



ÉTUDE COMPARATIVE DE LA PAILLE EN VALORISATION ÉNERGÉTIQUE OU EN ISOLATION

LOT 121

Titre de votre livrable © Année de création du livrable par Nom de/des structures qui a/ont produit le livrable est sous licence [CC-BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/).



Ce projet a été financé par l'État dans le cadre de France 2030 opéré par l'ADEME.



SOMMAIRE

1. CONTEXTE – OBJECTIF	3
2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE	4
2.1. TRAJECTOIRES CARBONE D'UNE TONNE DE PAILLE	4
2.2. ECONOMIES D'ENERGIE POUR UN LOGEMENT AVEC ET SANS ISOLATION	5
2.3. COMPARAISON DES EFFETS CUMULES DE L'USAGE DE LA PAILLE	7
3. ETUDES	8
3.1. TRAJECTOIRES CARBONE D'UNE TONNE DE PAILLE	8
3.1.1. Construction paille	8
3.1.2. Méthanisation.....	9
3.1.3. Combustion directe.....	9
3.1.4. Biocarburant	10
3.1.5. Amendement direct (laissé au champ)	10
3.1.6. Litière	11
3.1.7. Effet puits de carbone de la paille en fonction des usages	11
3.1.8. Conclusion.....	12
3.2. ECONOMIES D'ENERGIE POUR UNE PAROI OPAQUE AVEC ET SANS ISOLATION.....	13
3.3. SUBSTITUTION DES ENERGIES FOSSILES PAR LA PAILLE : CAS DE LA METHANISATION.....	14
3.4. COMPARAISON DES EFFETS CUMULES DE L'USAGE DE LA PAILLE	15
4. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES	18
5. BIBLIOGRAPHIE	19

1. CONTEXTE – OBJECTIF

La cause anthropique du réchauffement climatique nous oblige à réduire la quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère. Pour cela deux leviers sont à envisager : réduire les émissions et augmenter le captage. Cependant, même si la diminution des émissions est amorcée, elle reste trop faible pour atteindre des objectifs soutenable. La priorité doit donc se porter sur la réduction à court terme du taux de CO₂ dans l'atmosphère : la notion de temporalité est primordiale. Le captage du carbone par les plantes (sous forme de carbone biogénique) peut être une solution s'il s'accompagne d'un maintien à l'état biogénique sur du long terme. Le relargage sous forme de CO₂, pourra alors se faire lorsque le taux atmosphérique aura suffisamment diminué pour permettre de réintroduire du CO₂ de façon mesurée. Les trois actions prioritaires doivent être :

- **Le stockage du carbone,**
- **La réduction des émissions de gaz à effet de serre,**
- **La substitution des énergies fossiles.**

Dans le cadre du projet POP2030, une mise à jour des supports de communication vulgarisant les usages de la paille dans la construction est prévue. Pour mémoire, les deux principaux usages de la paille en France sont la litière et l'amendement (par un retour au champs). Bien que la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone) fixe l'ordre de priorité suivant pour les produits agro-alimentaires : alimentation, agronomie, biomatériaux, énergétique, la construction en paille est directement en concurrence avec les usages de valorisation énergétique (méthanisation, biocarburants, combustion). L'objectif du présent rapport est de faire un comparatif chiffré des impacts de la paille en construction par rapport à la valorisation énergétique.

Après une explication de la méthodologie mise en place pour cette étude, le document décrit l'analyse des cycles de vie de la paille en fonction de ses usages afin de mettre en évidence les applications jouant un rôle de puits de carbone, puis une estimation des économies d'énergie induites par un logement isolé est faite. Enfin, une analyse de l'impact de la méthanisation (basée principalement sur la littérature) est présentée.

2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

L'étude présentée dans ce document est divisée en trois parties. La première consiste à comparer les états du carbone (biogénique ou CO₂) pour les différents usages de la paille. La seconde évalue les économies réalisées par une paroi opaque isolée en paille. Enfin, la troisième présente la réduction des émissions de gaz à effet de serre due à la substitution des énergies fossiles par de la paille dans le cas de la méthanisation.

Pour faciliter la compréhension, chaque partie est traitée avec un périmètre différent (1 tonne pour la partie 1, 1 m² de paroi opaque pour la partie 2 et 1kW.h PCI pour la partie 3). Dans la dernière partie, l'ensemble des résultats est uniformisé pour 1m² de paroi opaque, ce qui permet leur comparaison.

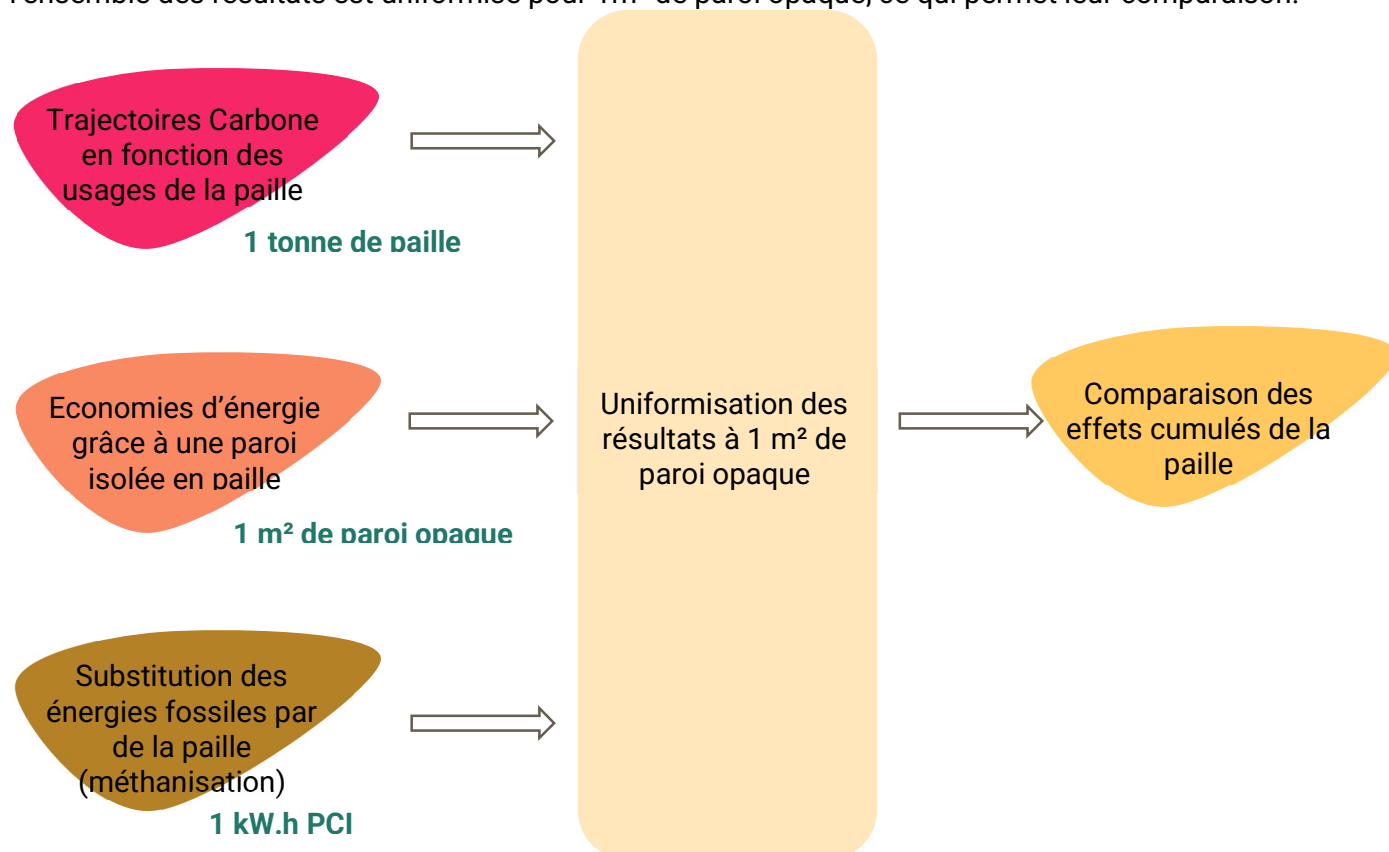


Figure 1 : Méthodologie de l'étude

Le lecteur gardera à l'esprit le fait que le choix du périmètre de l'étude est limitatif. En effet, il ne prend en compte que le cycle du carbone mais pas celui des NPK (azote, phosphore, potassium), éléments pourtant indispensables à la croissance des plantes et suivis par les agriculteurs. De plus, des indicateurs importants tels que la pollution de l'air et de l'eau, l'acidification des sols et de l'eau, les déchets dangereux, les déchets radioactifs, etc. pourraient également être suivis. Enfin, le périmètre d'étude pourrait être celui d'une surface de champs. Cette vision permettrait de prendre en compte une production annuelle de paille, la rotation des cultures sur 50 ans, les usages multiples de la paille sur une surface unique, etc.

