelnaudary, spéciale patrimoine				
1 m ² de tuile, durée de vie 100 ans				
Flow	Amount	Unit	Provider	Description
roof tile	65.8	kg	roof tile production roof tile APOS, U - RER	Procédé type EcolInvent repris tel quel; extraction de l'argile, transport de cette argile, opérations de carrière incluses. Une comparaison avec la FDES sur les tuiles canal montre des résultats assez proches, bien qu'étant un peu plus élevés dans notre modélisation concernant le procédé de fabrication
lime, packed	2.039	kg	lime production, milled, packed lime, packed APOS, U - Europe without Switzerland	Hypothèse de 5 kg par mètre linéaire de faîtage, solin, noue, etc; chaux utilisée pour ses propriétés mécaniques de souplesse
zinc	0.38982	kg	market for zinc zinc APOS, U - GLO	Hypothèse de 1,5 kg par mètre linéaire de plaque de 333 mm de

¹³ Tuile IMERYS : <https://edilians.com/canal-50-reabilis.html>

¹⁴ Déjà cité

¹⁵ Tuile canal midi MONIER :

https://assets.ctfassets.net/h1lj96ycs4pf/3e1PtB RBGS337fyXwm3h0E/c5dd37d889dca5b7093f81e396af02e6/Gamme_canal.pdf

¹⁶ CTMNC, Déclaration Environnementale de Produit (DEP) Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de la tuile canal et de la tuile plate de terre cuite, 2020, 22 pages : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>

				large, utilisée pour faitage, noues, solins, etc le cas échéant
sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed	0.0261096	m3	planing, beam, softwood, u=10% sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed APOS, U - CH	Charpente en bois raboté car apparente. Production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%)	0.02	m3	board, hardwood, raw, kiln drying to u=10% sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%) APOS, U - CH	Volige en bois non raboté de 20 mm, production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
steel, chromium steel 18/8	7.0	mg	market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 APOS, U - GLO	Crochets des premiers rangs
transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6	12.3	t*km	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 APOS, U - RER	187 km de transport par semi remorque depuis l'usine

Le Tableau 3 présente l'inventaire pour la lauze calcaire. Le procédé suisse d'exploitation de calcaire a été repris (les conditions suisses étant proches des conditions françaises). En revanche, il a été modifié de manière à supprimer la consommation de carburant des engins de chantiers comptabilisée par ailleurs. Le taux de chute est intégré directement, les chutes servant à caler les lauzes sur ce type de construction. L'association des lauziers couvreurs permet d'appréhender les spécificités des toitures en lauzes calcaires, qui reposent sur un effet de masse.¹⁷ Le taux de réutilisation n'a pas été pris en compte. Le choix de la carrière de Montdardier distant de 144 km est arbitraire. Lors de LAUBAPRO, des travaux d'étudiants avaient permis d'étudier cette Lauze.¹⁸

¹⁷ Association des artisans lauziers couvreurs : <https://artisanslauzierscouvreurs.fr/le-cqp-couvreur-lauzier-calcaire/> et <https://youtu.be/tq33900wPwM>

¹⁸ T. Encinas, F. Mollé, M. Trolio, L. Talbi, Analyse de cycle de vie : couvertures en lauzes calcaires, Mission R&D, IMT Mines Alès, 2018, 53 pages.

Tableau 3. Inventaire des flux et procédés EcolInvent mobilisés pour la lauze calcaire

Lauze calcaire				
1m ² de toiture, durée de vie 100 ans				
Flow	Amount	Unit	Provider	Description
limestone, unprocessed	131.5	kg	limestone quarry operation limestone, unprocessed APOS, U - Copy sans diesel - CH	Correspond au procédé d'extraction, hors engins de chantier
lime, packed	2.039	kg	lime production, milled, packed lime, packed APOS, U - Europe without Switzerland	Hypothèse de 5 kg par mètre linéaire de faîtage, solin, noue, etc; chaux utilisée pour ses propriétés mécaniques de souplesse
zinc	0.38982	kg	market for zinc zinc APOS, U - GLO	Hypothèse de 1,5 kg par mètre linéaire de plaque de 333 mm de large, utilisée pour faîtage, noues, solins, etc le cas échéant
sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed	0.0348128	m3	planing, beam, softwood, u=10% sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed APOS, U - CH	Charpente en bois raboté car apparente. Production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%)	0.027	m3	board, hardwood, raw, kiln drying to u=10% sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%) APOS, U - CH	Volige en bois non raboté de 27 mm, production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français; compte tenu du poids très important des lauzes calcaires, possible sous estimation
steel, chromium steel 18/8	0.0	kg	market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel	Pas de crochets ou autres éléments d'accroche

			18/8 APOS, U - GLO	
diesel, burned in building machine	57,42	MJ	market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine APOS, U - GLO	Correspond aux engins de carrière; varie de 1,45 litres à 14,L par m ²
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	18.94	t*km	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 APOS, U - RER	Camion 16-32 tonnes plus adapté au relief, autres tonnages possibles

Pour la lauze schiste (Tableau 4), l'exploitation a été assimilée à une exploitation de calcaire. En revanche, le procédé Ecolnvent, suisse afin de refléter les conditions françaises assez proches, a été modifié de manière à supprimer la consommation de carburant des engins de chantiers comptabilisée par ailleurs. Le taux de chute considéré est de 2%. L'association des artisans lauziers couvreurs montre la mise en œuvre de ce type de toiture¹⁹. Le taux de réutilisation n'a pas été pris en compte.

Tableau 4. Inventaire des flux et procédés Ecolnvent mobilisés pour la lauze schiste

Lauze schiste				
1m ² de toiture, durée de vie 100 ans				
Flow	Amount	Unit	Provider	Description
limestone, unprocessed	112.0	kg	limestone quarry operation limestone, unprocessed APOS, U - Copy sans diesel - CH	Correspond au procédé d'extraction, hors engins de chantier; taux de chute de 2 %
lime, packed	2.039	kg	lime production, milled, packed lime, packed APOS, U - Europe without Switzerland	Hypothèse de 5 kg par mètre linéaire de faitage, solin, noue, etc; chaux utilisée pour ses propriétés mécaniques de souplesse
zinc	0.38982	kg	market for zinc zinc APOS, U - GLO	Hypothèse de 1,5 kg par mètre linéaire de plaque de 333 mm de large, utilisée pour faitage, noues, solins, etc le cas échéant

¹⁹ Association des artisans lauziers couvreurs : <https://artisanslauzierscouvreurs.fr/le-cqp-couvreur-lauzier-schiste/> et <https://youtu.be/XXhZffEGvJ0>

sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed	0.0348128	m3	planing, beam, softwood, u=10% sawnwood, beam, softwood, dried (u=10%), planed APOS, U - CH	Charpente en bois raboté car apparente. Production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français
sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%)	0.027	m3	board, hardwood, raw, kiln drying to u=10% sawnwood, board, hardwood, raw, dried (u=10%) APOS, U - CH	Volige en bois non raboté de 27 mm, production suisse CH sélectionnée car mix électrique Suisse plus comparable au mix français; compte tenu du poids très important des lauzes calcaires, possible sous estimation
steel, chromium steel 18/8	0.199	kg	market for steel, chromium steel 18/8 steel, chromium steel 18/8 APOS, U - GLO	Estimé en faisant une hypothèse d'équivalence avec l'ardoise classique à crochets
diesel, burned in building machine	28.9	MJ	market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine APOS, U - GLO	Correspond aux engins de carrière
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	2.8	t*km	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 APOS, U - RER	Camion 16-32 tonnes plus adapté au relief, autres tonnages possibles

5. ANALYSE DES RESULTATS

5.1 CHOIX DES INDICATEURS

Le Tableau 5 suivant présente les résultats (en points) des différents systèmes de toiture et pour chaque indicateur, ainsi que de manière agrégé par aire de protection (ressources, qualité des écosystèmes, santé humaine) puis en score unique. Un seuil de coupure arbitraire est fixé à 0.1 point. Ce seuil est confirmé par le fait que les contributions inférieures à ce seuil le sont de l'ordre de deux magnitudes.