Les hypothèses de calculs ainsi que les méthodologies appliquées sont détaillées dans les paragraphes ci-dessous.

2.1. TRAJECTOIRES CARBONE D'UNE TONNE DE PAILLE

Dans un premier temps les cycles de vie des différents usages de la paille sont présentés schématiquement. Ils mettent en évidence le cycle de vie du carbone (émission et captage des principaux gaz à effet de serre, valorisation sous forme d'humus) ainsi que la circularité ou non de chaque usage.

Pour chaque étape, un équivalent CO₂ est calculé et les facteurs correctifs de l'ACV dynamique (issus de la réglementation [R13]) sont appliqués. On gardera à l'esprit que ces calculs ne sont pas une ACV (Analyse du Cycle de Vie) normative.

Les hypothèses suivantes ont été prises pour les calculs :

- Les valeurs négatives de kg CO₂eq correspondent à des captages de CO₂, tandis que les valeurs positives correspondent à des émissions.
- Tous les calculs présentés sont normalisés pour 1 tonne de paille.
- Les valeurs d'émission, de captage et de carbone biogénique de la paille en construction sont des valeurs moyennes des FDES 30441 [R1] et 30442 [R2].
- Le taux d'humification est le même quel que soit le procédé de transformation (compostage, amendement, méthanisation [R3]). Il est fixé à 15%.
- La production du fumier conduit à l'émission de CH₄ dès le démarrage du processus de compostage et se poursuit jusqu'à sa transformation totale en humus après amendement des champs. Cependant, les proportions d'émissions n'étant pas connues, nous avons pris pour hypothèse dans les calculs que tout le carbone biogénique de la paille se transformait en humus et en CO₂ après incorporation dans les champs.
- Lors de la combustion de la paille, tout le carbone biogénique est transformé en CO₂. Il n'y a pas d'imbrûlés.
- En moyenne, la méthanisation conduit à la production de 60% de méthane CH₄, 35% de dioxyde de carbone CO₂ et 5% d'autres gaz à effet de serre (H₂S, H₂O, NH₃, etc.) [R14]. Les calculs ont été faits avec une hypothèse de production de 60% de CH₄ et 40% de CO₂.
- Les fuites de CH₄ des méthaniseurs ont été négligées.
- L'énergie grise nécessaire à la méthanisation, à la séparation des gaz et à la mise en réservoir du CH₄ n'a pas été prise en compte dans les calculs.
- Le méthane issu de la méthanisation n'est pas utilisé en cogénération mais uniquement en combustion.
- Durant le procédé de production des biocarburants, tout le carbone biogénique de la paille est transformé en éthanol ou ETBE (éthyl-tertiobutyl-éther). Puis durant la combustion des biocarburants, tout l'éthanol et l'ETBE est transformé en CO₂.
- Faute de données disponibles sur les émissions de CO₂eq durant le procédé de transformation de la paille en biocarburant, la valeur a forfaitairement été fixée à deux fois les émissions de gaz à effet de serre de la production de la paille.

2.2. ECONOMIES D'ENERGIE POUR UN LOGEMENT AVEC ET SANS ISOLATION

L'ensemble des calculs présentés est réalisé pour 1m² de paroi opaque. Les apports solaires et internes ainsi que les échanges thermiques liés aux infiltrations d'air ne sont pas pris en compte.

Le schéma suivant présente la méthodologie mise en œuvre :

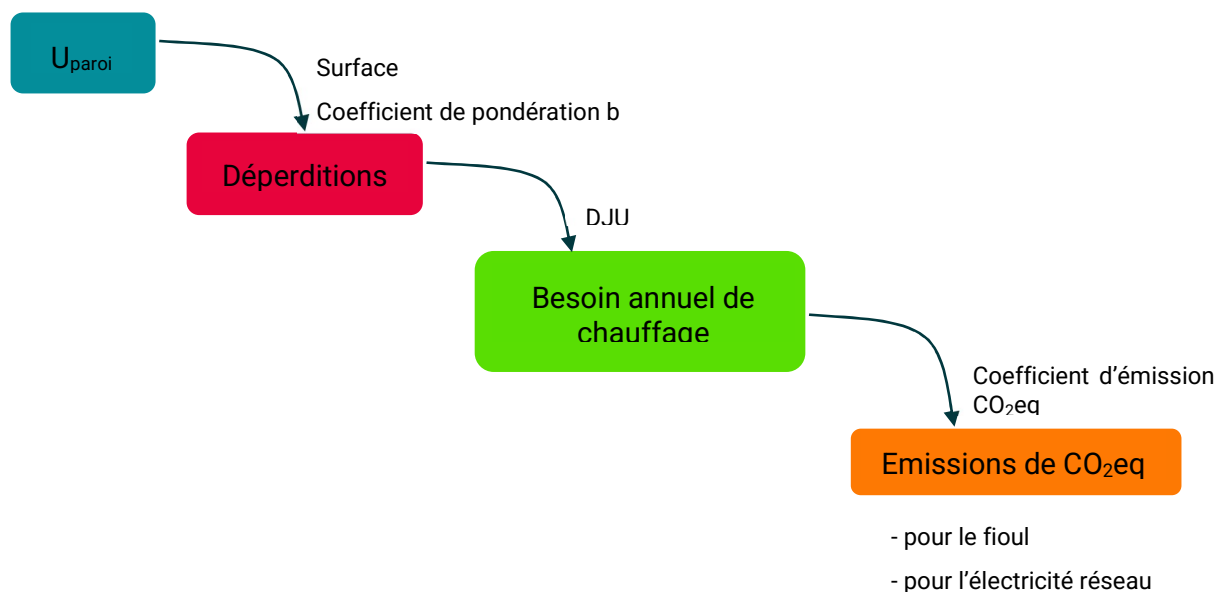


Figure 2 : Méthodologie de calcul des économies d'énergie

Le coefficient de transmission thermique U_{paroi} d'un mur extérieur non isolé a été calculé à partir des données présentées dans le document [R4] issu du projet Smart-Réno. On y trouve le nombre de maisons individuelles en France par période de construction ainsi que le U_{paroi} moyen associé. La moyenne pondérée de U_{paroi} a ainsi été calculée. Le détail est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Calcul du coefficient de transmission thermique U à partir des données issues de [R4]

Dates de construction	U (W/m ² .K)	nbr maisons individuelles	U moyen pondéré
avant 1914	1,5	3251076	1,23
1915-1948	2,5	1829370	
1949-1967	1,8	1843286	
1968-1974	2,8	1503633	
1975-1981	0,61	1860309	
1982-1989	0,42	1838635	
1990-1999	0,36	1731161	
2000-2005	0,33	1068034	
2006-2012	0,29	1349881	
2012	0,21	271925	

D'autre part, faute de données synthétiques sur les performances thermiques des logements collectifs, on a pris pour hypothèse que le niveau de performances était identique à celui des logements individuels, les réglementations thermiques en vigueur étant les mêmes quel que soit le type de bâtiment.

La valeur du coefficient de transmission thermique d'une paroi non isolée est fixée à 1,23 W/m².K.

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi isolée a été calculée en prenant comme hypothèse que la paroi non isolée était recouverte de 36cm de paille de conductivité thermique égale à 0.052W/m.K [R8]. On obtient alors un coefficient de transmission thermique d'une paroi isolée de 0.13W/m².K.

Les déperditions thermiques (H en W/K) sont calculées à partir du U_{paroi} , de la surface de la paroi (m²) et du coefficient de pondération b. La paroi étant considérée comme en contact direct avec l'extérieur, b a été fixé à 1.

Le besoin annuel de chauffage a été calculé avec le DJU (Degré Jour Unifié) annuel moyen national sur les années 2020 à 2024. Les valeurs annuelles des DJU sont issues du site gouvernemental [R5] et la valeur de DJU est calculée à 1757°C.j.

Ensuite, les émissions de CO₂eq ont été calculées pour 2 cas : un chauffage au fioul et un chauffage électrique. En effet, le rapport Smart-Reno [R4] détaille les types de chauffage présents dans le parc français de maisons individuelles. On observe que pour les maisons construites avant 1982, c'est le chauffage au fioul qui prédomine, tandis que l'électricité est majoritairement utilisée après 2000. Ainsi, le calcul avec le fioul permet d'avoir une vision actuelle pessimiste des émissions, tandis que le calcul avec l'électricité permet d'avoir une vision prospective.

Tableau 2 : Systèmes de chauffage et de ventilation présents dans le parc français de maisons individuelles (issu de [R4])

	CHAUFFAGE	VENTILATION
... 1914	Poêle fioul par pièce, pas de réseau de distribution	Ventilation naturelle
1915 ... 1948	Chaudière fioul standard >1991, 18-30 kW, sans régulation / Radiateurs eau chaude sans robinet thermostatique / Réseau individuelle eau chaude haute température (≥65°C), non isolé	Ventilation naturelle
1949 ... 1967	Chaudière fioul standard >1991, 18-30 kW, sans régulation / Radiateurs eau chaude sans robinet thermostatique / Réseau individuelle eau chaude haute température (≥65°C), non isolé	Ventilation naturelle
1968 ... 1974	Chaudière fioul standard >1991, 18-30 kW, sans régulation / Radiateurs eau chaude sans robinet thermostatique / Réseau individuelle eau chaude haute température (≥65°C), non isolé	Ventilation naturelle
1975 ... 1981	Chaudière fioul standard >1991, 18-30 kW sans régulation / Radiateurs eau chaude avec robinet thermostatique / Réseau individuel eau chaude haute température (≥65°C), isolé	Ventilation naturelle
1982 ... 1989	Poêle à bois >2001 / Pas de réseau de distribution + Convecteur électrique NFC	Ventilation naturelle
1990 ... 1999	Poêle à bois >2001 / Pas de réseau de distribution + Convecteur électrique NFC	VMC SF autoréglable
2000 ... 2005	Convecteur électrique NFC + Plancher rayonnant électrique avec régulation terminale	VMC SF autoréglable VMC SF hygro B
2006 ... 2012	PAC électrique air/eau avec résistance électrique d'appoint / Réseau individuel eau chaude basse température avec isolation / plancher chauffant basse température avec régulation	VMC SF hygro B
2012	PAC électrique air/eau avec résistance électrique d'appoint / Réseau individuel eau chaude basse température avec isolation / plancher chauffant basse température avec régulation	VMC SF hygro B

Les coefficients d'émission de CO₂eq sont issus des FDES 26559 [R6] pour le fioul, 26563 [R7] pour l'électricité et 26560 [R15] pour le gaz naturel. Le COP (coefficient de performance) des PAC (pompes à chaleur) est fixé à 2.

2.3. COMPARAISON DES EFFETS CUMULES DE L'USAGE DE LA PAILLE

L'ensemble des calculs présentés est réalisé pour 1m² de paroi opaque. Les apports solaires et internes ainsi que les échanges thermiques liés aux infiltrations d'air ne sont pas pris en compte.

Le coefficient d'émission de CO₂eq pour le gaz naturel est fixé à 0.227kg CO₂eq/kW.h. La valeur est issue de la FDES 26560 [R11].

Le coefficient d'émission de CO₂eq pour le biométhane est fixé à 0.044kg CO₂eq/kW.h. La valeur est issue du document [R10].

Le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) de la paille est fixé à 4MW.h/t de paille. La valeur est issue du document [R12].

Dans les scénarii proposés, la nature de la paroi de base (non isolée) n'ayant pas été définie, les émissions de gaz à effet de serre dues à la déconstruction ont été négligées.

3. ETUDES

La construction en paille cumule l'effet puits de carbone de la paille et l'effet de substitution dû à son rôle d'isolant qui permet de réduire la quantité d'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments. Cet effet est d'autant plus important si l'énergie qu'il épargne est d'origine fossile. De son côté, la méthanisation vient se substituer à des énergies fossiles (gaz naturel principalement).

Les paragraphes ci-dessous présentent séparément une analyse des cycles de vie de la paille en fonction de ses usages, puis l'estimation des émissions de gaz à effet de serre évités par l'usage de la paille en tant qu'isolant et une analyse de l'impact de l'usage de la paille en méthanisation.

3.1. TRAJECTOIRES CARBONE D'UNE TONNE DE PAILLE

Les usages de la paille sont variés (amendement, construction, production énergétique). Les principales applications sont présentées ci-dessous au travers de leur cycle de vie.

3.1.1. CONSTRUCTION PAILLE

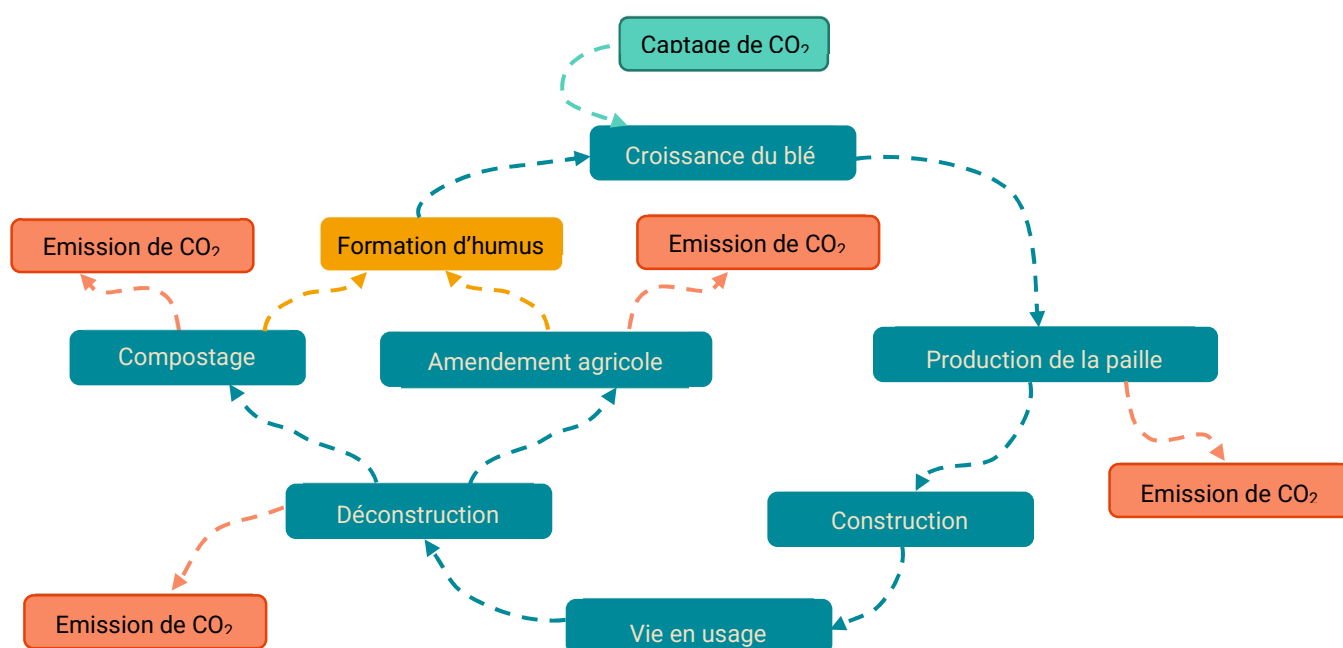


Figure 3 : Cycle de vie de la paille utilisée en construction

La croissance du blé capte du CO₂ atmosphérique, tandis que le travail agricole nécessaire à la production du blé et de la paille en émet. Pour faciliter la lecture, les deux étapes sont représentées séparément sur le schéma bien qu'elles se déroulent en même temps dans la réalité. La paille est ensuite utilisée pour la construction de bâtiment. Elle reste en place sans émettre ni capter de CO₂ durant toute la durée d'usage du bâtiment. A la déconstruction de celui-ci, elle est orientée en partie en compostage et en partie en amendement agricole (cf. hypothèses [R1] [R2]). Les deux cas conduisent à l'émission de CO₂ et à la production d'humus, ce dernier étant favorable à la croissance des plantes.