Tableau 5. Comparaison des résultats globaux des différents systèmes de toiture

Indicateur d'impact (Recipe EndPoint (H, A), Points)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
resources (fossil depletion)	0.31506	0.58606	0.52181	0.83745
resources (metal depletion)	0.15449	0.16191	0.08034	0.10527
resources (total)	0.46955	0.74797	0.60215	0.94271
ecosystem quality (marine ecotoxicity)	6.46404E-5	8.78391E-5	4.32028E-5	5.96978E-5
ecosystem quality (freshwater ecotoxicity)	0.00026	0.00034	0.00015	0.00023
ecosystem quality (agricultural land occupation)	0.00077	0.00070	0.00078	0.00060
ecosystem quality (terrestrial acidification)	0.00085	0.00111	0.00114	0.00112
ecosystem quality (urban land occupation)	0.00438	0.02288	0.00938	0.00871
ecosystem quality (climate change, ecosystems)	0.14321	0.25505	0.21916	0.49008
ecosystem quality (freshwater eutrophication)	0.00036	0.00059	0.00035	0.00062
ecosystem quality (total)	0.15091	0.28660	0.23212	0.50898
human health (ozone depletion)	5.82190E-5	0.00011	0.00011	0.00013
human health (climate change, human health)	0.22657	0.40352	0.34674	0.77538
human health (human toxicity)	0.12975	0.16901	0.13413	0.17124
human health (ionising radiation)	0.00057	0.00162	0.00067	0.00093
human health (photochemical oxidant formation)	0.00382	0.00588	0.00423	0.00373
human health (particulate matter formation)	0.23253	4.56958	0.28672	0.21207
human health (total)	0.59330	5.14972	0.77260	1.16347
total (total)	1.21376	6.18429	1.60687	2.61517

Les indicateurs les plus fortement contributeurs sont similaires pour chaque système constructif. Il s'agit des changements climatiques, de l'épuisement des ressources fossiles, de l'épuisement des métaux, de la toxicité humaine et des particules dans l'air. L'aire de protection relative à la qualité des écosystèmes est celle qui est la plus faiblement contributrice au score unique. L'aire de protection sur la santé humaine contribue plus fortement que celle relative aux ressources, mais avec des valeurs qui restent du même ordre de grandeur, excepté pour l'ardoise espagnole qui se démarque. Cette différence est due à une émission

de particules particulièrement importante lors des opérations de taille de l'ardoise espagnole. Parmi les ressources, les fossiles contribuent plus fortement que les ressources métalliques, avec des variations qui peuvent être importantes.

Nous utiliserons donc pour la suite de l'étude les indicateurs suivants (Tableau 6) :

Tableau 6. Indicateurs sélectionnés pour la suite de l'étude

Indicateur Recipe mid point v1.13 (H)	Unité
Climate change (GWP100)	kg CO ₂ -Eq
Particulate matter formation (PMFP)	kg PM ₁₀ -Eq
Human toxicity (HTPinf)	kg 1,4-DCB-Eq
Fossil depletion (FDP)	kg oil-Eq
Metal depletion (MDP)	kg Fe-Eq

5.2 COMPARAISON DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TOITURE

Cette partie présente les résultats pour chacun des indicateurs sélectionnés, en comparant chaque système de toiture et en illustrant la contribution relative des principaux matériaux utilisés ainsi que des transports.

5.2.1 Changements climatiques

La Figure 3 compare les différents systèmes de toiture en termes de changements climatiques :

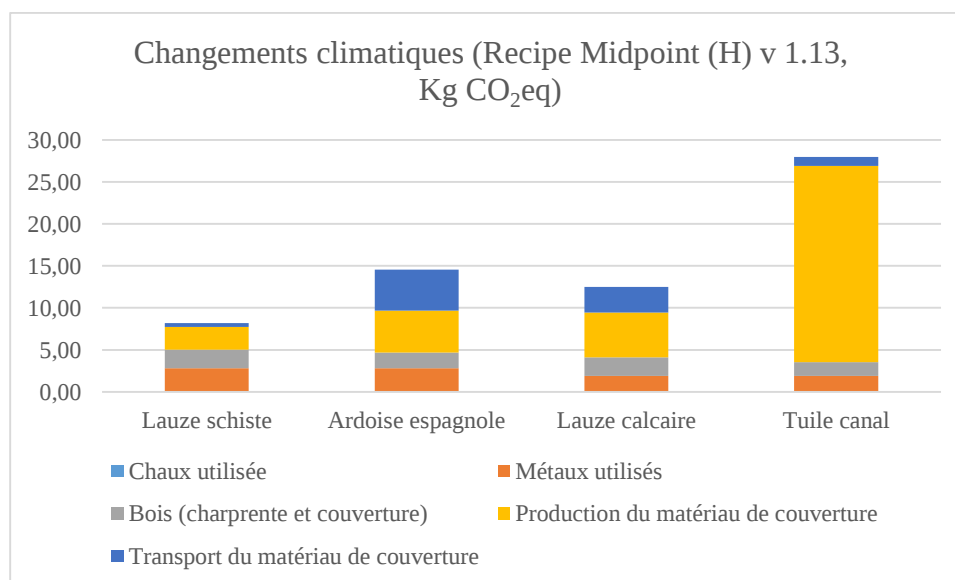


Figure 3. Comparaison des différents systèmes de toiture (changements climatiques, KgCO₂eq)

Les lauzes de schiste ont les meilleures performances relatives aux changements climatiques. L'étape de fabrication de l'ardoise espagnole ainsi que les transports sont les étapes les plus fortement contributrices sur ce produit et cette catégorie d'impact.

La lauze calcaire, qui nécessite une masse de matériaux plus importante que la lauze de schiste, a une étape liée aux transport plus importante, ainsi que l'étape liée à l'extraction et à la production de lauzes.

Le procédé de fabrication des tuiles (cuisson des tuiles par gaz naturel) impacte fortement ses performances environnementales et rend ce matériau non compétitif par rapport aux autres du point de vue des changements climatiques.

5.2.2 Epuisement des ressources fossiles

La Figure 4 présente les résultats relatifs à l'épuisement des ressources fossiles (utilisation des énergies fossiles). Le profil des résultats est similaire à celui obtenu pour les émissions de gaz à effet de serre, confirmant la prédominance des énergies fossiles comme énergie principale utilisée à toutes les étapes du cycle de vie de ces différents produits.