3.1.2. METHANISATION

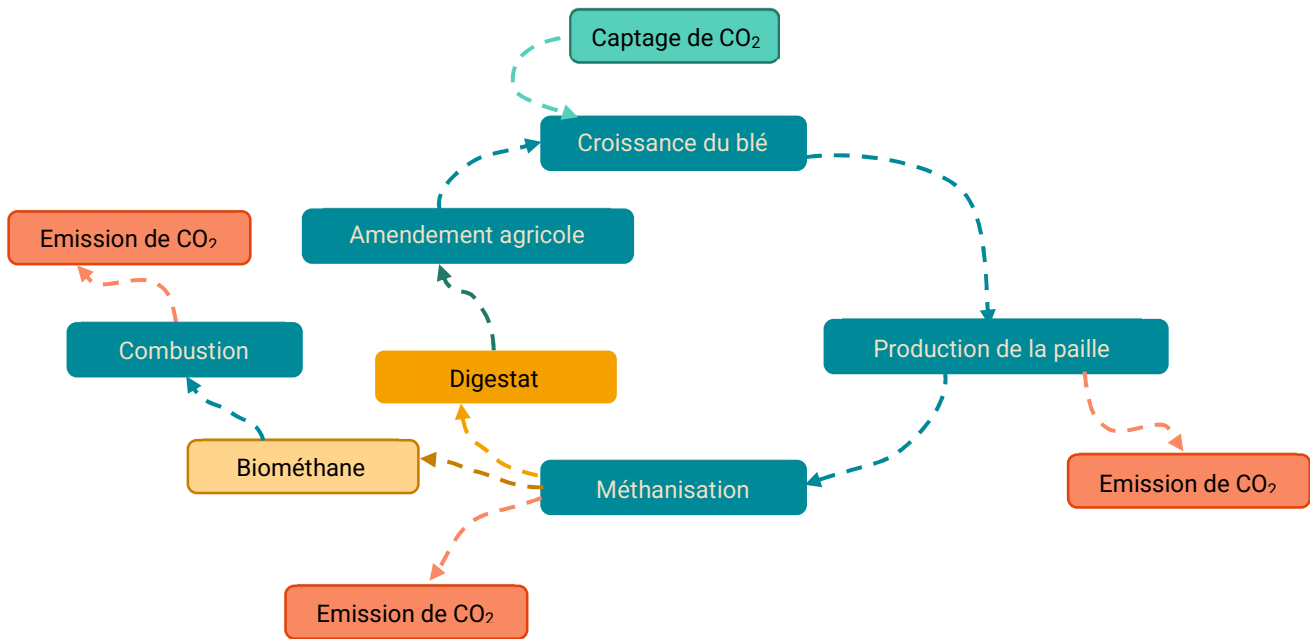


Figure 4 : Cycle de vie de la paille utilisée en méthanisation

La croissance du blé et la production de la paille sont identiques à la construction paille et ne sont pas rappelées ici. La méthanisation conduit à l'émission de CO_2 (relâché dans l'atmosphère), à la production d'un digestat qui est remis au champ et utilisé comme fertilisant et à la production de méthane CH_4 . Ce dernier est utilisé soit dans la production de chaleur en étant introduit dans les réseaux de gaz, soit comme source d'énergie pour les véhicules. Dans les deux cas la combustion du méthane conduit à l'émission de CO_2 . L'énergie grise nécessaire à la méthanisation, à la séparation des gaz et à la mise en réservoir du CH_4 n'a pas été prise en compte dans les calculs.

On gardera à l'esprit que dans le cas de la méthanisation, la paille n'est pas utilisée comme source principale d'alimentation des méthaniseurs mais en complément de fumier et/ou de lisier et de CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique). Ce point sera détaillé dans le paragraphe « Substitution des énergies fossiles par la paille : cas de la méthanisation ».

3.1.3. COMBUSTION DIRECTE

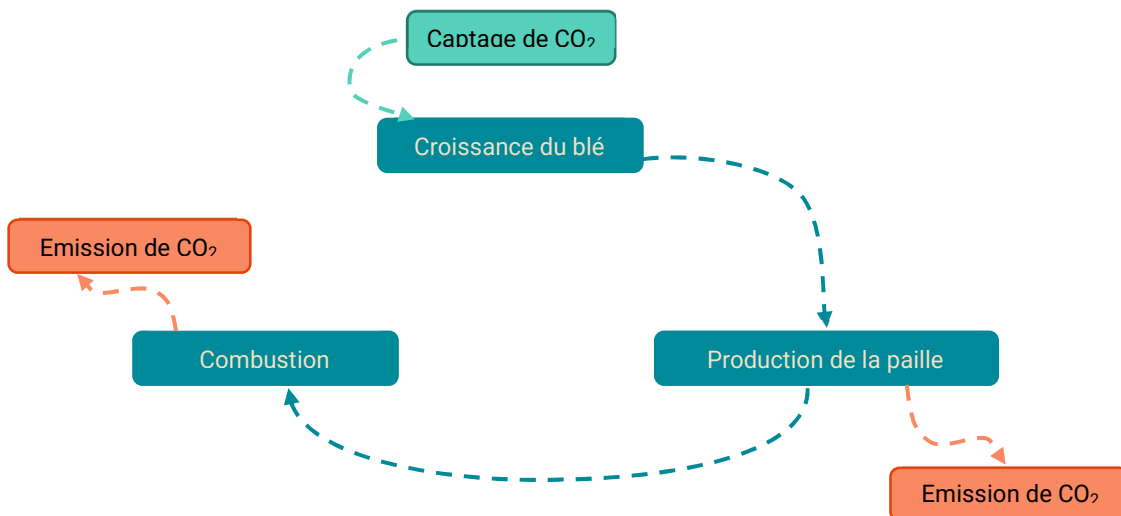


Figure 5 : Cycle de vie de la paille utilisée en combustion

La croissance du blé et la production de la paille sont identiques à la construction paille et ne sont pas rappelées ici. La paille est généralement utilisée localement pour alimenter une chaudière. La combustion

de la paille émet du CO₂. L'énergie grise nécessaire à la combustion (transport de la paille du champ vers le stockage, fonctionnement de la chaudière, évacuation des cendres, etc.) a été négligée dans les calculs.

Nota : Les chaudières à paille sont peu nombreuses en France. Elles sont le plus souvent utilisées à l'échelle d'une ferme (plus rarement à l'échelle d'une commune) et sont donc de forte puissance. Une des principales contraintes réside dans la température de fusion des cendres qui est plus basse que celle du bois. Le risque est la formation de mâchefer à l'intérieur du foyer. Les chaudières sont donc exclusivement destinées à fonctionner avec de la paille et ne peuvent pas être alimentées alternativement avec du bois.

3.1.4. BIOCARBURANT

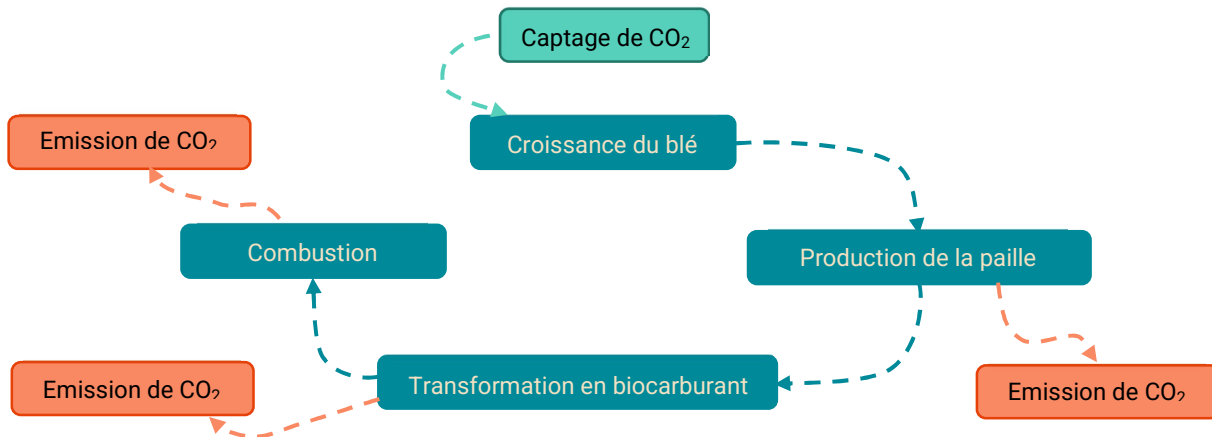


Figure 6 : Cycle de vie de la paille utilisée en biocarburant

La croissance du blé et la production de la paille sont identiques à la construction paille et ne sont pas rappelées ici. La transformation de la paille en biocarburant passe par une première étape de transformation industrielle en éthanol ou ETBE (éthyl-tertiobutyl-éther). Ces liquides sont ajoutés aux carburants pétrochimiques conventionnels dans une proportion inférieure à 8%. La combustion de ces mélanges dans les moteurs des véhicules produit du CO₂.

3.1.5. AMENDEMENT DIRECT (LAISSE AU CHAMP)

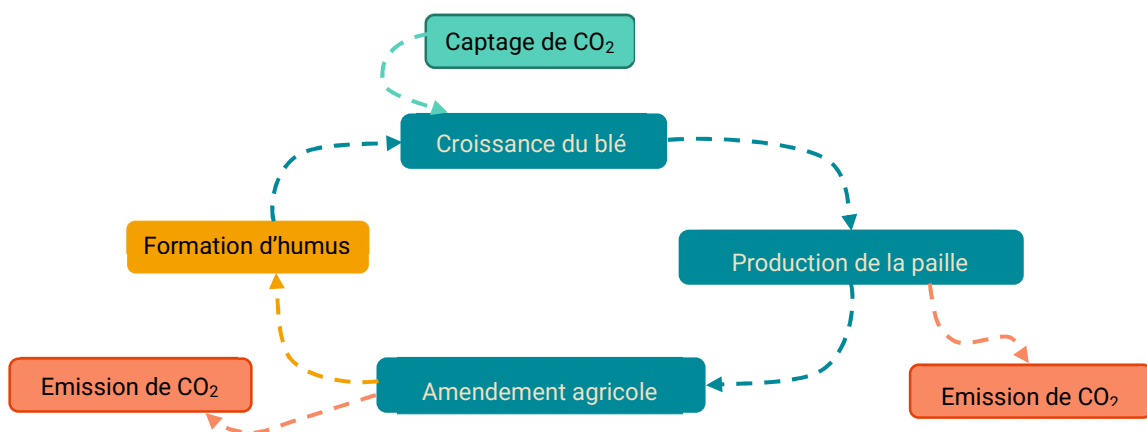


Figure 7 : Cycle de vie de la paille utilisée en amendement direct

La croissance du blé et la production de la paille sont identiques à la construction paille et ne sont pas rappelées ici. Dans certains cas, la paille n'est pas ramassée mais est laissée sur le champ pour y être enfouie. Ce principe conduit à la formation d'humus, source de croissance pour les cultures suivantes et à l'émission de CO₂.

3.1.6. LITIÈRE

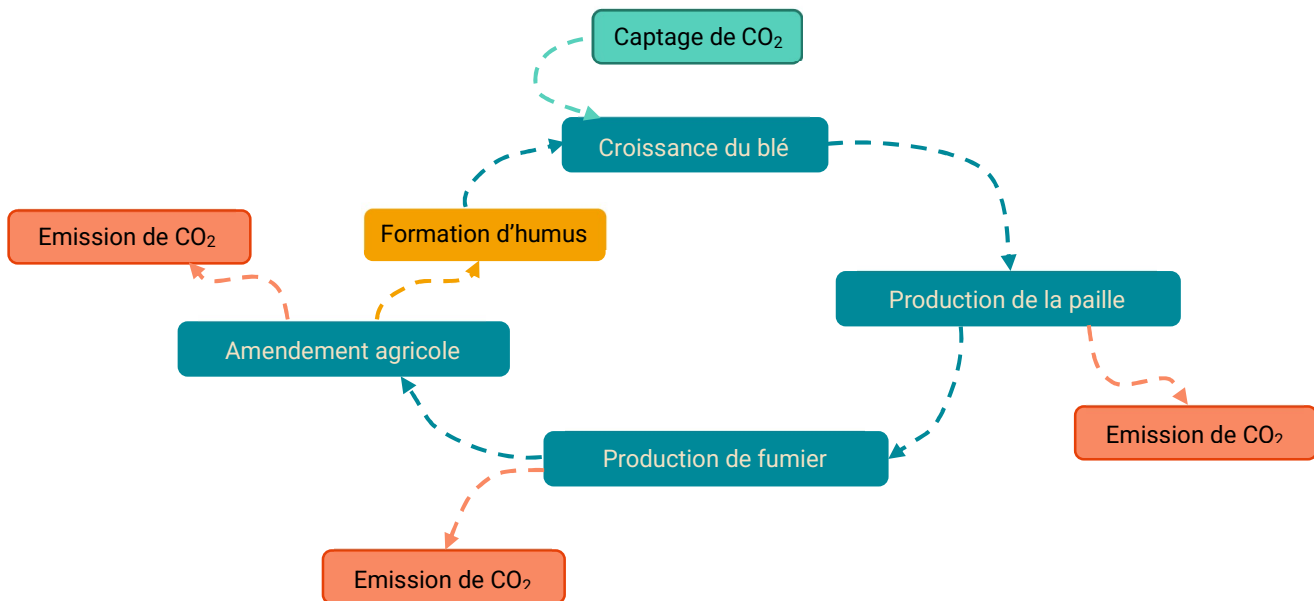


Figure 8 : Cycle de vie de la paille utilisée en litière

La croissance du blé et la production de la paille sont identiques à la construction paille et ne sont pas rappelées ici. L'usage de la paille en tant que litière animale conduit à la production de fumier qui est ensuite utilisé en tant qu'amendement agricole. Il en résulte la formation d'humus (favorable à la prochaine culture) et l'émission de CO₂.

3.1.7. EFFET Puits DE CARBONE DE LA PAILLE EN FONCTION DES USAGES

Les émissions et captages de CO₂ ont été calculés pour 1 tonne de paille et sont comparés dans le graphique ci-dessous. La temporalité étant très différente pour la construction, un zoom est réalisé sur les 5 premières années.