Les systèmes de lauze de schiste et calcaire présentent de meilleures performances par rapport aux matériaux conventionnels.

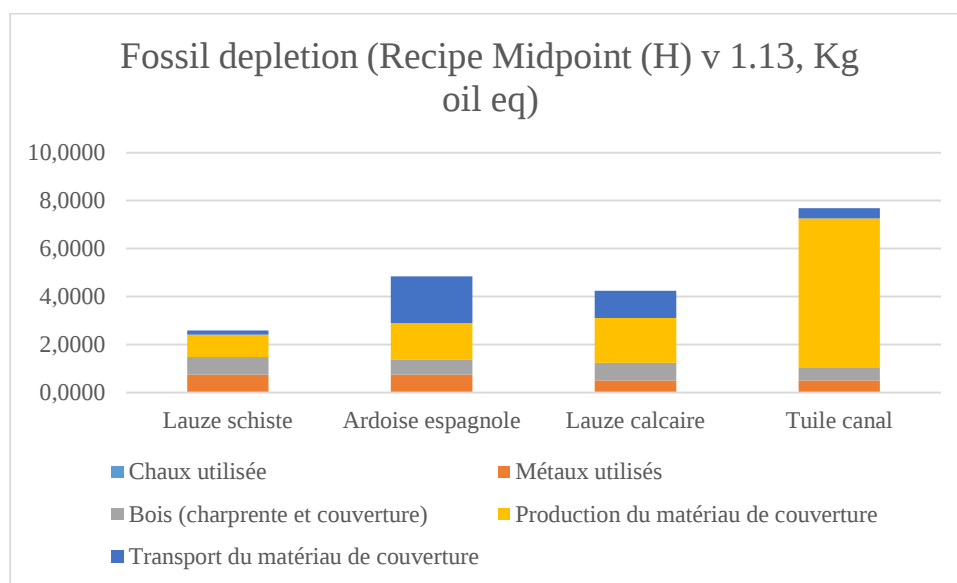


Figure 4. Comparaison des différents systèmes de toiture (épuisement des ressources fossiles, Kg Oil_{eq})

Ici aussi, l'étape de transport de l'ardoise espagnole dégrade fortement ses performances environnementales

5.2.3 Epuisement des ressources métalliques

La Figure 5 présente les résultats relatifs à l'épuisement des ressources métalliques. Les systèmes lauze de schiste et ardoise espagnole, utilisant une quantité plus importante d'éléments métalliques, ont des impacts plus importants. Ici aussi l'étape de fabrication des tuiles dégrade ses performances environnementales.

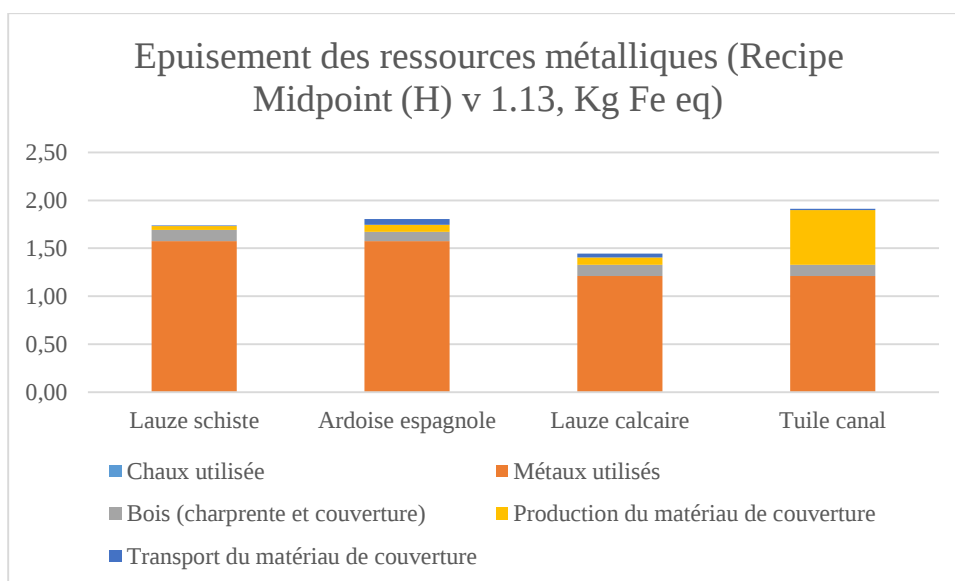


Figure 5. Comparaison des différents systèmes de toiture (épuisement des ressources métalliques, Kg Fe_{eq})

5.2.4 Toxicité humaine

L'indicateur sur la toxicité humaine (Figure 6) montre des impacts similaires concernant les métaux utilisés dus principalement à l'utilisation de pièces de zinc en quantité similaire. L'étape de production pour les matériaux conventionnels est aussi plus impactante que pour les lauzes. On remarque une contribution des pièces de bois plus importante pour les systèmes de lauze que pour les autres systèmes.

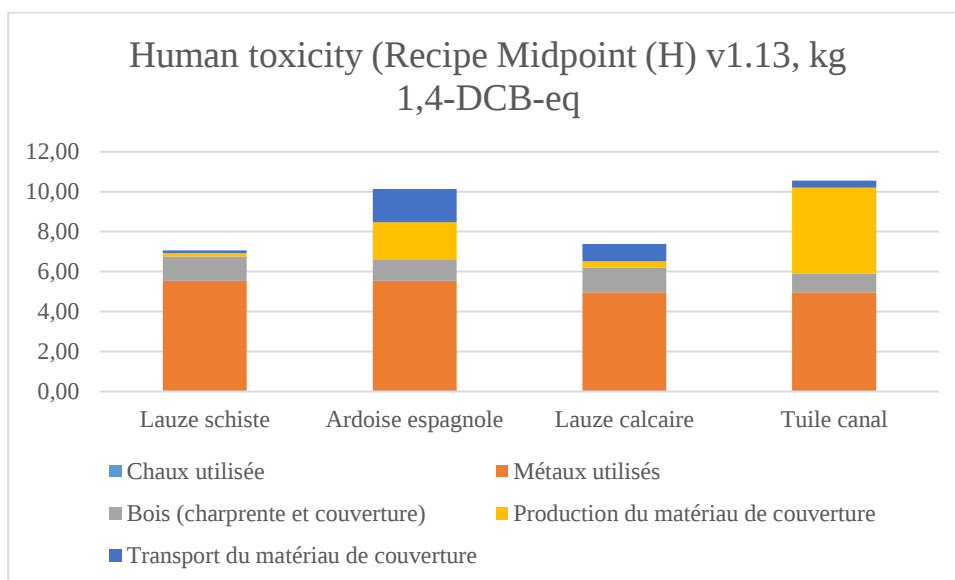


Figure 6. Comparaison des différents systèmes de toiture (toxicité humaine, KgCO₂ eq)

5.2.5 Particules dans l'air

Les impacts d'émissions de particules dans l'air (Figure 7) liés à la fabrication de l'ardoise espagnole écrasent les autres systèmes, du fait de la génération importante

de poussières générés par les opérations de coupe. Ce procédé est tiré d'un procédé EcolInvent permettant de générer des pierres utilisant des films diamantés pour les opérations de coupe. Il est possible que même si les carrières d'ardoise utilisent ce type de procédé, il soit utilisé en quantités moindres que celles exprimées dans le procédé EcolInvent.