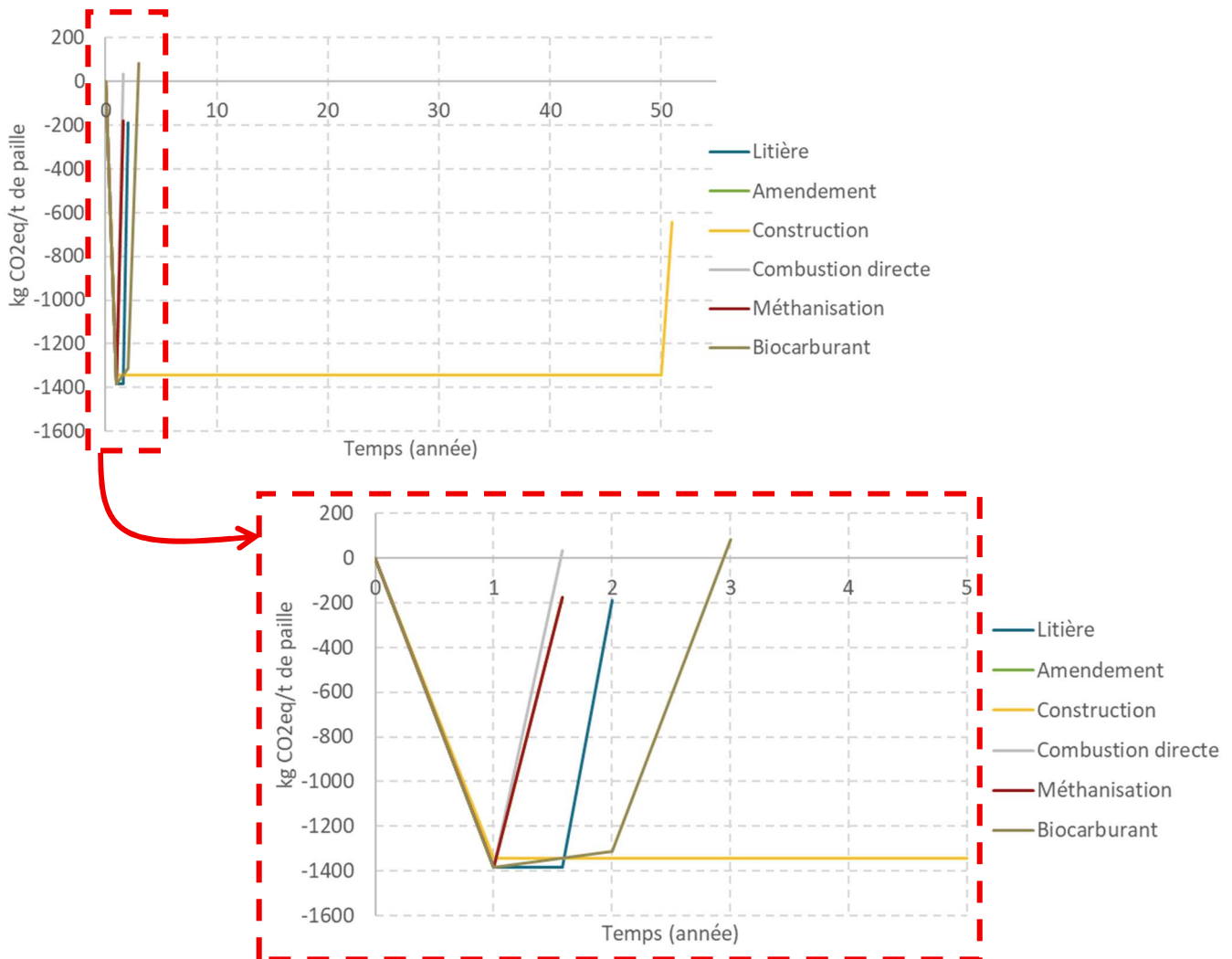


Figure 9 : Comparaison des émissions de CO₂ en fonction de l'usage de la paille (sur 50 ans et zoom sur 5 ans)

On observe que les usages de litière, d'amendement direct du sol, de méthanisation et de construction conduisent à un bilan négatif, c'est-à-dire qu'ils émettent moins de CO₂ qu'ils n'en captent. Ceci s'explique par la transformation d'une partie de la paille en humus ou digestat en fin de vie.

À l'inverse les usages énergétiques de la paille, à savoir la combustion et les biocarburants, conduisent à un bilan positif.

De plus, la paille utilisée en construction est stockée sous forme de carbone biogénique dès la construction du bâtiment et durant toute sa vie. L'hypothèse standard est de 50 ans mais l'expérience montre qu'elle peut être largement supérieure pour les bâtiments en paille (exemple : maison Feuillette construite en 1920 et toujours en usage).

Enfin, on gardera à l'esprit que la représentation graphique ci-dessus se limite à une seule rotation agricole. En menant une réflexion à l'échelle de 50 ans, pour la construction, une fois la paille insérée dans le mur, il reste 49 rotations pour valoriser la paille soit en construction soit en d'autres usages.

3.1.8. CONCLUSION

La comparaison des cycles de vie de la paille en fonction des usages montre que :

- La production d'énergie par combustion de la paille et des biocarburants produits à partir de paille émettent du CO₂,
- L'amendement du sol par enfouissement direct de la paille, la litière agricole, la méthanisation et la construction paille captent du CO₂ dans des ordres de grandeur identiques,
- La construction en paille se différencie des autres usages car elle capte le carbone à court terme et le stocke sous forme biogénique durant la totalité de la vie du bâtiment. Elle est l'unique usage

de la paille qui joue le rôle de puits de carbone, donc le plus efficace pour répondre à la réduction à court terme du taux de CO₂ dans l'atmosphère et ainsi concourir à la limitation du réchauffement climatique.

3.2. ECONOMIES D'ENERGIE POUR UNE PAROI OPAQUE AVEC ET SANS ISOLATION

Outre l'effet puits de carbone propre au matériau biosourcé qu'est la paille, il existe également un effet de réduction des émissions dû à son rôle d'isolant qui permet de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage des bâtiments. Les consommations énergétiques nécessaires au chauffage d'une surface de mur extérieur de 1m² ont été calculées. Elles sont comparées pour une configuration de mur non isolé représentant une performance thermique moyenne en France et une configuration de ce même mur isolé avec 36cm de paille.

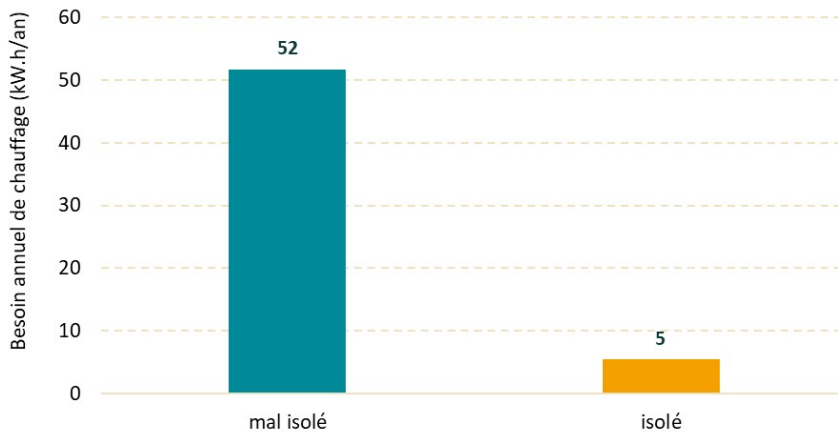


Figure 10 : Besoin annuel de chauffage pour 1m² de paroi mal isolée et isolée

Pour 1m² de paroi mal isolée, il faut 52kW.h/an pour contrebalancer les déperditions de la paroi, tandis que pour un mur isolé, il faut 5kW.h/an. La réduction de consommations de chauffage liées aux déperditions du mur est donc de 90%.

En termes d'émission de carbone, la figure ci-dessous compare les émissions de chauffages au fioul, électrique (de type pompe à chaleur) et au gaz naturel pour un mur mal isolé et isolé.

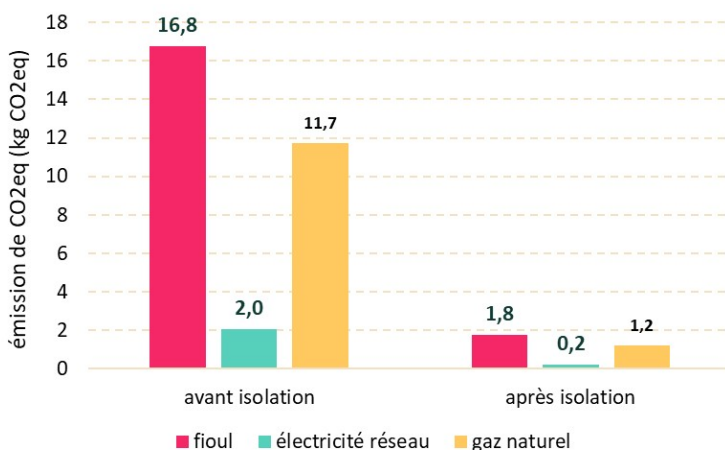


Figure 11 : Emissions de CO₂eq par m² de paroi par an en fonction du type de chauffage

Le mix électrique français étant faiblement carboné en raison de l'usage important d'électricité nucléaire, l'impact du chauffage au fioul est plus de quatre fois supérieur à celui de l'électricité. Les émissions de CO₂eq évitées par l'isolation d'1m² de paroi extérieure par 36cm de paille sont de 15kg CO₂eq par an pour un chauffage au fioul, de 1,8kg CO₂eq par an pour un chauffage électrique (de type pompe à chaleur) et de 10,5kg CO₂eq par an pour un chauffage au gaz naturel.

En rapportant ces valeurs à une tonne de paille, on obtient les valeurs suivantes :

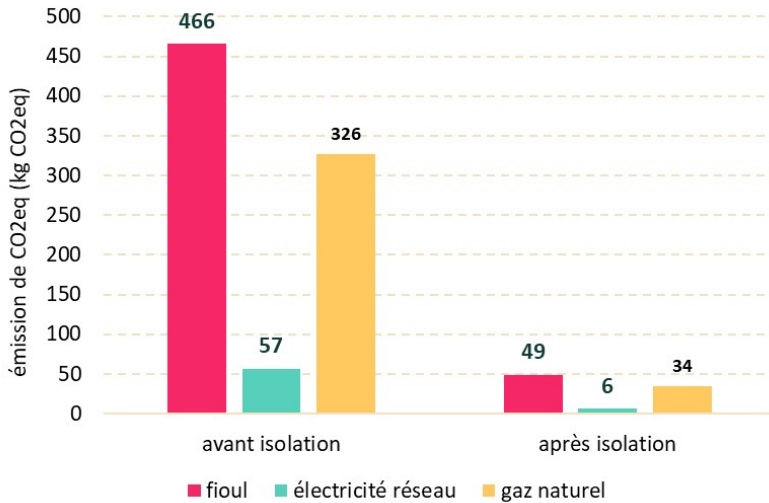


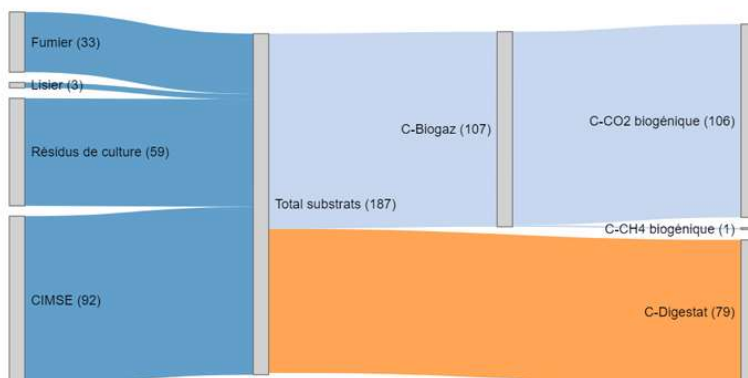
Figure 12 : Emissions de CO₂eq par tonne de paille utilisée en tant qu'isolant par an en fonction du type de chauffage

Les émissions de CO₂eq évitées par l'utilisation d'1 tonne de paille en tant qu'isolant de paroi extérieure sont de 417kg CO₂eq par an pour un chauffage au fioul, de 51kg CO₂eq par an pour un chauffage électrique de type pompe à chaleur et de 292kg CO₂eq par an pour un chauffage au gaz naturel.

D'autre part, on gardera à l'esprit d'une part que les chiffres présentés ci-dessus sont valables quel que soit l'isolant utilisé, d'autre part que la paille présente des émissions de CO₂eq négatives à l'échelle de son cycle de vie [R1] [R2].

3.3. SUBSTITUTION DES ENERGIES FOSSILES PAR LA PAILLE : CAS DE LA METHANISATION

Le schéma du cycle de vie de la paille en méthanisation présenté précédemment est une vision simplifiée de la réalité. En effet, le chargement d'un méthaniseur n'est jamais composé de 100% de paille. Ainsi, l'étude d'INRAE Transfert [R9] sur l'ACV du biométhane prend en compte deux cas extrêmes : une exploitation agricole de type « Culture » et une exploitation agricole de type « Elevage ». Les diagrammes de Sankey présentés ci-dessous détaillent les chargements :



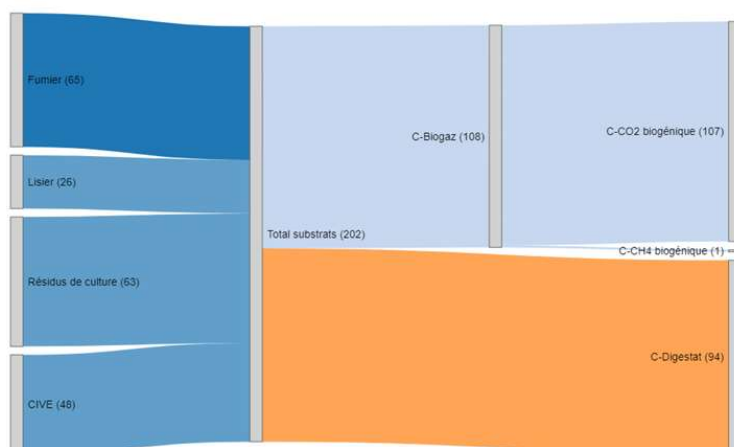


Figure 13 : Diagrammes de Sankey présentant les flux de carbone biogénique (g Cbio) permettant de produire 1kW.h PCI de biométhane, pour une exploitation agricole de type « Culture » (en haut) et « Elevage » (en bas)

La paille est incluse dans la catégorie « Résidus de culture » qui englobe les pailles de céréales ou d'oléagineux, les menues pailles, les résidus de maïs, les fanes de betteraves ou encore les déchets de sortie de silos. En moyenne, les résidus de culture représentent 61.0g de carbone biogénique. En prenant pour hypothèse que la paille de blé représente 20% des « Résidus de culture », on obtient 12.2g de carbone biogénique issus de paille de blé en entrée de méthaniseur.

La quantité de carbone biogénique par kg de paille a été calculée à partir des FDES 30441 [R1] et 30442 [R2]. Elle permet d'évaluer la quantité de paille en entrée de méthaniseur à 31.51g.

On en conclut donc que 31.51g de paille participent à la production de 1kW.h de biométhane.

Notre unité de calcul étant 1 tonne de paille, on en déduit que 1 tonne de paille participe à la production de 31741 kW.h PCI de biométhane.

D'après la note d'information de Solagro et NégaWatt [R10], la production d'1MW.h PCI de biométhane conduit à l'émission de 44kg CO₂eq, tandis que la production d'1MW.h PCI de gaz naturel conduit à l'émission de 230kg CO₂eq.

Nota : Ces valeurs correspondent au gaz en entrée du réseau de distribution de gaz, c'est-à-dire que pour le biométhane elle inclut la phase de séparation des gaz produits (CO₂, CH₄, etc.) et du digestat.

Une tonne de paille participe donc à l'émission de 1397kg CO₂eq, tandis que la même puissance (31741kW.h) de gaz naturel émettrait 7300kg CO₂eq. Une tonne de paille participe donc à éviter l'émission de 5904kg CO₂eq dans l'atmosphère.

En moyenne, la quantité de carbone biogénique provenant de la paille et introduite dans les méthaniseurs représente 6.3%. Cette proportion peut donc être appliquée de façon identique aux émissions de CO₂eq du biométhane produit. Une tonne de paille évite l'émission de 370kg CO₂eq dans l'atmosphère.

3.4. COMPARAISON DES EFFETS CUMULES DE L'USAGE DE LA PAILLE

Comme nous l'avons présenté dans les paragraphes précédents, l'impact de la paille sur le réchauffement climatique se fait à plusieurs niveaux :

- Puits de carbone dans la construction,
- Substitut aux énergies fossiles en méthanisation,
- Limitation des consommations d'énergie fossile en isolation.

Afin de comparer ces différents leviers, 4 scénarii ont été construits et leur impact sur le réchauffement climatique a été calculé pour 50 ans d'usage d'un m² de paroi. Le tableau ci-dessous les présente.

Tableau 3 : Description des scénarii

Scénario	Isolation	Chauffage
Scénario 1	Mal isolé	Gaz naturel
Scénario 2	Isolation en paille	Gaz naturel
Scénario 3	Mal isolé	Biométhane
Scénario 4	Isolation en paille	Biométhane

La figure suivante représente les émissions de CO₂eq pour chacun des scénarii.