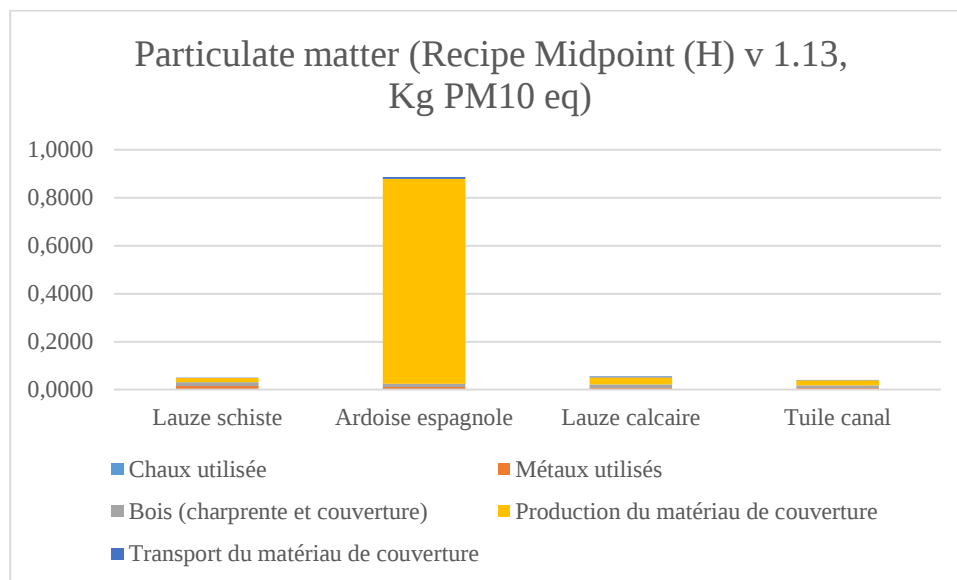


Figure 7. Comparaison des différents systèmes de toiture (particules dans l'air, Kg PM₁₀ eq)

5.2.6 Synthèse

Le Tableau 7 suivant propose une synthèse des résultats des différents systèmes constructifs. Les meilleures performances sont exprimées en vert, les secondes performances en jaune, les troisièmes en orange et les pires en rouge. Les valeurs détaillées figurent en Annexe.

Tableau 7. Synthèse des résultats entre les 4 systèmes

	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Changements climatiques (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg CO ₂ eq)	8,17	14,56	12,51	27,97
Epuisement des ressources fossiles	2,59	4,85	4,24	7,68
Epuisement des ressources métalliques (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg Fe eq)	1,74	1,81	1,45	1,91
Toxicité humaine	7,06	10,13	7,37	10,56
Particules dans l'air	0,049	0,89	0,06	0,04

Ces résultats confirment les résultats End point, avec le système en lauze schiste qui présente les meilleures performances pour trois indicateurs sur 5, et les secondes meilleures pour ses 2 autres indicateurs. Le système en tuiles présente les pires performances pour 4 indicateurs

sur 5. Le système en lauzes calcaires est le meilleur pour un indicateur et le second meilleur pour 3 indicateurs. Enfin, la solution d'ardoises CUPA a le pire score pour 1 indicateur et est toujours troisième pour les autres indicateurs.

Nous pouvons ainsi proposer la hiérarchie suivante : lauze schiste>lauze calcaire>ardoise espagnole>tuile. Il faut toutefois tenir compte de certaines limitations :

- La durée de vie pour tous ces systèmes est de 100 ans et le taux de réutilisation peut également varier. Toutefois, dans le cadre de cette étude ces aspects ne seront pas étudiés ;
- Les métaux utilisés peuvent être modifiés (remplacement du zinc par du plomb pour des éléments d'étanchéité) ;
- Les parties en zinc ont été modélisées sur la base d'éléments standard ; cependant, la nature particulière des bâtiments nécessite de faire varier leurs dimensions.
- Les transports sont fortement dépendant du site ;
- Une carrière artisanale est très spécifique, et il peut exister une variabilité d'une carrière à une autre.

5.3 ETUDE DE SENSIBILITE

5.3.1 Métal utilisé

Nature des métaux utilisés

Les figures suivantes présentent les résultats de la comparaison du plomb et du zinc pour une plaque de surface et d'épaisseurs identiques. En effet, le plomb est susceptible d'être utilisé pour des systèmes de lauzes.

La Figure 8 montre les résultats de la lauze calcaire. Pour ce système, le remplacement du zinc par le plomb se traduit par des résultats similaires pour les changements climatiques, l'épuisement des ressources fossiles et les particules dans l'air et à une diminution pour la toxicité humaine et l'épuisement des ressources métalliques.

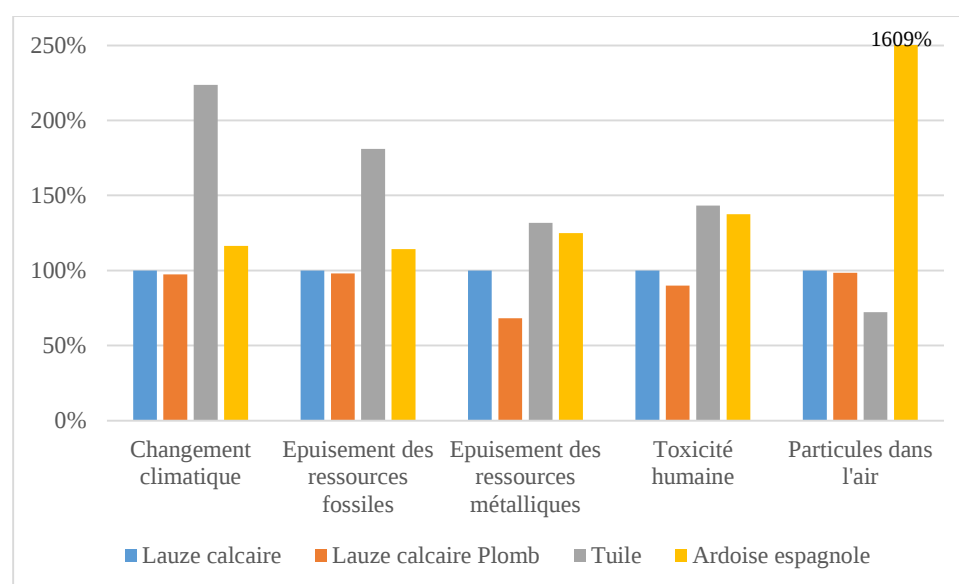


Figure 8. Comparaison des impacts environnementaux du plomb et du zinc pour la lauze calcaire

Des résultats similaires sont constatés pour la lauze ardoise (Figure 9).

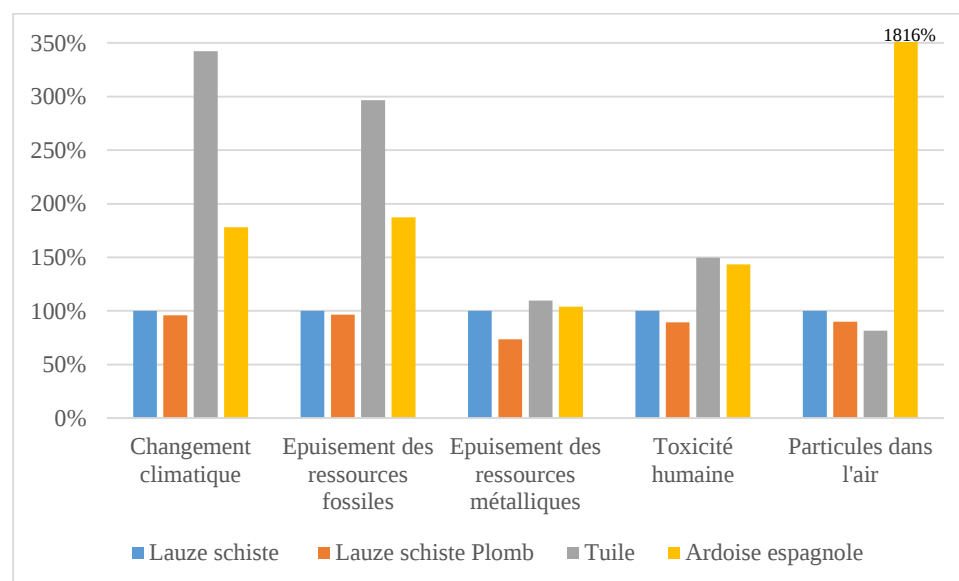


Figure 9. Comparaison des impacts environnementaux du plomb et du zinc pour la lauze de schiste

Pour les deux lauzes, les performances sont donc pratiquement équivalentes voire améliorées lorsqu'on passe du zinc au plomb.

Dans ces conditions, le plomb est légèrement moins impactant que le zinc, malgré sa densité plus élevée car il nécessite pour être produit une quantité moindre d'énergie du fait de sa température de fusion plus basse. Cependant, ces résultats doivent être appréciés au regard des deux hypothèses suivantes qui ont été faites : surface et épaisseur des plaques identiques, durée de vie identique.

Quantité des métaux utilisés

Les scénarios de référence ont choisi des éléments de zinc de largeur modérée. En fonction des caractéristiques du toit, ces éléments peuvent avoir une surface et/ou une épaisseur plus importante pour garantir l'étanchéité de la toiture. Des éléments de largeur différente ont donc été comparés (333 mm, 666 mm, 1332 mm, Figure 10).

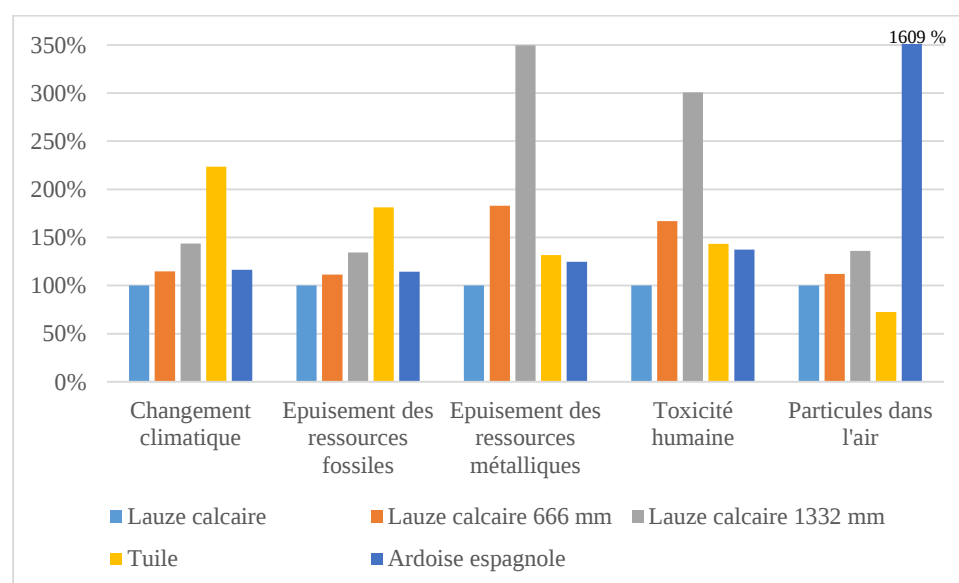


Figure 10. Effet de la largeur des éléments d'étanchéité en zinc sur les résultats de la lauze calcaire

On constate une forte augmentation des impacts d'épuisement des ressources métalliques et de toxicité humaine, ce qui est logique car la quantité des métaux utilisés augmente. De plus, le zinc est un métal lourd avec une toxicité humaine non négligeable. Toutefois, les impacts relatifs aux changements climatiques et à l'épuisement des ressources fossiles restent dans tous les cas inférieurs à ceux de la tuile et sont similaires à ceux de l'ardoise espagnole pour le scénario 666 mm.

Pour le système en lauze de schiste (Figure 11), les différentes largeurs des éléments en zinc ont été comparés au système d'ardoise espagnole. Le scénario de référence (base 100) est le scénario initial de lauze schiste (largeur 333 mm).

Les valeurs restent inférieures aux ardoises espagnoles et aux tuiles pour les impacts relatifs aux changements climatiques, épuisement des ressources fossiles et uniquement aux ardoises espagnoles pour les particules dans l'air.

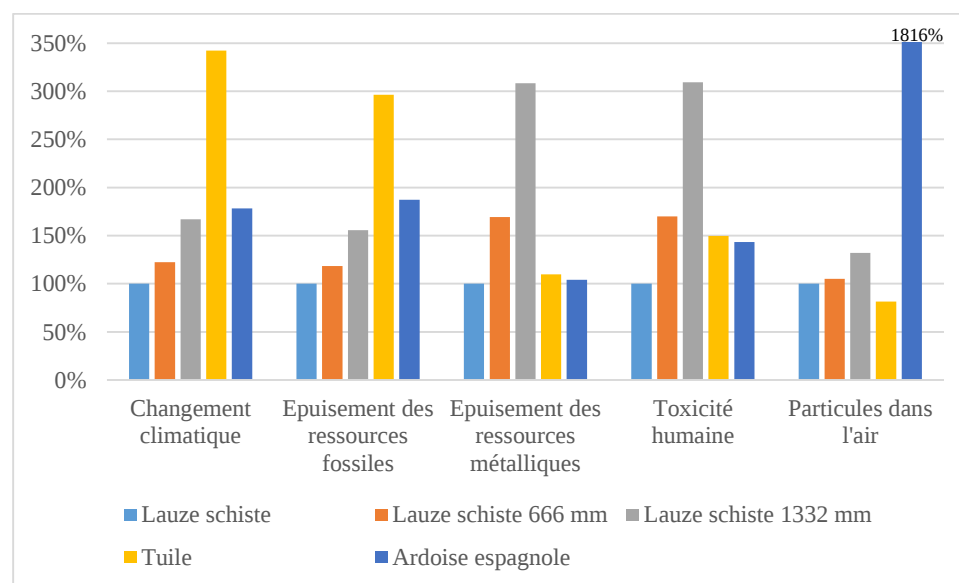


Figure 11. Effet de la largeur des éléments d'étanchéité en zinc sur les résultats de la lauze schiste

5.3.2 Transports

Les Figures suivantes montrent l'évolution des impacts pour chaque système en fonction de la distance parcourue (acheminement des lauzes, ardoises ou des tuiles).

Pour l'indicateur relatif aux changements climatiques (Figure 12), nous voyons que la tuile reste toujours la moins performante, du fait de son coût initial d'impacts engendrés lors de sa fabrication. La lauze de schiste aura toujours les meilleures performances pour des distances d'acheminement inférieures à 148 km. En revanche, si la lauze calcaire présente de meilleures performances que la tuile de 0 à 1000 km, elle est très rapidement désavantagée par rapport à l'ardoise espagnoles : 14 km suffisent.

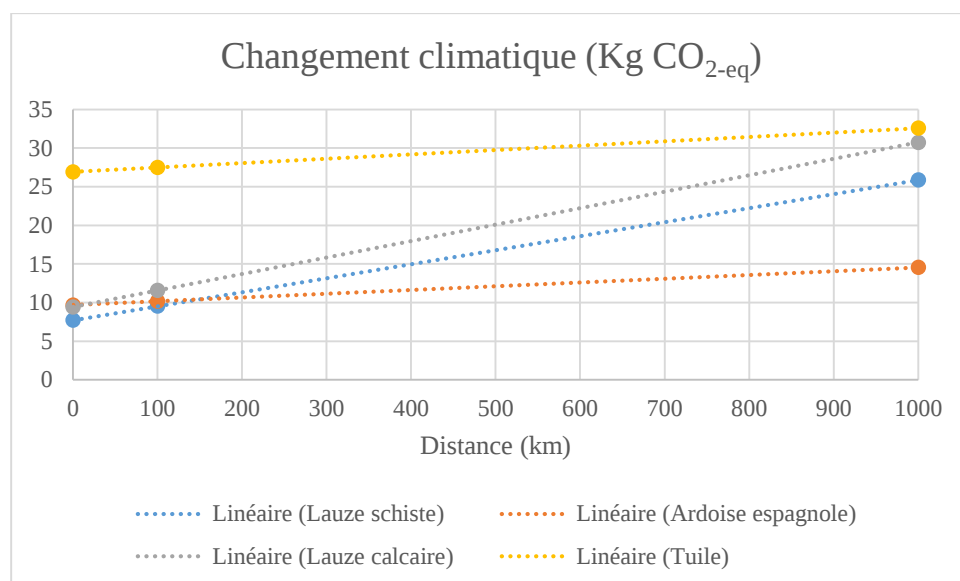


Figure 12. Evolution des impacts en fonction de la distance d'acheminement : changement climatique

Concernant l'épuisement des ressources fossiles (Figure 13), la lauze de schiste présente les meilleures performances par rapport à l'ardoise espagnole pour des distances inférieures à 101 km et à la tuile sur l'ensemble de l'intervalle. La lauze calcaire, moins performante que ces dernières, reste toutefois plus intéressante que la tuile pour des distances inférieures à 741 km.

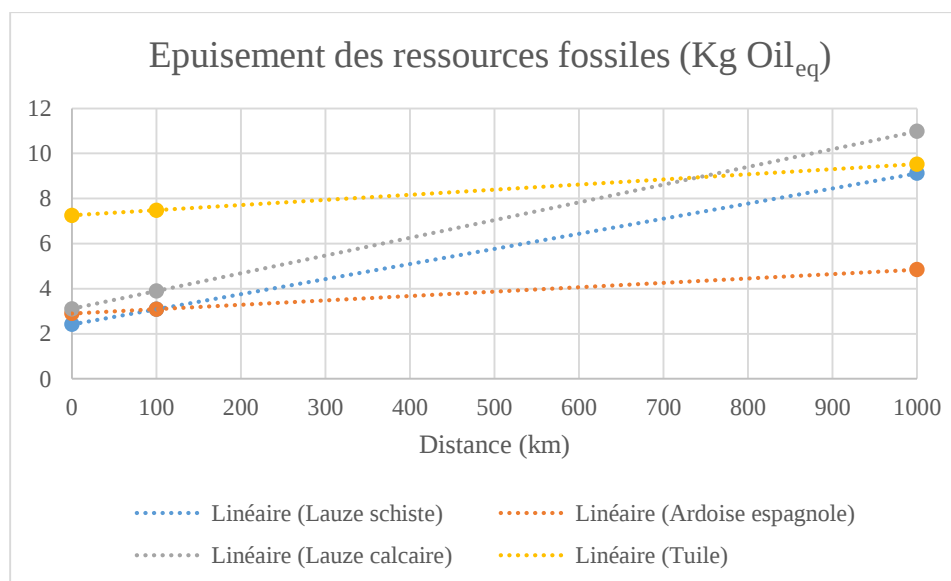


Figure 13. Evolution des impacts en fonction de la distance d'acheminement : épuisement des ressources fossiles

La Figure 14 montre les résultats pour l'épuisement des ressources métalliques. La lauze calcaire reste le système le plus performant dans l'intervalle de distance considéré. Par rapport à l'ardoise espagnole et à la tuile, la lauze de schiste voit ses performances devenir inférieures à partir de 100 km et 700 km respectivement.

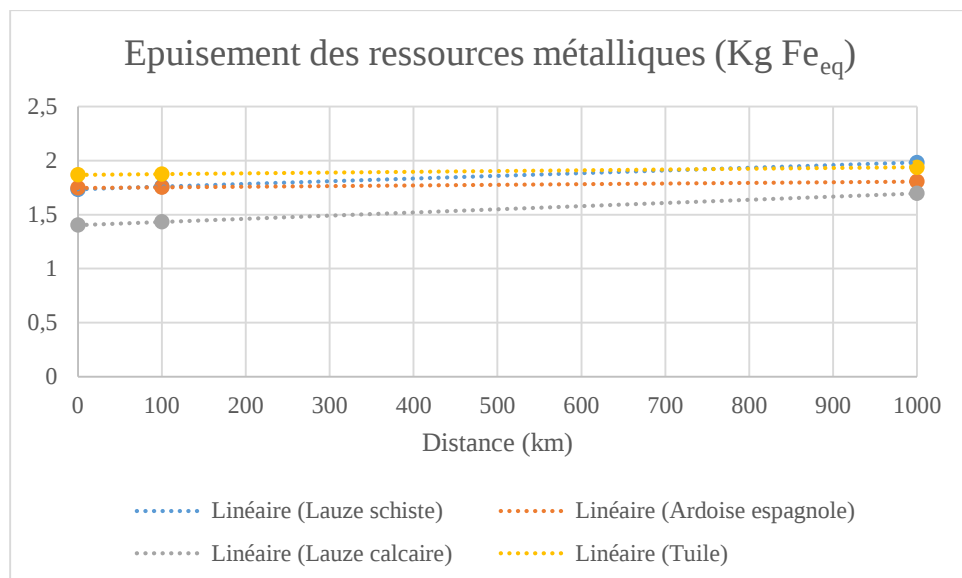


Figure 14. Evolution des impacts en fonction de la distance d'acheminement : épuisement des ressources métalliques

Pour la toxicité humaine (Figure 15), les systèmes de lauze ont des performances très proches sur tout l'intervalle de distance considérés. Ils présentent les meilleures performances pour des distances inférieures à environ 500 km par rapport à l'ardoise espagnole et 980 km pour la tuile.

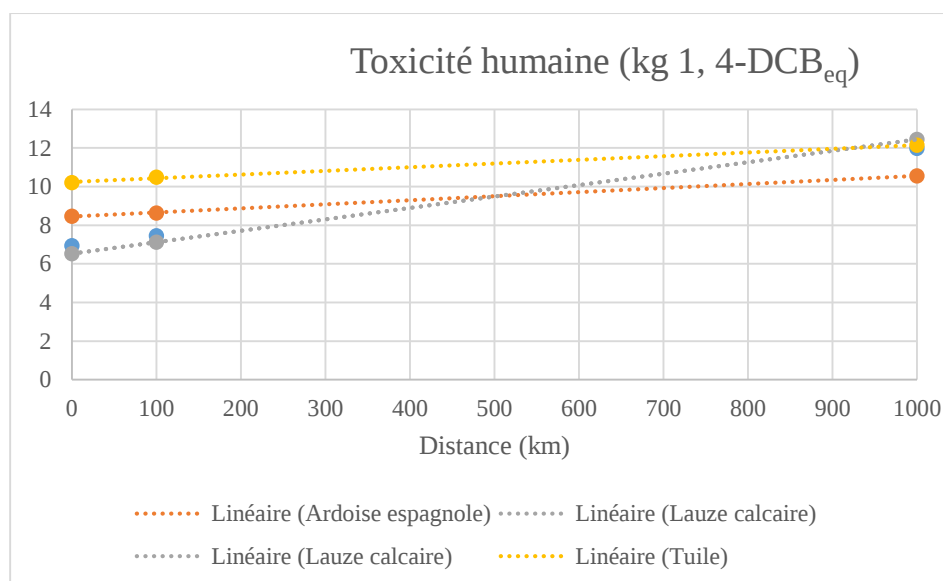


Figure 15. Evolution des impacts en fonction de la distance d'acheminement : toxicité humaine

Enfin, concernant les particules dans l'air (Figure 16), l'ardoise espagnole présente des impacts 15 à 20 fois plus élevés que tous les autres systèmes sur tout l'intervalle de distance considéré, de part de l'importance de la quantité de particules émises lors de la fabrication des ardoises. La solution des tuiles reste la plus performante sur tout l'intervalle considéré

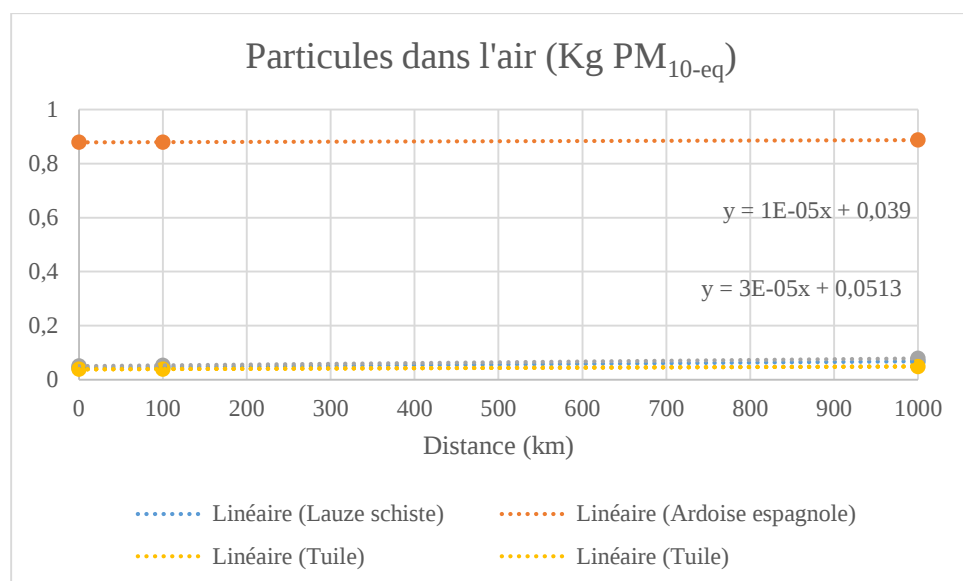


Figure 16. Evolution des impacts en fonction de la distance d'acheminement : particules dans l'air

L'ensemble de ces résultats démontrent l'intérêt des systèmes de lauze en approvisionnement local. La lauze de schiste est un système plus performant que l'ardoise espagnole pour des distances inférieures à 100 km. Excepté pour les particules dans l'air, la lauze calcaire est plus intéressante que la tuile pour des distances inférieures à 500 km. En revanche, les pentes des deux systèmes de lauze sont plus importantes du fait du poids à transporter plus important en lauzes par mètre carré de toiture. Ainsi, plus la distance d'approvisionnement augmente, plus ces deux systèmes seront défavorisés par rapport à l'ardoise espagnole et à la tuile.

En revanche, ces simulations ont été réalisées toutes conditions égales par ailleurs. Ainsi, le maintien des différents types de camions (semi-remorques pour les tuiles et ardoises espagnoles, camion plus petit et adapté aux petites routes pour les lauzes) désavantage les lauzes. Enfin, si l'on considère un approvisionnement par une carrière d'ardoise en France et non plus en Espagne, les impacts dus à la consommation électrique seront très différents du fait du mix électrique qui repose sur les énergies fossiles en Espagne par rapport à la France.

5.3.3 Procédés de fabrication

Variabilité des consommations de gazole dans l'exploitation des carrières artisanales

Un projet d'élèves réalisé dans le cadre de LAUBAMAC avait permis de recenser les consommations de gazole pour différentes carrières. Si la consommation retenue de 1.45 litres retenue pour le scénario de référence semblait la plus cohérente par rapport aux valeurs données existantes, une carrière avait toutefois une valeur 10 fois plus élevée.

Une étude de sensibilité a donc été réalisée afin de voir l'influence de la consommation en carburant des engins de chantier sur les performances des lauzes calcaires. Le scénario de la lauze initial est le scénario de référence. Les autres scénarios (consommation multipliées par 5 et par 10, tuile) sont comparés à ce scénario considéré comme une base de 100 (Figure 17).

Les impacts environnementaux sont multipliés environ par 2,5 et 5 pour une augmentation de la consommation en carburant multipliée par 5 et 10 respectivement pour les impacts changements climatiques, épuisement des ressources fossiles et particules dans l'air. Les impacts relatifs à la toxicité humaine et à l'épuisement des ressources métalliques sont beaucoup moins influencés.

Par ailleurs, une consommation multipliée par 10 engendre des impacts supérieurs à ceux de la tuile pour tous les impacts sauf celui de la toxicité humaine. Une consommation multipliée par 5 donne un impact un peu plus faible de la lauze par rapport à la tuile pour l'épuisement des ressources métalliques, un peu plus élevé pour le changement climatique et l'épuisement des ressources fossiles, et bien plus élevé pour les particules dans l'air.

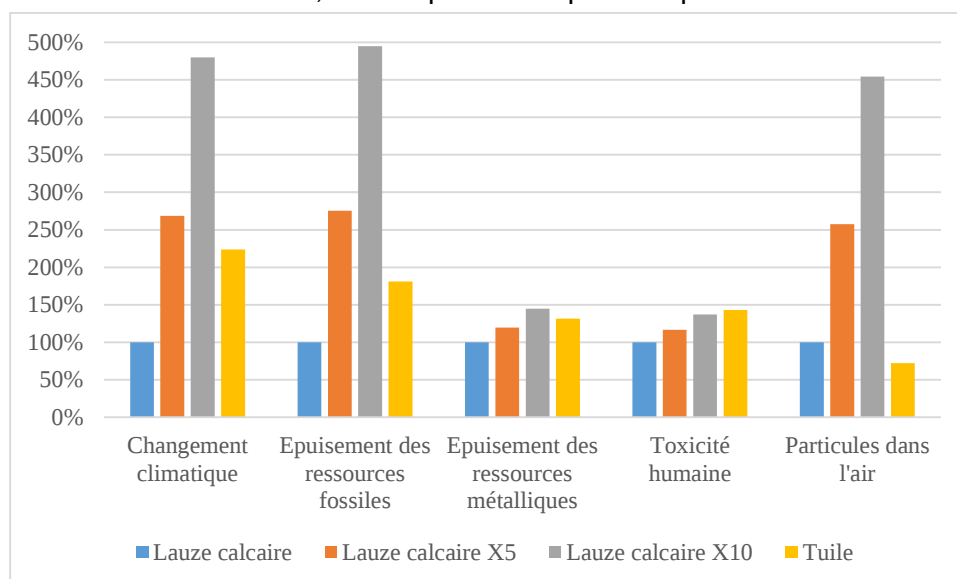


Figure 17. Effet de la consommation en carburant des engins de carrière sur les performances du système de lauze calcaire

Cette étude de sensibilité démontre que les performances dépendant fortement des spécificités de chaque carrière ayant une influence plus ou moins grande sur la consommation de carburant. Elle justifie de promouvoir des bonnes pratiques, permettant de réduire la consommation de carburant, permettant de dégager des gains environnementaux mais aussi économiques.

6. CONCLUSION

Ces résultats montrent que pour le cas d'étude considéré, les systèmes en lauze sont plus performants que les systèmes conventionnels (ardoise espagnole et tuile). Toutefois, le système de lauze calcaire nécessitant une quantité de matière plus importante, ses performances globales sont moindres que pour le système de lauze schiste.

Le système de tuile est fortement défavorisé par l'opération de cuisson des tuiles, le rendant non compétitif du point de vue environnemental, excepté sur l'indicateur des particules dans l'air. La longueur des transports grève celui des ardoises espagnoles.

L'analyse de sensibilité montre que le remplacement du zinc par le plomb améliore faiblement les performances. En revanche, en fonction des spécificités de la toiture, l'utilisation de plaques de zinc de largeur plus importante impacte négativement leurs performances.

Le système de lauze de schiste permet d'avoir des distances d'approvisionnement élevées (de l'ordre de 100 km par rapport à l'ardoise espagnole) avant de voir ses performances passer devenir moins compétitive. Pour la lauze calcaire, les résultats sont plus mitigés. Par rapport à la tuile, la lauze calcaire présente de meilleurs résultats pour des distances jusqu'à 500 km. En revanche, par rapport à l'ardoise espagnole, ses performances se dégradent rapidement.

Enfin, les conditions d'exploitation des carrières, ici illustrées par l'exemple de la lauze calcaire, peuvent influencer fortement sur les résultats. Cet aspect limite la généralisation des résultats, car chaque carrière artisanale a des spécificités (nature du gisement, conditions d'exploitation, matériel utilisé, comportement des utilisateurs). A cet effet, il est important de diffuser des bonnes pratiques.

En revanche, les aspects liés à la réutilisation des lauzes, ardoises espagnoles, tuiles n'ont pas été poussés car les taux de réutilisation qui sont donnés par les FDES (22% pour les ardoises et 20% pour les tuiles) paraissent très élevés. Des travaux ultérieurs devront permettre d'affiner ces informations. En l'état, la non prise en compte de ces aspects pour les lauzes pénalisent leurs performances.

Cette étude a été réalisée selon une approche orientée produit (lauze), et ne visait pas à étudier le système « carrière ». Certains aspects de multifonctionnalité n'ont donc pas été abordés.

Annexe

Changements climatiques (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg CO ₂ eq)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Chaux utilisée	0,08	0,08	0,08	0,08
Métaux utilisés	2,73	2,73	1,82	1,82
Bois (charpente et couverture)	2,20	1,87	2,20	1,64
Production du matériau de couverture	2,71	5,00	5,34	23,36
Transport du matériau de couverture	0,45	4,87	3,07	1,06
Total	8,17	14,56	12,51	27,97

Fossil depletion (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg oil eq)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Chaux utilisée	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
Métaux utilisés	0,7194	0,7194	0,4830	0,4830
Bois (charpente et couverture)	0,7331	0,6236	0,7331	0,5471
Production du matériau de couverture	0,9464	1,5309	1,8721	6,2076
Transport du matériau de couverture	0,1677	1,9531	1,1340	0,4249
Total	2,5856	4,8460	4,2412	7,6816

Epuisement des ressources métalliques (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg Fe eq)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Chaux utilisée	0,00	0,00	0,00	0,00
Métaux utilisés	1,57	1,57	1,21	1,21
Bois (charpente et couverture)	0,12	0,10	0,12	0,12
Production du matériau de couverture	0,04	0,07	0,08	0,57
Transport du matériau de couverture	0,01	0,06	0,04	0,01
Total	1,74	1,81	1,45	1,91

Human toxicity (Recipe Midpoint (H) v1.13, kg 1,4-DCB-eq)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Chaux utilisée	0,04	0,04	0,04	0,04
Métaux utilisés	5,50	5,50	4,93	4,93
Bois (charpente et couverture)	1,23	1,05	1,23	0,92
Production du matériau de couverture	0,17	1,88	0,33	4,31
Transport du matériau de couverture	0,13	1,66	0,85	0,36
Total	7,06	10,13	7,37	10,56

Particulate matter (Recipe Midpoint (H) v 1.13, Kg PM10 eq)	Lauze schiste	Ardoise espagnole	Lauze calcaire	Tuile canal
Chaux utilisée	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Métaux utilisés	0,0152	0,0115	0,0066	0,0066
Bois (charpente et couverture)	0,0152	0,0131	0,0152	0,0114
Production du matériau de couverture	0,0173	0,8537	0,0292	0,0208
Transport du matériau de couverture	0,0006	0,0085	0,0041	0,0019
Total	0,0486	0,8871	0,0553	0,0409

IMT Mines Alès
6 avenue de Clavières
30319 Alès cedex
France
Tél +33 (0)4 66 78 50 00

www.mines-ales.fr