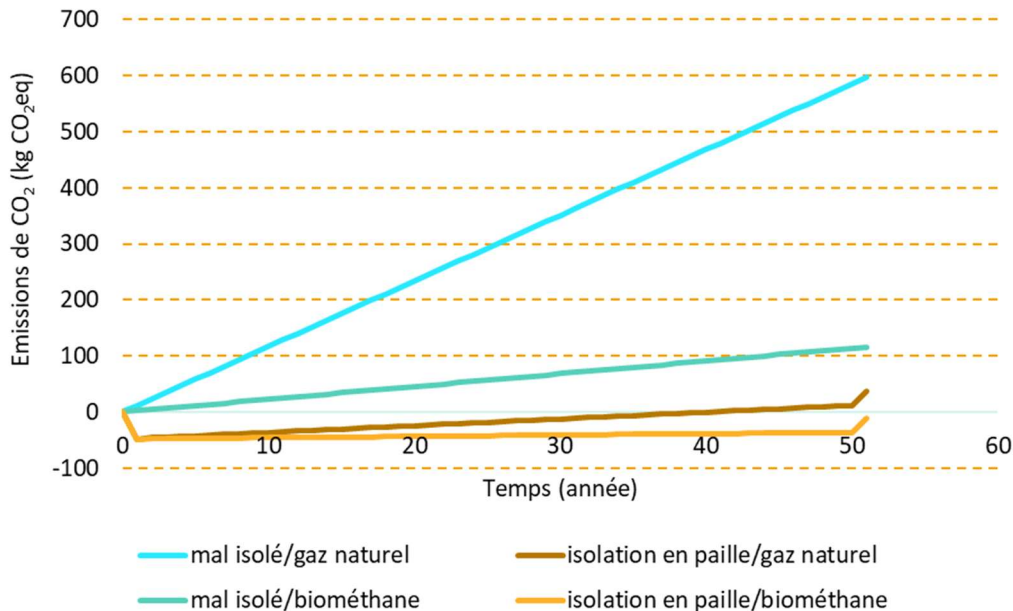


Figure 14 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre pour différents scénarii

L'isolation d'une paroi en paille est un levier important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. En effet, il combine l'effet puits de carbone de la paille et les économies de chauffage dû à son rôle d'isolant.

Pour une paroi isolée, le passage d'une énergie fossile (gaz naturel) à une énergie issue de la biomasse (biométhane), conduit à une réduction des émissions de GES. Cependant, **seule la configuration d'une paroi isolée en paille combinée à un chauffage au biométhane conduit à des émissions négatives en fin de vie de la paroi.**

On retiendra donc que l'impact sur les émissions de gaz à effet de serre est le suivant :

Mal isolé/gaz naturel > mal isolé/biométhane > isolation en paille/gaz naturel > isolation en paille/biométhane

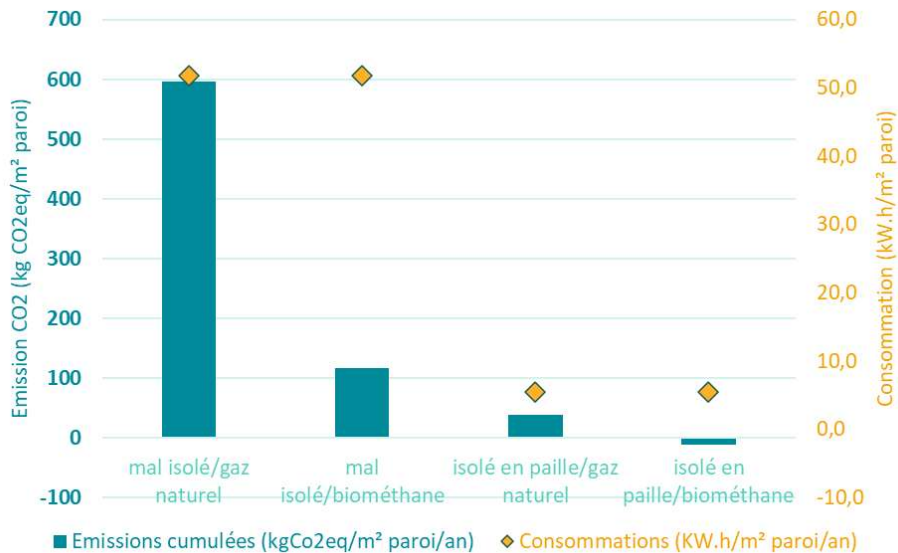


Figure 15 : Emission de gaz à effet de serre en fin de vie pour différents scénarii d'isolation et de chauffage et consommation énergétique associée

L'isolation en paille* d'une paroi de 1m² permet d'économiser 91% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à une paroi non isolée et chauffée au gaz naturel.

Le remplacement du chauffage au gaz naturel par du biométhane permet d'économiser 81% des émissions de gaz à effet de serre pour une paroi non isolée.

Le cumul de l'isolation d'une paroi en paille* et du remplacement du chauffage au gaz naturel par du biométhane permet d'économiser 99.5% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à une paroi non isolée et chauffée au gaz naturel.

*R=5m².K/W

4. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Une comparaison des cycles de vie des différents usages de la paille a permis de mettre en évidence que la construction paille est le seul usage qui conduit à un effet de puits de carbone immédiat, car il stoppe la circularité du cycle de vie du carbone dans un état biogénique, donc favorable vis-à-vis du réchauffement climatique.

De plus, la paille en construction présente un double intérêt puisqu'elle participe également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en raison de la réduction des besoins de chauffage grâce à son rôle d'isolant thermique.

La méthanisation quant à elle, joue un rôle de remplacement des énergies fossiles (en l'occurrence du gaz naturel). Cependant, cet usage ne présente pas un effet puits de carbone puisque le carbone se retrouve alternativement sous forme biogénique et sous forme de CO₂ sur des cycles courts (annuels). D'autre part, la paille introduite dans les méthaniseurs ne représente qu'une faible proportion du carbone biogénique introduit.

Enfin, on gardera à l'esprit que le fait de mener une analyse en se limitant à l'influence sur les émissions de gaz à effet de serre est réducteur et ne met pas en évidence la complexité systémique de la gestion du vivant à l'échelle d'une exploitation agricole (biodiversité, cycles de l'azote, du phosphore et du potassium, érosion des sols, remplacement des intrants pétrochimiques, pollution de l'air, de l'eau, etc.) avec pour finalité la viabilité économique de l'activité. L'usage de la paille en construction ne représentera un intérêt pour les agriculteurs que s'il y a un intérêt économique à externaliser une partie de leur production de paille vers ces débouchés.

En conclusion, les chiffres à retenir sont les suivants :

- L'isolation en paille* d'une paroi de 1m² permet d'économiser 91% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à une paroi non isolée et chauffée au gaz naturel.
- Le remplacement du chauffage au gaz naturel par du biométhane permet d'économiser 81% des émissions de gaz à effet de serre pour une paroi non isolée.
- Le cumul de l'isolation d'une paroi en paille* et du remplacement du chauffage au gaz naturel par du biométhane permet d'économiser 99.5% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à une paroi non isolée et chauffée au gaz naturel.

*R=5m².K/W

5. BIBLIOGRAPHIE

- [R1] FDES 30441 - Isolation en bottes de paille de plein champs issues de l'agriculture biologique
- [R2] FDES 30442 - Isolation en bottes de paille de plein champs issues de l'agriculture conventionnelle
- [R3] L'utilisation des digestats en agriculture – Les bonnes pratiques à mettre en œuvre – Sophie Carton, Quentin Bulcke
- [R4] Smart-Réno - Fiabiliser, Professionnaliser, Valoriser la Rénovation Energétique - Troisième volet : Valoriser le confort - Livrable T3.1 – Synthèse des données du parc de maisons individuelles – Novembre 2019 - Jérôme LE DREAU, Charles-Florian PICARD, Marc ABADIE
- [R5] Indice de rigueur - Degrés-jours unifiés aux niveaux national, régional et départemental | Données et études statistiques – Consulté le 24/09/2025
- [R6] FDES 26559 - [RE2020] Combustion d'un kWh de fioul domestique en chaudière
- [R7] FDES 26563 - [RE2020] Mise à disposition d'un kWh d'électricité pour l'usage de chauffage dans un bâtiment résidentiel
- [R8] Arrêté du 4 août 2021 – Annexe XII – Performance par défaut des isolants biosourcés
- [R9] Analyse du Cycle de Vie du biométhane issu de ressources agricoles – Rapport d'ACV – Octobre 2021 – INRAE Transfert
- [R10] La méthanisation dans le mix énergétique : enjeux, impacts et propositions – Solagro ; NégaWatt – Note d'information - juin 2021
- [R11] FDES 26560 - [RE2020] Combustion d'un kWh de gaz naturel en chaudière - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE
- [R12] La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? – Document de travail - Ilyas Mourjane, Julien Fosse – France Stratégie – juillet 2021
- [R13] Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation – Article 11
- [R14] Produire du biométhane – Guide technique - Aile, RAEE – Novembre 2012
- [R15] FDES 26560 – [RE2020] Combustion d'un kWh de gaz naturel en chaudière - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE