

EVALUATION DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE DE LA FILIÈRE CSR

État des lieux actuel et prospectif suivi d'une étude
stratégique sur les filières des activités économiques
et des combustibles solides de récupération

RAPPORT FINAL

Juillet 2025



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Marie APRIL (ADEME)
Lise ARNAUD (ADEME)
Jérôme AUFFRET (Véolia)
Guillaume DA COSTA (FNADE/FEDENE)
Christophe DOUSSET (ADEME)
Alexandre FARCY (Biomasse Normandie)
Karine FILMON (ADEME)
Bérangère FORCET (FNADE/FEDENE)
Séverine FRANCASTEL (DGE)
Olivier GAIRALDI (ORECA)
Guenola GASCOIN (SNEFID)
Estelle GUILLE (ORDECO)
Camille HUET (TEO Pays de la Loire)
Roland MARION (ADEME)
Océane MARTINEZ (DGPR)
Nora MEGDER (CME France)
Ludovic MOUGEOT (SUEZ)
Léonard NEUVILLE (FEDERREC)
Sandrine NOUGIER (DGPR)
Muriel OLIVIER (FNADE)
Anna PINEAU (ADEME)
Marilou PONTY (FNADE)
Antoine PORTERE (AREC Nouvelle-Aquitaine)
Thierry ROLLAND (ADEME)
Olivier THEOBALD (ADEME)
Olivier THOMAS (SUEZ)
Nolwenn TOUBOULIC (ADEME)
Sophia VAUCLIN (DGPR)
Gabriel VOLCOVSCHI (FEDENE)

CITATION DE CE RAPPORT

CAUDRON Alice, WUNDERLICH Thomas, ALEXANDRE Céline, RDC Environment. 2025. Etat des lieux actuel et prospectif suivi d'une étude stratégique sur les filières des déchets d'activités économiques et des combustibles solides de récupération - Lot 3 relatif à l'évaluation de l'empreinte environnementale de la filière CSR. 168 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2022MA000065-3

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : RDC Environment

Coordination technique - ADEME : ROLLAND Thierry – ARNAUD Lise

Direction/Service : Direction Economie Circulaire/Service Valorisation des Déchets

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	9
1.1. Préambule.....	9
1.2. Contexte.....	10
1.2.1. Définition d'un CSR	10
1.2.2. Gisements de déchets mobilisables pour produire du CSR	10
1.2.3. Réglementations françaises en vigueur	11
1.2.4. Soutien financier à la filière en France	12
1.2.5. Critère de durabilité et de réduction des émissions de GES	13
1.3. Objectifs et publics cibles	14
1.4. Revue critique	15
2. ENSEIGNEMENTS ISSUS DES ÉVALUATIONS DE GISEMENTS DAE ET CSR	16
2.1. Etat des lieux de la filière CSR en France.....	16
2.1.1. Installations de préparation de CSR	17
2.1.2. Installations de co-incinération de CSR	17
2.2. Potentiel de production de CSR à horizon 2030-2040	18
2.2.1. Présentation des étapes du calcul.....	18
2.2.2. Cadrage des scénarios prospectifs	19
2.2.3. Application des étapes de calcul appliquées aux DAE et aux DMA.....	20
2.2.4. Potentiel de production.....	23
2.3. Composition du CSR.....	24
2.4. Impacts de la filière CSR sur les installations de traitement des déchets	24
2.5. Impacts de la filière CSR sur les modes de production de chaleur.....	25
2.6. Gisement de bois et de papier-carton utilisable pour la préparation des CSR en France 26	
3. MÉTHODOLOGIE.....	29
3.1. Etude en trois volets	29
3.2. Evaluation environnementale selon la méthode d'analyse du cycle de vie.....	29
3.2.1. Introduction à l'analyse du cycle de vie.....	29
3.2.2. Unité fonctionnelle	31
3.2.3. Frontières générales du système	33
3.2.4. Critères environnementaux évalués dans l'étude	41
3.2.5. Critères de coupure.....	43
3.2.6. Evaluation de la qualité des données	44
4. DONNÉES UTILISÉES ET HYPOTHÈSES FORMULÉES	46
4.1. Préparation de CSR et transport jusqu'à la chaufferie.....	46
4.1.1. Traitement de la fraction hors CSR	48
4.2. Composition du CSR.....	48
4.2.1. Méthodologies envisagées.....	48
4.2.2. En lien avec les soutiens financiers existants en France	49
4.2.3. Taux biogénique en énergie	51
4.3. Principes de fonctionnement d'une chaufferie CSR dédiée	52
4.3.1. Principe général.....	52
4.3.2. Traitement des résidus.....	52
4.3.3. Combustion des CSR en unité dédiée à four à grille	53
4.3.4. Combustion des CSR en unité dédiée à lit fluidisé	53
4.4. Modèle de combustion des déchets.....	54
4.4.1. Sources principales des données d'activité.....	54
4.4.2. Sources principales des jeux de données d'inventaire du modèle de combustion des déchets.....	63

4.4.3. Différences dans la valorisation des CSR en unité dédiée à four à lit fluidisé par rapport au four à grille.....	64
4.4.4. Récapitulatif des données pour les unités dédiées.....	65
4.5. Mix énergétiques utilisés.....	65
4.5.1. Mix électrique utilisé par la chaufferie	65
4.5.2. Mix de chaleur utilisé par la chaufferie.....	67
4.6. Production d'énergie évitée	67
4.7. Traitement des déchets évité	68
5. RÉSULTATS POUR LES CAS DE BASE	71
5.1. Méthodologie associée à la présentation des résultats.....	71
5.2. Organisation des résultats	72
5.3. Sélection des indicateurs pertinents	72
5.4. Volet 1 – Préparation et combustion – Multicritères	74
5.4.1. Etapes les plus contributrices	75
5.4.2. Flux élémentaires les plus contributeurs.....	77
5.4.3. Impact unitaire pour 1 tonne de CSR	78
5.5. Volet 2 – Préparation, combustion et systèmes évités – Multicritères.....	82
5.5.1. Contributions des systèmes évités aux différents critères environnementaux	82
5.5.2. Contributions d'une tonne de CSR aux différents critères environnementaux.....	83
5.5.3. Impact unitaire pour 1 tonne de CSR et pour 1MWh de chaleur utile	86
5.6. Volet 3 – Déploiement de la filière CSR – Mono critère.....	88
5.6.1. Gisement de déchets valorisables et potentiel de production de chaleur suite au déploiement de la filière CSR.....	89
5.6.2. Emissions de GES suite au déploiement de la filière CSR.....	90
5.6.3. Résultats totaux pour les volets 3A et 3B.....	93
6. RÉSULTATS DES ANALYSES ADDITIONNELLES DE SENSIBILITÉ	94
6.1. Introduction	94
6.1.1. Liste des analyses de sensibilité.....	94
6.1.2. Organisation des résultats	95
6.2. Analyses de sensibilité pour le volet 2	95
6.2.1. Analyse par flux (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles).....	95
6.2.2. Influence de la méthodologie de prise en compte du CO ₂ biogénique (sans et avec)	98
6.2.3. Influence du rendement de la chaufferie	101
6.2.4. Influence du taux de biogénique du CSR (45% et 50%)	104
6.2.5. Influence du choix du type de systèmes de production d'énergie évitée (électricité produite à partir de gaz)	106
6.2.6. Influence de la source d'énergie fossile évitée (gaz naturel, charbon, fioul)	111
6.2.7. Influence du système de traitement de déchets évité.....	116
6.2.8. Valorisation du biogaz capté en ISDND (torchère vs. cogénération)	118
6.3. Analyses de sensibilité pour le volet 3	120
7. CONCLUSIONS DES CAS DE BASE.....	123
7.1. Conclusions du volet 1.....	123
7.2. Conclusions du volet 2	125
7.3. Conclusions pour le volet 3-A	128
7.4. Conclusions pour le volet 3-B.....	129
8. CONCLUSIONS DES ANALYSES ADDITIONNELLES DE SENSIBILITÉ	131
8.1. Analyses de sensibilité relatives au volet 2.....	131
8.2. Analyses de sensibilité relatives au volet 3.....	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	136
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	138
SIGLES ET ACRONYMES	142

RÉSUMÉ

Le présent rapport est relatif au lot 3 d'une étude structurée en quatre lots et visant à dresser un état des lieux des déchets mobilisables et à accompagner le développement de la filière « Combustible Solide de Récupération » (CSR) en France. Les objectifs de cette étude sont multiples : **mieux connaître les acteurs et les flux de déchets pouvant être valorisés dans la filière CSR, proposer des scénarios de déploiement à horizon 2030-2040, évaluer les impacts environnementaux de la filière CSR au regard des pratiques actuelles.**

Un CSR est un **déchet non dangereux, préparé pour être utilisé comme combustible** et issu d'un tri pour extraire les fractions valorisables d'un flux de déchets mélangés. Les déchets potentiels pour produire des CSR proviennent des DMA (Déchets Ménagers et Assimilés) et des DAE (Déchets des Activités Economiques), y compris les flux issus ou non des filières REP (Responsabilité Elargie du Producteur).

Les chaufferies CSR permettent de valoriser ces déchets (à l'issue d'une préparation) en vue de produire de la chaleur et/ou de l'électricité.

L'évolution du cadre réglementaire français, favorisant la valorisation énergétique et limitant le stockage des déchets non recyclables, est a priori favorable au déploiement de la filière CSR. Par ailleurs, l'ADEME soutient la filière CSR notamment via un lancement depuis plusieurs années d'appels à projet (6^{ème} AAP en 2024).

Le présent rapport vise spécifiquement à évaluer le bilan environnemental des principaux types de chaufferies CSR et repose sur la méthode d'évaluation dite d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Il a été soumis à une **revue critique** par des experts afin de garantir la fiabilité des hypothèses formulées, des données utilisées et des enseignements tirés.

Différentes configurations de préparation et de valorisation de CSR en chaufferie dédiée ont été étudiées (trois types de chaufferies et 6 compositions de CSR avec un taux de biogénique en énergie variable), ainsi que les bénéfices liés aux évitements d'impacts (2 options pour le stockage des déchets, 3 options pour la production d'énergie).

Lorsque l'évaluation environnementale se focalise sur la préparation et la combustion en chaufferie (sans prise en compte des évitements potentiels dus à la valorisation des déchets sous forme de CSR) (cf. volet 1 du présent rapport), celle-ci montre que les principaux contributeurs aux impacts environnementaux sont les émissions à la combustion (pour les enjeux : changement climatique et acidification), la consommation d'électricité de la chaufferie (pour l'enjeu relatif à la consommation de ressources fossiles et nucléaires ou à l'émission de radiations ionisantes), et enfin le traitement des résidus de combustion.

En intégrant les évitements potentiels dus à la valorisation des déchets sous forme de CSR à savoir l'absence d'envoi des déchets en installation de stockage et la production d'énergie en utilisant d'autres combustibles (cf. volet 2 du présent rapport), la filière CSR présente un bilan contrasté. Deux paramètres influencent fortement le bilan environnemental à savoir le **taux de biogénique en énergie** (variant de 30 à 55 % selon la composition du CSR), tout comme les **rendements énergétiques des chaufferies** (jusqu'à 80 % pour la chaleur et 45 % pour l'électricité).

La filière CSR peut générer des **bénéfices** du point de vue du changement climatique et de la consommation de ressources fossiles et nucléaires, à condition que la chaufferie présente un haut rendement énergétique et que le débouché pour la chaleur soit continu.

En prenant en compte le potentiel de déploiement de la filière CSR à horizon 2030 – 2040 en fonction notamment des gisements déterminés dans le cadre des travaux des autres lots (lot 2 & 4), la filière CSR permettrait de détourner jusqu'à 6,7 Mt de déchets du stockage et de produire jusqu'à 2,7 TWh d'électricité et 19,9 TWh de chaleur. Ce déploiement permettrait ainsi de potentiellement éviter l'émission de jusqu'à ~0.8 Mt CO₂ équivalent annuellement.

ABSTRACT

This report (Lot 3 of 4) assesses the current situation of recoverable waste and supporting the development of the Refuse Derived Fuel (RDF) sector in France. The objectives of this study are the following: (i) gaining a better understanding of the stakeholders in the value chain and of the waste streams that can be recovered in the RDF sector, (ii) proposing scenarios for the deployment at larger scale for 2030-2040 and (iii) assessing the environmental impact of the RDF sector compared to current practices (fossil heat and electricity production, landfilling of waste).

RDF is non-hazardous waste product that is prepared for use as a fuel. It is extracted from recoverable fractions within a mixed waste stream. Relevant potential waste streams for the production of RDF come from household and similar waste streams, as well as waste streams from economic activities. This also includes EPR (Extended Producer Responsibility) and non-EPR waste streams.

RDF boiler rooms help recover this waste (after preparation) to produce heat and/or electricity.

Changes in the French regulatory framework favouring energy recovery and limiting the storage of non-recyclable waste, are – in principle – conducive to the deployment of the RDF sector.

ADEME also supports the RDF sector, in particular through calls for projects over several years (6th call for projects in 2024).

This report specifically aims to assess the environmental performance of the main types of RDF boilers and is based on the Life Cycle Assessment (LCA) method. It has been peer reviewed by experts to ensure the reliability of the assumptions made, the data used and the lessons learned.

Different configurations for the preparation and recovery of RDF in dedicated boilers were studied (three types of boilers and six RDF compositions with varying biogenic energy content), as well as the benefits associated with impact avoidance (two options for waste storage, three options for energy production).

When the environmental assessment focuses on preparation and combustion in boilers (without taking into account the potential avoidance benefits) (see section 1 of this report), it shows that the main contributors to environmental impacts are combustion emissions (for the climate change and acidification environmental impacts), electricity consumption in the boiler room (for the environmental impacts of fossil and nuclear resource consumption or ionising radiation emissions), and finally the treatment of combustion residues.

The RDF sector presents a mixed picture when taking into account the potential reductions achieved through waste recovery in the form of RDF, i.e. the diversion of waste from landfills and the production of energy from other fuels (see section 2 of this report). Two parameters strongly influence the environmental balance: the biogenic content in energy (varying from 30 to 55% depending on the composition of the RDF) and the energy efficiency of the boilers (up to 80% for heat and 45% for electricity). The RDF sector can generate benefits in terms of climate change and consumption of fossil and nuclear resources, provided that the boiler has high energy efficiency and there is a continuous market for the heat.

Taking into account the potential of the RDF sector by 2030-2040, based in particular on the deposits identified in the work of the other lots (lots 2 & 4), the RDF sector could use up to 6.7 Mt of waste from storage and produce up to 2.7 TWh of electricity and 19.9 TWh of heat. This use could potentially avoid the emission of up to ~0.8 Mt CO₂ equivalent per year.

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Préambule

L'ADEME souhaite réaliser un état des lieux des filières « Déchets d'Activités Economiques (DAE) » et « Combustibles Solides de récupération (CSR) » qui a pour objectif de :

- Mieux connaître l'écosystème des filières DAE et CSR issus de DAE et Déchets Ménagers et Assimilés (DMA),
- Faire un état des lieux régional et national des flux des déchets mobilisables et des installations pour produire des CSR et les facteurs d'évolution,
- Définir un objectif de quantité de CSR valorisable pour 2030 et 2040, en cimenterie et en chaufferies spécifiques (proposition de scénarii d'évolution),
- Évaluer les impacts environnementaux de la filière CSR,
- Proposer des orientations pour une stratégie ADEME d'accompagnement des acteurs.

Afin de répondre à ces objectifs ambitieux, l'ADEME a choisi de découper la présente étude en 4 lots distincts réalisés par différents prestataires en parallèle, un lot de coordination générale de l'étude et 3 lots plus techniques.

Les objectifs poursuivis par chaque lot sont présentés ci-dessous :

- Lot 1 : coordination et animation : le bureau d'études In Extenso Innovation Croissance est chargé de :
 - Être le point de contact privilégié avec ADEME,
 - Coordonner les actions avec l'ensemble des intervenants dans l'étude,
 - Garantir la bonne coordination avec le responsable de chaque lot,
 - Suivre le respect du planning global de l'étude,
 - Préparer, animer et organiser les réunions (COPIL/COTECH, ...) : proposition d'ordre du jour, de relevés de décisions, invitations, compte-rendu, ... dans des délais raisonnables pour relecture et validation par l'ADEME,
 - Être le garant de la qualité des livrables finaux fournis.
- Lot 2 : évaluation du gisement de DAE, prospectives et proposition de recommandations pour la filière : le bureau d'études Elcimai est chargé de :
 - Estimer à l'échelle nationale et régionale la production et les filières de traitement des DAE, notamment les refus valorisables en CSR, afin de donner des premières pistes de renseignement pour le suivi des objectifs réglementaires, et permettre d'orienter les actions à mener,
 - Identifier les acteurs à accompagner dans le cadre de leur stratégie de gestion des DAE, et les conditions d'accompagnement qui pourraient créer un réel effet levier,
 - Proposer des recommandations qui couvrent le champ complet de gestion des DAE (de la prévention à la valorisation), dans une logique d'économie circulaire et de préservation de la ressource.
- Lot 3 : évaluation environnementale de la filière CSR conduite par le bureau d'études RDC Environment
- Lot 4 : évaluation du gisement de CSR, prospectives et propositions de recommandations pour la filière : le bureau d'étude RDC Environment est chargé de :
 - Cartographier les installations existantes et en projet de production et d'utilisation de CSR,
 - Dresser un état des lieux actuel et prospectif, régional et national, de la production potentielle de CSR et de la demande en énergie potentiellement substituable par de l'énergie issue de CSR,
 - Identifier les freins et leviers au développement de la filière CSR,

- Recommander les politiques publiques adéquates pour le développement de la filière CSR,
- Fixer des objectifs à la filière CSR et identifier la contribution de la filière CSR aux objectifs déchets et énergie.

Ce lotissement et les objectifs associés à chaque lot sont résumés en quelques mots à la Figure 1 ci-dessous.

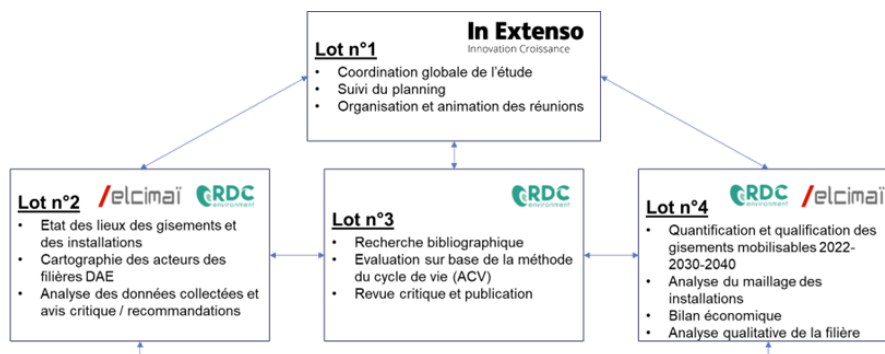


Figure 1 : Décomposition de la mission en 4 lots distincts

Des interactions entre les différents lots sur l'utilisation et le croisement des données ont été réalisées tout au long de l'étude en fonction des besoins et de l'avancée globale de l'étude.

Ce rapport concerne uniquement l'évaluation de l'empreinte environnementale de la filière CSR (Lot 3 de l'étude). L'état des lieux des gisements, les installations, les acteurs, les perspectives à horizon 2030 et 2040 et les orientations sont traités dans un second rapport (Lot 2 pour les DAE et lot 4 pour les CSR)

1.2. Contexte

1.2.1. Définition d'un CSR

L'Article R-541-8-1 du code de l'environnement¹ définit un « Combustible Solide de Récupération (CSR) » comme « *un déchet non dangereux solide, composé de déchets qui ont été triés de manière à en extraire la fraction valorisable sous forme de matière dans les conditions technico-économiques du moment, préparé pour être utilisé comme combustible dans une installation relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement* ».

L'Arrêté du 23 mai 2016 modifié² par l'arrêté du 2 octobre 2020, relatif à la préparation des combustibles solides de récupération précise que :

- « les caractéristiques d'un lot de CSR sont stables dans le temps ;
- un CSR est préparé à partir de déchets non dangereux et a un PCI sur CSR brut supérieur ou égal à 12 000 kJ/kg ;
- un CSR a fait l'objet d'un tri dans les meilleures conditions technico-économiques disponibles des matières indésirables à la combustion, notamment les métaux ferreux et non ferreux ainsi que les matériaux inertes ;
- un CSR ne dépasse pas les teneurs suivantes :
 - mercure (Hg) : 3 mg/kg de matière sèche ;
 - chlore (Cl) : 15 000 mg/kg de matière sèche ;
 - brome (Br) : 15 000 mg/kg de matière sèche ;
 - total des halogénés (brome, chlore, fluor et iode) : 20 000 mg/kg de matière sèche ».

1.2.2. Gisements de déchets mobilisables pour produire du CSR

¹ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032554270

² <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000042425949/#LEGIARTI000042425949>

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015 fixe parmi ses objectifs d'assurer la valorisation énergétique des déchets qui ne peuvent être recyclés en l'état des techniques disponibles et qui résultent d'une collecte séparée ou d'une opération de tri réalisée dans une installation prévue à cet effet.

Au regard des éléments de cette loi, les gisements de déchets permettant de produire des CSR sont :

- les Déchets Non Dangereux Non Inertes (DNDNI) issus des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA³) et
- les Déchets d'Activités Economiques (DAE⁴), plus particulièrement la fraction non dangereuse et non inerte de ceux-ci (DNDAE).

Au sein des deux catégories de déchets cités ci-dessus (DAE et DMA), les gisements de déchets permettant de produire des CSR peuvent être obtenus à partir de flux issus de filières REP existantes ou non (par exemple, emballages et papiers graphiques ménagers, mobiliers). A ces filières existantes viendront s'ajouter la filière REP des « emballages de restauration » en cours de mise en œuvre et les différentes filières REP en cours d'étude de préfiguration comme la filière « Emballages industriels et commerciaux (EIC) » prévue pour 2025⁵.

Les gisements de CSR peuvent aussi provenir de différents flux de déchets qui ne sont pas couverts par des filières REP et ainsi provenir des flux du « Service Public de Prévention de Gestion des Déchets » (SPGD). Cela concerne en particulier le tout-venant de déchèterie, aussi appelé parfois « encombrants » ; et d'autre part, les flux DAE non couverts par une REP et issus des secteurs de l'industrie⁶, de la construction ou du tertiaire.

1.2.3. Réglementations françaises en vigueur

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015⁷, fixait des objectifs de **réduction de la production des DAE** à l'horizon 2020. Depuis, la loi AGEC relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire du 10 février 2020⁸, a fixé de nouveaux objectifs nationaux :

- réduction des DMA de 15% par habitant
- réduction des DAE de 5% par unité de valeur produite en 2030 par rapport à 2010.

En ce qui concerne les déchets pouvant faire l'objet d'une préparation en CSR, le gisement futur évoluera de par :

- la poursuite des objectifs de prévention des déchets, de réemploi et de réutilisation,
- la montée en puissance des collectes séparées,
- l'extension des consignes de tri sélectif (mise en place du tri 5 flux défini dans la LTECV devenu tri 8 flux en 2021),
- l'obligation du tri à la source des biodéchets en 2023 défini dans la loi AGEC,
- l'augmentation du nombre de filières REP.

La LTECV du 17 août 2015⁷ fixe des objectifs de **diminution de stockage des déchets non dangereux non inertes** (DNDNI) et **d'augmentation de la valorisation matière** pour 2025. Ces objectifs ont depuis été complétés par la loi AGEC du 10 février 2020⁸ qui fixe de nouveaux objectifs nationaux en termes de traitement des déchets :

³Définis à l'article R541-8 du code de l'Environnement (https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042662931) comme « tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur est un ménage ».

⁴Définis à l'article R541-8 du code de l'Environnement (https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042662931) comme « tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage ».

⁵ <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep/fonctionnement-filiere-rep>

⁶ Les flux issus du secteur de l'industrie comprennent notamment les refus de pulpeur de l'industrie papetière et les refus de de tri de TMB sur OMR.

⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire>

- valorisation énergétique d'au moins 70 % des déchets ne pouvant faire l'objet d'une valorisation matière d'ici 2025 ;
- interdiction de stockage des déchets non dangereux non inertes (DNDNI) valorisables, ainsi que la justification du respect des obligations de tri avant élimination d'ici 2030 ;
- stockage de 10% maximum des DMA d'ici 2035.

La poursuite de ces objectifs est facilitée par le fait que :

- les installations de stockage des déchets non dangereux arrivent à saturation, avec 26% des collectivités concernées par des difficultés d'exutoires en 2019⁹ ;
- la construction de nouvelles installations suscite des réticences de la part des riverains ;
- les coûts de stockage augmentent ;
- la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP) relative au stockage va évoluer vers 65€/t sans modulations à horizon 2025 pour l'ensemble des installations autorisées (contre 18 à 42€/t avec un taux moyen proche du minima de 21€/t en 2019).

L'évolution des obligations réglementaires est schématisée à la figure ci-dessous :

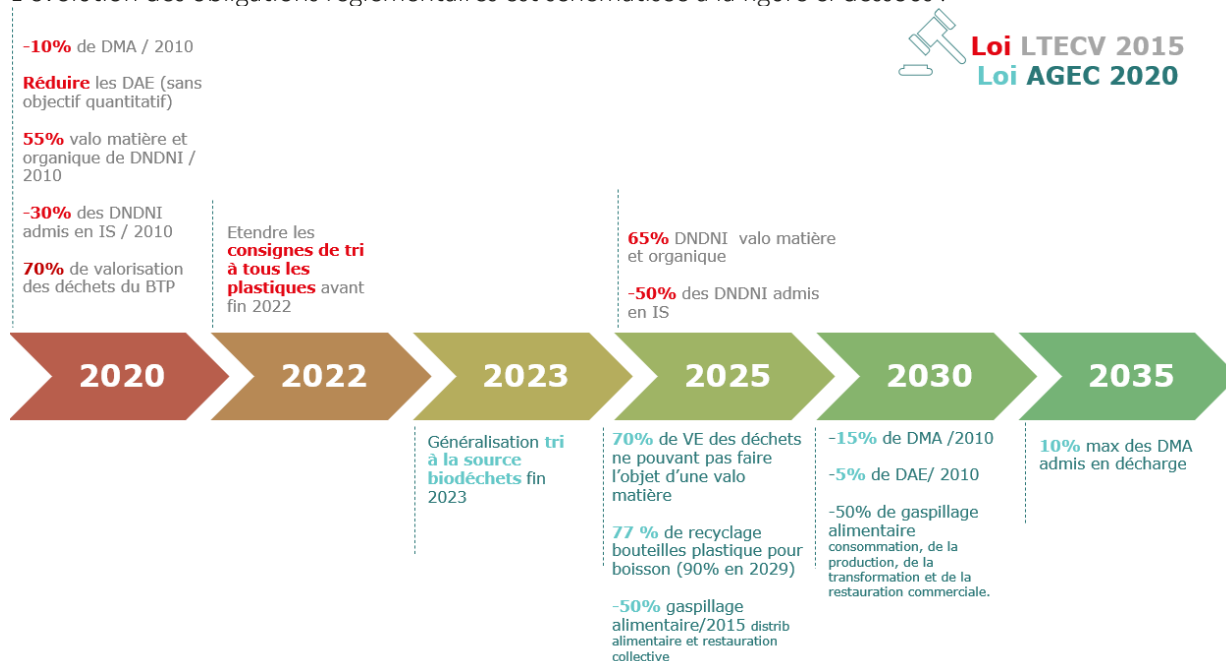


Figure 2 : Schéma de l'évolution des obligations réglementaires en lien avec la gestion des DAE/DMA (lot 2)

1.2.4. Soutien financier à la filière en France

1.2.4.1. Appel à projet « Energie CSR »

Depuis 2016, l'ADEME propose un mécanisme de soutien aux projets de chaufferies dédiée CSR via l'appel à projet (AAP) Energie CSR. Six sessions de cet AAP ont eu lieu : 2016, 2017, 2019, 2020, 2 sessions en 2021. L'ADEME a lancé, en mars 2024, un nouvel appel à projets¹⁰.

1.2.4.2. Règlement général d'exemption par catégorie (RGEC)

Certaines aides d'Etat sont exemptées de notification à la Commission européenne. Les critères de compatibilité de ces aides sont précisés dans des règlements dits d'exemption (à la procédure de

⁹ <https://amorce.asso.fr/actualite/saturation-actuelle-ou-prochaine-des-isdnd-ou-en-est-on-aujourd-hui-dans-les-discussions>

¹⁰ <https://presse.ademe.fr/2024/03/lademe-lance-son-6eme-appel-a-projets-energie-csr-pour-contribuer-a-la-reduction-des-emissions-carbone.html>

notification), regroupés en un document unique, le **règlement général d'exemption par catégorie** (RGE – SA 111726¹¹). L'introduction de nouvelles catégories d'aides et le relèvement des seuils d'exemption, au fil des modifications du RGE, permettent à la Commission européenne de se concentrer sur les mesures d'aides ayant la plus forte incidence sur le marché intérieur, et corrélativement, aux Etats membres, d'octroyer un plus grand nombre d'aides sans notification préalable à la Commission européenne.

Dans le cadre du présent règlement, la France a mis en place des aides d'Etat auxquelles sont éligibles les chaufferies CSR **servant à la production combinée de chaleur et d'électricité** du moment que les rendements de cogénération répondent aux exigences de la Commission européenne¹² (PES supérieur à 10%) et cela quelle que soit la **part biogénique (en énergie)**¹³.

1.2.4.3. Encadrement temporaire de crise et de transition (TCTF)¹⁴

La France a notifié à la Commission européenne un régime d'aides (SA 107668) sous la forme de subventions directes ou d'avances remboursables visant à accélérer le déploiement des énergies renouvelables et du stockage d'énergie dans le contexte de REPowerEU, en application de **l'encadrement temporaire de crise et de transition** pour les mesures d'aide d'Etat visant à soutenir l'économie à la suite de l'agression de la Russie contre l'Ukraine¹⁵. La mesure vise à accélérer le déploiement de l'énergie issue de la filière des CSR et est applicable jusqu'en fin 2025 (à noter que les projets devront être notifiés à la Commission européenne avant le 31 décembre 2025 et entrer en fonctionnement trois ans après celle-ci).

Dans le cadre du présent régime, seuls sont éligibles les projets utilisant des CSR dont la **part biogénique (en énergie)**¹³ est supérieure à 50%. Par ailleurs, pour sécuriser économiquement les projets, les CSR serviront à la **production de chaleur ou à la production combinée de chaleur et d'électricité** (cogénération à haut rendement).

1.2.5. Critère de durabilité et de réduction des émissions de GES

Le critère de durabilité et de réduction des émissions de GES applicable aux CSR est défini par la législation française, notamment dans le code de l'énergie. Ce critère vise à garantir que la production et l'utilisation des CSR respectent les exigences du développement durable, en particulier en matière de réduction des émissions de GES.

Dans la réglementation française, il est précisé que le critère de durabilité ne doit pas être rempli pour les combustibles issus de déchets, contrairement à d'autres combustibles. En revanche, il existe des critères de réduction des émissions de GES.

En effet, selon l'Article L281-4 du Code de l'Energie¹⁶, « les biocarburants, bioliquides et combustibles ou carburants issus de la biomasse¹⁷ produits à partir de déchets et de résidus autres que les résidus

¹¹ https://www.europe-en-france.gouv.fr/sites/default/files/sa.111726_protection_environnement_pacte_vert.pdf

¹² La cogénération à haut rendement est définie par les économies d'énergie obtenues avec la production combinée de chaleur et d'électricité, par rapport à une production séparée. Des économies supérieures à 10 % constituent le seuil d'entrée dans la catégorie de la « cogénération à haut rendement ».

¹³ La part biogénique en énergie correspond à la proportion de déchets d'origine biogénique pondérée par la quantité d'énergie contenue dans ces déchets (voir Chapitre 4.2.3)

¹⁴ C(2023) 1711 final ou "Temporary Crisis and Transition Framework" - TCTF : « Régime temporaire relatif aux aides visant à accélérer le déploiement des énergies renouvelables grâce aux investissements en faveur de l'utilisation de combustibles solides de récupération (CSR) »

¹⁵ Communication de la Commission Encadrement temporaire de crise et de transition pour les mesures d'aide d'Etat visant à soutenir l'économie à la suite de l'agression de la Russie contre l'Ukraine (JO C 101 du 17/03/2023, p. 3). L'« encadrement temporaire de crise et de transition » remplace l'encadrement temporaire de crise adopté le 28 octobre 2022 (JO C 426 du 9/11/2022, p. 1), qui avait déjà remplacé l'encadrement temporaire de crise précédent adopté le 23 mars 2022 (JO 131 I du 24/3/2022, p. 1), modifié le 20 juillet 2022 (JO C 280 du 21/7/2022, p. 1) (l'« encadrement temporaire de crise »). L'encadrement temporaire de crise n'est plus en application depuis le 9 mars 2023.

¹⁶ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043211331

¹⁷ Les chaufferies CSR utilisent certains déchets issus de la biomasse, comme le bois, le papier, le carton ainsi que certains textiles tels que le coton.

provenant de l'agriculture, de l'aquaculture, de la pêche et de la sylviculture ne doivent remplir que les critères de réduction des émissions de gaz à effet de serre des articles L. 281-5 et L. 281-6. ».

Selon l'article L281-6 du Code de l'Energie¹⁸, « La production d'électricité, de chaleur et de froid à partir de combustibles ou carburants issus de la biomasse, la production de biogaz injecté dans un réseau de gaz naturel, la production du biogaz non injecté dans un réseau de gaz naturel et non destiné au secteur des transports doivent présenter un potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 70 % par rapport aux émissions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation de combustibles d'origine fossile lorsque cette production a lieu dans des installations mises en service du 1er janvier 2021 au 31 décembre 2025. Ce pourcentage minimal est porté à 80 % pour les installations mises en service à partir du 1er janvier 2026. »

Selon la réglementation européenne (Article 29 de la directive européenne 2018/2001¹⁹), « Les combustibles issus de la biomasse remplissent les critères de durabilité et de réduction des gaz à effet de serre établis aux paragraphes 2 à 7 et au paragraphe 10 s'ils sont utilisés dans des installations produisant de l'électricité, de la chaleur et du froid ou des combustibles ou carburants dont la puissance thermique nominale totale est égale ou supérieure à 20 MW dans le cas des combustibles issus de la biomasse solide et dont la puissance thermique nominale totale est égale ou supérieure à 2 MW dans le cas des combustibles issus de la biomasse gazeuse. Les États membres peuvent appliquer les critères de durabilité et de réduction des émissions de gaz à effet de serre aux installations d'une puissance thermique nominale totale inférieure. »

C'est dans ce contexte réglementaire mouvant que les nouveaux projets de chaufferies CSR se développent.

1.3. Objectifs et publics cibles

Au sein de ce projet global, **le lot 3, auquel se rapporte le présent rapport**, vise à conduire une **évaluation environnementale** de la filière CSR afin de remplir les sous-objectifs suivants et s'adressent à différents publics cibles (présentés en souligné ci-dessous) :

- Continuer à conforter les connaissances de l'ADEME sur la filière CSR actuelle (volet 1 du lot 3 de l'étude) ;
- Servir de base à la création et à l'alimentation par l'ADEME d'un outil d'aide à l'instruction²⁰ de nouveaux projets en territoire à destination des acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 2) à horizon 2030-2040 ;
- Simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030-2040 en termes d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en vue de communiquer celui-ci aux acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 3) par rapport :
 - aux filières actuelles de traitement de ces déchets,
 - aux filières actuelles de production de chaleur et d'électricité ;
- Construire des jeux de données d'inventaire²¹ afin d'alimenter la base de données d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) Base Empreinte® de l'ADEME²²,

¹⁸ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043211349/2025-01-17

¹⁹ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>

²⁰ Le format que prendra l'outil d'aide à la décision interne à l'ADEME n'est pas connu à ce stade et sera discuté ultérieurement au sein de l'ADEME

²¹ Un jeu de données d'inventaire est une compilation et une quantification des intrants (flux de produit, de matière ou d'énergie entrant dans un processus) et des extrants (flux de produit, de matière ou d'énergie sortant d'un processus) pour un système donné.

²² <https://base-empreinte.ademe.fr/>

1.4. Revue critique

Les normes ISO 14040 et ISO 14044, qui encadrent la réalisation des analyses du cycle de vie (ACV), exigent qu'une revue critique par des experts indépendants des réalisateurs de l'étude soit réalisée lorsque cette dernière sert de base à des assertions comparatives destinées à être communiquée en externe. Dans la mesure où cette étude repose sur la méthode ACV, et qu'elle est basée sur une comparaison de scénarios, cette étude a été soumise à un panel d'experts indépendants sélectionnés sur base de leur compétence sur les différents sujets techniques et méthodologiques concernés dans ce rapport :

- Delphine BAUCHOT et Laure COUTEAU (Solinnen),
- François RICOUL (S3D),
- Yves BLANCHOZ et Sebastien FOLLET (TERRA).

La revue critique permet de fiabiliser l'évaluation réalisée, en s'assurant que les hypothèses retenues sont représentatives, que les données utilisées pour la quantification sont d'une qualité suffisante au regard des objectifs et qu'elles reposent sur des modélisations cohérentes.

2. Enseignements issus des évaluations de gisements DAE et CSR

2.1. Etat des lieux de la filière CSR en France

Les gisements de DAE et de CSR, les acteurs et les structures impliquées sont présentées dans l'autre rapport relatif à cette étude.

De manière schématique, la production et la valorisation énergétique des CSR sont structurées en amont par les acteurs spécialisés dans la gestion des déchets et en aval par les acteurs spécialisés dans le domaine de l'énergie (opérateurs de réseaux de chaleur/électricité). La chaîne de valeur de la production des CSR relie des acteurs distincts par leurs métiers et leurs domaines de compétences.

Au niveau français, la filière CSR est constituée de grands groupes industriels, de PME/ETI et d'opérateurs publics ou privés. Un schéma présentant ces différents acteurs a été réalisé dans le cadre du lot 4 de cette étude :



Figure 3 : Schéma représentant les différents acteurs de la filière CSR (source : Lot 4)

2.1.1. Installations de préparation de CSR

La préparation des CSR nécessite diverses étapes (le tri, la séparation et le broyage), variables selon la nature des gisements de déchets utilisés mais aussi selon la qualité requise des CSR. Il n'y a pas de procédé de préparation de CSR standard. Cependant, les CSR doivent être préparés selon les exigences de l'arrêté du 23 mai 2016.²³ La préparation des CSR vise à répondre aux exigences de :

- densité énergétique,
- réduction de contaminants lors de la combustion,
- et de mise en œuvre (granulométrie, humidité).

Celles-ci sont dictées par les exigences réglementaires (relatives au traitement des fumées et au devenir des cendres) des installations qui utilisent les CSR et par les cahiers des charges des consommateurs de CSR (cimenteries et chaufferies dédiées). Les installations de préparation de CSR (issus des DAE et déchets ménagers) ont été recensées fin 2023 dans le cadre des travaux du lot 4 (voir second rapport de l'étude) :

- 65 en fonctionnement (1 575 kt/an de capacité de préparation identifiée) ;
- 31 en projet (890 kt/an de capacité de préparation identifiée) ;
- 1 à l'arrêt.

2.1.2. Installations de co-incinération de CSR

Les installations de co-incinération de CSR sont définies dans l'Arrêté du 23 mai 2016 modifié.²⁴ comme « toute unité technique fixe ou mobile dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels, et qui utilise des CSR comme combustible habituel ou d'appoint, ou dans laquelle des CSR sont soumis à un traitement thermique en vue de leur valorisation par combustion par oxydation ou par d'autres procédés de traitement thermique, tels que la pyrolyse, la gazéification ou le traitement plasmatique, pour autant que les substances qui en résultent soient ensuite directement utilisées comme combustible ». Ces installations de co-incinération sont soumises à autorisation sous la rubrique 2971 des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015.²⁵ définit le cadre dans lequel la préparation et la valorisation de combustibles solides de récupération doivent être réalisées : « Afin de ne pas se faire au détriment de la prévention ou de la valorisation sous forme de matière, la valorisation énergétique réalisée à partir de combustibles solides de récupération doit être pratiquée soit dans des installations de production de chaleur ou d'électricité intégrées dans un procédé industriel de fabrication, soit dans des installations ayant pour finalité la production de chaleur ou d'électricité, présentant des capacités de production de chaleur ou d'électricité dimensionnées au regard d'un besoin local et étant conçues de manière à être facilement adaptables pour brûler de la biomasse ou, à terme, d'autres combustibles afin de ne pas être dépendantes d'une alimentation en déchets ».

Les installations suivantes de co-incinération ont été recensées dans le cadre des travaux du lot 4 fin 2023 :

- Chaufferies CSR
 - 3 en fonctionnement (170 kt/an de capacité de combustion) ;
 - 43 en projet (2 000 kt/an de capacité de combustion) ;
 - 6 projets abandonnés.

²³ Arrêté du 23 mai 2016 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement

²⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032575814>

²⁵ <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

- Cimenteries : 26 cimenteries ont été identifiées et selon les sources sollicitées :
 - 20 consomment du CSR (370 kt de CSR valorisés en 2022 et 1,2 Mt prévus en 2030) ;
 - 3 ne consomment pas de CSR ;
 - 3 sans information.
- Fours à chaux : 22 fours à chaux ont été identifiés, 3 d'entre eux consomment du CSR (tonnage confidentiel dû au faible nombre de sites) selon les sources sollicitées dans le cadre du lot 4.

2.2. Potentiel de production de CSR à horizon 2030-2040

Les principales hypothèses reprises du lot 4 de cette étude sont présentées ici. Pour plus de détail concernant la méthode et les hypothèses réalisées, se référer au second rapport de l'étude.

2.2.1. Présentation des étapes du calcul

Pour estimer le potentiel de production de CSR en 2030 et 2040, le calcul réalisé dans le lot 4 suit les étapes suivantes, résumées en Figure 4, pour chaque flux de déchets dans le périmètre de l'étude :

- Etape 1 : Estimation du gisement de déchets en 2030 et 2040 (par rapport au gisement produit/collecté²⁶ ou traité²⁷ en 2021);

Les déchets considérés sont :

- Les DAE hors REP (différence entre les DAE totaux et les DAE faisant partie de filières REP),
- Les Flux issus des filières REP (DAE et DMA),
- Les DMA hors REP (encombrants),
- Etape 2 : Estimation de la part qui n'est pas envoyée en valorisation matière (refus de tri) ;
- Etape 3 : Estimation de la part des refus envoyés en CSR ;
- Etape 4 : Estimation du rendement de préparation de CSR.

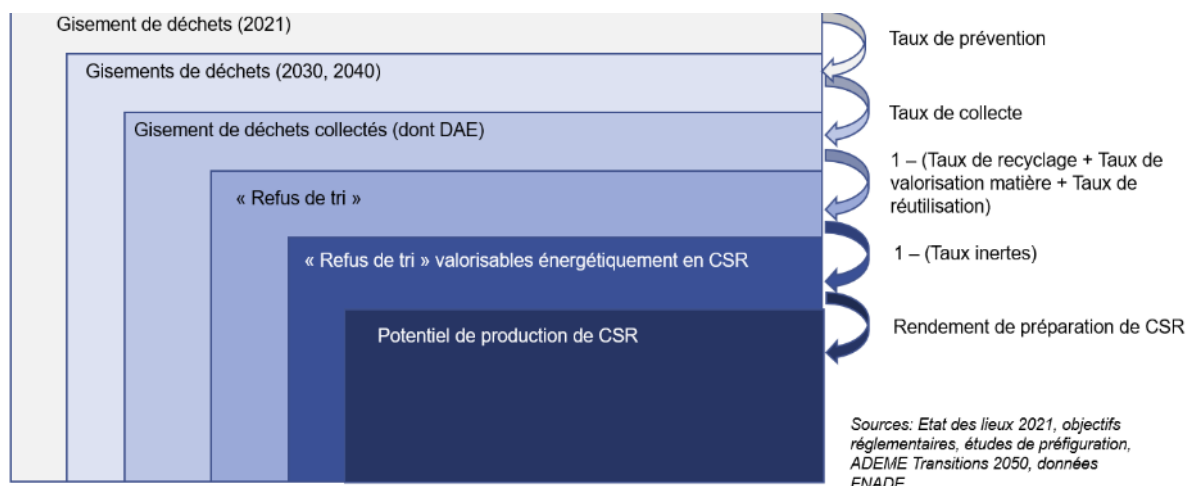


Figure 4 : Etapes du calcul du potentiel de production des CSR à horizon 2030 et 2040 (Source : Lot 4)

²⁶ Le gisement produit ou collecté correspond au gisement de déchets produit en France et faisant l'objet d'une collecte légale.

²⁷ Le gisement traité correspond au gisement qui fait l'objet d'un traitement en France. La différence avec le gisement produit/collecté correspond aux déchets importés et exportés.

Les hypothèses nécessaires à ce calcul dépendent de nombreux facteurs :

- les orientations des politiques publiques qui seront adoptées à ces horizons telles que les politiques de prévention, de collecte séparée, la priorité donnée au recyclage, et la place de l'unité de valorisation énergétique (UVE) / de l'installation de stockage des déchets non dangereux (ISDND) par rapport au CSR pour la gestion des refus de tri ;
- l'évolution de la composition des déchets en fonction des évolutions technologiques et des modes de consommation ;
- l'évolution des techniques de tri et gestion des déchets.

En conséquence, le potentiel de production de CSR a été estimé pour trois scénarios différents qui sont associés à des hypothèses contrastées sur ces différents volets.

2.2.2. Cadrage des scénarios prospectifs

Le calcul du gisement de CSR à horizon 2030 et 2040 réalisé dans le lot 4 se basent sur les hypothèses des scénarios « Transitions 2050²⁸ » développés par l'ADEME pour les années 2030 et 2050.

Au sein des scénarios « Transition 2050 », trois scénarios ont été retenus pour l'analyse menée :

- Le scénario « Tendanciel (Tend) », qui correspond à la perpétuation des tendances actuelles,
- Le scénario « Coopérations territoriales (S2) » (voir Figure 5 ci-dessous),
- Le scénario « Technologies vertes (S3) » (voir Figure 5 ci-dessous).

Les scénarios S1 et S4 n'ont pas été retenus car ils reposent sur des paris de rupture plus marqués :

- un pari humain dans le scénario S1 (sobriété poussée)
- et un pari technologique dans le scénario S4 (développement de technologies de décarbonation n'existant pas encore).



Figure 5 : Cadrage des scénarios Transitions 2050 (ADEME, 2021) (Source : Lot 4)

Pour chacun de ces scénarios, l'ADEME a développé des hypothèses :

- de prévention des déchets ménagers, des déchets industriels et des déchets du commerce ;
- de proportion des déchets qui sont finalement traités en valorisation matière, en ISDND, en UVE, et en valorisation énergétique sous forme CSR (chaufferie ou cimenterie), tenant compte de l'évolution de la composition des déchets et des technologies de tri et de préparation de CSR.

²⁸ <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/5072-prospective-transitions-2050-rapport.html>

Ces hypothèses ADEME ont été adaptées dans le cadre du lot 4 de la présente étude, et les scénarios ont été renommés afin d'éviter la confusion avec les estimations de production de CSR issues directement de « Transitions 2050 » :

- SA : scénario fondé sur le scénario Tendanciel de « Transitions 2050 » ;
- SB : scénario fondé sur le scénario S2 ;
- SC : scénario fondé sur le scénario S3.

Le potentiel de production de CSR 2040 a été calculé comme la moyenne entre le potentiel 2030 et le potentiel 2050 (hypothèse de vitesse de croissance de la production de CSR constante sur la période).

2.2.3. Application des étapes de calcul appliquées aux DAE et aux DMA

Les étapes 1 et 2 détaillées ci-dessous sont utilisées pour déterminer le gisement de déchets des flux REP. Ces étapes sont également suivies pour les flux hors REP, afin d'avoir un même cadre méthodologique pour tous les types de déchets. En revanche, les valeurs ont été adaptées pour les flux hors REP telles qu'explicité dans le rapport relatif au lot 4.

Etape 1 : Estimation du gisement de déchets 2030 et 2040 par secteur

Les DAE sont décomposés en 3 secteurs : Industrie, Construction et Tertiaire.

Le gisement des déchets à horizon 2030-2040 a été estimé à partir du gisement 2021 sur base du rythme de prévention des déchets défini dans « Transition 2050 » en appliquant :

- au secteur « Tertiaire », le rythme du secteur « Commerce »,
- aux secteurs « Industrie » et « Construction », le rythme associé au secteur « Déchets industriels ».

Pour les DAE, l'hypothèse de prévention²⁹ est appliquée au gisement produit (estimation maximale) et au gisement traité (estimation minimale).

Pour les flux REP, l'hypothèse de prévention est appliquée au gisement mis sur le marché, auquel est appliqué un taux de collecte séparée réglementaire. Au-delà de 2030, comme les filières REP n'ont pas d'objectifs réglementaires, des hypothèses d'évolution tendancielle des objectifs ont été réalisées, modérées pour certaines filières par la faisabilité technique de ces objectifs (voir le second rapport de l'étude).

Pour les encombrants, l'hypothèse de prévention est calculée en tenant compte de la prévention sur le gisement DMA, et des quantités sorties des encombrants via les filières REP. Ainsi, la réduction des encombrants est plus forte que la prévention moyenne sur les DMA.

Etape 2 : Estimation de la part qui n'est pas envoyée en valorisation matière (refus de tri)

Pour les DAE, la part qui est envoyée en refus de tri a été estimée en appliquant :

- au secteur « Tertiaire », le taux de refus de tri³⁰ du « Commerce » défini dans « Transition 2050 »,
- au secteur « Industrie », le taux de refus de tri associé aux « Déchets industriels » défini dans « Transition 2050 »,
- au secteur de la « Construction », le taux de refus de tri correspondant aux objectifs de recyclage définis dans la réglementation liée à la filière REP PMCB pour 2027 (un objectif de recyclage de 57% correspond à un taux de refus de tri de 43%).

Pour le secteur de la « Construction », les taux de refus de tri sont identiques pour tous les scénarios car les objectifs de recyclage n'évoluent pas entre 2030 et 2040. En revanche, les secteurs « Tertiaire » et « Industrie » ne sont pas directement associés à une REP donc les hypothèses de « Transition 2050 » ont été reprises et varient par scénario.

Les taux de refus de tri retenus par secteur et par scénario sont résumés en Figure 6 ci-dessous.

²⁹ Une estimation de la réduction de la quantité de déchets a été réalisée, sur base des politiques de prévention.

³⁰ Le taux de refus de tri correspond à la fraction ne faisant l'objet d'aucune valorisation matière (par exemple le recyclage ou la réutilisation).

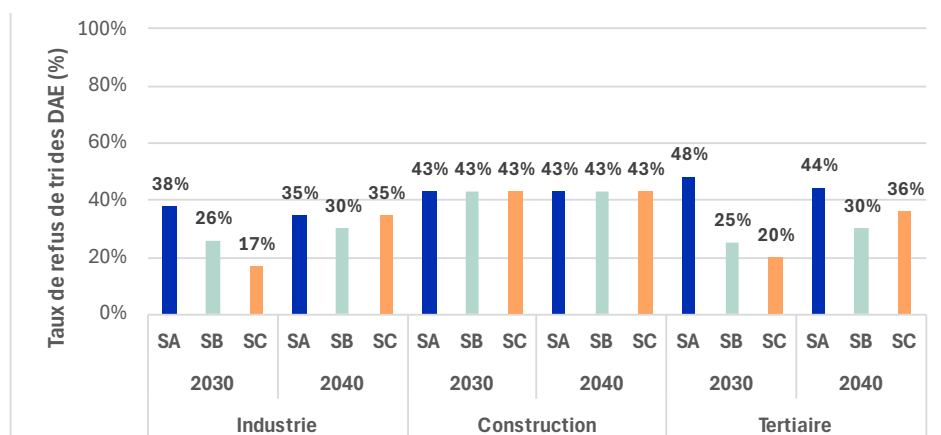


Figure 6 : Taux de refus de tri des DAE par secteur et scénario, 2030 et 2040 issus du lot 4 (Source : Lot 4)

Le refus de tri peut ensuite être :

- envoyé en ISDND,
- envoyé en UVE,
- ou valorisé sous forme de CSR (production finale de CSR).

Pour les flux issus de filière REP, le taux de valorisation matière est estimé à partir des objectifs réglementaires de valorisation matière (recyclage et réutilisation) pour chaque filière REP. Au-delà de 2030, comme les filières REP n'ont pas d'objectifs réglementaires, des hypothèses d'évolution tendancielle des objectifs ont été réalisées, modérées pour certaines filières par la faisabilité technique de ces objectifs compte tenu de la composition du gisement.

Etape 3 : Estimation de la part des refus envoyés en CSR

Les scénarios « Transitions 2050 » fournissent une proportion de déchets :

- valorisés matière,
- envoyés en ISDND,
- envoyés en UVE,
- et valorisés sous forme de CSR (production finale de CSR).

Chaque scénario propose des valeurs différentes correspondant à des hypothèses contrastées d'évolution de la composition des déchets, des technologies de tri et de préparation du CSR et des choix d'orientation des refus vers l'ISDND, l'UVE et le CSR. La part des refus envoyés en préparation de CSR est directement reprise pour les flux hors REP.

La proportion de refus totale pouvant être envoyée en CSR correspond à la somme de la part envoyée en ISDND (nulle pour les scénarios SB et SC), de la part envoyée en UVE et de la part valorisée sous forme de CSR. Une répartition est calculée entre ces différentes destinations et présentées à la figure ci-dessous.

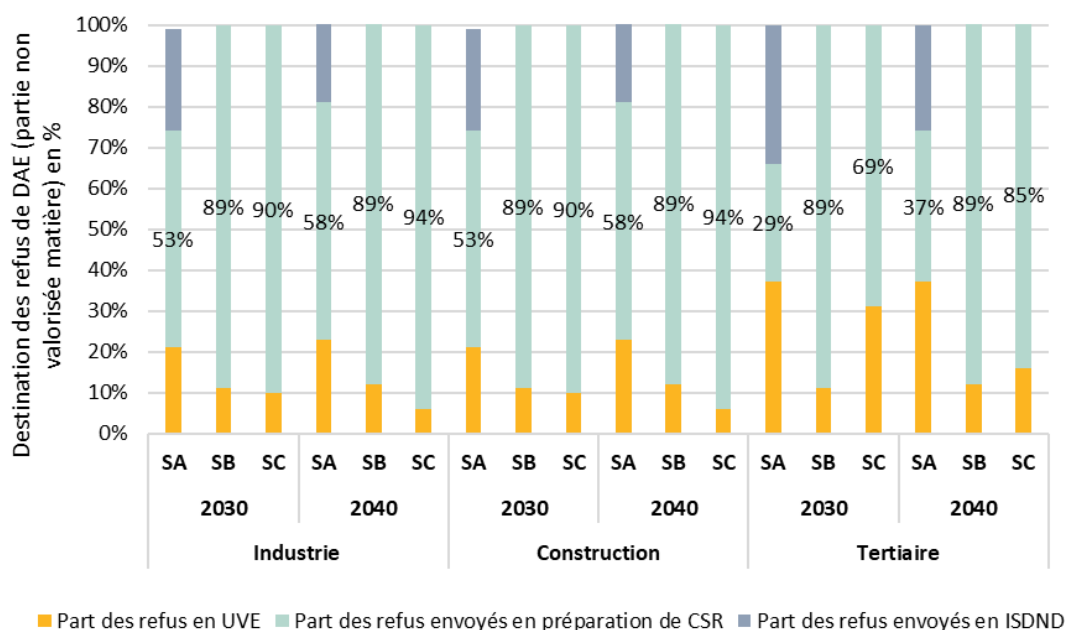


Figure 7 : Destination des refus de DAE (partie non envoyée en valorisation matière) entre la préparation de CSR, l'UVE et l'ISDND – 2030 et 2040 (Source : Lot 4)

Pour les flux hors REP, les données utilisées sont directement issues de l'étape 3. Les étapes 1 et 2 ont simplement été suivies afin d'utiliser le même cadre méthodologique afin de confirmer les hypothèses faites sur les valeurs de « Transition 2050 ».

Pour les encombrants et les flux issus de REP, le parti pris est que les refus de tri valorisables énergétiquement vont aller préférentiellement en CSR plutôt qu'en UVE, les UVE étant davantage destinées aux flux des déchets des collectivités collectés en mélange. Cela conduit à maximiser le potentiel de CSR issu de ces flux.

Etape 4 : Estimation du rendement de préparation de CSR

La proportion de déchets envoyée en préparation de CSR et le rendement de préparation de CSR ont été recalculés à partir de la proportion de déchets valorisée énergétiquement en CSR et de la proportion envoyée en ISDND (comprenant les refus de préparation de CSR), en se basant sur les données fournies par la FNADE et les scénarios « Transition 2050 ». Les scénarios Transition 2050 permettent de connaître les valeurs dans les cases rouges dans la figure suivante :

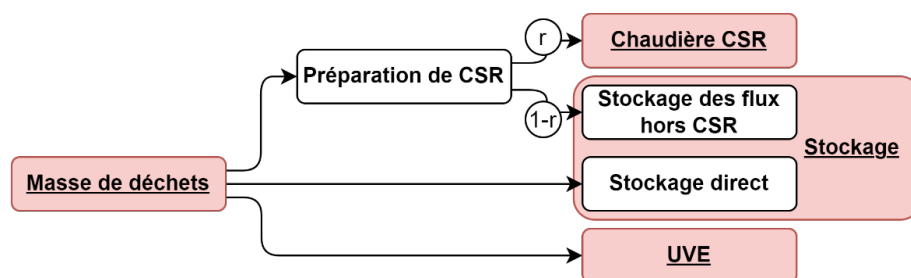


Figure 8 : Exutoire des déchets selon Transition 2050 (r =rendement de préparation)

À l'aide de ces valeurs, il est possible d'estimer les tonnages entrants en installation de préparation de CSR en vue de projeter les capacités d'unités de préparation de CSR correspondantes, et il permet également d'estimer les tonnages de flux hors CSR, entrant en ISDND. Ceux-ci étaient agrégés avec les tonnages envoyés en ISDND dans les projections des scénarios Transitions 2050, comme montré dans la figure ci-dessus.

Les hypothèses suivantes ont été réalisées pour les DAE totaux :

- Pour le scénario SA, le rendement de préparation a été estimé à 67%. Ce calcul provient du rendement estimé pour 2021 sur base de l'hypothèse FNADE (60% de CSR, 30% de refus envoyés en ISDND, soit 60/90). Le rendement 2021 a été corrigé pour tenir compte du fait que le potentiel de valorisation matière après préparation de CSR devient nul du fait du progrès du tri à la source. Aucune amélioration des techniques de tri n'est attendue dans ce scénario. Les hypothèses de rendement sont estimées, selon les flux, à 60% (par exemple les DAE issus de REP mobilier, VHU, DEEE ou bateaux) ou à 95% pour les flux pour lesquels la part des refus envoyés en CSR tient déjà compte de la part du gisement qui est combustible (par exemple, les articles de sport et loisirs, emballages et papiers, textiles, encombrants...). Un rendement de préparation est estimé pour les flux qui contiennent peu de non incinérables.
- Pour les scénarios SB et SC, les rendements de préparation en CSR ont été estimés en supposant que plus aucun déchet n'était envoyé en stockage direct à partir de 2030. Les déchets envoyés en stockage dans les scénarios S2 et S3 d'après Transition 2050 sont donc exclusivement des refus de préparation de CSR. Ainsi, il est possible de déterminer la valeur du rendement de préparation à partir de ces valeurs. En effet, s'il n'y a plus de stockage direct, le rendement est calculé de la manière suivante :

$$r = \frac{\text{masse entrant en chaudière CSR}}{\text{masse entrant en préparation}} = \frac{\text{masse entrant en CSR}}{\text{masse de déchets} - \text{masse entrant en UVE}} \text{ (voir Figure 8).}$$

Le rendement de préparation de CSR par scénario est résumé en Figure 9 ci-dessous.

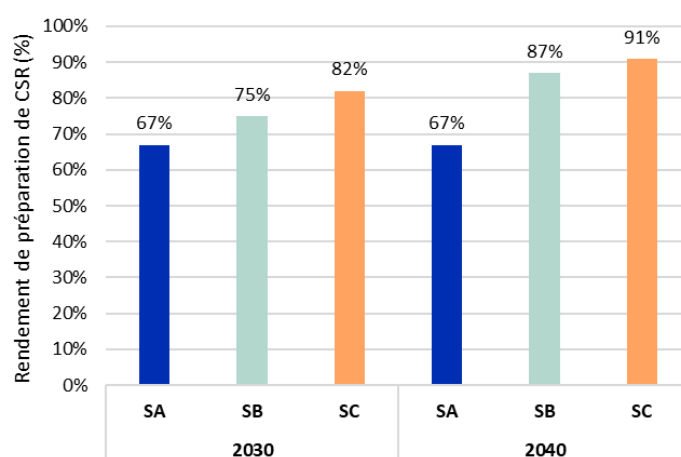


Figure 9 : Rendement de préparation de CSR par scénario - 2030 et 2040 (Source : Lot 4)

2.2.4. Potentiel de production

À l'issue des 4 étapes présentées précédemment, un potentiel de production peut être déterminé. Ce potentiel est défini pour les trois scénarios prospectifs considérés (scénarios A, B et C présentés au chapitre 2.2.2), pour 2030 et pour 2040. Pour chaque scénario, une hypothèse minimale et maximale est présentée.

Pour les 2 horizons, les scénarios A, B et C reprennent les hypothèses d'évolution de la consommation et des technologies de traitement présentées précédemment.

Le potentiel minimal (SA min, SB min et SC min) est calculé à partir du gisement de DAE traité (cette hypothèse est minimisante car une partie du gisement peut ne pas être représenté) et le potentiel maximal (SA max, SB max et SC max) est calculé à partir du gisement de DAE produit (cette hypothèse est maximisante car une partie du gisement produit sera perdu, par exemple, il y a plus d'exports que d'imports). Il n'y a pas d'hypothèse minimale et maximale pour les DMA, par manque de données.

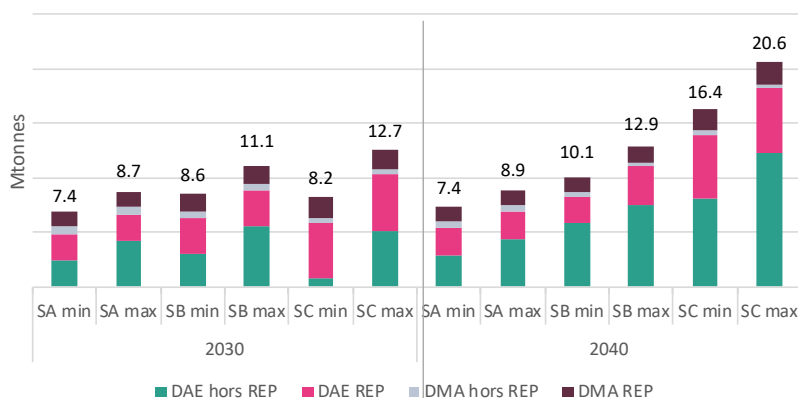
A l'horizon 2030, lorsqu'il n'y a pas de contrainte sur le taux de biogénique à atteindre le potentiel de production de CSR est compris entre 7,4 et 12,7 Mt en fonction des 3 scénarios prospectifs considérés, dont 72 à 81% de DAE, le reste provenant de Déchets Ménagers et Assimilés (hors OMR).

A l'horizon 2040, lorsqu'il n'y a pas de contrainte sur le taux de biogénique à atteindre le potentiel de production de CSR est compris entre 7,4 et 20,6 Mt en fonction des 3 scénarios prospectifs considérés, dont 73 à 88% de DAE, le reste provenant de Déchets Ménagers et Assimilés (hors OMR).

Ainsi, pour 2030-2040, le potentiel de production de CSR est principalement issu des DAE (à plus de 2/3).

Le potentiel CSR réellement mobilisable dépendra de l'évolution réelle des gisements de déchets, des technologies de tri et de préparation de CSR, et des choix d'orientation des déchets entre la valorisation matière, l'UVE, l'ISDND et le CSR. Les scénarios SA, SB et SC proposent des hypothèses contrastées sur ce sujet, représentant ainsi une gamme de valeurs possibles.

Note : le potentiel minimum pour 2030 et 2040 n'évolue pas car les évolutions des DAE et des DMA se compensent.



Production CSR (Mt)	2030						2040					
	SA min	SA max	SB min	SB max	SC min	SC max	SA min	SA max	SB min	SB max	SC min	SC max
DAE hors REP	2,9	4,2	3,1	5,6	0,7	5,2	2,9	4,4	5,9	7,5	8,1	12,3
DAE REP	2,4	2,4	3,3	3,3	5,2	5,2	2,6	2,6	2,5	3,6	5,9	5,9
DMA hors REP	0,8	0,8	0,7	0,7	0,4	0,4	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3
DMA REP	1,3	1,3	1,6	1,6	1,9	1,9	1,4	1,4	1,5	1,5	2,1	2,1
Total	7,4	8,7	8,6	11,1	8,2	12,7	7,4	8,9	10,1	12,9	16,4	20,6

Figure 10 et Tableau 1: Evolution du potentiel de production de CSR (2030-2040) pour les différents scénarios (Source : Lot 4)

À l'aide du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des différents CSR et du rendement énergétique de la chaufferie CSR, il est possible de déterminer la quantité d'énergie qui serait fournie par ce potentiel :

$$\text{Quantité d'énergie fournie} = \text{masse de CSR} \times \text{PCI} \times \text{rendement de l'installation}$$

2.3. Composition du CSR

Compte tenu du fait que plus de 2/3 du potentiel de production de CSR 2030 / 2040 est issu de DAE, et que la composition des DAE est fortement incertaine en raison de la faible précision des données disponibles (il y a un grand nombre de déchets déclarés avec un code déchets en mélange dont la composition est inconnue), il n'a pas été possible de définir une composition précise du CSR à partir de la composition des déchets sources.

2.4. Impacts de la filière CSR sur les installations de traitement des déchets

La mise en service d'installations de préparation et de combustion de CSR a inévitablement une influence sur les quantités de déchets entrantes dans les installations de traitement classiques.

Les hypothèses réalisées dans le cadre du lot 4 sont que la filière de préparation de CSR a été construite pour détourner des déchets du stockage et les objectifs publics vont dans ce sens. En effet, la loi Anti-Gaspillage pour l'Economie Circulaire (AGEC) promulguée en 2020³¹ :

³¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/>

- interdit progressivement le stockage des DNDNI valorisables³²,
- impose une justification du respect des obligations de tri avant 2030,
- et fixe un objectif de 70% de valorisation énergétique des déchets ne pouvant faire l'objet d'une valorisation matière d'ici 2025.

De plus, les capacités d'incinération ne permettent pas d'accepter les déchets détournés du stockage à la hauteur des objectifs de réduction du stockage. En effet, les UVE et UIOM disposent d'une capacité de traitement limitée (120 installations d'incinération de déchets pour une capacité réglementaire de 15,8 Mt par an selon la base de données SINOE³³) qui ne permet pas d'absorber la baisse du stockage. La construction de nouvelles unités suscite également des oppositions³⁴.

Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont amené à retenir comme hypothèse **que les déchets entrants dans la composition des CSR sont détournés des Installations de stockage des déchets non-dangereux (ISDND) uniquement** et que les unités de valorisation énergétique (UVE) ne sont pas impactées.

En cas de base, l'absence d'envoi vers une installation de stockage est alors évaluée. L'absence de traitement en unité d'incinération est également évaluée en analyse de sensibilité, ce qui signifierait que de nouvelles UVE seraient construites.

Note : Pour le bois B, le flux par défaut est la chaufferie biomasse. L'hypothèse est de ne pas faire rentrer ces deux filières en compétition car la filière de préparation de CSR a été construite pour détourner des déchets du stockage.

2.5. Impacts de la filière CSR sur les modes de production de chaleur

Les hypothèses prises pour l'estimation des gisements (voir second rapport de l'étude) mènent à dire que l'un des objectifs de la filière CSR est de substituer de l'énergie fossile par des CSR. Par ailleurs, les scénarios développés dans « Transition 2050 » font tous l'hypothèse d'une hausse des énergies renouvelables et d'une baisse des énergies fossiles. Ainsi, la filière CSR viendrait remplacer ces énergies fossiles (principalement le gaz naturel, mais également d'autres sources de chaleur fossile minoritaires comme le charbon et le fioul). De plus, l'usage de biomasse est rare dans les projets industriels et de réseaux de chaleur de moyenne et grande taille qui sont visés par les CSR.

La demande en chaleur fossile techniquement substituable par du CSR pour l'industrie et les réseaux de chaleur a été évaluée dans la partie de l'étude relative à l'évaluation des gisements CSR (voir second rapport de l'étude)³⁵ pour les 3 scénarios et deux horizons temporels :

³² L'Article R541-48-3 du Code de l'environnement créé par le décret n°2021-1199 du 16 septembre 2021 précise les échéances auxquelles cette obligation s'applique en fonction de la composition des déchets apportés https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000044062074

³³ <https://www.sinoe.org/>

³⁴ Exemple : <https://france3-regions.francetvinfo.fr/grand-est/ardennes/charleville-mezieres/environnement-un-projet-d-incinerateur-de-dechets-effraie-la-population-dans-les-ardennes-2901005.html>

³⁵ Estimation en TWh/an, puis convertie en Mt équivalent CSR par an, avec l'hypothèse dans cette partie de l'étude d'un CSR moyen de 13,5 MJ/kg et une chaufferie ayant un rendement thermique minimal de 70%.

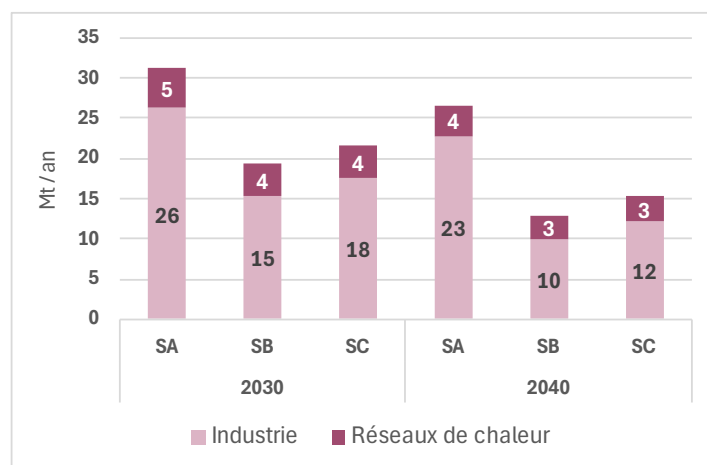


Figure 11 : Demande en chaleur fossile substituable par du CSR en Mt/an (Source : lot 4, hypothèses lot 3)

La demande en énergie techniquement substituable par du CSR excède l'offre dans tous les scénarios à horizon 2030 (voir figure ci-dessous) et dans les scénarios SA en 2040. En général, cela signifie que la demande en énergie n'est pas en tant que telle limitante pour le déploiement de la filière CSR à horizon 2030. Les facteurs limitants sont au niveau de l'offre en déchets disponibles, et des conditions économiques du déploiement des sites.

A horizon 2040, pour les scénarios SB et SC, les efforts de sobriété énergétique et de transition énergétique marqués conduisent à une forte baisse de la demande en énergie techniquement substituable par du CSR (13 et 15 Mt équivalent CSR) tandis que l'offre disponible reste élevée compte tenu notamment du potentiel de production, ce qui conduit l'offre à excéder la demande.

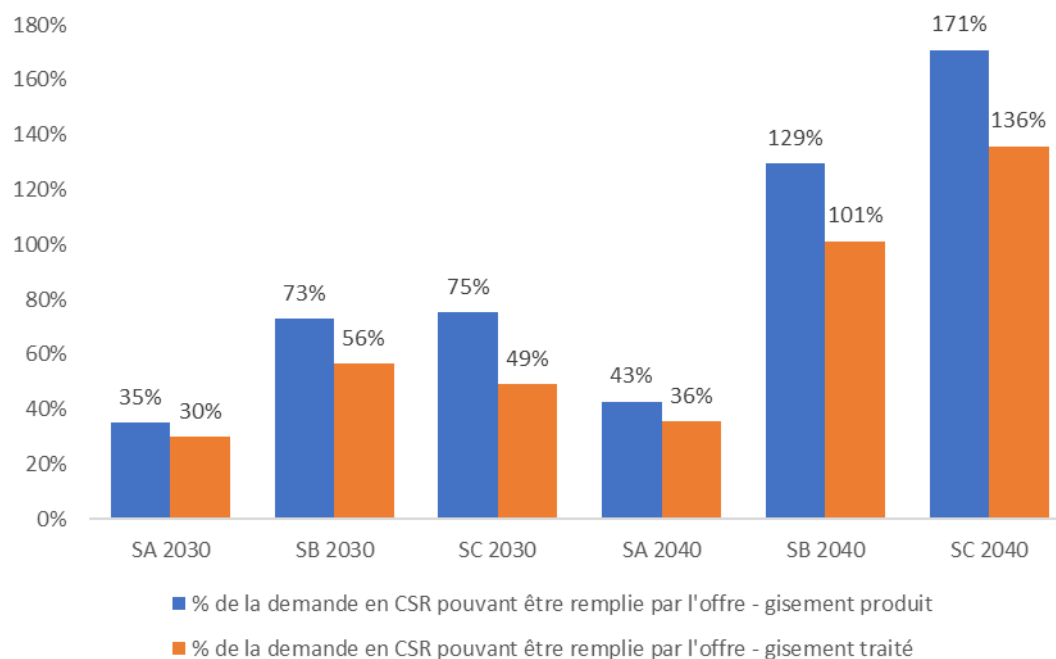


Figure 12 : Part de la demande en énergie techniquement substituable par du CSR qui peut être remplie par le potentiel de production de CSR calculé pour chaque scénario à partir du gisement produit (max) et du gisement traité (min) (Source : Lot 4)

En réalité, afin d'atteindre certaines compositions, et en particulier certaines teneurs en biogénique, le gisement réellement mobilisable en CSR est plus faible (voir chapitre 2.6 ci-dessous), et ne dépasse jamais la demande en chaleur fossile substituable par du CSR.

2.6. Gisement de bois et de papier-carton utilisable pour la préparation des CSR en France

Le gisement de bois et de papier-carton disponible pour les CSR a également été déterminé dans le lot 4 à partir des données disponibles concernant la teneur en bois et en papier-carton dans les DAE et dans les DMA utilisés pour la préparation de CSR. Ce sont des fragments qui restent en mélange avec d'autres matières après tri du fait de leur taille et imbrication dans le flux de DAE en mélange à traiter. Il ne s'agit donc pas de flux de bois et de papier – carton triés ou apportés en mono-flux qui sont utilisés pour la production de CSR. Un gisement de bois (et donc de CSR) plus faible que le gisement total est pris en compte, car le gisement envoyé en chaufferie biomasse n'est pas considéré comme étant détourné vers le CSR. En revanche, le gisement de bois déchet ne peut généralement pas entrer légalement dans les chaufferies biomasse. Il y a des exceptions pour des déchets peu contaminés ou sortis du statut de déchet (broyats de bois d'emballage par exemple). Ces déchets font déjà l'objet d'une filière et n'ont pas été comptés dans le gisement du CSR.

Les travaux du lot 4 ont permis d'établir la répartition entre le gisement de bois et le gisement de papier-carton. Il a été montré qu'en 2021, le gisement était composé à 80% de bois, et à 20% de papier-carton. Ainsi, cette hypothèse a été utilisée dans les compositions du cas de base. Une augmentation de la quantité de papier-carton par rapport à la quantité de bois a également été évaluée en analyse de sensibilité.

Le gisement mobilisable en CSR est présenté dans le tableau suivant pour les trois scénarios définis précédemment :

	2030			2040		
	SA	SB	SC	SA	SB	SC
Masse de bois + papier carton utilisable (Mt)	1,3	1,4	1,3	1,4	1,7	2,8

Tableau 2 : Gisement de bois et de papier-carton utilisable pour la préparation des CSR en France (2030 et 2040)

La quantité de bois mobilisable en CSR est relativement faible comparée au gisement total mobilisable présenté au Chapitre 2.2.4. Afin d'assurer un certain taux biogénique en énergie, il est nécessaire de mobiliser une grande part de bois et papier-carton dans le CSR (représentant entre 33% et 49% du CSR en masse). Ainsi, l'hypothèse est faite que seule une partie du gisement total issu de DAE-DMA pourra être réellement mobilisée. En effet, la quantité de bois et de papier-carton disponible ne serait pas suffisante pour permettre de conserver les mêmes compositions en utilisant tout le gisement mobilisable. Alors tout le bois et papier-carton mobilisables seraient réellement utilisés, et une partie du gisement pour les autres flux ne le serait pas.

Ainsi, afin de garantir un certain seuil de carbone biogénique (dans la présente étude en moyenne 44% en masse dans les scénarios prospectifs), il faut diminuer le gisement de CSR mobilisé. En effet, il est possible d'atteindre ce seuil de carbone biogénique en mobilisant seulement une partie du gisement de CSR, afin de concentrer les flux biogéniques dans ce gisement.

Cela représente pour les scénarios A et C, en 2030 et 2040 les tonnages suivants :

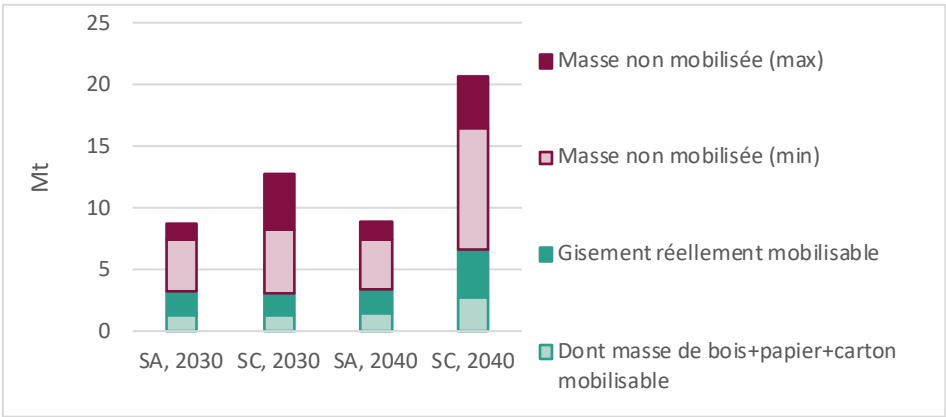


Figure 13 : Exemple de gisement réellement mobilisable et non mobilisé pour deux scénarios

Par exemple pour le scénario A en 2030, l'utilisation de 1,3 Mt de bois/papier/carton équivaut à l'utilisation de 3,2 Mt de CSR. Or il a été vu au Chapitre 2.2 que le gisement total est situé entre 7,4 Mt et 8,7 pour ce scénario en 2030. Ainsi, seulement 37% à 43% du gisement total serait utilisé.

Une autre solution (non retenue) pour mobiliser tout le gisement de CSR serait de détourner des flux de bois et de papier de la valorisation matière ou de la valorisation énergétique dédiée, ce qui n'est pas conforme au cadre du développement de la filière CSR prévue par la réglementation.

La quantité de bois, papier et carton est insuffisante pour atteindre le taux de biogénique souhaité dans le CSR en mobilisant tout le gisement. **Le gisement réellement mobilisable est donc toujours inférieur au gisement total.**

3. Méthodologie

3.1. Etude en trois volets

L'évaluation de l'empreinte environnementale est réalisée en trois volets :

- Le **volet 1** vise à conforter les connaissances de l'ADEME quant à l'empreinte environnementale de la filière CSR. La préparation et la valorisation de différentes compositions de CSR en chaufferie dédiée sont évaluées.
- Le **volet 2** permettra d'alimenter un outil d'aide à l'instruction.³⁶ de l'empreinte environnementale de nouveaux projets en territoire (outil à développer par la suite par l'ADEME) afin de guider les acteurs de la filière et les acteurs institutionnels sur l'intérêt environnemental d'une filière CSR comparée à une orientation vers des installations de stockage des déchets.
- Le **volet 3** vise à simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030 et 2040 en termes d'émissions de GES en vue de communiquer celles-ci aux acteurs de la filière et aux institutionnels par rapport :
 - aux installations de traitement classique de ces déchets (stockage),
 - aux filières actuelles de production de chaleur (gaz naturel).

3.2. Evaluation environnementale selon la méthode d'analyse du cycle de vie

3.2.1. Introduction à l'analyse du cycle de vie

3.2.1.1. Principes

La présente étude a été réalisée conformément aux prescriptions méthodologiques développées dans les normes ISO 14040 et ISO 14044 relatives à l'analyse du cycle de vie (ACV).

L'analyse du cycle de vie consiste en une approche :

- **fonctionnelle** car elle quantifie les impacts environnementaux associés à un produit, un service ou un système, en les rapportant à la fonction principale du système étudié ;
- **multicritère** car elle évalue les impacts potentiels, sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles ;
- **multi-étapes** (cycle de vie) car elle réalise un inventaire des émissions de polluants et les consommations de ressources naturelles qui ont lieu à toutes les étapes du cycle de vie du système étudié.

Ces deux dernières caractéristiques permettent d'éviter le transfert d'impacts.

L'analyse du cycle de vie permet de :

- comparer les impacts environnementaux potentiels de plusieurs solutions rendant le même service.
- identifier les principales sources d'impacts environnementaux d'un produit ou d'un service, tout au long de son cycle de vie.

L'ACV permet d'obtenir des résultats :

- rapportés à une unité fonctionnelle (service rendu),
- agrégés dans l'espace et dans le temps et issus d'une relation linéaire entre les quantités de polluants émis et les impacts,
- pouvant être exprimés en (voir section résultats) :
 - indicateurs de flux tels que des consommations de ressources (eau, minerais, ...) et d'énergie,

³⁶ Le format que prendra l'outil d'aide à la décision interne à l'ADEME n'est pas connu à ce stade et sera discuté ultérieurement au sein de l'ADEME

- indicateurs d'impacts potentiels (approche mid-point) par problématique environnementale (augmentation de l'effet de serre, acidification atmosphérique, pollution des eaux, ...),
- indicateurs de dommages potentiels (approche end-point) sur trois domaines de protection à savoir la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles,
- voire sous la forme d'une note environnementale unique en fonction des méthodes utilisées.

3.2.1.2. Mise en œuvre

La méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie est articulée en quatre phases bien distinctes mais interdépendantes car, tout au long de l'étude, de fréquents retours sont nécessaires, ce qui rend la démarche générale itérative.

- **Etape 1 - Définition des objectifs et du champ de l'étude**

Chaque analyse du cycle de vie est construite pour répondre à des questions précises. La définition des objectifs et du champ de l'étude conditionne donc les choix méthodologiques de chaque étape (inventaire, évaluation des impacts, interprétation) et par voie de conséquence les résultats : l'ACV est dite "goal-dependent".

Cette première étape se précise de manière itérative au fur et à mesure de l'avancée de l'analyse. On retrouvera, par exemple, la définition des frontières de l'étude, la définition des fonctions du (ou des) système(s), l'exigence de la qualité des données nécessaires à l'analyse de l'inventaire (ISO 14044), les types d'impact et leurs indicateurs nécessaires à l'évaluation des impacts environnementaux (ISO 14044). L'unité fonctionnelle est définie ; unité à laquelle sera rapportée l'ensemble des flux. Cette unité est représentative de la fonction du produit ou service étudié. L'unité fonctionnelle permet la comparaison de produits pour un service rendu équivalent. On détermine alors les systèmes qui s'y rattachent ainsi que ses frontières.

- **Etape 2 - Analyse de l'inventaire**

Les flux de matière et d'énergie entrants et sortants sont ensuite quantifiés et des bilans matière et énergie sont effectués afin de vérifier les bouclages et dès lors la robustesse des données pour chaque étape de l'inventaire modélisé.

Le recueil et le traitement des données se font conformément à la définition des objectifs comme le précise la norme ISO 14044. Les frontières du système initialement fixées peuvent être élargies et la qualité des données redéfinie.

- **Etape 3 - Evaluation des impacts sur l'environnement**

L'étape d'évaluation des impacts a pour but de traduire les consommations de ressources et les rejets dans les milieux air/eau/sol recensés lors de l'inventaire en impacts environnementaux potentiels (augmentation de l'effet de serre, déplétion de la couche d'ozone, pollution à l'ozone, acidification, eutrophisation, toxicité ...).

Pour ce faire, des facteurs de caractérisation sont utilisés pour calculer les impacts environnementaux potentiels associés à chacun des flux inventoriés. Le choix des catégories d'impact et des facteurs de caractérisation associés se font en relation avec les objectifs et les systèmes étudiés.

- **Etape 4 – Interprétation**

L'interprétation a pour objectif d'analyser les résultats et d'expliquer les limites de l'inventaire et de l'évaluation des impacts, afin de fournir des recommandations de manière la plus transparente possible.

Elle met en avant les points forts et les points faibles d'un système et permet l'identification des paramètres et des étapes sensibles. Ceci ouvre des perspectives en matière de leviers d'actions pour tendre vers une diminution des impacts.

Comme le précise la norme ISO 14044, cette étape s'appuie sur l'identification des points significatifs de l'inventaire et de l'évaluation des impacts du cycle de vie accompagnée de différents contrôles : contrôle de sensibilité des hypothèses retenues (indicateurs, frontière...), contrôle de la complétude et de la cohérence sur le cycle de vie ou entre plusieurs options.

3.2.2. Unité fonctionnelle

Un des premiers points méthodologiques clés d'une ACV consiste à définir "l'unité fonctionnelle", c'est-à-dire la quantification du service rendu par les différents systèmes étudiés. Le service considéré doit être le même pour tous les systèmes afin de permettre une comparaison de ceux-ci. Cette unité doit être définie avec précision à partir de l'objectif de l'étude et de son utilisation.

Pour rappel, les objectifs sont les suivants :

- Continuer à conforter les connaissances de l'ADEME sur la filière CSR actuelle (volet 1),
- Servir de base à la création et à l'alimentation par l'ADEME d'un outil d'aide à l'instruction.³⁷ de nouveaux projets en territoire à destination des acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 2) à horizon 2030-2040,
- Simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030-2040 en termes d'émissions de GES en vue de communiquer celui-ci aux acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 3) par rapport :
 - aux filières actuelles de traitement de ces déchets
 - aux filières actuelles de production de chaleur,
- Construire des jeux de données d'inventaire afin d'alimenter la base de données d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) Base Empreinte® de l'ADEME.

Pour répondre à ces objectifs, deux fonctions ont été identifiées :

1. l'éventuelle préparation et le traitement des déchets,
2. la production d'énergie.

Dans le tableau ci-après, l'unité fonctionnelle peut être déclinée de la sorte pour les différents volets de l'étude :

³⁷ Le format que prendra l'outil d'aide à la décision interne à l'ADEME n'est pas connu à ce stade et sera discuté ultérieurement au sein de l'ADEME

Quoi		Combien	Comment		Ou	Quand	
Volet [1]		1 tonne de CSR avec une certaine composition	À partir de refus de tri issus de DAE/DMA préparés avec une certaine efficacité de préparation ³⁸ , acheminé et valorisé en combustion dans une chaufferie CSR, disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires		En France	En 2024	
Volet [2]		1 tonne de CSR avec une certaine composition	À partir de refus de tri issus de DAE/DMA préparés avec une certaine efficacité de préparation et suite à une combustion dans une chaufferie CSR, disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires				
			À partir de gaz naturel				
			En ISDND				
Volet 3	[3-A]	Traiter des DAE et des DMA	x tonnes de CSR avec une certaine composition	Après le pré-traitement de refus de tri issus de DAE/DMA dans une installation de tri (ayant une certaine efficacité de préparation) et suite à une combustion dans une chaufferie CSR disposant de technologies conformes aux prescription réglementaires			En 2030 et en 2040 (scénarios prospectifs)
				En ISDND			
	[3-B]	Produire de l'énergie à partir de déchets ou de combustibles fossiles	y TWh de chaleur utile	À partir de CSR préparé à partir de refus de tri issus de DAE/DMA avec une certaine efficacité de préparation et suite à une combustion dans une chaufferie CSR disposant de technologies conformes aux prescription réglementaires			
				À partir de gaz naturel			

Tableau 3 : Unité fonctionnelle

³⁸ Voir Chapitre 4.1

Les trois unités fonctionnelles présentées dans le tableau ci-dessus sont résumées ci-dessous :

[1] Préparation d'une (1) tonne de CSR à partir de refus de tri issus de DAE/DMA, acheminement et valorisation de ce CSR en chaufferie CSR dédiée disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires, en France en 2024.

[2] Production d'énergie lors de la combustion d'une (1) tonne de CSR préparée à partir de refus de tri issus de DAE/DMA en chaufferie CSR disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires, en France en 2024.

[3-A] Traitement de (x) tonnes de CSR issues des estimations de gisement 2030 et 2040 à partir de refus de tri issus de DAE/DMA, acheminement et valorisation de ce CSR en chaufferie CSR dédiée disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires, en France en 2030 et en 2040.

[3-B] Production de (y) TWh de chaleur utile en chaufferie CSR dédiée disposant de technologies conformes aux prescriptions réglementaires à partir de CSR issus de refus de tri issus de DAE/DMA ayant été préalablement préparés, en France pour les estimations de gisement en 2030 et en 2040.

3.2.3. Frontières générales du système

Les frontières du système indiquent quelles phases du cycle de vie et quels évitements sont inclus et exclus dans l'évaluation de chaque volet. Le Tableau ci-dessous résume ces inclusions avant de les détailler aux paragraphes suivants.

	Volet 1	Volet 2	Volet 3-A	Volet 3-B
Systèmes de préparation et valorisation du CSR en chaufferie dédiée	Inclus	Inclus	Inclus	Inclus
Système alternatif de traitement des déchets – ISDND (évitement)	Exclu	Inclus	Inclus	Exclu
Système alternatif de production d'énergie (évitement)	Exclu	Inclus	Exclu	Inclus

Tableau 4 : Synthèse des frontières du système par volet

Les paragraphes à considérer pour chaque volet sont les suivants :

	Volet 1	Volet 2	Volet 3-A	Volet 3-B
Méthodologie	3.2.3.1			
		3.2.3.2, 3.2.3.3	3.2.3.2	3.2.3.3
Données	4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5			
		4.6, 4.7	4.7	4.6
Résultats	5.1, 5.3			
	5.4	5.5	5.6	5.6

Tableau 5 : Synthèse des paragraphes à considérer pour chaque volet

3.2.3.1. Systèmes de préparation et valorisation de CSR en chaufferie dédiée

Le schéma suivant représente une simplification des grandes étapes de cycle de vie prises en compte dans cette étude, pour le volet 1. Le chapitre 4 détaille les entrants et sortants de chacune de ces étapes.

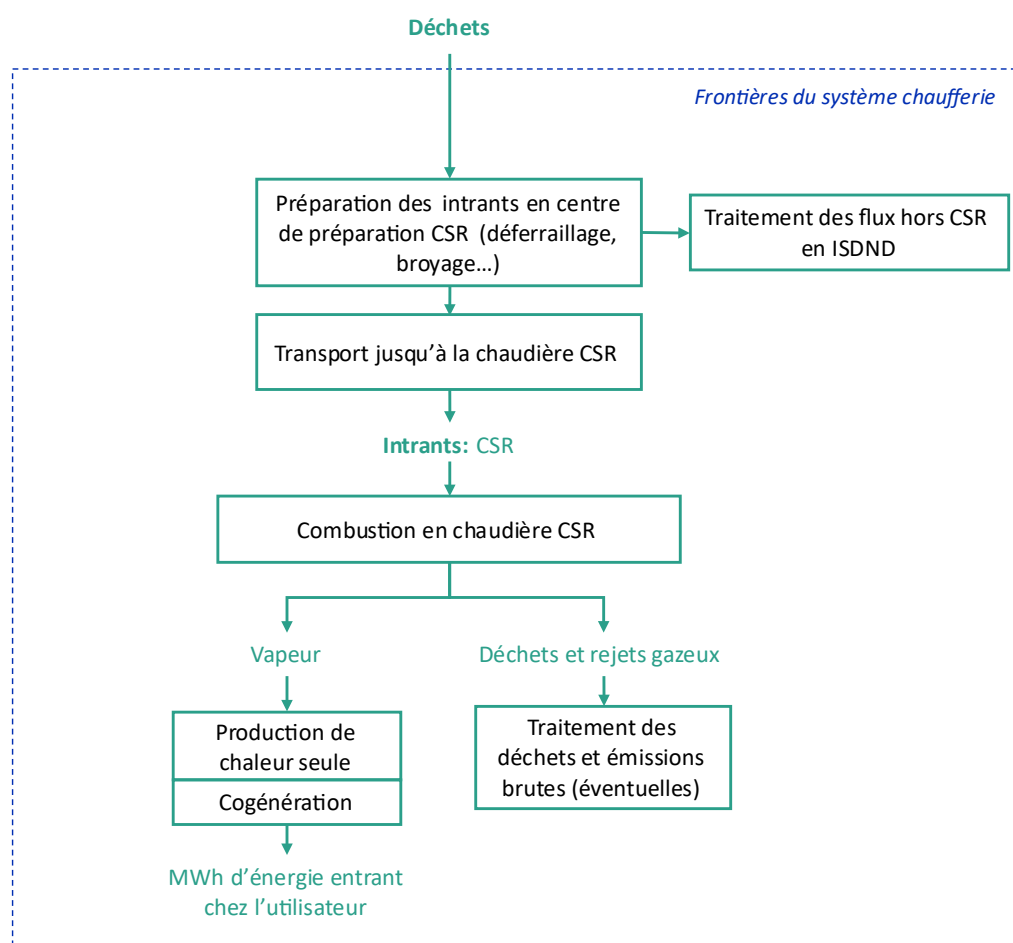


Figure 14 : Volet 1 - Frontières du système de préparation et de valorisation de CSR en chaufferie dédiée

Remarque 1 : les infrastructures composant la chaufferie sont également incluses dans le périmètre.

Remarque 2 : Les flux hors CSR sont considérés comme subissant le même traitement (c'est-à-dire l'envoi en ISDND), qu'ils soient issus de la filière CSR ou ISDND. Afin de prendre en compte tous les impacts liés à la valorisation de CSR, le traitement des flux n'entrant pas en CSR est considéré dans tous les volets. L'évitement du traitement de ces flux est comptabilisé dans les volets 2 et 3-A, qui comparent la valorisation de CSR avec les systèmes alternatifs de traitement des déchets.

L'évitement de la production d'acier et d'aluminium grâce au recyclage des métaux récupérés après déferraillage n'est pas inclus dans les frontières du système. En effet, il est considéré comme subissant un traitement identique quelle que soit la filière en l'absence d'éléments tangibles permettant de différencier des pratiques différentes de traitement des déchets.

Dans le volet 1 de l'étude, aucun évitement (de production d'énergie et de traitement de déchets) n'est évalué. Dans les volets 2 et 3, le bénéfice lié à ces évitements est pris en compte.

Pour les différents volets, les étapes incluses et exclues du système sont présentées plus en détail dans le schéma suivant :

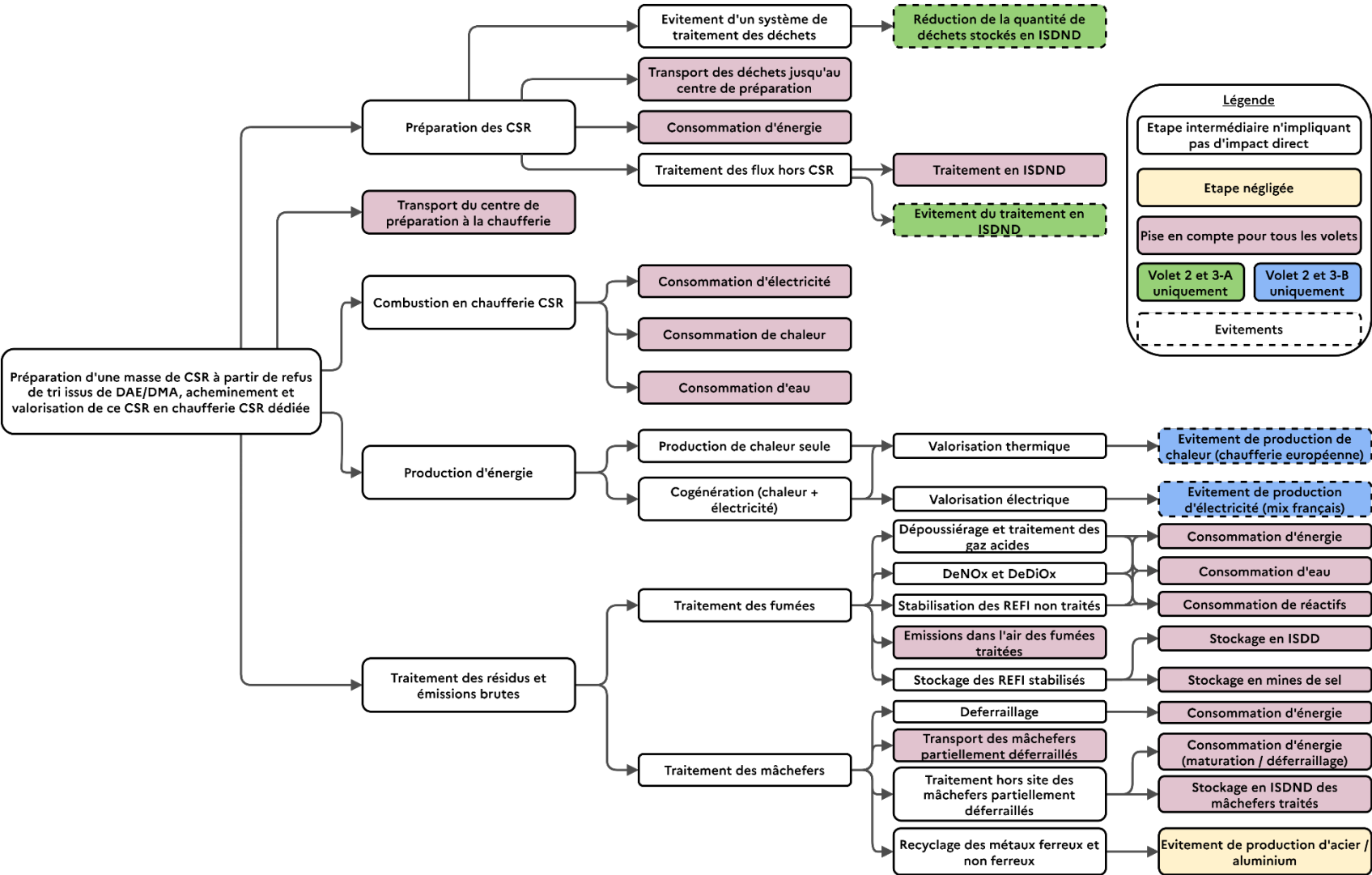


Figure 15 : Frontières du système pour les trois volets de l'étude

Cette étude utilise une approche partiellement attributionnelle et partiellement conséquentielle.

En effet, le volet 1 utilise une approche attributionnelle (les règles de coupure et d'attribution permettent d'isoler le système étudié du reste du monde). Ce volet permet d'évaluer de manière isolée les impacts environnementaux de la filière CSR, dans l'objectif d'apporter plus de connaissances sur cette filière et ses impacts environnementaux.

Les volets 2 et 3 utilisent une approche conséquentielle. C'est-à-dire qu'on modélise l'influence de la valorisation de CSR sur les autres activités liées (impact de la production de CSR sur les systèmes de traitement de déchets et de production d'énergie). Dans ces volets, des impacts indirects sont comptabilisés (évitement d'un système de traitement de déchets et évitement de production d'énergie, en pointillés sur la Figure 15), afin de pouvoir comparer la filière CSR avec ses alternatives.

Le volet 2 prend en compte tous les évitements liés à la valorisation de CSR, afin de pouvoir aider l'ADEME à évaluer les nouveaux projets en France, en prenant en compte toutes les implications de la valorisation de CSR.

Les volets 3-A et 3-B s'intéressent à comparer le déploiement de la filière CSR en 2030-2040 à la filière de stockage de déchets (ISDND) et aux filières de production de chaleur de manière séparée. Ainsi, les évitements liés à ces filières sont comptabilisés de manière séparée dans ces deux volets.

3.2.3.2. Système alternatif de traitement des déchets

L'étude, du point de vue de l'unité fonctionnelle [2] ou [3-A], comporte une comparaison des résultats obtenus avec d'autres systèmes de traitement des déchets. En cas de base, uniquement la technologie de stockage en ISDND a été considérée, suite aux hypothèses du lot 4 (qui sont en lien avec les objectifs réglementaires de réduction de 50% de l'enfouissement à l'horizon 2025). Une analyse de sensibilité a été réalisée pour comparer les résultats du cas de base à ceux de l'incinération en UVE.

La pyrogazéification n'est pas considérée dans cette étude car les installations existantes en Europe sont en cours de démonstration. Il n'y a donc pas suffisamment de retour d'expérience sur lequel baser des données. Cette méthode de traitement est donc exclue de l'étude.

Les chaufferies biomasse ne sont pas considérées dans cette étude car, selon les travaux du lot 4, ils n'entrent pas en compétition avec les chaufferies CSR. En effet, ce ne sont pas les mêmes types de déchets entrant en chaufferies biomasse (bois B principalement) et en chaufferies CSR (déchets issus de DAE/DMA). Comme vu au Chapitre 2.6, les combustibles déchets ne peuvent généralement pas entrer légalement dans les chaufferies biomasse, à l'exception de certains déchets peu contaminés ou sortis du statut de déchet (broyats de bois d'emballage) qui font déjà l'objet d'une filière.

Ainsi, en cas de base, il est considéré que les déchets valorisés en CSR auraient été envoyés en installation de stockage. En analyse de sensibilité, une autre hypothèse est formulée avec un envoi pour traitement dans une unité d'incinération.

Les mêmes compositions de déchets sont utilisées pour les comparaisons des deux modes de traitement. L'installation de stockage (ISDND) ou l'UVE a en effet comme intrant des déchets en mélange, comme la chaufferie CSR. Une étape de préparation des CSR avant leur utilisation en chaufferie est considérée dans le périmètre de l'étude.

Le traitement des flux hors CSR est également considéré comme étant traité en ISDND, et modélisé dans les évitements liés au traitement de déchets.

Les émissions lors du stockage en ISDND dépendent du taux de dégradation du déchet (défini par type de déchet dans la base de données ecoinvent), du taux de dégradation en CH₄ et en CO₂, du taux de fuite du biogaz et de la part oxydée, et de l'exutoire du biogaz capté (voir Figure ci-dessous). Les taux de dégradation en CH₄, de fuite et d'oxydation sont issus du Cadre de référence de l'ADEME³⁹ :

- Taux de dégradation du C du déchet en CH₄ : 50 %
- Taux de fuite : 30%
- Taux d'oxydation : 10%

Le taux de dégradation du déchet après 100 ans est issu de la base de données Ecoinvent :

- Taux de dégradation du bois après 100 ans : 1,5 %
- Taux de dégradation du papier-carton après 100 ans : 32,4 %
- Taux de dégradation du coton après 100 ans : 12 %

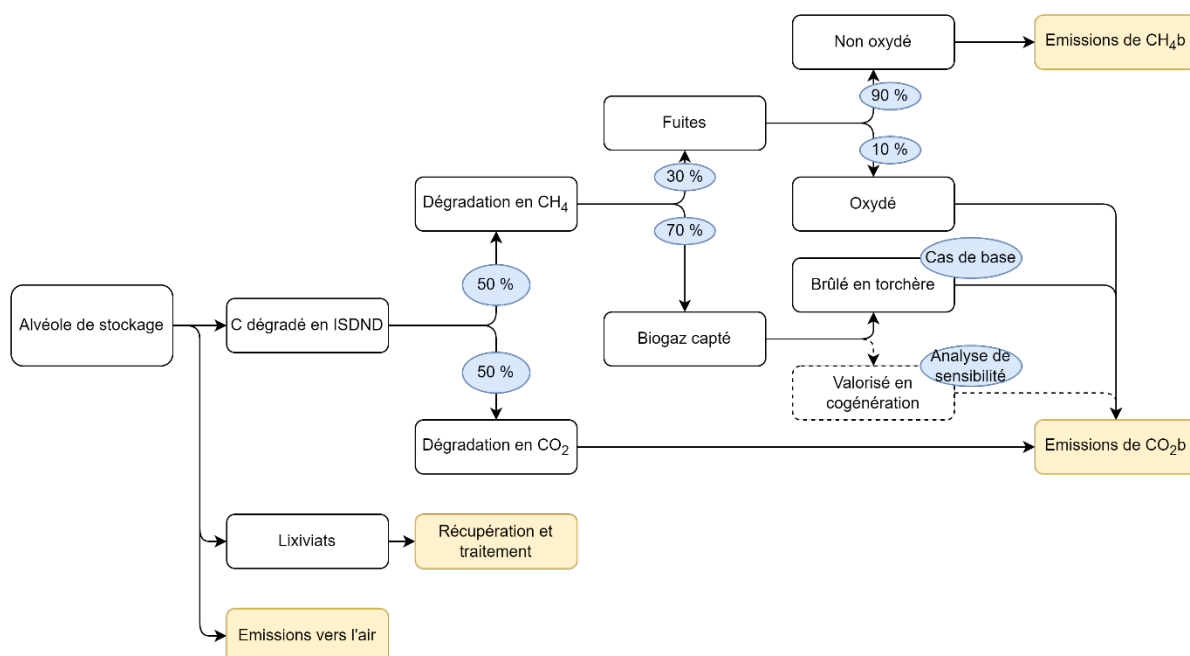


Figure 16 : Volet 2/3A - Frontières du système alternatif – Installation de stockage.³⁹

3.2.3.3. Systèmes alternatifs de production de chaleur

L'étude, du point de vue de l'unité fonctionnelle [3-B], comporte une comparaison des résultats obtenus avec les technologies de production de chaleur existante.

La substitution est envisagée selon les deux utilisations de chaleur suivantes :

- La chaleur utilisée en réseau de chaleur
- La chaleur utilisée dans l'industrie.

Les sources d'énergie utilisées dans les réseaux de chaleur sont les suivantes :

³⁹ Source : GUIOT Marianne, GUEUDET Alice, PARISOT Florian, PASQUIER Sylvain, ADEME, PALLUAU Magali, HUGREL Charlotte, BLEU SAFRAN. 2022. Cadre de Référence - ACV comparatives entre différentes solutions d'emballages | Version 01. 147 p.

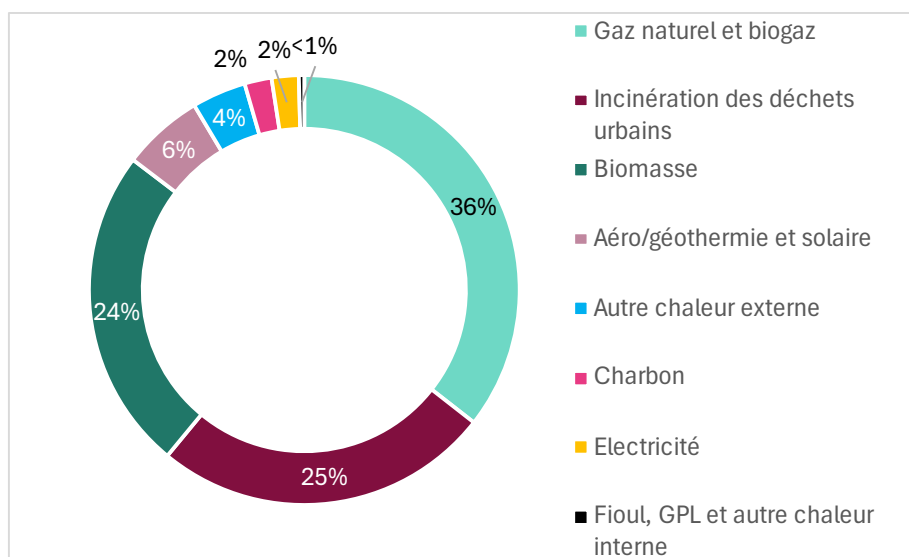


Figure 17 : Répartition des sources d'énergie utilisées dans les réseaux de chaleur (Source : SDES, Bilan énergétique de la France)

Les centrales thermiques au charbon, électriques et au fioul sont des systèmes marginaux en France. En effet, il existe seulement trois centrales thermiques au charbon en métropole en 2023 dont une unité qui a été provisoirement arrêtée en 2022. En Outre-mer, trois centrales mixtes charbon et biomasse (utilisant la bagasse issue de la canne à sucre) sont en cours de conversion vers des chaufferies biomasse.⁴⁰ Ainsi, les centrales thermiques électriques ne sont jamais considérées comme étant en concurrence avec les chaufferies CSR. Les centrales au charbon et au fioul sont étudiées en analyse de sensibilité.

Comme vu au chapitre 3.2.3.2, les déchets sont considérés comme étant uniquement détournés de l'ISDND, et pas des chaufferies biomasse ni des UVE (en cas de base). La concurrence du traitement des déchets avec l'UVE est considérée en analyse de sensibilité en tant que système de traitement des déchets.

D'autre part, la chaleur renouvelable (aéro/géothermie et solaire) n'est pas considérée comme étant en concurrence avec les chaufferies CSR, car il est considéré que les chaufferies CSR remplacent des moyens de production de chaleur fossile uniquement (voir Chapitre 2.5).

Ainsi, en cas de base, il est considéré que la production de chaleur à partir de CSR entre en compétition avec le gaz naturel uniquement. Une analyse de sensibilité est réalisée afin de comparer la production de chaleur à partir de CSR avec la production à partir de charbon ou de fioul (voir Chapitre 6).

3.2.3.4. Prise en compte du carbone biogénique

Certaines émissions de gaz à effet de serre sont d'origine fossile, tandis que d'autres sont d'origine biogénique. L'ensemble de ces émissions ont lieu, mais ne sont pas comptabilisées de la même manière.⁴¹

Selon le rapport n°2023-01 sur la comptabilisation des GES biogéniques (ScoreLCA), la neutralité carbone repose sur deux postulats :

1) L'égalité au niveau de l'inventaire des flux de CO₂ biogénique entrant et sortant :

Il est supposé que la quantité de CO₂ absorbée lors de la croissance de la biomasse est exactement égale à la quantité de CO₂ réémise dans l'atmosphère au cours des étapes suivantes du cycle de vie.

En pratique, cette égalité n'est pas toujours vraie :

⁴⁰ Source : SDES, Bilan énergétique de la France

⁴¹ Sources : SCORELCA étude n°2021-01 Analyse du cycle de vie de la biomasse énergie : état de l'art, enjeux méthodologiques et recommandations ; SCORELCA étude n°2023-01 Comptabilisation des GES biogéniques

- Le CO₂ capté lors de la photosynthèse n'est pas forcément réémis à l'atmosphère sous forme de CO₂ mais par exemple sous forme de CH₄b (*Emissions sous forme de méthane (fuites) lors des étapes de la filière biogaz, émissions sous forme de méthane lors de la dégradation en installation de stockage, émissions sous forme de méthane lors de processus de compostage (suivant la façon dont il est mené), ...*)
- Une partie du carbone contenu dans la biomasse peut rester stockée à long terme avant d'être réémise à l'atmosphère (*Dans une installation de stockage, dans le sol suite à l'utilisation de digestat comme amendement, ...*)

En réalité, les études montrent que la contribution de la sylviculture à l'atténuation du changement climatique dépend des pratiques forestières et du type de ressources utilisées. Ainsi, certaines pratiques peuvent dégrader le bilan carbone du bois tandis que d'autres pratiques durables peuvent favoriser le stockage du carbone.

L'étude souligne que l'hypothèse d'égalité entre les quantités de carbone biogénique séquestrées lors de la photosynthèse et les émissions ne peut être appliquée que pour des cycles de vie courts, qu'elle ne devrait pas être appliquée pour des filières issues de biomasse à croissance lente (comme les forêts) et qu'elle implique que les stocks de carbone sont à l'équilibre.

2) L'égalité des impacts générés et évités sur les changements climatiques :

Il est supposé que les impacts générés par l'émission du CO₂ sont compensés par les impacts évités par l'absorption du CO₂. En réalité, les flux liés au processus de stockage ou déstockage du carbone n'ont pas les mêmes dynamiques temporelles (selon l'année où la séquestration et l'émission ont lieu).

En cas de base, pour l'ensemble des installations étudiées (stockage, incinération, chaufferie CSR), le modèle utilisé est l'approche FC 0/0, qui ne considère que les contributions du CO₂ fossile et du CH₄ fossile et biogénique (les émissions de CO₂ biogéniques ne sont ni inventoriées, ni caractérisées tandis que les émissions de CH₄ biogénique sont inventoriées et caractérisées comme du CH₄ fossile. Cette approche est obligatoire dans le PEF (2018) avec un facteur ajusté pour le CH₄ (sauf contre-indication par un PCR). Elle est parfois possible dans d'autres méthodologies, comme par exemple ILCD handbook (2010) qui ne donne pas de méthode spécifique à suivre.

Deux approches sont proposées en analyse de sensibilité (voir Chapitre **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- L'approche FC -1/1 compte l'absorption de CO₂ biogénique ainsi que son émission. Dans cette approche, le CO₂ biogénique est inventorié et le facteur de caractérisation du CH₄ biogénique est adapté. Cette méthode est généralement recommandée dans certaines méthodologies, telles que le GHG Protocol (2011), PAS 2050 (2011), EN 15804+A2 (2019), EN 16485, EN 16760, ISO 14067 (2018), ...
- La dernière approche exclut l'étape d'absorption du CO₂ biogénique, tout en incluant les émissions de CO₂ fossile. Avec cette approche, il est considéré que l'absorption du CO₂ biogénique est allouée à la première vie du déchet, et n'est donc pas comptabilisée dans le cas des CSR.

La contribution de ces gaz dépend de leur pouvoir de réchauffement global (PRG), résumés dans le tableau ci-dessous :

	Neutralité carbone	Inclusion de l'absorption	CO ₂ b capté	CO ₂ b émis	CO ₂ f	CH ₄ b	CH ₄ f
Cas de base (FC 0/0)	Oui	Oui (=0)	0	0	1	27	29,8
Analyse de sensibilité 1 (FC-1/1)	Oui	Oui	-1	1	1	29,8	29,8
Analyse de sensibilité 2	Non	Non	0	1	1	29,8	29,8

Tableau 6 : Résumé des différentes approches de comptabilisation du carbone biogénique pour l'ensemble des installations étudiées (stockage, incinération et chaufferie CSR)

A titre illustratif, les trois approches sont schématisées dans la Figure 18 ci-dessous, pour les différentes étapes du cycle de vie de préparation et valorisation du CSR en chaufferie :

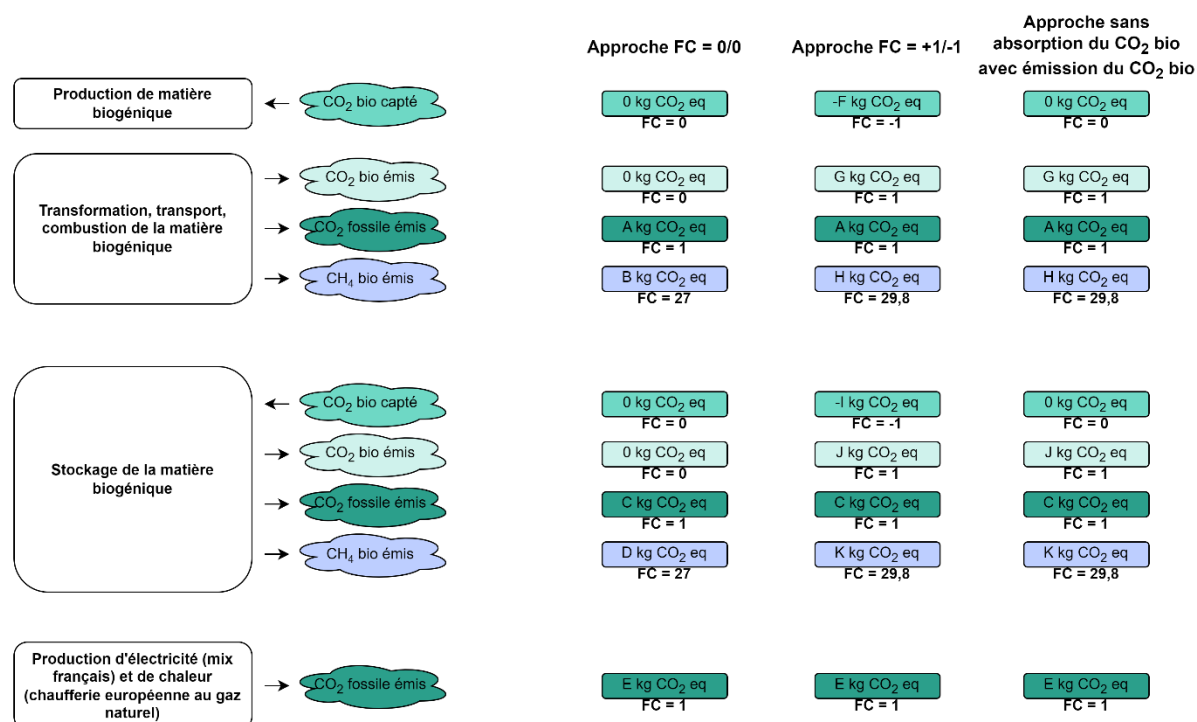


Figure 18 : Schéma présentant les différentes approches de comptabilisation du carbone biogénique illustrée pour la préparation et la valorisation du CSR en chaufferie

Dans cette étude, le taux biogénique contenu dans le déchet est présenté en énergie. Le taux biogénique en énergie correspond à la proportion de déchets d'origine biogénique pondérée par la quantité d'énergie contenue dans ces déchets. Il est calculé de la manière suivante :

$$\text{Taux biogénique en énergie (\%)} = \frac{\sum \text{déchets d'origine biogénique} \times \text{Masse du déchet} \times \text{PCI du déchet}}{\text{Masse du CSR} \times \text{PCI du CSR}} \times 100$$

Le taux biogénique en masse est calculé comme suit :

$$\text{Taux biogénique en masse (\%)} = \frac{\sum \text{déchets d'origine biogénique} \times \text{Masse du déchet}}{\text{Masse du CSR}} \times 100$$

Les déchets d'origine biogénique sont le bois, le papier, le carton et certains textiles (le coton par exemple). Les plastiques, les autres incombustibles et l'eau sont considérés comme n'étant pas d'origine biogénique.

Cette définition est retenue pour l'étude, mais les acteurs n'expriment pas toujours le taux biogénique de cette manière. En effet, il est courant de parler de « taux de carbone biogénique » ou de « taux biogénique en masse », sans que la définition soit clairement précisée.

3.2.4. Critères environnementaux évalués dans l'étude

Les catégories d'impacts potentiels étudiées sont celles recommandées par le JRC.⁴² dans les recommandations de l'ILCD Handbook.⁴³ Elles ont fait l'objet d'évolution dans le cadre du projet Product Environmental Footprint de la Commission européenne (PEF). La nouvelle liste est publiée dans le « Product Environmental Footprint Category Rules Guidance, Version 6.3, May 2018 ».⁴⁴ et a été révisée en 2022 avec l'EF 3.1.⁴⁵

⁴² Le JRC est le centre de recherche de la Commission Européenne

⁴³ <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC58190>

⁴⁴ https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf

⁴⁵ <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml>

Catégorie d'impact	Abréviation	Modèle	Unité	Source	Qualité
Changement climatique	CC	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg CO ₂ eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2021)	I
Diminution de la couche d'ozone stratosphérique	OD	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPs as in (WMO 2014 + integrations)	I
Toxicité humaine, effets cancérogènes	Tox_c	Comparative Toxic Unit for humans	CTUh	USEtox model 2.1 (Frankte et al, 2017)	III
Toxicité humaine, effets non- cancérogène	Tox_nc	Comparative Toxic Unit for humans	CTUh	USEtox model 2.1 (Frankte et al, 2017)	III
Particules fines	PM	Impact on human health	Disease incidence	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)	I
Radiations ionisantes	IR	Human exposure efficiency relative to U235	kBq U235 eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Formation d'ozone photochimique	POF	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe 2008	II
Acidification	Ac	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophisation, terrestre	Eutr_t	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophisation, eau douce	Eutr_e	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophisation, marine	Eutr_m	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe	II
Écotoxicité, eau douce	Ecotox	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model 2.1 (Frankte et al, 2017)	III
Usage des sols	LU	<ul style="list-style-type: none"> Indice de qualité des sols Production biotique Résistance à l'érosion Filtration mécanique Réapprovisionnement en eau souterraine 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionless (pt) kg biotic production kg soil m³ water m³ groundwater 	Soil quality index based on LANCA model (De Laurentiis et al. 2019) and on the LANCA CF version 2.5 (Horn and Maier, 2018)	III
Épuisement des ressources en eau	WU	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m ³ eq	Available Water REMaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016	III
Ressources minérales	Res_m	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.	III
Ressources fossiles et nucléaires	Res_f	Abiotic resource depletion – fossil fuels (ADP-fossil)	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002	III

Tableau 7: Catégories d'impacts potentiels étudiées (EF 3.1⁴⁵)

Le niveau de qualité de la méthode est défini dans le rapport du JRC :

Niveau I	Méthode recommandée et satisfaisante
Niveau II	Méthode recommandée mais nécessite encore plusieurs améliorations (développements)
Niveau III	Méthode recommandée mais devant être interprétée avec précaution

La méthode AWARE (Available Water REmaining)⁴⁶ pour l'évaluation de l'épuisement de la ressource en eau s'applique sur la consommation d'eau nette (consommations – émissions vers le même milieu) régionalisée. Les inventaires de cycle de vie ne sont généralement pas régionalisés, c'est le cas de la base de données ecoinvent qui est majoritairement utilisée dans cette étude. Dans ce cas, le facteur de caractérisation moyen européen est appliqué.

3.2.5. Critères de coupure

Dans le cadre de cette étude, les efforts de modélisation et de collecte de données sont portés sur les éléments influençant le plus les résultats de l'évaluation environnementale.

En pratique, le processus a été itératif pour la collecte de données comme il est recommandé dans l'ILCD Handbook et l'ISO 14040/44 : 2006.

- Première itération : des valeurs par défaut (intervalles de valeurs) fournies par les acteurs ayant une vision globale de la problématique sont utilisées de même que des bases de données secondaires. Des hypothèses conservatrices sont également formulées afin d'identifier, de façon automatique et exhaustive, les paramètres de modélisation importants.

Pour cette étude, la première itération se base sur les données de littérature identifiées et plus particulièrement sur l'outil WILCI⁴⁷ (l'outil est présenté plus en détails dans l'Annexe 3) qui a été adapté pour correspondre au périmètre et au type de chaufferies étudié. L'outil WILCI, développé par le BRGM permet à l'origine d'évaluer l'impact environnemental du traitement d'une tonne de DMA français, et peut être adapté afin de correspondre aux spécificités des chaufferies étudiées dans cette étude.

- Deuxième itération : les données qui influencent de manière non négligeable les résultats d'évaluation environnementale sont affinées sur base des informations issues des autres lots de l'étude, des contacts avec les acteurs de terrain ou/et des recherches complémentaires dans la littérature.

Cette approche itérative permet de ne pas perdre de temps dans la recherche de données sans influence sur l'évaluation environnementale, et donc de mettre l'accent sur la recherche de données sensibles. Ainsi, un plus haut degré de fiabilité peut être atteint pour ces données sensibles.

Par ailleurs, la décision d'inclure un procédé ou un flux dans le modèle développé pour réaliser l'évaluation environnementale de cette étude s'est basée sur les règles suivantes :

- Masse : lors de l'utilisation de la masse comme critère, une décision appropriée nécessiterait l'inclusion dans l'étude de tous les intrants qui, cumulativement, participent à plus qu'un pourcentage défini de la masse du système étudié. Dans cette étude, ce pourcentage d'inclusion est fixé à 95%.
- Énergie : lors de l'utilisation de l'énergie comme critère, une décision appropriée nécessiterait l'inclusion dans l'étude des intrants qui, cumulativement, participent à plus qu'un pourcentage défini des intrants énergétiques du système étudié. Dans cette étude, ce pourcentage d'inclusion est fixé à 95%.
- Portée environnementale : il convient que les flux/procédés pouvant être exclus en raison de leur masse ou de leur utilisation d'énergie ne le soient pas si les impacts associés à ces

⁴⁶ Boulay et al., 2016 WULCA 2016

⁴⁷ ADEME, « L'outil WILCI pour l'analyse de cycle de vie de l'incinération des déchets ménagers et assimilés en France » 2017

flux/procédés sont significatifs pour les indicateurs d'impacts évalués.⁴⁸ Dans cette étude, ce pourcentage d'exclusion est fixé à 5%.

Des analyses de sensibilités sont effectuées pour montrer l'impact non significatif de certains éléments. Une liste des limites de l'étude est disponible en Annexe 1.

3.2.6. Evaluation de la qualité des données

Lors de la réalisation d'une analyse du cycle de vie, des choix sont réalisés pour modéliser un processus entre l'utilisation de données primaires, spécifiques, ou l'utilisation de données secondaires, c'est-à-dire des données d'inventaires issues de bases de données ou d'autres sources.

Ce choix est réalisé en cohérence avec les objectifs de l'étude, le champ de l'étude et les choix méthodologiques définis dans l'étude. Plusieurs éléments entrent donc dans le choix d'un inventaire, comme le besoin en données ayant la meilleure représentativité technologique, géographique et temporelle. Cependant, la cohérence méthodologique est également un point essentiel pour permettre de dresser des conclusions robustes répondant aux objectifs de l'étude.

Pour répondre à ces choix méthodologiques, il est parfois nécessaire de compléter ou d'adapter la modélisation d'un inventaire de cycle de vie. Plus généralement, les adaptations méthodologiques sont possibles avec les inventaires de cycle de vie dont les données de modélisation sont accessibles (inventaires désagrégés). Les adaptations nécessaires pour le besoin de l'étude ne sont donc pas possibles lorsque l'inventaire de cycle de vie est agrégé (inventaire « boîte noire ») ou lorsque les règles méthodologiques appliquées pour l'inventaire ne sont pas connues (manque de transparence).

L'analyse de la qualité des données permet donc d'appuyer les conclusions de l'étude. Selon la norme ISO 14 044, cette analyse permet une « *meilleure compréhension de la fiabilité de l'ensemble des résultats d'indicateurs et du profil de l'évaluation de l'impact* ». Cette étape permet de « *mieux comprendre la portée, l'incertitude et la sensibilité des résultats* » lors de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie.

Les données primaires sont les données quantitatives utilisées pour chiffrer les différents processus. Les données secondaires sont les inventaires du cycle de vie utilisés pour représenter les données primaires.

Une évaluation semi-quantitative de la qualité des données primaires et secondaires est réalisée suivant la procédure suivante :

- Classer les jeux de données d'inventaire du cycle de vie par ordre décroissant de contributions au cycle de vie pour toutes les catégories d'impact étudiées.
- Identifier les inventaires contribuant à au moins 80 % des impacts pour chaque catégorie d'impact pertinente.
- Évaluer la qualité des données par un jugement semi-quantitatif basé sur 3 critères :
 - Représentativité technologique (TeR) ;
 - Représentativité temporelle (TiR)
 - Représentativité géographique (GR) ;

⁴⁸ Par exemple, l'or présent dans une carte électronique est en très faible quantité pourtant la contribution de cet élément peut être supérieure au seuil de coupure sur les indicateurs d'impacts étudiés.

La description des critères est donnée dans le tableau suivant :

Critère	Explication
TeR	Mesure dans laquelle l'ensemble de données reflète le champ technologique considéré.
TiR	<p>Mesure dans laquelle le jeu de données reflète les conditions particulières du système considéré en ce qui concerne la date/l'âge des données.</p> <p>Le critère de représentativité temporelle est basé sur la moyenne des deux sous-critères suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> la différence entre l'année de référence de l'étude et la fin de la période de validité de l'inventaire du cycle de vie (validité du jeu de données TiR) ; la différence entre l'année de référence de l'étude et l'année de référence TiR. $TiR \text{ (moyen)} = \frac{TiR \text{ validité du jeu des données} + TiR \text{ année de référence}}{2}$
GR	Mesure dans laquelle l'ensemble de données reflète le champ d'application géographique considéré.

Tableau 8 : Critères d'évaluation de la qualité des jeux de données secondaires

Les critères de notation des inventaires de cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant :

Score	TiR	TeR	GR
1	2020 à 2024	La technologie de la donnée est exactement la même que la technologie visée par l'étude.	Le processus modélisé dans l'étude se déroule dans la zone géographique représentée par la donnée (France).
2	2015 à 2020	La donnée est relative au procédé ou au matériau de la technologie visée par l'étude, mais la technologie est différente.	Le processus modélisé dans l'étude se déroule dans l'une des zones géographiques couvertes par la donnée (Europe).
3	< 2015	Le jeu de données est une approximation de la technologie visée par l'étude	Le processus modélisé dans l'étude se déroule dans une zone géographique différente de celle couverte par la donnée.

Tableau 9 : Critères de notation de la qualité des jeux de données d'inventaire du cycle de vie

Les tableaux d'évaluation des données sont disponibles en Annexe 2.

4. Données utilisées et hypothèses formulées

Les chapitres suivants sont présentés en suivant les étapes du cycle de vie. Les chapitres à considérer pour les différents volets sont présentés ci-dessous :

	Volet 1	Volet 2	Volet 3-A	Volet 3-B
Préparation de CSR et leur transport jusqu'à la chaufferie (Chapitre 4.1)	X	X	X	X
Composition du CSR (4.2)	X	X	X	X
Fonctionnement d'une chaufferie CSR (4.3)	X	X	X	X
Modèle de combustion des déchets (4.4)	X	X	X	X
Mix énergétiques utilisés (4.5)	X	X	X	X
Production d'énergie évitée (4.6)		X		X
Traitement de déchets évité (4.7)		X	X	

Tableau 10 : Synthèse des chapitres à considérer par volet

4.1. Préparation de CSR et transport jusqu'à la chaufferie

L'étape de préparation des CSR consiste à une étape de sur-tri de refus de tri issus de centres de tri de déchets d'activités économiques et de déchets ménagers et assimilés. Il peut s'agir, par exemple d'un séparateur magnétique et courant de Foucault pour séparer les métaux ferreux et non ferreux, d'un tri aérodynamique pour la séparation des fractions lourdes et légères, ou encore d'un tri optique pour extraire certaines fractions recyclables ou indésirables comme le PVC.

À l'issue de cette préparation, le CSR doit avoir une certaine granulométrie.⁴⁹ :

- Inférieure à 5 cm pour le four à lit fluidisé.⁵⁰
- La flexibilité est plus importante pour le four à grille (jusqu'à 10 cm pour certains fours selon les appels à projet).

L'efficacité de préparation de CSR est calculée en utilisant les efficacités de préparation de CSR issues du Tableau 11. Ces valeurs sont issues de l'étude ADEME de 2019 sur les impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques.

L'efficacité de préparation d'une fraction de déchet est définie de la manière suivante :

$$Efficacité\ de\ préparation_{flux\ i} = \frac{Masse_{flux\ i\ entrant\ en\ CSR}}{Masse_{flux\ i\ entrant\ en\ préparation}}$$

Elle peut également être définie de manière globale pour le CSR :

$$Efficacité\ de\ préparation\ globale = \frac{Masse\ entrant\ en\ CSR}{Masse\ entrant\ en\ préparation}$$

D'après les enquêtes et les entretiens menés auprès des préparateurs au cours de cette étude, l'efficacité globale de préparation varie selon les installations et se situe entre 40% et 75% (selon le type de flux utilisé).

⁴⁹ La granulométrie est la taille des fragments qui composent le CSR.

⁵⁰ Source : ADEME, 2019, impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques.

Les efficacités de préparation les plus élevées sont pour les plastiques, le papier et le bois, qui vont surtout en CSR d'une part, et les déchets métalliques qui vont surtout dans la fraction hors CSR.⁵¹ d'autre part (voir Tableau 11).

Efficacité de préparation		
Fraction de déchets	Dans le CSR	Dans la fraction hors CSR
Bois	82%	18%
Papier-carton	85%	15%
Plastiques	93%	7%
Autres, combustibles (textiles, mousse polyuréthane)	70%	30%
Autres, non combustibles (métaux, inertes)	34%	66%

Tableau 11 : Efficacités de préparation dans les centres de préparation CSR (Source : Etude ADEME Impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques)

Dans ce tableau, il est possible de voir les efficacités de préparation des différents matériaux retrouvés dans les CSR. Les valeurs en gras indiquent la destination visée pour le flux (dans le CSR ou hors CSR).

Ainsi, l'objectif de l'étape de préparation est de conserver la plus grande quantité des flux de bois, de papier, de carton, de plastiques et d'autres combustibles (dont le textile et les mousses polyuréthane) dans le CSR pour obtenir un PCI et un taux biogénique en énergie répondant aux exigences des clients pour la chaleur via les exploitants de chaufferie CSR, et on cherchera donc à avoir une efficacité de préparation la plus élevée pour ces flux.

En revanche, l'objectif est que les autres non combustibles (broyat fin, déchets métalliques et autres matières qui deviendront des résidus de combustion) soient dans la fraction hors CSR. On cherchera donc à avoir une efficacité de préparation la plus basse possible pour ce flux, afin qu'il ne se retrouve pas dans le CSR.

Il en résulte que pour les compositions de CSR retenues, au vu des quantités reçues pour chaque flux, l'efficacité globale de préparation, pondérée pour chaque flux est de 63% à 66%. C'est-à-dire que pour obtenir 1 tonne de CSR il faut 1,26 à 1,38 tonne de déchets en entrée (voir schéma ci-dessous).

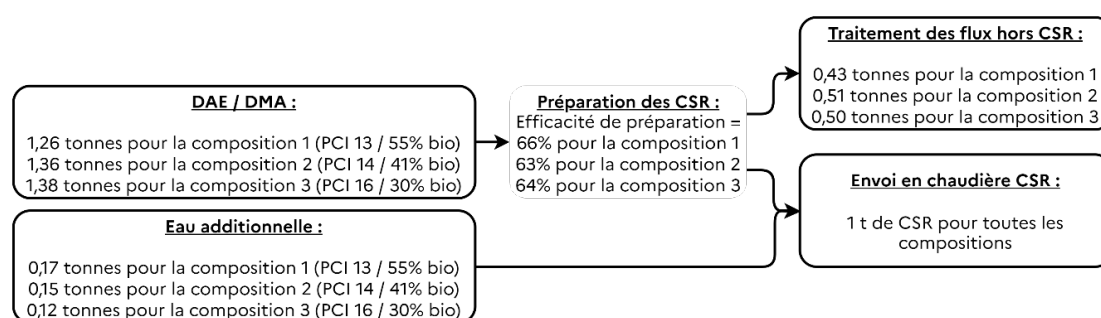


Figure 19 : Masse mobilisée pour les 3 compositions (bio=biogénique)

Pour la modélisation des centres de préparation CSR, il est tenu compte du fait que les fours à lit fluidisé ont besoin d'un CSR de dimensions plus faibles ; ce qui induit une consommation d'électricité additionnelle d'après l'étude ADEME *Etat de l'art de la production et de l'utilisation de combustibles solides de récupération* de 2012.

Les consommations d'électricité, de chaleur et d'eau associées à la production de CSR pour les différents types de chaufferies, issues du chapitre 6.8 de l'étude ADEME *Impacts environnementaux de scénarios de*

⁵¹ La fraction hors CSR est la part du flux qui n'est pas orientée vers les CSR à l'issue de l'étape de préparation.

valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques (page 96) sont indiquées au Tableau 12.

Consommation par tonne entrante	Four à grille	Four à lit fluidisé
Electricité (kWh/t)	100	120
Chaleur (MJ/t)	50	50
Eau (l/t)	10	10

Tableau 12 : Consommations associées aux centres de préparation CSR

Une distance moyenne de 66 km entre le centre de préparation et la chaufferie a été considéré, en cohérence avec les entretiens et enquêtes menés dans le cadre de l'étude (la distance variant entre 0 km pour les chaufferies produisant elles-mêmes leur CSR et 150 km pour les chaufferies les plus éloignées des préparateurs).

4.1.1. Traitement de la fraction hors CSR

La fraction hors CSR est considérée comme étant traitée en ISDND. La fraction hors CSR est modélisée par flux (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles, autres non combustibles). Une étape de transport est également modélisée afin de prendre en compte le transport de ces flux entre le centre de préparation et l'ISDND (hypothèse : 50 km). La fraction hors CSR est calculée de la manière suivante :

	Masse de déchets à mobiliser	Masse de déchets dans le CSR	Masse de déchets hors CSR
Flux i	Masse dans le CSR + Masse hors CSR $= \frac{1}{\eta_i} \times x_i \times m_{CSR}$	$x_i \times m_{CSR}$	$\frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \times x_i \times m_{CSR}$

Tableau 13 : Calcul de la masse de la fraction hors CSR

Avec :

- x_i , la part du flux i dans le CSR
- m_{CSR} , la masse totale de CSR après la préparation
- η_i , le rendement de préparation du flux i.

4.2. Composition du CSR

4.2.1. Méthodologies envisagées

La composition du CSR à utiliser dans le cadre de ce lot de l'étude devait au départ être déterminée sur la base des travaux issus des lots 2 & 4. Cette méthode qui était initialement envisagée a finalement été abandonnée, faute de données suffisamment exploitables (cf. section 2 en page 16 et suivantes).

Ainsi, une méthode alternative de détermination a été mise en œuvre. Celle-ci a consisté à réaliser des enquêtes et entretiens auprès des préparateurs de CSR et des opérateurs de chaufferies dédiées CSR (voir résultats détaillés à l'Annexe 5). Elle a mené à :

- la réalisation d'une visite, organisée chez un préparateur de CSR (à destination de cimenterie),
- des entretiens menés avec un préparateur de CSR pour chaufferie et six opérateurs de chaufferies, qui représentent au total 15 sites et utilisent principalement des fours à grille,

- des enquêtes menées auprès de quatre préparateurs de CSR pour chaufferie (couvrant 17 sites), ainsi que quatre opérateurs de chaufferies utilisant des fours à grille (représentant six sites),
- une analyse des données provenant des appels à projets.

Cependant, la quantité de données recueillies via ces différents canaux s'est avérée insuffisante au vu de la couverture nationale, compromettant la représentativité de la composition pouvant en être tirée.

Ces deux méthodes n'ont donc pas été retenues, et une troisième méthode a été utilisée, en s'appuyant sur les connaissances de l'ADEME et des résultats des deux premières méthodes.

4.2.2. En lien avec les soutiens financiers existants en France

Suite aux recommandations de l'ADEME au regard des différents soutiens financiers existants (cf. section 1.2.4 page 12) et à partir des données des plans d'approvisionnements établis dans les projets déposés dans les appels à projets CSR de l'ADEME entre 2016 et 2021, la proposition de trois types de CSR distincts, chacun caractérisé par une teneur en biogénique (en énergie) a été formulée :

- Premier type : avec une teneur en biogénique de 55% (permettant de répondre au seuil minimum pour le TCTF, voir Chapitre 1.2.4.3).
- Deuxième type : avec une teneur en biogénique de 40%, qui est identifié par les acteurs de la filière et l'ADEME comme le point de bascule par rapport au gaz.
- Troisième type : avec une teneur en biogénique plus faible de l'ordre de 30%, permettant de mobiliser un gisement plus élevé, puisque la part de déchets de bois et de papier-carton est plus faible dans ce type de CSR⁵² (pour rappel : la quantité de bois et de papier-carton est limitante, cf. section 2.6 page 26).

De plus, pour ces trois types de CSR, deux gammes de PCI sont étudiées, afin de correspondre aux deux types de fours en activité :

- Les fours à lit fluidisé utilisent des CSR ayant un PCI compris majoritairement entre 15 et 17 MJ/kg.
- Les fours à grille utilisent des CSR ayant un PCI compris majoritairement entre 12 et 14 MJ/kg.

Les deux types de fours, bien qu'ils acceptent majoritairement des CSR ayant des PCI dans ces gammes de valeurs, peuvent également utiliser des CSR ayant des PCI autour de ces gammes de valeurs. Cela ne représente pas la majorité des cas.

Ces trois types de CSR et leurs compositions sont synthétisés dans le Tableau 14. Les CSR sont composés de flux venant de DAE et DMA (plastique, bois, papier, carton, textile, mousse, métal, inertes). De l'eau additionnelle est également comprise dans les déchets selon les conditions météorologiques, puisque les déchets sont stockés à l'air libre.

⁵² Ce type de CSR peut par exemple être composé, pour la partie non biogénique, des gisements particuliers type résidus de broyage automobile (RBA).

	Composition 1	Composition 2	Composition 3
Plastiques (%)	14 %	21 %	30 %
Bois (%)	39,2 %	31,2 %	26,4 %
Papier/carton (%)	9,8 %	7,8 %	6,6 %
Autres combustibles (textiles, mousses) (%)	5 %		
Autres incombustibles (métaux, inertes) (%)	15 %	20 %	
Eau additionnelle (%)	17 %	15 %	12 %
Taux d'humidité total ⁵³ (%)	26,0 %	22,7 %	19,1 %
Part biogénique en énergie (%)	54,5 %	40,2 %	29,2 %
Part biogénique en masse (%)	49,5 %	39,5 %	33,5 %
PCI (MJ/kg)	12,9	14,0	16,3
Technologie de four	Four à grille		Four à lit fluidisé

Tableau 14 : Composition des trois types de CSR

Ces compositions sont hypothétiques et basées sur les PCI visés ainsi que sur des données issues de la littérature (pour les PCI de chaque flux) et des appels à projet de l'ADEME (pour la part de chaque flux dans les CSR). Ainsi, ces trois compositions de CSR sont représentatives de ce que les acteurs peuvent utiliser.

Comme vu au chapitre 2.6, le gisement total de CSR est limité par la quantité de résidus de bois et de papier-carton restants dans les refus de tri utilisés pour la préparation de CSR. En effet, pour atteindre les parts biogéniques visées et les compositions présentées ci-dessus, le gisement de déchets disponible pour les CSR n'est pas entièrement mobilisable, car il faudrait une plus grande quantité de déchets biogéniques. Ainsi, selon la composition du CSR (en particulier la part plus ou moins grande de biomasse mobilisée sans compétition avec la valorisation matière), le gisement mobilisable ne sera pas le même.

Différentes quantités sont considérées par le lot 4 : selon le scénario (A, B ou C) et l'année (2030 ou 2040). Ainsi, le potentiel de production de CSR pour 2030-2040 atteignable dans la limite du gisement de biomasse mobilisée sans compétition (notamment de bois et papier-carton) dépend :

- De la composition du CSR (de la part de biomasse qu'il contient),
- Du scénario de réduction des déchets (SA, SB ou SC),
- De l'horizon temporel (2030 ou 2040).

Le gisement, selon les différents scénarios est résumé dans le tableau suivant :

⁵³ Le taux d'humidité total correspond à l'humidité initialement incluse dans les déchets ainsi que l'eau de pluie additionnelle.

Année		SA (tendanciel)	SC
2030	Quantité de biomasse mobilisée sans compétition (Mt)	1,34	1,30
	Potentiel de production de CSR pour un CSR moyen (Mt)	3,21	3,11
2040	Quantité de biomasse mobilisée sans compétition (Mt)	1,43	2,81
	Potentiel de production de CSR pour un CSR moyen (Mt)	3,41	6,70

Tableau 15 : Potentiel de production de CSR en Mt

4.2.3. Taux biogénique en énergie

Pour rappel, les déchets d'origine biogénique sont le bois, le papier, le carton et certains textiles (le coton par exemple). Les plastiques, les autres incombustibles et l'eau sont considérés comme n'étant pas d'origine biogénique.

	Part biogénique (en masse)	PCI (MJ/kg)
Plastiques	0 %	35,49
Bois	100 %	13,99
Papier, Carton	100 %	14,72
Autres combustibles (textiles, mousses)	10 %	20,45
Autres incombustibles (métaux, inertes)	0 %	0
Eau additionnelle	0 %	0

Tableau 16 : Taux biogénique en énergie par flux de déchet

Comme présenté dans le Tableau 16 ci-dessus, le bois et le papier-carton sont considérés comme étant totalement d'origine biogénique. Les autres combustibles sont considérés comme étant composés à 10% de matériaux biogénique (en particulier, le coton des textiles). Cette hypothèse a été élaborée par RDC de manière arbitraire sur base de son expérience.

Les PCI pour chaque flux sont extraits des inventaires ecoinvent correspondants, utilisant les données de Doka, 2007, Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services.

L'influence de la composition du gisement, en particulier sur les émissions de CO₂ fossile et biogénique, est étudiée via une analyse de sensibilité, par matériau (voir Chapitre 6.2.1).

4.3. Principes de fonctionnement d'une chaufferie CSR dédiée

4.3.1. Principe général

Les modèles de valorisation du CSR en chaufferie dédiée utilisés dans cette étude sont dérivés du modèle WILCI (voir Annexe 3), développé par le BRGM (ADEME, 2017), et utilisent les principes de modélisation résumés dans la figure ci-dessous :

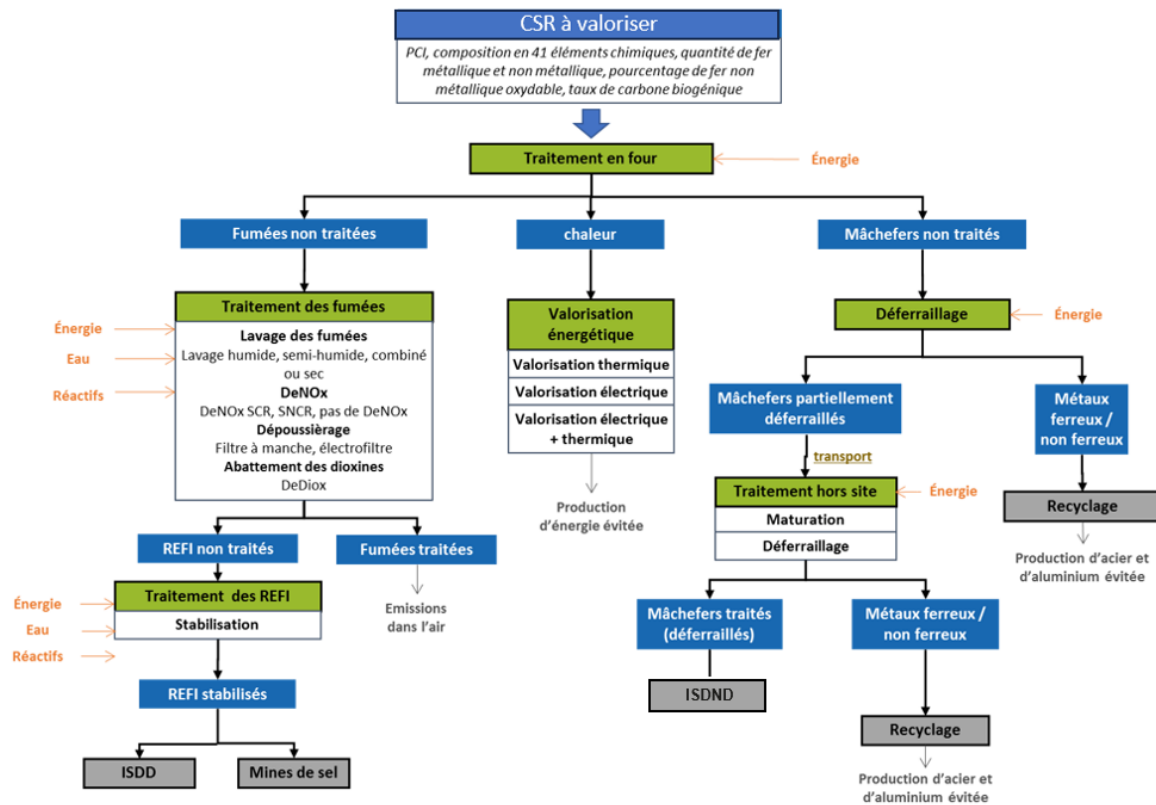


Figure 20 : Principe de modélisation de valorisation en chaufferie dédiée

Le modèle WILCI permet à l'utilisateur de modifier de nombreux paramètres permettant de personnaliser le modèle en fonction du type de chaufferie analysée. Ainsi, l'outil WILCI permet de s'adapter aux spécificités des chaufferies CSR (en particulier à la composition du CSR).

La majeure partie des unités dédiées à la valorisation des CSR sont, à ce jour en France, des fours à grille. En Europe cependant, de nombreux fours à lit fluidisé sont utilisés. Dans cette étude, les deux types de fours sont étudiés.

Les fours à grille ou à lit fluidisé sont composés des mêmes éléments principaux. La différence entre les deux technologies se trouve au niveau du foyer, à l'endroit où la combustion des CSR a lieu. De manière générale, les fours à lit fluidisé nécessitent plus de préparation sur les CSR en amont mais le processus plus complexe permet une plus grande souplesse dans la composition.

4.3.2. Traitement des résidus

Plusieurs types de résidus sont générés lors de la combustion des CSR :

- Les REFI (résidus d'épuration des fumées d'incinération) sont composés des éléments qui ont été filtrés par les différents systèmes d'abattement des fumées.

Lors de la combustion des CSR, des polluants atmosphériques sont générés. Les principaux polluants présents dans les CSR sont l'azote, le brome, le chlore, le fluor, le soufre et les métaux lourds. Des SOx, des NOx, des acides tels que l'acide sulfurique, le HBr, HCl ou HF ou bien des dioxines et des furanes peuvent par exemple être produits lors de la combustion des CSR. Des réglementations et des valeurs limites existent pour ce type de polluants. Afin de respecter ces réglementations, il est alors possible de trier les matières premières (par

exemple, éviter le PVC) ou d'adapter les systèmes d'abattement des fumées. Les principaux gaz à effet de serre émis dans l'air sont le CO₂, les NO_x, les SO_x et le CO.

Les REFI sont souvent composés de déchets dangereux. Ils sont alors envoyés en ISDD (installation de stockage des déchets dangereux). Les REFI peuvent également être envoyés dans d'autres filières de traitement des déchets, et peuvent par exemple être enfouis dans des mines de sel.

- Les mâchefers et les cendres sont composés de matières solides qui ne sont pas des combustibles, comme les métaux ou les inertes.

La quantité de mâchefers et de cendres générée dépend de la composition des CSR. En effet, la quantité de cendres est liée à la quantité de matière minérale (métaux, terre, gravats, charges inorganiques dans les polymères, fibres de verre, etc.) contenue dans les CSR. La quantité de mâchefers dépend de la quantité de métaux et de matière inerte.

Les mâchefers ne sont pas des déchets dangereux. Ils peuvent passer une étape de déferailage et de maturation pour valoriser les métaux qu'ils contiennent (métaux ferreux et aluminium). Le reste peut être envoyé dans des ISDND (installation de stockage de déchets non dangereux).

La quantité de REFI, de cendres et de mâchefers est calculée à l'aide de l'outil WILCI en fonction de la composition du CSR et du système d'abattement des fumées.

Les données utilisées dans WILCI sur la gestion des REFI sont tirées du rapport AMORCE, 2012 « La gestion des REFIOM des UIOM françaises ». Les données liées à la gestion des mâchefers sont majoritairement issues du rapport CEREMA, 2014 « Gestion des mâchefers d'incinération des déchets non dangereux (MIDND) ».

4.3.3. Combustion des CSR en unité dédiée à four à grille

Dans un four à grille, les CSR sont placés sur une grille lors de la combustion. La grille est souvent mobile ce qui permet au combustible d'avancer au cours de la combustion. Les résidus solides de combustion passent à travers la grille et peuvent ensuite être récupérés pour être traités. L'air passe également à travers la grille afin d'alimenter le four en air primaire, et favoriser la combustion.

Différentes technologies existent au sein des fours à grille, comme les grilles mobiles ou les grilles tournantes. Dans le cadre de cette étude, aucune distinction n'est faite entre ces différentes technologies.

Les fours à grille peuvent théoriquement accepter des gammes de PCI moins élevées que les fours à lit fluidisé. En effet, les déchets à haut PCI (supérieur à 18 MJ/kg) peuvent engendrer une dégradation de la grille. Cependant, certaines grilles peuvent avoir un traitement particulier pour remédier à cela, comme des grilles refroidies à l'eau, ou possédant un revêtement adapté.

Sur la base des connaissances de l'ADEME acquises lors de l'analyse des dossiers des appels à projet, de manière générale, la majorité des fours à grille utilisent des CSR ayant un PCI compris entre 12 et 14 MJ/kg et la majorité des fours à lit fluidisé utilisent des CSR ayant un PCI compris entre 15 et 17 MJ/kg. Les deux types de fours peuvent également fonctionner sur une gamme de PCI plus large. Dans l'étude, cela se traduit par le traitement en four à grille des CSR ayant un PCI de 13 et de 14 MJ/kg et un traitement en four à lit fluidisé du CSR ayant un PCI de 16 MJ/kg.

Le contrôle de la température est plus compliqué pour un four à grille que pour un four à lit fluidisé, car l'homogénéité de la combustion dépend beaucoup de la répartition sur la grille.

Les CSR utilisés en fours à grille doivent avoir un taux d'humidité relativement plus faible que pour les fours à lit fluidisé. Dans les scénarios de l'étude, il est situé entre 19% et 26%. Le taux d'humidité présent dans le déchet a une influence sur la combustion puisqu'il fait varier le PCI du déchet. En effet, plus il y a d'eau dans le déchet, plus le PCI est faible. À l'inverse, un déchet complètement sec a un PCI plus élevé.

La quantité de cendres est un enjeu dans le cas des fours à grille, car lorsqu'il y en a trop, les grilles sont colmatées, et cela empêche la bonne circulation de l'air. Un four à grille requiert des CSR produisant donc un taux de cendres faible (inférieur à 15%).

Les données utilisées pour le modèle d'unités dédiées à four à grille sont présentées au chapitre 4.4.

4.3.4. Combustion des CSR en unité dédiée à lit fluidisé

Dans un four à lit fluidisé, les CSR sont incorporés sur un lit de sable, qui est mis en suspension à l'aide d'une injection d'air.

Plusieurs techniques de lit fluidisé existent, comme le lit fluidisé bouillonnant ou le lit fluidisé circulant. Dans le cadre de cette étude, aucune distinction n'est faite entre ces différentes technologies par manque d'information spécifique sur chaque technologie.

Les fours à lit fluidisé tolèrent des CSR avec des caractéristiques plus variées que les fours à grille. En effet, il est possible d'utiliser des CSR ayant des forts taux d'humidité (supérieur à 50%), et des combustibles produisant des taux de cendres élevés (jusqu'à 50%).⁵⁴. De plus, ce type de four permet une très bonne homogénéité de la température, grâce au sable en suspension. Cela permet également de réduire les émissions de NOx (jusqu'à 25% inférieur par rapport aux fours à grille) en étagant mieux la combustion ou en injectant de l'ammoniac au-dessus du lit, et de réduire la formation des SOx en ajoutant du CaCO₃ (ou autre absorbant basique) dans le lit. Cependant, les CSR à destination des fours à lit fluidisé demandent plus de préparation que pour les fours à grille, puisqu'ils doivent avoir une granulométrie plus fine pour pouvoir être utilisés.

L'excès d'air est de 20 à 40 % pour ce type de technologie alors qu'il est de 50 à 70 % pour les fours à grille.

4.4. Modèle de combustion des déchets

La valorisation de CSR en unité dédiée à four à grille et à four à lit fluidisé est modélisée selon le principe exposé ci-dessus.

Un modèle de gestion des déchets comporte 2 types de données pour être utilisé dans une analyse du cycle de vie :

- Données d'activités (ex : consommation d'électricité, émissions dans l'air)
- Données d'inventaires du cycle de vie (ex : production d'un kWh d'électricité)

4.4.1. Sources principales des données d'activité

Les données pour la valorisation des CSR en unité dédiée sont obtenues via le modèle d'incinération WILCI développé par le BRGM (BRGM, 2017) (ADEME, 2017).

Ce modèle porte sur l'incinération de déchets dans un four à grille, et est basé sur des données d'activité d'incinérateurs en France.

4.4.1.1. Rendements de récupération d'énergie

Le rendement électrique et le rendement thermique sur lesquels sont basées les données sont synthétisés dans le Tableau 17. Ces paramètres ont été définis en prenant en compte les minimums réglementaires, les valeurs communiquées lors des enquêtes et entretiens réalisés, ainsi que lors des échanges avec les fédérations (FEDERREC, FNADE) et avec l'ADEME en 2024.

Les rendements sont définis pour une typologie de chaufferie (selon s'il s'agit d'une production de chaleur seule, une cogénération avec raccordement à un réseau de chaleur urbain – sans débouché continu pour la chaleur, ou une cogénération reliée à une industrie – avec un débouché continu pour la chaleur).

Le cas de base utilisé dans cette étude est le rendement maximum, qui correspond aux valeurs opérationnelles observées par les acteurs (FEDERREC, FNADE) et l'ADEME, communiquées lors d'un échange oral en 2024. En analyse de sensibilité, un rendement minimum a été étudié, correspondant

⁵⁴ Source : Ancre, Les combustibles solides de récupération (CSR) : Les verrous techniques, réglementaires, économiques et sociétaux de la filière en France, 2018

à ceux des seuils réglementaires fixés dans l'arrêté du 23 mai 2016. Les valeurs retenues sont résumées dans le tableau suivant⁵⁵ :

	η_{th} min	η_{th} max	η_{el} min	η_{el} max
Chaleur seule	70%	80%	N.A.	N.A.
Cogénération sans débouché continu pour la chaleur	70% (5 mois) 0% (7 mois)	80% (5 mois) 0% (7 mois)	0% (5 mois) 30% (7 mois)	0% (5 mois) 45% (7 mois)
Cogénération avec débouché continu pour la chaleur	70%	78%	5%	15%

Tableau 17 : Rendement énergétique des unités

Les rendements électrique (η_{el}) et thermique (η_{th}) sont calculés de la manière suivante, afin de correspondre à la réglementation et à l'Arrêté du 23/05/16.

$$\eta_{el} = [\text{énergie produite}/\text{énergie primaire}] * 100 = [E_{elec}] / [E_{CSR} + E_{combustible(s)}] * 100$$

où :

E_{elec} = Energie électrique produite et vendue + Energie électrique autoconsommée (MWh/an)
 $E_{CSR} + E_{combustible(s)}$ (MWh/an) = énergie contenue dans les CSR [Σ PCI* quantité CSR utilisés]
+ Energie contenue dans les autres combustibles utilisés [Σ PCI* quantité autres combustibles utilisés]

$$\eta_{th} = [\text{énergie produite}/\text{énergie primaire}] * 100 = [E_{th}] / [E_{CSR} + E_{combustible(s)}] * 100$$

où :

E_{th} = Energie thermique produite vendue + Energie thermique autoconsommée (MWh/an)

L'énergie produite par valorisation énergétique se substitue :

- pour l'électricité : au mix électrique évité (mix de consommation en France)
- pour la chaleur : au mix de chaleur lorsque la chaleur est valorisée dans un procédé industriel (production à partir de gaz naturel).

Le rendement minimal est le suivant :

- $\eta_{th} = 70\%$, ce qui correspond au minimum légal pour les installations ICPE 2971 utilisant des CSR pour la production industrielle de chaleur ou l'alimentation de réseau de chaleur (entre le 1er novembre et le 31 mars).
- $\eta_{el} = 30\%$ pendant 7 mois dans l'année, pour la cogénération raccordée à un réseau de chaleur ce qui correspond au minimum légal pour les installations ICPE 2971 en cogénération utilisant des CSR pour l'alimentation de réseau de chaleur (entre le 1er avril et le 31 octobre).
- $\eta_{el} = 5\%$ pour la cogénération raccordée à une industrie, correspondant aux minimums observés dans les appels à projet de l'ADEME.

Le rendement maximum, pris en cas de base, correspond aux rendements opérationnels observés par les opérateurs, et déclarés dans les différents appels à projet de l'ADEME.

⁵⁵ Source : Arrêté du 23 mai 2016 relatif aux installations de production de chaleur et/ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans des installations prévues à cet effet associées ou non à un autre combustible et relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Note : L'augmentation du rendement thermique et/ou électrique a les mêmes effets que l'augmentation du rendement de la chaufferie. Dès lors, cette analyse de sensibilité couvre également les améliorations technologiques des fours améliorant le rendement, tels que les fours à combustion étagée.

Pour rappel, la quantité d'énergie produite par le four est calculée de la manière suivante :

$$\text{Electricité} = \text{Masse}_{\text{déchets}} \times \text{PCI}_{\text{déchets}} \times \eta_{el} \text{ et } \text{Chaleur} = \text{Masse}_{\text{déchets}} \times \text{PCI}_{\text{déchets}} \times \eta_{th}$$

Avec :

- *Electricité* et *Chaleur* la quantité d'électricité et de chaleur produite (en MJ)
- *Masse_{déchets}* la masse de déchets entrant (en tonne)
- *PCI_{déchets}* le PCI du déchet entrant (en MJ/tonne)
- η_{el} et η_{th} l'efficacité électrique et thermique (en %)

Les rendements des systèmes alternatifs de production de chaleur ont été calculés à partir des données utilisées dans Ecoinvent v3.9.1 et sont les suivants :

- Pour le gaz naturel, un rendement de 96,7%
- Pour le fioul, un rendement de 95,2%
- Pour le charbon, un rendement de 82,8%

4.4.1.2. Consommation d'énergie

La consommation électrique pour les unités dédiées est tirée du modèle WILCI.

Le modèle WILCI utilise, pour un four à grille, une consommation électrique par défaut de 103 kWh/t, correspondant à la moyenne observée sur 90 incinérateurs en France sur la période 2012-2014. Pour les fours à lits fluidisés, la consommation par défaut est de 138 kWh/t et est fournie par Séché Environnement (étude ADEME sur les impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques, 2019). Cette consommation par défaut est ensuite modifiée par le modèle WILCI pour tenir compte des caractéristiques du déchet incinéré et des caractéristiques du procédé (volume d'air de combustion requis, volume des fumées, etc.). En effet, la consommation électrique dépend des caractéristiques de la chaufferie. Par exemple, la consommation électrique pour le traitement des fumées est proportionnelle au volume des fumées traitées. Par ailleurs, pour les chaufferies faisant de la cogénération, une partie de l'électricité produite est autoconsommée, alors que les chaufferies produisant de la chaleur seule tirent toute l'électricité du réseau.

4.4.1.3. Coefficients de transfert

Les coefficients de transfert pour les unités dédiées sont indiqués en Annexe 1. Ces coefficients de transfert sont appliqués aux éléments chimiques pour modéliser leur comportement lors du traitement des fumées. Cela permet de définir la quantité de chaque élément qui est émis vers l'air, vers les mâchefers, vers les REFI et vers l'eau lors de ce traitement.

4.4.1.4. Excès d'air

Dans le four, il est important d'avoir un débit d'air suffisant afin de limiter les imbrûlés et la formation de monoxyde de carbone. Pour cela, il faut injecter de l'air en excès par rapport à la stoechiométrie de la combustion. Cet excès dépend de la technologie de four utilisée et de l'hétérogénéité des CSR utilisés. Cependant, l'excès d'air a également un impact sur le rendement énergétique de la chaufferie. En effet, plus l'excès d'air est élevé, moins il y a d'imbrûlés, mais moins le rendement est élevé.

Du fait d'une meilleure maîtrise de la composition des déchets entrant dans le four, les unités dédiées peuvent fonctionner avec un excès d'air plus faible que les UVE (dans lesquelles l'excès d'air est de 70%).

En raison de la moindre qualité du mélange des gaz et du risque de point froid, l'excès d'air doit être plus élevé pour un four à grille que pour un four à lit fluidisé. L'excès d'air des unités dédiées à four à grille est donc considéré comme plus élevé (+10%) que celui d'une unité dédiée à four à lit fluidisé.

L'excès d'air utilisé pour modéliser les unités dédiées est alors de 50% pour les fours à grille et de 40% pour les lits fluidisés. Cet excès d'air permet d'arriver à une teneur en oxygène à la cheminée d'environ 7%.

4.4.1.5. Technologies d'épuration des fumées

Il existe une plage de température dans laquelle les CSR peuvent être brûlés de manière idéale, en permettant de maîtriser la formation de NOx, tout en empêchant la présence d'imbrûlés. Pour cela, il faut que la température soit supérieure à 850°C environ. Selon l'article 9 de l'Arrêté du 23 mai 2016, il est stipulé que la température doit toujours dépasser 850°C pendant deux secondes au moins pour toute combustion de CSR. La température est en général de 850°C à 1100°C pour les fours à grille (elle peut même aller jusqu'à 1300°C selon RECORD pour un four à grille mobile inclinée refroidie à l'eau) et de 850°C à 950°C pour les fours à lit fluidisé. Par ailleurs, afin de minimiser la formation de mâchefers ou d'agglomérats, il faut que la température soit inférieure à la température de fusion des minéraux contenus dans les cendres. De plus, le processus SNCR⁵⁶ utilisant de l'ammoniac est également le plus efficace dans des gammes de températures de 850°C à 950°C, et le processus SNCR avec de l'urée est le plus efficace jusqu'à 1050°C. Ces gammes de température sont les plus efficaces pour la réduction des NOx. Si la température est trop basse, ou que la durée du processus d'épuration des fumées est trop courte, la réaction qui a lieu entre l'ammoniac et les NOx ne se fait pas, et l'efficacité du processus DeNOx diminue. Dans ce cas, il y aura une plus grande émission d'ammoniac et de NOx.

L'épuration des fumées est modélisée dans le modèle WILCI via :

- 6 groupes de technologies combinant dépoussiéreurs et traitement des gaz acides,
- 5 groupes de technologie combinant les processus DeNOx et DeDiox.

Technologies de dépoussiérage et de traitement des gaz acides

Les technologies de dépoussiérage consistent à abattre les particules solides ayant une dimension entre 1 µm et 1 mm selon l'étude ADEME de 2017 « l'outil WILCI pour l'ACV de l'incinération de déchets ménagers et assimilés en France ». Ces technologies sont soit des filtres à manches, soit des électrofiltres. Les technologies de traitement des gaz acides consistent à abattre certains polluants (HCl, SO₂, HF) qui sont contenus dans les fumées formées lors de la combustion. Ces technologies sont soit des processus humides, semi-humides ou secs.

Selon l'étude ADEME de 2012 « Etat de l'art de la production et de l'utilisation de combustibles solides de récupération », les centrales dédiées utilisent une méthode sèche pour le traitement des fumées. Ce système est moins onéreux et consomme moins d'énergie électrique pour son fonctionnement, mais il est moins efficace que les systèmes humides et semi-humides pour la gestion de taux simultanément élevés de Cl et S ce qui entraîne une consommation de réactifs plus élevée. Ce procédé consiste à injecter un réactif composé de chaux hydratée ou de bicarbonate de sodium dans les fumées.

De ce fait, l'étude modélise uniquement le traitement des gaz acides via des procédés secs, en gardant la même proportion entre les deux que pour les UVE. La répartition des technologies de dépoussiérage/traitement des gaz acides est présentée à la Figure 21.

⁵⁶ Réduction sélective non catalytique : injection d'ammoniac ou d'urée dans la chaufferie, qui est ensuite convertie en ammoniac, qui réagit avec les NOx pour les transformer en azote et en eau.

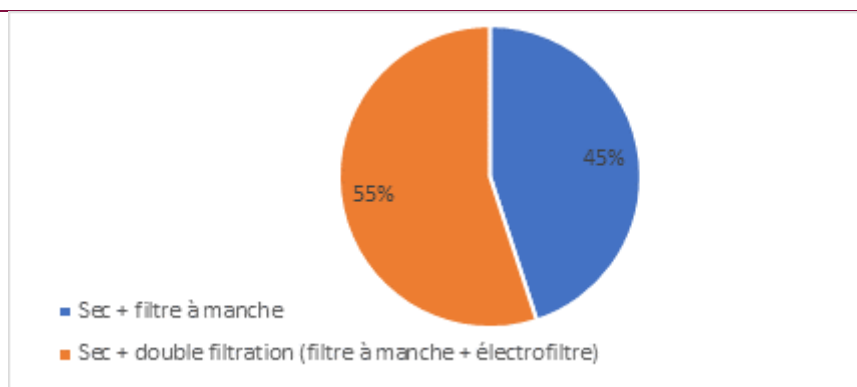


Figure 21 : Traitement des gaz acides et dépoussiérage - répartition du parc d'unités dédiées par classe de technologie

La principale conséquence de ce choix de modélisation de procédés DeSOx secs est :

- une absence d'émissions vers l'eau. En effet, les procédés de DeSOx secs n'ont pas de coefficients de transfert vers l'eau et n'induisent donc pas d'émissions vers l'eau. En revanche, les procédés de DeSOx humides induisent (via un coefficient de transfert vers l'eau) des émissions de polluants vers l'eau (avec des coefficients de transfert élevés vers l'eau pour le chlore, le soufre, le fluor et le Bore).
- des émissions plus élevées vers les Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération (REFI) ; les composés qui n'iront pas vers l'eau se retrouveront dans les REFI.

Technologies de traitement DeNOx et DeDiox

Le traitement DeNOx et DeDiox consiste à abattre les dioxines contenues dans les fumées formées lors de la combustion. Cela se fait par l'ajout de réactifs (coke de lignite ou charbon actif) ou par l'action d'un catalyseur (SCR). Il existe deux types d'abattement des NOx : la réduction catalytique sélective (SCR) et la réduction non catalytique sélective (SNCR). Ces deux techniques impliquent l'ajout d'ammoniac ou d'urée, qui réagit avec les NOx et l'air pour donner de l'azote et de l'eau, selon l'étude ADEME de 2017 « l'outil WILCI pour l'ACV de l'incinération de déchets ménagers et assimilés en France ».

Les technologies de traitement DeNOx et DeDiox utilisées dans cette étude correspondent au parc d'UVE français pour la période 2012-2015 et sont tirées de l'outil WILCI. Faute de plus de précision sur les chaufferies, l'hypothèse retenue est de modéliser les mêmes traitements DeNOx et DeDiox dans ces dernières que pour les UVE.

La répartition de ces technologies est indiquée sur la Figure 22 :

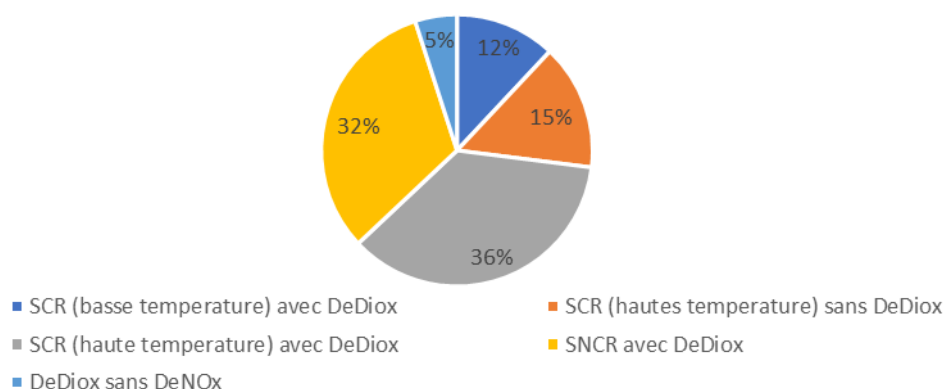


Figure 22 : Groupes de technologies combinant les traitements DeNOx et DeDiox - répartition du parc d'UVE par classe de technologies

Modélisation des technologies

Ces technologies d'épuration des fumées sont modélisées par des émissions dans l'air (voir Chapitre 4.4.1.6), une consommation de réactifs (voir Chapitre 4.4.1.7), une consommation d'eau et de gaz naturel (voir Chapitre 4.4.1.8), ainsi que des émissions vers l'eau pour le traitement des résidus (voir Chapitre 4.4.1.9).

4.4.1.6. Émissions dans l'air et traitement des fumées

Les principales données utilisées dans le modèle et relatives aux différents types d'émissions sont mentionnées ci-dessous :

Emissions spécifiques au déchet

Ces émissions sont modélisées au moyen des coefficients de transfert. Les coefficients de transfert pour les UVE sont indiqués en Annexe 3 (les mêmes coefficients de transfert sont utilisés pour les fours à grille et les fours à lit fluidisé).

Ces émissions dépendent de la composition du CSR et des caractéristiques de la chaufferie.

Ces émissions sont calculées de la manière suivante dans WILCI :

$$\text{Emission}(k, j) = \text{Masse}_{\text{Déchets}} \times \sum_{f=1}^{F_b} [\text{Composition}_{\text{Déchets}}(f) \times \text{Composition}(f, k) \times \text{CT}_{\text{Combustibles}}(k, j)]$$

Avec :

$\text{Emission}(k, j)$ la masse de l'élément k émis vers le compartiment j ;

$\text{Masse}_{\text{Déchets}}$ la masse de déchets entrants ;

$\text{Composition}_{\text{Déchets}}(f)$ la composition du déchet entrant en la fraction de déchets f ;

$\text{Composition}(f, k)$ la composition de la fraction de déchets f en l'élément k ;

$\text{CT}_{\text{Combustibles}}(k, j)$ le coefficient de transfert de l'élément k vers le compartiment j , pour les fractions de déchets combustibles ;

F_b le nombre de fractions de déchets « combustibles » (et non « inertes »)

Figure 23 : Calcul des quantités d'émissions gazeuses, aqueuses et REFIOM spécifiques aux déchets

$$\begin{aligned} \text{Mâchefers}(k) &= \text{Masse}_{\text{Déchets}} \\ &\times \sum_{f=1}^{F_b} [\text{Composition}_{\text{Déchets}}(f) \times \text{Composition}(f, k) \times \text{CT}_{\text{Combustibles}}(k, \text{mâchefers})] \\ &+ \text{Masse}_{\text{Déchets}} \\ &\times \sum_{l=1}^{F_{\text{inertes}}} [\text{Composition}_{\text{Déchets}}(l) \times \text{Composition}(l, k) \times \text{CT}_{\text{inertes}}(k, \text{mâchefers})] \end{aligned}$$

Avec :

$\text{Mâchefers}(k)$ la masse de l'élément k dans les mâchefers sortants ;

$\text{CT}_{\text{inertes}}(k, \text{mâchefers})$ le coefficient de transfert de l'élément k vers le compartiment « mâchefers », pour les fractions de déchets inertes ;

F_{inertes} le nombre de fractions de déchets « inertes ».

Figure 24 : Calcul des quantités d'émissions vers les mâchefers

Emissions spécifiques au procédé

Ces émissions (à l'exception des émissions dépendantes du traitement des gaz acides) sont reprises des données du modèle WILCI et sont dépendantes du procédé d'abattement des polluants.

Ces émissions ne dépendent pas de la composition du CSR mais uniquement des conditions opératoires de la chaufferie. Il s'agit d'émissions de dioxines, furanes, particules, COV, CO, NOx et NH₃.

Ces émissions sont calculées de la manière suivante dans WILCI :

$$Emission(k, p, air) = Masse_{Déchets} \times Facteur\ d'émissions(k, p) \times Niveau\ d'émissions_{Déchets}$$

Avec :

Emission(k, p, air) l'émission vers l'air de l'élément/substance k, spécifique au procédé p ;

Facteur d'émissions(k, p) le facteur d'émission vers l'air relatif à l'élément/substance k (en kg d'élément ou substance / tonne de déchets traités) et spécifique au procédé p.

Le niveau d'émission est calculé comme une fonction du volume de gaz de combustion de la fraction de déchets étudiée.

Figure 25 : Emissions de poussières, CO, COV, dioxines

Pour certaines substances, il existe deux types d'émissions : les émissions combustibles et les émissions thermiques. Par exemple, c'est le cas des NOx :

- Les NOx combustibles sont formés par l'oxydation de l'azote contenu dans le déchet.
- Les NOx thermiques sont formés par l'oxydation de l'azote contenu dans l'air. Ces NOx sont formés lorsqu'une très haute température est atteinte à certains endroits dans la chaufferie.

Dans l'outil WILCI, basé sur des hypothèses d'ecoinvent v3, la répartition entre les NOx combustibles et thermiques est de 50% - 50%.

4.4.1.7. Consommation de réactifs pour l'épuration des fumées

Les consommations de réactifs sont tirées de l'outil WILCI (les données sont basées sur la consommation de réactifs de 90 incinérateurs en France en 2012). La quantité et le type de réactifs considérés dépendent des techniques d'abattement des fumées considérées (voir Chapitre 4.4.1.5).

Pour le traitement des gaz acides par voie sèche, la consommation de réactifs est définie en fonction de la composition chimique des déchets (quantité d'éléments à épurer, comme le soufre, le fluor, le chlore, le brome, l'iode qui composent les gaz acides). Les réactifs utilisés sont le bicarbonate de sodium, la chaux éteinte et la chaux à surface spécifique élevée. Ces réactifs sont représentatifs des techniques utilisées en France sur la période 2012-2015.

Pour le traitement des NOx, les réactifs considérés sont l'ammoniac et l'urée. La quantité de réactifs utilisée dépend de la quantité de NOx à traiter et de la répartition entre les différents types de traitement (la répartition entre SNCR et SCR considérée est présentée au chapitre précédent).

Le charbon actif, le coke de lignite et le Dioxorb© sont également utilisés pour les traitements SCR et SNCR. La quantité considérée dépend des niveaux d'émissions et de la répartition entre les différents traitements (voir chapitre précédent).

Finalement, du TiO₂ et du V₂O₅ sont considérés pour le traitement SCR. La quantité utilisée est représentative des incinérateurs suisses, par manque de données spécifiques à la France.

La consommation de produits pour les procédés DeDiox est calculée de la manière suivante dans WILCI, en fonction de la masse de déchets brûlée :

$$Produit(i, p) = Masse_{déchets} \times Facteur\ de\ consommation(i, p)$$

Avec :

- *Produit (i, p)*, la quantité de produit i nécessaire pour l'incinération d'une masse de déchets *Masse_{déchets}*, dans le cas de la mise en œuvre du procédé d'épuration p.
- *Facteur de consommation(i, p)*, le facteur de consommation de produit i spécifique au procédé p (en kg de produits par tonne de déchets), défini pour chaque produit et pour chaque procédé sur base d'une moyenne mesurée sur 90 usines sur la période 2012-2014.

La consommation de produits pour les procédés DeNOx est calculée de la manière suivante, en fonction de la masse de déchets et de la quantité de NOx en sortie de cheminée :

$$\text{Réactif (i, p)} = \text{Masse}_{\text{déchets}} \times \text{Facteur de consommation(i, p)} \times \frac{\text{NOx}_{\text{déchets}}}{\text{NOx}_{\text{déchets moyens}}} \times \%i_p$$

Avec :

- *Réactif (i, p)* la quantité de réactif i nécessaire pour l'incinération d'une masse de déchets *Masse_{déchets}* dans le cas de la mise en œuvre du procédé DeNOx p.
- *Facteur de consommation(i, p)*, le facteur de consommation de réactif i spécifique au procédé p (en kg de réactifs par tonne de déchets), défini pour chaque réactif et pour chaque procédé sur base d'une moyenne mesurée sur 90 usines sur la période 2012-2014.
- $\%i_p$ la part des déchets incinérés pour laquelle le procédé p se fait via le réactif i.
- *NOx_{déchets}* les émissions de NOx en sortie de cheminée pour le déchet évalué et *NOx_{déchets moyens}* les émissions de NOx en sortie de cheminée pour des DMA en moyenne en France.

La consommation de produits pour l'abattement des gaz acides est calculée de la manière suivante dans WILCI :

$$\text{Réactif (i, p)} = \sum_{\text{gaz acides } k} \text{Masse}_k \times \text{dosage stoechiométrique(i, k)} \times \text{facteur d'efficacité(i, p)} \times \%i_p$$

Avec :

- *Réactif (i, p)* la quantité de réactif i nécessaire pour l'incinération d'une masse de déchets *Masse_{déchets}* dans le cas de la mise en œuvre du procédé d'abattement des gaz acides p.
- *Masse_k* la masse de gaz acide k abattu (c'est-à-dire la masse du polluant k se retrouvant dans les résidus de traitement des fumées)
- *dosage stoechiométrique(i, k)* le dosage stoechiométrique du couple réactif i / gaz acide k (en kg de réactif par kg de polluant)
- *facteur d'efficacité(i, p)* le facteur d'efficacité de l'utilisation du réactif i dans le procédé p
- $\%i_p$ la part des déchets incinérés pour laquelle le procédé p se fait via le réactif i.

4.4.1.8. Consommation d'eau et de gaz naturel pour l'épuration des fumées

Les consommations d'eau et de gaz naturel sont tirées de l'outil WILCI. Ces consommations dépendent uniquement des technologies d'abattement des gaz acides.

La consommation d'eau pour l'abattement des gaz acides de chacune des technologies d'épuration des fumées se base sur des entretiens réalisés en 2017 avec des experts des incinérateurs français (Suez, R&V France, TIRU et Veolia).

La consommation de gaz naturel pour l'abattement des NOx et Diox se base sur la publication de Beylot et al. en 2017 sur les installations d'incinération françaises sur la période 2012-2015.

4.4.1.9. Traitement des résidus

Les données utilisées sont les suivantes :

REFI

Les procédés de traitement des fumées produisent des Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération (REFI). Dans cette étude, il est considéré que le mode de traitement des REFI est similaire à celui des REFIOM, issus de l'incinération des ordures ménagères. Les différents types de traitement des REFIOM et leur répartition sont indiqués sur la Figure 26, pour la France (AMORCE, 2012). Cette répartition est également reprise dans la modélisation de l'outil WILCI qui reprend la stabilisation des REFI et leur exutoire.

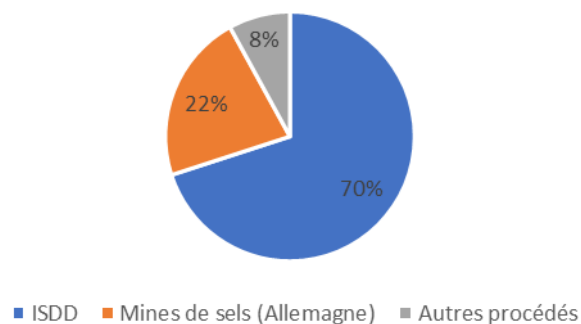


Figure 26 : Mode de traitement des REFIOM (AMORCE, 2012)

Les REFI sont modélisés dans WILCI comme des émissions dans l'eau dues au stockage des REFI en ISDD.

Mâchefers et cendres

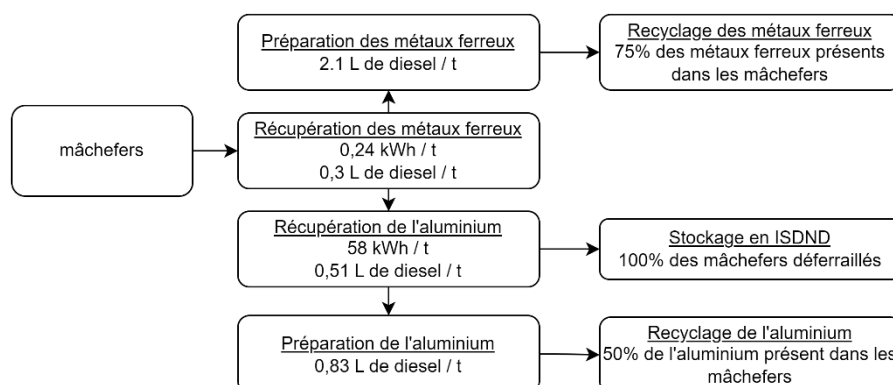


Figure 27 : Exutoire des mâchefers

Les mâchefers passés par un centre de déferailage / maturation.⁵⁷, sont considérés comme étant envoyés dans une ISDND (installation de stockage des déchets non dangereux).

Ces données sont intégrées à l'outil WILCI.

Les métaux ferreux et non ferreux sont déferailés pour être recyclés. 75% des métaux ferreux sont collectés et envoyés en recyclage, 50% de l'aluminium est collecté et envoyé en recyclage. Le déferailage et le pré-traitement des ferrailles impliquent une consommation d'électricité et de diesel. Les consommations sont présentées dans la Figure 27.

La fraction envoyée en ISDND est modélisée par des émissions dans l'eau (une partie des émissions est modélisée comme des émissions à court terme vers les eaux de rivière, et l'autre partie est modélisée comme des émissions à long terme vers les eaux souterraines).

4.4.2. Sources principales des jeux de données d'inventaire du modèle de combustion des déchets

Les procédés utilisés pour le modèle correspondent à ceux utilisés par le modèle WILCI. Ces procédés sont indiqués dans le Tableau 18. La base de données utilisée dans cette étude est ecoinvent 3.9.1, cut off.

Type d'activité	Procédé d'arrière-plan	Géographie	Source
Mix électrique et chaleur	Voir Chapitre 4.5		ecoinvent 3.9
Infrastructures	market for flat glass, coated	GLO	ecoinvent 3.9
	market for concrete, normal	GLO	ecoinvent 3.9
	market for reinforcing steel	GLO	ecoinvent 3.9
	market for glass fibre	GLO	ecoinvent 3.9
	mastic asphalt production	RoW	ecoinvent 3.9
	market for display, liquid crystal, 17 inches	GLO	ecoinvent 3.9
	market for computer, desktop, without screen	GLO	ecoinvent 3.9
	market for switch, toggle type	GLO	ecoinvent 3.9
	market for electronics, for control units	GLO	ecoinvent 3.9

⁵⁷ Le déferailage et la maturation sont modélisés par des consommations d'électricité et de diesel (basé sur la publication d'Allegrini et al. 2015). Voir Figure 27

Type d'activité	Procédé d'arrière-plan	Géographie	Source
	market for transformer, high voltage use	GLO	ecoinvent 3.9
	market for steel, chromium steel 18/8	GLO	ecoinvent 3.9
	market for cable, unspecified	GLO	ecoinvent 3.9
	market for diesel-electric generating set, 10MW	GLO	ecoinvent 3.9
Consommables	market for water, decarbonised, at user	GLO	ecoinvent 3.9
	market for ammonium bicarbonate	GLO	ecoinvent 3.9
	market for lime, hydrated, packed	GLO	ecoinvent 3.9
	market for quicklime, milled, packed	GLO	ecoinvent 3.9
	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	GLO	ecoinvent 3.9
	market for water, deionised, from tap water, at user	RoW	ecoinvent 3.9
	market for ammonia, liquid	RER	ecoinvent 3.9
	market for urea, as N	GLO	ecoinvent 3.9
	market for carbon black	GLO	ecoinvent 3.9
	market for coke	GLO	ecoinvent 3.9
	market for chemical, organic	GLO	ecoinvent 3.9
	market for titanium dioxide	RER	ecoinvent 3.9
	market for chromium oxide, flakes	GLO	ecoinvent 3.9
	market for diesel, burned in building machine	GLO	ecoinvent 3.9
	market for cement, unspecified	GLO	ecoinvent 3.9
Traitement des REFI	market for residual material landfill	GLO	ecoinvent 3.9
Traitement des mâchefers et cendres	market for process-specific burdens, residual material landfill	GLO	ecoinvent 3.9

Tableau 18 : Procédés d'arrière-plan du modèle

4.4.3. Différences dans la valorisation des CSR en unité dédiée à four à lit fluidisé par rapport au four à grille

La valorisation énergétique des CSR en fours à lit fluidisé est modélisée en adaptant le modèle WILCI pour tenir compte des spécificités des fours à lit fluidisé :

- **Technique d'abattement des polluants**

Pour cette étude, il est supposé que le parc d'unités dédiées à four à lit fluidisé possède les mêmes techniques d'abattement des polluants (technologie et répartition) que le parc d'unités dédiées à four à grille.

- **Coefficients de transfert**

Par manque de données spécifiques aux fours à grille et à lit fluidisé, les coefficients de transfert utilisés pour modéliser les fours à lit fluidisé sont les mêmes que pour les fours à grille et sont indiqués en Annexe 3.

- **Rendement thermique**

Le rendement thermique des unités dédiées à fours à lit fluidisé est considéré similaire à celui des unités dédiées à four à grille.

- **Consommation électrique**

La consommation électrique des unités dédiées à four à lit fluidisé est considérée comme étant de 138 kWh par tonne de déchets. Cette consommation est utilisée comme consommation 'par défaut' dans le modèle WILCI pour modéliser les fours à lit fluidisé. Elle est ensuite modifiée par le modèle WILCI pour tenir compte des caractéristiques du déchet

incinéré et des caractéristiques du procédé (volume d'air de combustion requis, volume des fumées, etc.).

- **Excès d'air**

L'excès d'air utilisé pour modéliser les unités dédiées à four à lit fluidisé est de 40% (Antonini, 2005). Cet excès d'air permet d'arriver à une teneur en oxygène à la cheminée de 6% (Suez environnement - Degrémont).

- **Consommation de sable**

Les fours à lit fluidisé utilisent du sable afin d'augmenter le transfert de chaleur entre le lit fluidisé et les gaz chauds.

La consommation de sable est estimée à 10 kg de sable par tonne de CSR.

Ce sable sort de l'unité dédiée à lit fluidisé principalement sous forme de mâchefers et dans une moindre mesure de REFI. Les proportions correspondent au coefficient de transfert pour le Silicium.

Les procédés utilisés pour le modèle de valorisation énergétique des CSR en four à lit fluidisé sont les mêmes procédés que ceux utilisés pour les autres modèles basés sur le modèle WILCI. Ils sont indiqués dans le Tableau 18.

4.4.4. Récapitulatif des données pour les unités dédiées

Le Tableau 19 synthétise les données d'activité différentes entre les deux sortes d'unités dédiées :

Procédé de traitement de déchet	Valorisation en unité dédiée (Four à lit grille)	Valorisation en unité dédiée (Four à lit fluidisé)
Traitement des gaz acides	Procédés secs	
Combustible utilisé	CSR issu de DMA/DAE	
Production d'énergie ou substitution de combustibles	Rendement thermique et électrique identique	
Excès d'air	50%	40%
Consommation électrique 'par défaut'	103kWh/t	138kWh/t
Consommation de sable	-	10kg/t

Tableau 19 : Récapitulatif des données pour les unités dédiées

4.5. Mix énergétiques utilisés

4.5.1. Mix électrique utilisé par la chaufferie

Le mix électrique moyen français est considéré pour modéliser l'énergie utilisée par la chaufferie. En effet, la chaufferie consomme de l'électricité en France. Ainsi, l'inventaire utilisé est issu d'ecoinvent V3.9.1 « market for electricity, medium voltage, FR », représentatif de la période 2014-2022. Ce mix électrique est composé des différents modes de production suivants :

Nucléaire	Hydro	Eolien	Charbon	Biomasse	Biogaz	Lignite	Géothermie, haut fourneau, solaire thermique, charbon (gaz)
72,77%	11,47%	6,76%	0,68%	0,53%	0,23%	0,10%	<0,06%

Tableau 20 : Mix électrique moyen français

Le mix électrique étant amené à évoluer dans les prochaines années, des mix prospectifs sont évalués pour 2030 et 2040. Ces mix électriques sont ceux utilisés dans les travaux de l'ADEME « Transition 2050 » :

Scénario	Nucléaire	Hydro	Eolien terrestre	Eolien en mer	Turbines gaz	Autres thermiques	Photovoltaïque	Autres renouvelables
S1	62%	11%	13%	3%	0%	1%	8%	2%
S2	64%	11%	13%	3%	0%	0%	7%	2%
S3EnR Offshore	60%	10%	13%	3%	3%	0%	8%	2%
S3 Nuc	60%	10%	13%	3%	3%	0%	8%	2%
S4	59%	10%	13%	4%	5%	0%	8%	1%

Figure 28 : Mix électriques français en 2030 selon "transition 2050"

Scénario	Nucléaire	Hydro	Eolien terrestre	Eolien en mer	Turbines gaz	Autres thermiques	Photovoltaïque	Autres renouvelables
S1	39%	13%	23%	7%	0%	0%	15%	2%
S2	45%	12%	20%	9%	0%	0%	13%	2%
S3EnR Offshore	36%	10%	18%	15%	3%	0%	17%	2%
S3 Nuc	43%	10%	18%	8%	2%	0%	17%	2%
S4	42%	8%	16%	13%	4%	0%	15%	2%

Figure 29 : Mix électriques français en 2040 selon "Transition 2050"

Les mix électriques retenus dans cette étude sont les suivants :

Horizon temporel	Nucléaire	Hydro	Eolien terrestre	Eolien en mer	Turbines gaz	Centrale fioul	Photovoltaïque	Géothermique
2030	60%	10%	13%	3%	3%	1%	8%	2%
2040	40%	10%	20%	10%	3%	0%	15%	2%

Tableau 21 : Mix électriques retenus, basé sur les scénarios "Transition 2050"

Les facteurs d'émission de l'ADEME dans Base Empreinte® pour chacune de ces sources d'énergie sont les suivants :

	Nucléaire	Hydro	Eolien terrestre	Eolien en mer	Turbines gaz	Centrale fioul	Photovoltaïque	Géothermique
Facteur d'émission (kg CO ₂ eq / kWh)	0,004	0,006	0,014	0,016	0,418	0,730	0,029	0,045

Tableau 22 : Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie (Base Empreinte®)

Les facteurs d'émission des mix prospectifs moyens pour 2030 et 2040 sont donc les suivants :

- 0,028 kg CO₂ eq / kWh en 2030 et
- 0,024 kg CO₂ eq / kWh en 2040.

4.5.2. Mix de chaleur utilisé par la chaufferie

Le mix de chaleur européen au gaz naturel est considéré pour modéliser la chaleur utilisée par la chaufferie. Comme il n'existe pas de mix spécifique au cadre français dans ecoinvent, un mix européen a été utilisé, car les installations utilisées en Europe sont relativement représentatives des technologies utilisées en France. En revanche, l'approvisionnement du gaz est représentatif de l'Europe et pas précisément de la France, ce qui peut mener à une légère différence avec la réalité.

Il s'agit de l'inventaire ecoinvent V3.9.1 « market for heat, district or industrial, natural gas, Europe without Switzerland ». Cet inventaire comprend un mix de chaufferies au gaz naturel de puissances différentes, utilisées par différents pays européens, ayant des technologies différentes.

Le type de gaz utilisé est amené à évoluer dans les prochaines années. Ainsi, en analyse de sensibilité, une utilisation et un évitement de biogaz est évaluée. Le facteur d'émission du biogaz est de 0,0445 kg CO₂ eq par kWhPCI. Il est issu de la Base Empreinte® et correspond au jeu de données « Biométhane/Injecté dans les réseaux/Mix moyen » pour la France continentale.

4.6. Production d'énergie évitée

Les volets 2 et 3B consistent à comparer la production d'un certain nombre de MWh de chaleur utile à partir de CSR aux alternatives auxquelles elle se substitue, c'est-à-dire la production de chaleur à partir de gaz naturel (pour l'industrie ou pour les réseaux de chaleur).

Plusieurs scénarios prospectifs pour 2030 et pour 2040 sont étudiés dans cette partie (SA, SB et SC) à partir des résultats issus du lot 4.

Les frontières des systèmes étudiés sont étendues aux systèmes évités par ces moyens de production d'énergie :

- La production d'électricité se substitue à la production d'électricité par des moyens de production dédiés, pour la même quantité d'électricité. En cas de base, le mix électrique moyen français est évité. Il s'agit de l'inventaire ecoinvent V3.9.1 « market for electricity, medium voltage, FR »
- La production de chaleur se substitue à la production de chaleur à partir d'une chaufferie au gaz naturel, pour la même quantité de chaleur. Il s'agit de l'inventaire ecoinvent V3.9.1 « heat production, natural gas, at industrial furnace low-NOx >100kW, Europe without Switzerland » (voir Annexe 10).

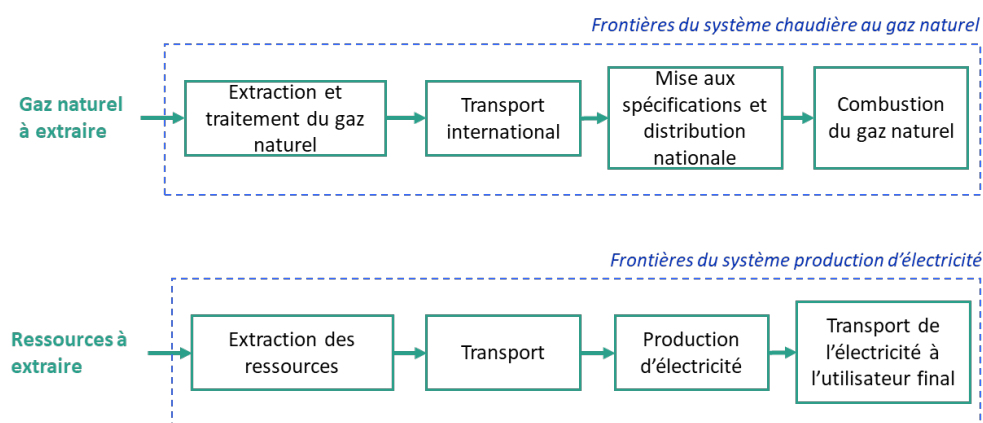


Figure 30 : Volet 3B - Frontières des systèmes évités

Selon les résultats présentés par le lot 4, la chaleur évitée est à destination des réseaux de chaleur urbains (besoin discontinu en chaleur) ou de l'industrie (besoin continu en chaleur). Dans cette étude, l'hypothèse adoptée est que la chaleur évitée est issue de gaz naturel.

4.7. Traitement des déchets évité

Les volets 2 et 3A consistent à comparer le traitement d'une masse de déchets par différents modes de traitement. La production de chaleur avec des CSR permet de ne pas envoyer les DAE/DMA en installation de stockage. Ainsi, le traitement évité (en ISDND) varie selon la composition du CSR. En effet, la fraction non envoyée en ISDND est la même que celle qui est envoyée en CSR (voir Figure ci-dessous) :

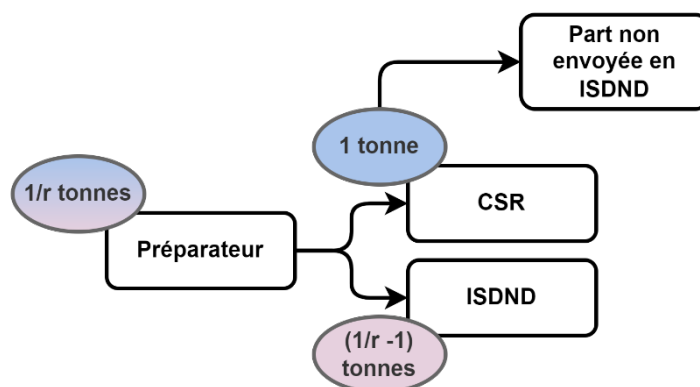


Figure 31 : Part envoyée en ISDND et non envoyée ISDND (r =rendement de préparation)

Les tonnages de déchets pouvant ne pas être envoyés en installation de stockage (voir Chapitre 2.2), pour les compositions étudiées sont rappelés dans le tableau suivant :

Déchets non envoyés en installation de stockage (en Mt)	
Scénario min	2,3 Mt
Scénario max	11,8 Mt

Tableau 23 : Déchets non envoyés en installation de stockage

Le stockage en ISDND est modélisé par flux, avec des données spécifiques à la Suisse (représentatives des installations françaises). Les inventaires du cycle de vie utilisés pour modéliser le stockage en ISDND de chaque flux sont les suivants :

Flux	Inventaire du cycle de vie (Ecoinvent V3.9.1, cut off)
Bois	Treatment of waste wood, untreated, sanitary landfill, CH
Papier – carton	Treatment of waste paperboard, sanitary landfill, CH
Plastiques	Treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill, CH
Autres combustibles	50% treatment of waste polyurethane, sanitary landfill, CH
	10% treatment of waste yarn and waste textile, unsanitary landfill, RoW
	40% Treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill, CH
Autres non combustibles	50 % treatment of inert waste, sanitary landfill, CH
	50% treatment of waste aluminium, sanitary landfill, CH

Tableau 24 : ICV utilisés pour modéliser le stockage en ISDND

Ecoinvent a développé un modèle de mise en décharge qui permet de calculer sur la base de la composition des déchets, les émissions des polluants dans les lixiviats et la production de biogaz.

Les principes de modélisation sont présentés ci-dessous.

Le flux de déchets entrant est caractérisé selon :

- les 41 éléments chimiques principaux qui le composent ;
- le taux de carbone organique ;
- le taux de dégradation du déchet à 100 ans.

Les **émissions dans l'air et dans l'eau** dépendent directement du type de déchet et du taux de dégradation de celui-ci.

- Des coefficients de transfert pour chaque élément chimique sont utilisés pour modéliser les émissions vers l'air et vers l'eau.

Ces coefficients de transfert sont issus d'un bilan massique moyen réalisé en entrée et en sortie de différents centres de stockage et d'hypothèses de modélisation (actuellement basées sur la modélisation Ecoinvent).

La modélisation des émissions (dans l'air et dans l'eau) est séparée suivant 2 horizons temporels pour pouvoir prendre en compte l'ensemble des impacts potentiels d'une installation de stockage sur l'ensemble de la durée d'exploitation de celle-ci :

- Les émissions ayant lieu à court terme : de t_0 à $t_0 + 100$ ans
- Les émissions ayant lieu à long terme : de $t_0 + 100$ à $t_0 + 60\,000$ ans

Cette séparation des émissions à court et long terme a une influence sur l'indicateur eutrophisation marine (voir Chapitre 5.5) qui est fortement lié aux émissions dans l'eau. Ces deux types d'émissions sont séparées afin de mettre en avant les émissions court terme du stockage en ISDND, dont on est sûr qu'elles adviendront, alors que les émissions long terme dus à la rupture de la membrane des installations de stockage semblent plus incertaines.

Par exemple, sur cet indicateur, le stockage d'une tonne de carton représente 1,82 kg N eq. lorsqu'on s'intéresse à toutes les émissions (court terme + long terme), et 1,66 kg N eq. lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux émissions court terme. En effet, l'inventaire du cycle de vie utilisé considère les émissions à long-terme suivantes :

- Emissions vers l'eau d'ammonium, de nitrate et de nitrite.
- Emissions vers l'air de nitrate, NOx et d'ammoniac.

Les émissions d'ammonium vers l'eau représentent 95% des émissions à long-terme.

Le modèle inclut la fabrication et la fin de vie des infrastructures de l'installation de stockage (y compris l'utilisation des sols). Les infrastructures sont amorties en fonction de la durée de vie de l'unité et de la quantité de déchets stockés.

Pour la fraction de déchets biogénique qui est dégradée en ISDND, les hypothèses utilisées sont issues du cadre de référence pour les emballages de l'ADEME (voir Figure 16 du Chapitre 3.2.3.2)

En analyse de sensibilité, le modèle prend également en compte la production d'énergie à partir de biogaz issu des déchets stockés.

5. Résultats pour les cas de base

5.1. Méthodologie associée à la présentation des résultats

Comme présenté dans les chapitres précédents, en cas de base, 3 compositions de CSR sont étudiées :

- Un CSR ayant un PCI de 13 MJ/kg, avec un taux de biogénique en énergie de 55%.
- Un CSR ayant un PCI de 14 MJ/kg, avec un taux de biogénique en énergie de 40%.
- Un CSR ayant un PCI de 16 MJ/kg, avec un taux de biogénique en énergie de 30%.

Chaque composition correspond à un type de four selon son PCI. En effet, un four à grille est considéré pour les CSR ayant un PCI de 13 ou 14 MJ/kg et un four à lit fluidisé est considéré pour le CSR ayant un PCI de 16 MJ/kg.

Pour chacune des compositions, 3 types de chaufferies sont étudiées :

- Une chaufferie produisant de la chaleur seule, avec un débouché continu.
- Une chaufferie produisant de la chaleur et de l'électricité en cogénération avec un débouché continu pour la chaleur, c'est-à-dire raccordée à une industrie.
- Une chaufferie produisant de la chaleur et de l'électricité en cogénération sans débouché continu pour la chaleur, c'est-à-dire raccordée à un réseau de chaleur urbain.

Pour résumer, l'ensemble des systèmes suivants sont étudiés :

- Composition CSR 1 (PCI 13, 55% biogénique) :
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Cogénération reliée à une industrie
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Cogénération reliée à un réseau de chaleur urbain
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Chaleur seule
- Composition CSR 2 (PCI 14, 40% biogénique) :
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Cogénération reliée à une industrie
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Cogénération reliée à un réseau de chaleur urbain
 - Unité CSR dédiée en four à grille – Chaleur seule
- Composition CSR 3 (PCI 16, 30% biogénique) :
 - Unité CSR dédiée en four à lit fluidisé – Cogénération reliée à une industrie
 - Unité CSR dédiée en four à lit fluidisé – Cogénération reliée à un réseau de chaleur urbain
 - Unité CSR dédiée en four à lit fluidisé - Chaleur seule

Les résultats sont regroupés par phase du cycle de vie.

Nom de la phase	Explication
Amont chaufferie	Il s'agit des consommations d'eau, d'électricité et de chaleur lors de la préparation du CSR ainsi que son transport du centre de préparation jusqu'à la chaufferie. Il s'agit aussi du traitement de la fraction hors CSR obtenue à l'issue de la préparation ainsi que son transport du centre de préparation jusqu'à l'ISDND.
Combustion - infrastructure	Il s'agit de l'amortissement des matériaux de l'infrastructure.
Combustion – réactifs	Il s'agit de la consommation de produits chimiques et matériaux pour la combustion et pour le traitement des fumées.

Nom de la phase	Explication
Combustion – émissions	Il s'agit des émissions vers l'air, l'eau et les sols liés à la combustion des CSR.
Combustion – consommation d'énergie	Il s'agit de la consommation d'électricité et de chaleur nécessaire pour le fonctionnement de la chaufferie.
Traitement des résidus	Il s'agit de l'exutoire des résidus solides.
Production d'énergie évitée	Il s'agit de la production d'énergie qui aurait eu lieu avec d'autres moyens de production d'énergie (électricité et chaleur), si la filière CSR n'était pas en place.
Traitement de déchets évité	Il s'agit du système de traitement (filière ISDND) que les déchets (CSR et fraction hors CSR) auraient suivis si la filière CSR n'était pas en place.

Tableau 25 : Phases du cycle de vie étudiées dans les résultats

Note : les couleurs utilisées pour chaque phase sont conservées tout au long du document.

Pour rappel, pour le volet 1, les résultats sont toujours présentés sans évitement.

Pour le volet 2, les résultats sont présentés à la fois en prenant en compte les évitements liés :

- au traitement des déchets (stockage en ISDND) et
- à la production d'énergie (chaleur et/ou électricité),

Pour le volet 3, les résultats sont présentés séparément en prenant en compte les évitements liés :

- au traitement des déchets (volet 3-A) ou
- à la production d'énergie (volet 3-B).

5.2. Organisation des résultats

Les résultats pour chaque volet et chaque section sont organisés en 3 temps :

1/	Rappel de l'objectif du volet étudié et de l'unité fonctionnelle dans un encadré noir
2/	Présentation des principaux enseignements en début de section dans un encadré de couleur « rose »
3/	Présentation des résultats détaillés dans le corps du texte

5.3. Sélection des indicateurs pertinents

Le JRC a développé des facteurs de normalisation et pondération associés aux méthodes de caractérisation des impacts de la méthode PEF (voir Annexe 6). Ces facteurs sont utilisés pour la sélection des indicateurs pertinents pour l'étude.

A l'issue de ce processus, les indicateurs de catégories d'impact suivants ont été sélectionnés pour les volets 1 et 2 (ces catégories d'impact sont expliquées dans l'Annexe 7) :

- Changement climatique
- Acidification
- Eutrophisation marine

- Particules fines
- Ressources fossiles et nucléaires
- Radiations ionisantes

Ces catégories, présentant une contribution importante avec la méthode PEF sont pertinentes pour les deux volets au vu des processus étudiés.

La somme de la contribution de ces 6 indicateurs représente a minima à 80% des résultats normalisés et pondérés, pour les deux volets étudiés.⁵⁸

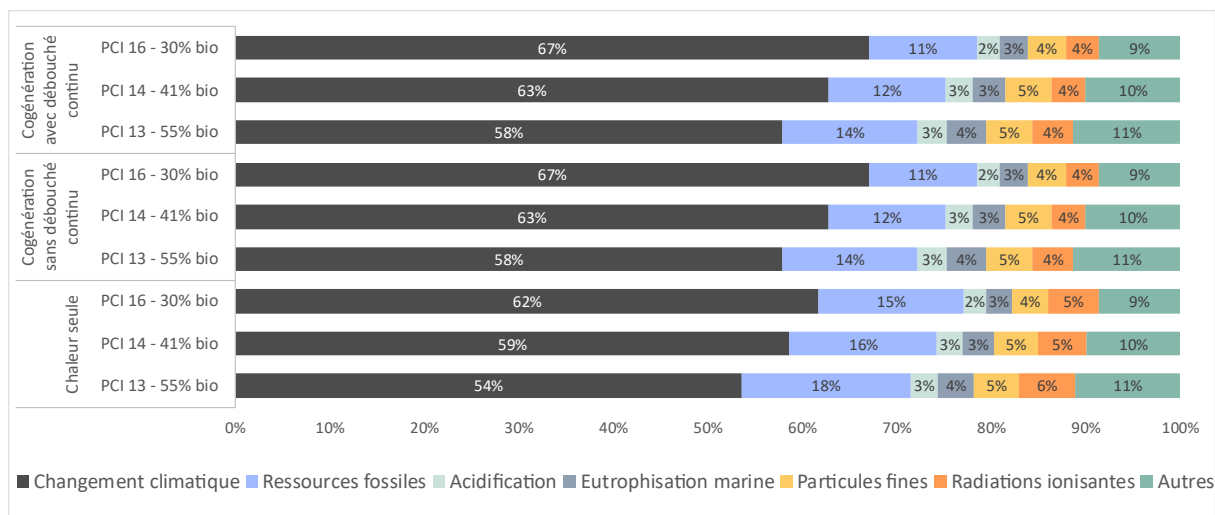


Figure 32 : Contribution des catégories d'impacts au score unique pour le volet 1 (résultats normalisés et pondérés)

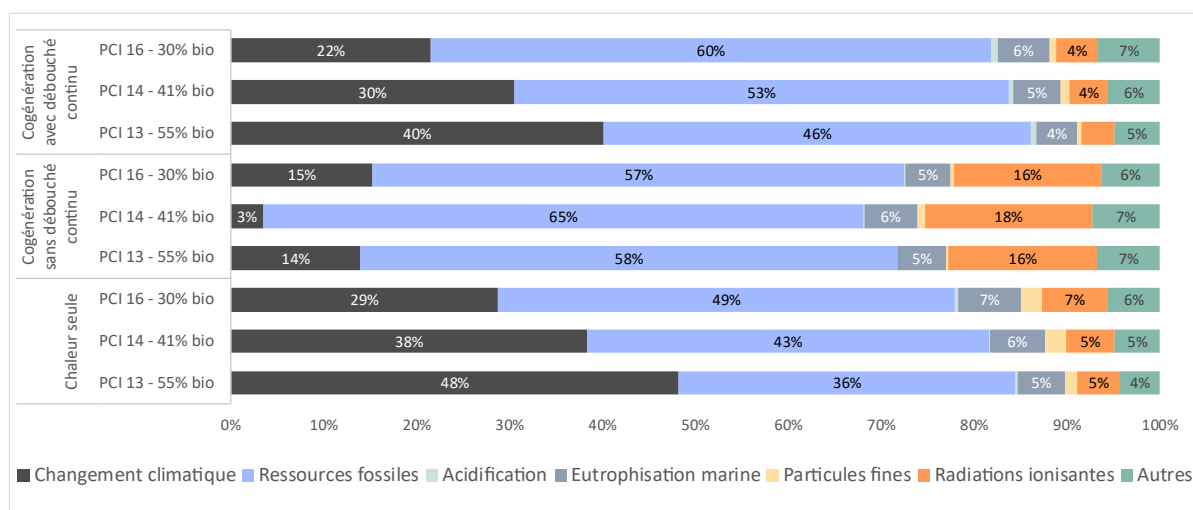


Figure 33 : Contribution des catégories d'impacts au score unique pour le volet 2 (résultats normalisés et pondérés)

En utilisant une autre méthode de pondération (iso-pondération), ces 6 indicateurs ressortent également comme les plus pertinents à utiliser, puisqu'ils représentent environ 80% de l'impact total normalisé-iso-pondéré.

⁵⁸ Point d'attention : il n'est pas possible de comparer les différentes compositions entre elles sur base de ce graphique, qui est en pourcentage rapporté à 100%.

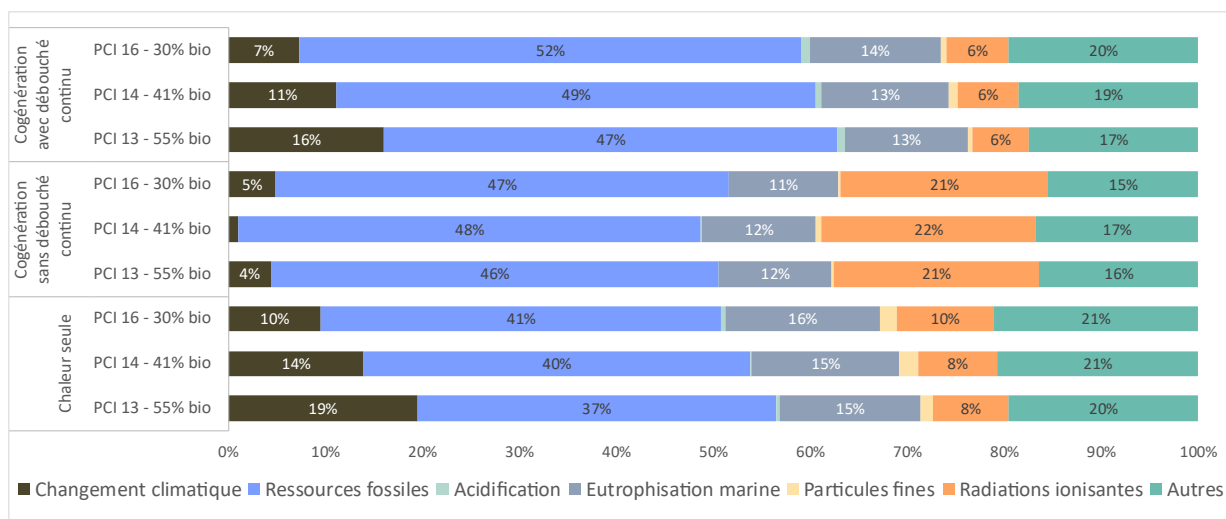


Figure 34 : Contribution des catégories d'impacts pour le volet 2, avec iso-pondération

Les résultats bruts pour chaque volet, en valeur absolue, sont disponibles en Annexe 8.

5.4. Volet 1 – Préparation et combustion – Multicritères

Rappel :

Le volet 1 vise à conforter les connaissances de l'ADEME sur la filière CSR (préparation et combustion)

Le volet 1 traite de la préparation d'une tonne de CSR et sa valorisation en chaufferie dédiée.

Le traitement d'une tonne de CSR en unité dédiée permet de générer l'énergie utile suivante :

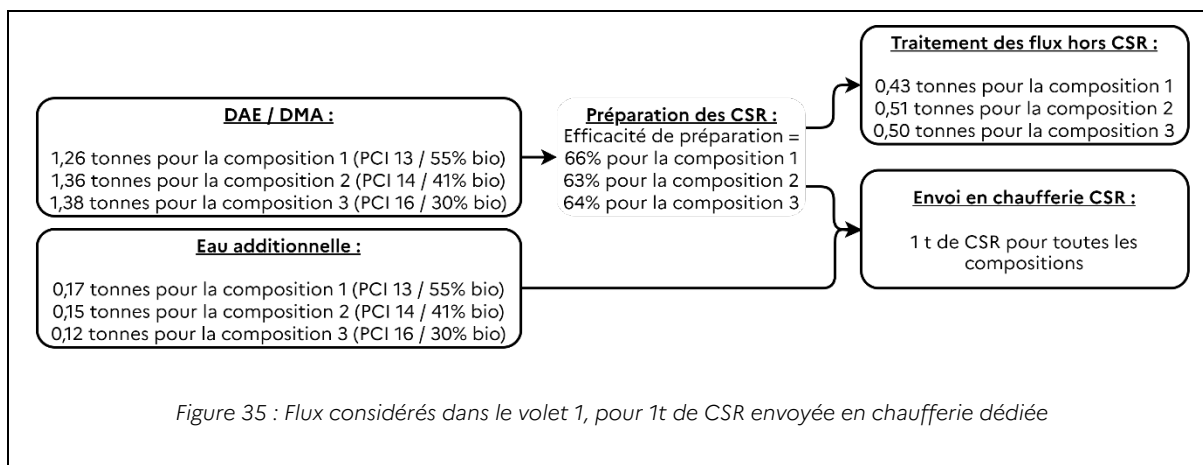
Composition	Chaleur			Cogénération sans débouché continu pour la chaleur			Cogénération avec débouché continu pour la chaleur		
	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio
Electricité produite ⁵⁹ (MWh/tonne)	/	/	/	0.94	1.02	1.19	0.36	0.39	0.45
Chaleur produite ⁶⁰ (MWh/tonne)	2.87	3.11	3.63	1.20	1.30	1.51	2.69	2.91	3.40

Tableau 26 : Quantité d'énergie produite pour une tonne de CSR envoyée en chaufferie dédiée

Les flux considérés pour ce volet sont les suivants :

⁵⁹ L'électricité produite est calculée de la manière suivante : $Electricité\ produite = PCI \times Rendement\ électrique \times masse\ entrante$

⁶⁰ La chaleur produite est calculée de la manière suivante : $Chaleur\ produite = PCI \times Rendement\ thermique \times masse\ entrante$



5.4.1. Etapes les plus contributrices

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Pour les différents critères environnementaux :

- Pour la plupart des critères environnementaux en lien avec des émissions dans l'air (changement climatique et acidification), les **émissions directes lors de la combustion** contribuent fortement à ceux-ci et représentent entre 45-88% de la contribution suivant les critères considérés (cf. Figure 36 ci-dessous).
- Pour les critères environnementaux « ressources fossiles et nucléaires » et « radiations ionisantes », la **consommation d'énergie, en particulier d'électricité pour la préparation (amont chaufferie) et pour le fonctionnement de la chaufferie (combustion – consommation d'énergie)**, représentent les principales contributions.
- Pour le critère environnemental « Particules », la contribution principale provient du **traitement des résidus de combustion** et plus particulièrement du traitement des mâchefers.
- Pour le critère environnemental « Eutrophisation marine », le **traitement des flux hors CSR (amont chaufferie)** représentent la contribution principale.

Pour les différentes typologies de CSR :

La composition des CSR a peu d'influence sur la répartition de la contribution des différentes étapes du cycle de vie.

Pour les différents types de valorisation de l'énergie issue de la combustion du CSR :

Le type de chaufferie utilisé (produisant de la chaleur seule ou en cogénération) a une influence sur la répartition de la contribution des différentes étapes pour les catégories d'impact en lien avec l'énergie, c'est-à-dire les « ressources fossiles et nucléaires » et les « radiations ionisantes ».

Pour chacun des indicateurs retenus, la contribution des différentes étapes de la filière CSR aux impacts environnementaux est la suivante.⁶¹ :

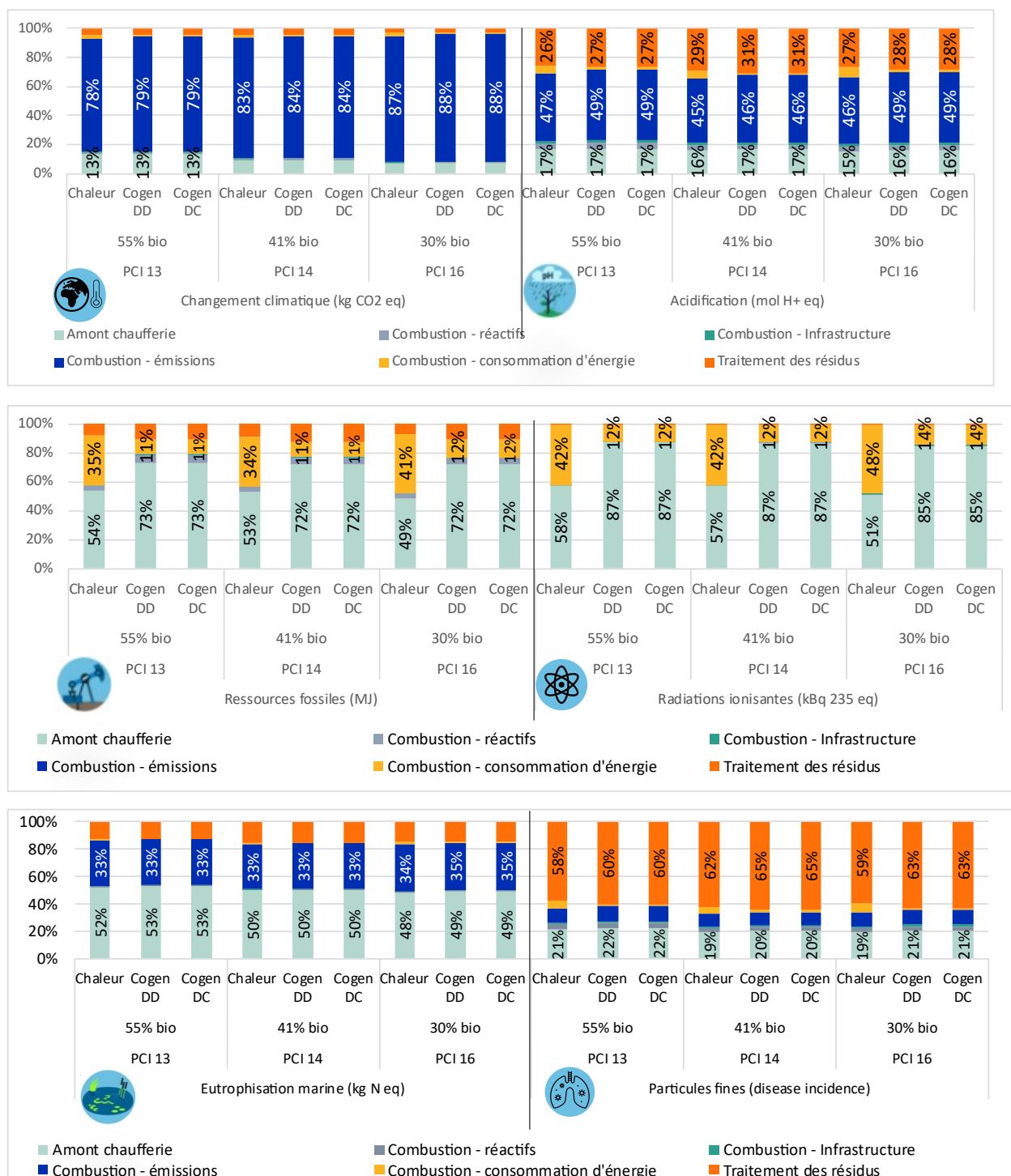


Figure 36 : Contribution des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux de la filière CSR - volet 1

Sur l'indicateur changement climatique, pour tous les scénarios, ce sont les émissions vers l'air lors de la combustion qui contribuent le plus. Parmi ces émissions, les émissions de CO₂ fossile représentent la quasi-totalité des émissions (>98% des émissions vers l'air).

Les émissions dans l'air sont également les plus contributrices sur l'indicateur acidification. Les NO_x en particulier représentent la quasi-totalité des émissions dans l'air (Combustion – émissions sur la Figure 36).

⁶¹ Cogen DD : cogénération avec débouché discontinu / Cogen DC : cogénération avec débouché continu

Ces NOx peuvent être soit liés à la quantité d'azote présente dans le déchet (NOx combustible), soit lié à la quantité d'azote présente dans l'air lors de la combustion (NOx thermique).

Le traitement des flux hors CSR en ISDND (Amont chaufferie sur la Figure 36) est très contributeur sur l'indicateur eutrophisation marine.

Lors du pré-traitement des mâchefers, du diesel est utilisé (Traitement des résidus sur la Figure 36), et sa combustion contribue fortement sur les indicateurs particules fines et acidification, car la combustion de diesel lors du processus émet des NOx.

Sur l'indicateur ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes, la consommation d'énergie pour préparer le CSR et pour faire fonctionner la chaufferie, notamment l'électricité, est très contributrice.⁶² La consommation d'électricité contribue plus pour les chaufferies produisant de la chaleur seule par rapport à celles faisant de la cogénération. En effet, les chaufferies de cogénération produisent de l'électricité, qu'elles auto-consomment en partie pour fonctionner, ce qui permet de ne pas recourir au mix électrique issu du réseau, alors que les chaufferies produisant de la chaleur seule utilisent de l'électricité, principalement fossile, issue de ressources nucléaires.

5.4.2. Flux élémentaires les plus contributeurs

Les principaux flux contributeurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Changement climatique	Acidification	Eutrophisation marine	Particules fines	Ressources fossiles et nucléaires	Radiations ionisantes
Flux contributeurs	CO ₂ fossile	NOx	Ammonium, NOx	Particules PM _{2,5}	Uranium, gaz naturel	Radon. ⁶³ , carbone 14. ⁶⁴
Cause	Émissions directes dans l'air	Emissions directes dans l'air lors de la combustion et diesel (pré-traitement des mâchefers)	Emissions dans l'eau lors du stockage des flux hors CSR Emissions directes dans l'air lors de la combustion	Diesel (pré-traitement des mâchefers)	Electricité	
Etape du cycle de vie	Combustion émissions	Combustion émissions Traitement des résidus - Mâchefers	Amont chaufferie Combustion émissions	Traitement des résidus - Mâchefers	Amont chaufferie Combustion -consommation	

Tableau 27 : Flux contributeurs principaux lors de la préparation et de la combustion de CSR

⁶² La production d'électricité en France est autour de 70% d'origine nucléaire.

⁶³ Le radon est produit par la désintégration de l'uranium, naturellement présent dans la roche et le sol. Le radon est libéré dans l'air lors de l'extraction du minerai d'uranium et, dans une moindre mesure lors de la production de combustible à base d'uranium pour les centrales nucléaires.

⁶⁴ Le carbone 14 est émis dans l'air lors du traitement du combustible usé et de la production d'électricité à partir de nucléaire

5.4.3. Impact unitaire pour 1 tonne de CSR

L'impact pour chaque indicateur de la combustion d'une tonne de CSR est présenté dans le Tableau suivant pour la production de chaleur seule (Tableau 28), et pour la cogénération avec ou sans débouché continu pour la chaleur (Tableau 29) :

- L'« amont » correspond à la préparation des CSR ainsi que leur transport jusqu'à la chaufferie et le traitement des flux hors CSR.
- La partie « chaufferie CSR » correspond à l'amortissement de l'infrastructure, aux consommations de réactifs et d'énergie, ainsi que les émissions lors de la combustion et le traitement des résidus de combustion.

Les résultats sont calculés pour les indicateurs présentés au Chapitre 3.2.4, et présentés uniquement pour les indicateurs pertinents sélectionnés au Chapitre 5.3.

Une tonne de CSR préparée et consommée en chaufferie dédiée engendre, selon la composition du CSR plus ou moins élevée en biogénique et le type de chaufferie utilisé (chaleur seule ou cogénération) :

- Entre 500 – 1000 kg CO₂ eq par tonne de CSR brûlée pour le changement climatique,
- Entre 0,7 et 0,9 moles H⁺ eq par tonne de CSR pour l'acidification
- Entre 0,7 et 0,8 kg N eq par tonne de CSR pour l'eutrophisation marine
- Entre 8 et 11 E-6 incidence des maladies par tonne de CSR pour les particules fines
- Entre 2800 et 5200 MJ pour les ressources fossiles et nucléaires
- Entre 90 et 200 kBq U235 eq pour les radiations ionisantes

<u>Pour 1 t de CSR envoyée en chaufferie (production de chaleur seule)</u>		Changement climatique kg CO ₂ eq	Acidification Mol H ⁺ eq	Eutrophisation marine kg N eq	Particules fines Incidence des maladies	Ressources fossiles et nucléaires MJ	Radiations ionisantes kBq U235 eq
PCI 13 55% bio	Amont (1)	70	0,12	0,37	1,9E-06	2097	81
	Chaufferie CSR (2)	467	0,62	0,33	7,0E-06	1810	59
	Total (1) + (2)	537	0,74	0,70	8,8E-06	3907	140
PCI 14 40% bio	Amont (1)	67	0,13	0,37	2,1E-06	2229	85
	Chaufferie CSR (2)	659	0,71	0,37	8,6E-06	1983	63
	Total (1) + (2)	726	0,84	0,75	1,1E-05	4212	148
PCI 16 30% bio	Amont (1)	66	0,14	0,38	2,2E-06	2559	100
	Chaufferie CSR (2)	902	0,78	0,41	9,1E-06	2680	94
	Total (1) + (2)	968	0,92	0,79	1,1E-05	5239	195

Tableau 28 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR (production de chaleur seule) - volet 1

<u>Pour 1 t de CSR envoyée en chaufferie (avec cogénération)</u>		Changement climatique kg CO ₂ eq	Acidification Mol H ⁺ eq	Eutrophisation marine kg N eq	Particules fines Incidence des maladies	Ressources fossiles et nucléaires MJ	Radiations ionisantes kBq U235 eq
PCI 13 55% bio	Amont (1)	70	0,12	0,37	1,9E-06	2097	81
	Chaufferie CSR (2)	460	0,59	0,33	6,6E-06	767	12
	Total (1) + (2)	530	0,71	0,69	8,4E-06	2864	92
PCI 14 40% bio	Amont (1)	67	0,13	0,37	2,1E-06	2229	85
	Chaufferie CSR (2)	652	0,67	0,37	8,2E-06	867	13
	Total (1) + (2)	718	0,81	0,74	1,0E-05	3096	98
PCI 16 30% bio	Amont (1)	66	0,14	0,38	2,2E-06	2559	100
	Chaufferie CSR (2)	891	0,73	0,39	8,4E-06	987	18
	Total (1) + (2)	957	0,87	0,77	1,1E-05	3546	118

Tableau 29 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR (cogénération avec ou sans débouché continu pour la chaleur) - volet 1

Les résultats issus des deux tableaux ci-dessus sont présentés par indicateur dans les graphiques ci-dessous :



Figure 37 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR - volet 1

Sur l'indicateur changement climatique, les émissions varient avec le PCI du CSR. En effet, plus ce dernier est élevé et dès lors composé d'autres flux de déchets que ceux issus de la biomasse, plus les émissions sont élevées. En d'autres termes, plus le taux de biogénique est élevé, moins le taux de carbone fossile l'est, ce qui limite les émissions de carbone fossile. Pour rappel (voir Chapitre 3.2.3.4), les émissions de carbone fossile et biogénique sont distinguées et ne contribuent pas de la même manière :

- 1 kg de CO₂ biogénique n'a pas d'impact,
- 1 kg CO₂ fossile émet 1 kg CO₂ équivalent,
- 1 kg de CH₄ biogénique émet 27 kg de CO₂ équivalent,
- 1 kg de CH₄ fossile émet 29,8 kg de CO₂ équivalent.

La contribution à l'acidification et à l'eutrophisation marine augmente légèrement avec le PCI. Cela s'explique en partie par le fait que la composition du CSR a une influence sur les émissions qui ont lieu lors de la combustion. Plus le PCI augmente, plus les émissions NO_x thermique⁶⁵ sont élevées, et ne sont pas toutes captées par le système de filtration.

La quantité de NO_x thermique varie avec la composition des CSR. Dans l'outil WILCI, la quantité de NO_x thermique est proportionnelle au volume d'air utilisé pour la combustion de la fraction de déchets dans la chaufferie. En effet, un excès d'air favorise la formation de NO_x en augmentant la disponibilité

⁶⁵ Pour rappel, les NO_x thermiques sont formés par l'oxydation de l'azote contenu dans l'air tandis que les NO_x combustibles sont formés par l'oxydation de l'azote contenu dans le déchet.

d'oxygène pour réagir avec l'azote. Ainsi, le volume d'air nécessaire pour cette combustion est calculé en fonction de la composition du CSR, en particulier en fonction de sa quantité de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Dans le cas présent, plus le PCI est élevé, plus le volume d'air nécessaire pour la combustion est élevé, et plus la quantité de NOx thermique est élevée.

La quantité de NOx combustible dépend du type de four : elle est légèrement plus élevée pour les fours à grille que pour les fours à lits fluidisés.

La contribution du prétraitement des mâchefers augmente avec le taux de résidus métalliques, car plus la part de métaux est importante, plus l'étape de déferraillage est lourde (bien que cette part de métaux reste faible (entre 8% et 10% de la masse du CSR). Ainsi, plus il y a de résidus métalliques⁶⁶, plus l'impact sur les indicateurs particules fines, acidification et eutrophisation marine est important.

Sur l'indicateur ressources fossiles et nucléaires, la composition apporte peu de différence. Cependant, il est possible d'observer que les fours à lit fluidisé consomment plus d'énergie, ce qui ressort légèrement sur l'indicateur ressources fossiles et nucléaires, ainsi que sur l'indicateur radiations ionisantes. Le four à lit fluidisé consomme 138 kWh/t lors de la combustion (103 kWh/t pour le four à grille), et 120 kWh/t pour la préparation (100 kWh/t pour le four à grille).

Le type d'énergie produite (chaleur uniquement ou cogénération) fait fortement varier les émissions de radiations ionisantes ainsi que l'épuisement des ressources fossiles et nucléaires. En effet, comme vu au Chapitre 5.4.1, les chaufferies produisant de la chaleur seule consomment plus d'énergie fossile que les chaufferies en cogénération, qui auto-consomment une partie de l'électricité qu'elles produisent.

⁶⁶ Pour rappel, le CSR ayant un PCI de 13 est composé à 7,5% de métaux, et les CSR ayant un PCI de 14 et de 16 sont composés à 10% de métaux

5.5. Volet 2 – Préparation, combustion et systèmes évités – Multicritères

Rappel :

Le volet 2 vise à alimenter un outil d'aide à l'instruction de l'empreinte environnementale de nouveaux projets en territoire (outil à développer par la suite par l'ADEME) afin de guider les acteurs de la filière et les acteurs institutionnels sur l'intérêt environnemental d'une filière CSR comparée à une orientation vers des installations de stockage des déchets.

Le volet 2 traite de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée, en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND et l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

Les flux de déchets considérés pour ce volet sont les suivants :

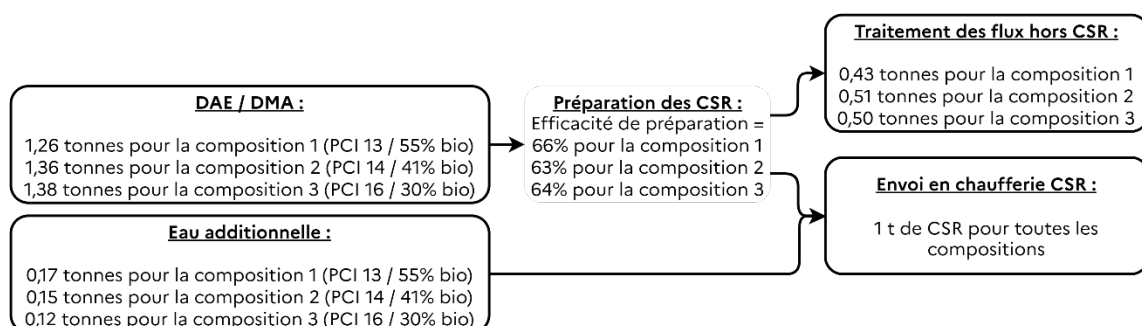


Figure 38 : Flux considérés dans le volet 2, pour une tonne de CSR envoyée en chaufferie dédiée

5.5.1. Contributions des systèmes évités aux différents critères environnementaux

Le tableau suivant présente les contributions aux différents critères environnementaux des deux systèmes évités suite au déploiement de la filière CSR :

- Production d'1 MWh de chaleur à partir de gaz naturel
- Stockage d'1 tonne de déchets en ISDND

		Changement climatique kg CO ₂ eq	Acidification Mol H ⁺ eq	Eutrophisation marine kg N eq	Particules fines Incidence des maladies	Ressources fossiles et nucléaires MJ	Radiations ionisantes kBq U235 eq
1 MWh de chaleur produite à partir de gaz naturel		292	0,25	0,08	1,3E-6	4433	4,6
1 tonne de déchets stockée en ISDND	PCI 13 55% bio	260	0,11	1,54	2,3E-06	352	1,58
	PCI 14 40% bio	224	0,12	1,63	2,5E-06	388	1,75
	PCI 16 30% bio	210	0,12	1,79	2,5E-06	393	1,75

Tableau 30 : Impacts environnementaux pour les systèmes alternatifs – Volet 2

5.5.2. Contributions d'une tonne de CSR aux différents critères environnementaux

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous. Le détail est présenté dans un second temps.

- Pour les critères environnementaux « ressources fossiles et nucléaires » et « eutrophisation marine », l'absence d'envoi de déchets en installation de stockage et la valorisation de l'énergie issue de la combustion des déchets préparés sous forme de CSR engendre des bénéfices environnementaux⁶⁷.
- Pour le critère environnemental « particules fines », l'absence d'envoi de déchets en installation de stockage et la valorisation de l'énergie issue de la combustion des déchets préparés sous forme de CSR n'engendre pas de bénéfices environnementaux.
- Pour le critère environnemental « acidification », l'absence d'envoi de déchets en installation de stockage et la valorisation de l'énergie issue de la combustion des déchets préparés sous forme de CSR engendre des bénéfices environnementaux si :
 - la chaufferie produit de la chaleur seule
 - ou si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et qu'elle a un débouché continu pour la chaleur.

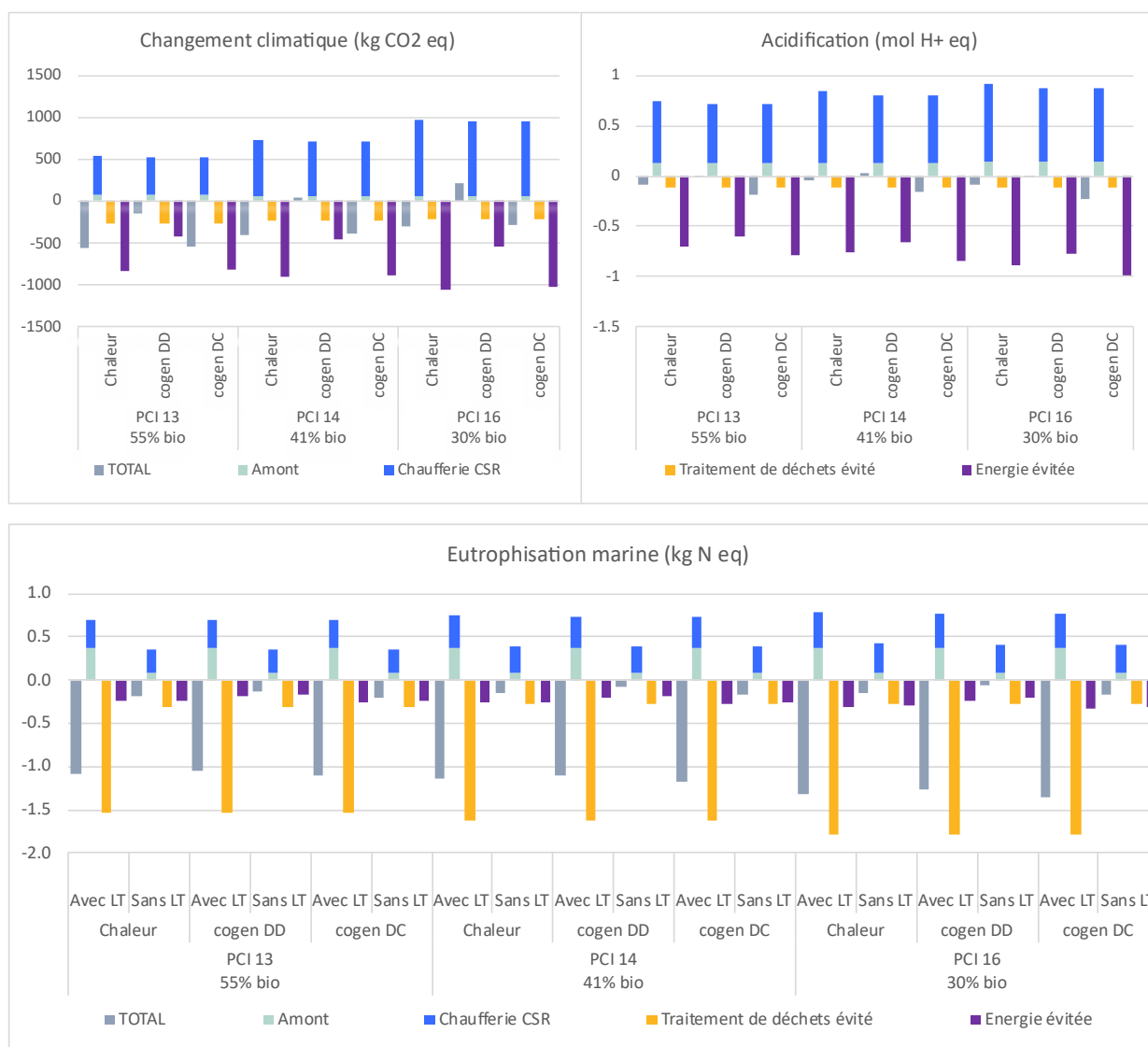
Le bénéfice est nul si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et qu'elle n'a pas de débouché continu pour la chaleur.
- Pour le critère environnemental « changement climatique », l'absence d'envoi de déchets en installation de stockage et la valorisation de l'énergie issue de la combustion des déchets préparés sous forme de CSR engendre des bénéfices environnementaux si :
 - la chaufferie produit de la chaleur seule
 - ou si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et a un débouché continu pour la chaleur

⁶⁷ La préparation et combustion de CSR engendre des bénéfices environnementaux lorsque les bénéfices liés à l'évitement de la production d'énergie et au traitement des déchets sont plus importants que les impacts liés à la préparation et à la combustion des CSR, ainsi que le traitement des résidus.

- ou si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération sans débouché continu et que le CSR a un taux biogénique en énergie du CSR de 55% ou plus (Une analyse plus fine des taux biogéniques en énergie situés entre 40% et 55% a été effectuée en analyse de sensibilité).

Cela engendre un dommage si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération sans débouché continu et que le CSR a un taux biogénique en énergie de 40% ou moins.

- Pour le critère environnemental « radiations ionisantes », l'absence d'envoi de déchets en installation de stockage et la valorisation de l'énergie issue de la combustion des déchets préparés sous forme de CSR engendre des bénéfices environnementaux si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et un dommage si la chaufferie produit de la chaleur seule (dans ce cas, il n'y a pas d'évitement de la production d'électricité avec les centrales nucléaires).



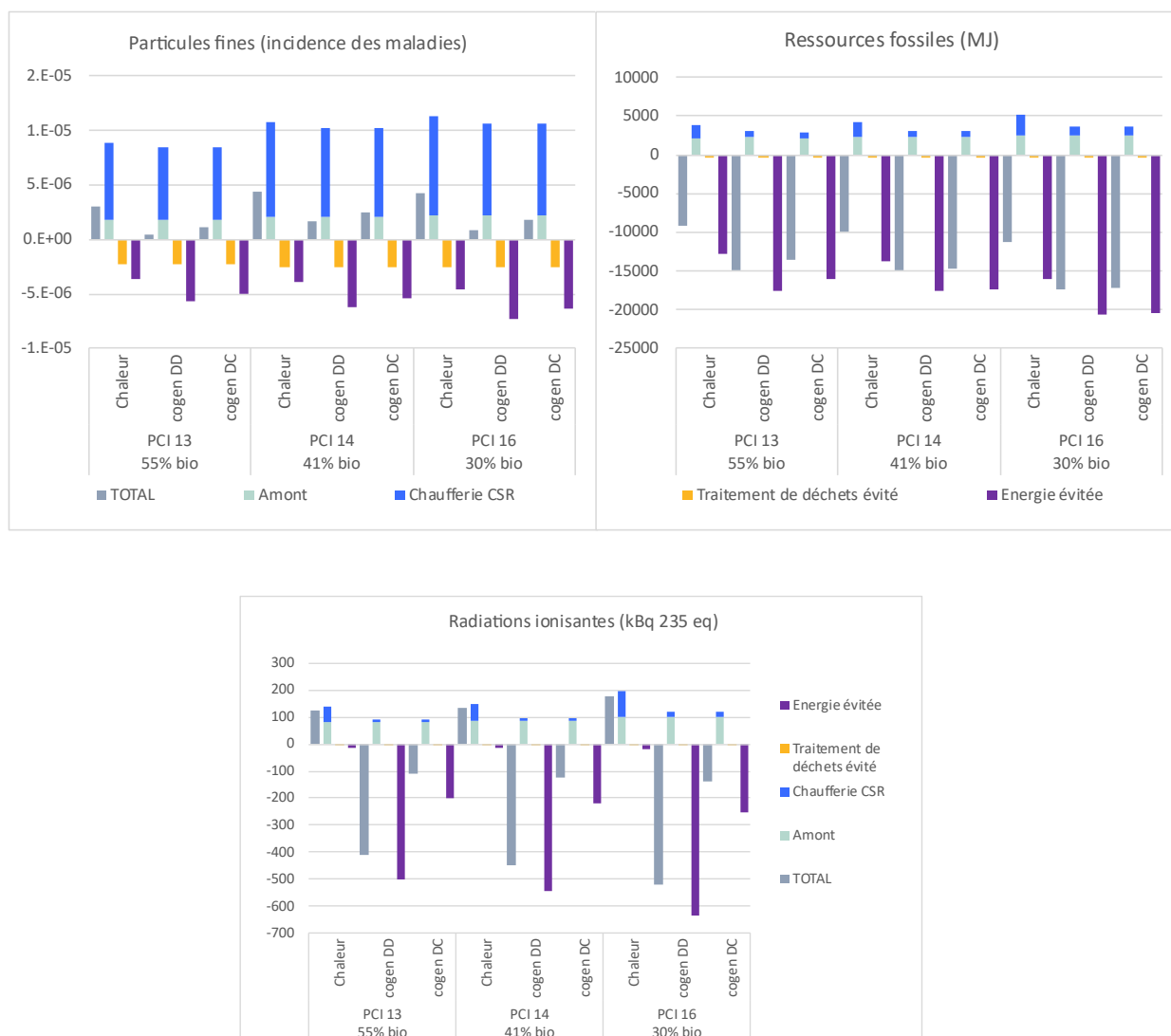


Figure 39 : Impacts environnementaux de la filière CSR pour une tonne de CSR en chaufferie dédiée - volet 2 (2/2)

Rappel : les impacts environnementaux bruts pour ces 6 indicateurs environnementaux sont résumés par étape du cycle de vie dans l'Annexe 8 sous forme de tableau.

Les bénéfices liés à **l'évitement du stockage des CSR** sont très importants sur l'eutrophisation marine. Cela est dû au fait que le stockage du polyuréthane, du papier et du plastique a un fort impact sur cet indicateur, puisque le stockage de ces flux induit des émissions vers l'eau. Les trois procédés émettent de l'ammonium, et le stockage du papier émet également des nitrates. Cependant, les bénéfices du stockage sur l'eutrophisation marine sont principalement dus à des évitements d'émissions à long terme, c'est-à-dire des émissions qui auront lieu entre 100 et 60 000 ans après l'enfouissement. En effet, pour les trois compositions, 80% à 85% des bénéfices liés à l'évitement du stockage sont liés à des émissions à long terme, contre 15% à 20% d'émissions à court terme. Ainsi, il est possible de voir sur la Figure ci-dessus que lorsque les émissions à long terme ne sont pas comptabilisées, le bénéfice lié à l'évitement du traitement de déchets est très largement réduit. Excepté pour l'indicateur eutrophisation marine, les bénéfices liés à l'évitement du traitement de déchets sont du même ordre de grandeur pour toutes les compositions et tous les types de chaufferies.

Le stockage du papier contribue au changement climatique, car il émet du méthane (biogénique).

Le stockage du papier et du bois émet du dioxyde de soufre et des NOx, qui contribuent à l'acidification. Ainsi, plus le taux de papier augmente, plus les bénéfices liés à l'évitement du stockage du papier augmentent. Le stockage du bois, du papier et du plastique émet également des particules fines (PM2,5) vers l'air, et consomment des ressources fossiles et nucléaires, en particulier du pétrole. Une analyse de sensibilité par flux (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles) a été réalisée (voir Chapitre 6.2.1).

Les flux les plus contributeurs liés aux évitements du stockage en ISDND sont résumés dans le tableau suivant pour les différentes catégories d'impact :

	Changement climatique	Acidification	Eutrophisation marine	Particules fines	Ressources fossiles/nucléaires	Radiations ionisantes
Flux contributeurs	Méthane biogénique vers l'air	Dioxyde de soufre et NOx vers l'air	Émissions d'ammonium et de nitrate dans l'eau	Emissions de particules PM2,5 vers l'air	Consommation de pétrole	Emissions de radon et carbone dans l'air
Cause	Stockage du papier-carton, coton et bois	Stockage du papier-carton Stockage du bois	Stockage du polyuréthane, papier-carton et plastiques	Stockage du papier, bois, plastique	Stockage du papier, bois, plastique	Stockage du papier, aluminium, bois

Tableau 31 : Flux contributeurs principaux pour les évitements du stockage des déchets – volet 2

Les bénéfices liés à **l'évitement de la production d'énergie** sont très forts pour les indicateurs liés aux enjeux énergétiques, c'est-à-dire l'épuisement des ressources fossiles et nucléaires et les émissions de radiations ionisantes (uniquement pour la production d'électricité).

Plus le PCI du CSR est élevé, et plus la production d'énergie est importante. En effet, les bénéfices liés à l'évitement de la production d'énergie sont proportionnels au PCI.

Par ailleurs, l'évitement de la production d'électricité a un plus grand effet que l'évitement de la production de chaleur sur l'épuisement des ressources fossiles et nucléaires et les radiations ionisantes. Ainsi, les chaufferies à cogénération montrent un bénéfice lié à l'évitement de la production d'énergie plus important que les chaufferies produisant de la chaleur seule.

5.5.3. Impact unitaire pour 1 tonne de CSR et pour 1MWh de chaleur utile

L'impact unitaire est présenté dans les tableaux ci-dessous pour les indicateurs étudiés. Pour rappel, la contribution aux impacts environnementaux lié à la préparation et à la combustion des CSR est analysée au Chapitre 5.4.1 et celle des impacts évités est analysée au Chapitre 5.5.1.

Chaleur seule ($\eta_{th}=80\%$)				Cogénération sans débouché continu ($\eta_{th}=0-80\%$ / $\eta_{el} = 0-45\%$)			Cogénération avec débouché continu ($\eta_{th}=75\%$ / $\eta_{el} = 10\%$)		
Pour 1 tonne de CSR consommée	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio
CC (kg CO ₂ eq)	-561	-406	-302	-152	37	213	-543	-387	-282
Res_f (MJ)	-9171	-9956	-11246	-13735	-14886	-17390	-13588	-14726	-17205
Ac (mole H ⁺ eq)	-0.08	-0.05	-0.09	-0.01	0.03	-0.02	-0.18	-0.16	-0.24
Eu_m (kg N eq)	-1.1	-1.1	-1.3	-1.1	-1.1	-1.3	-1.1	-1.2	-1.4
PM (incidence des maladies)	3.0E-06	4.4E-06	4.2E-06	4.2E-07	1.6E-06	8.6E-07	1.2E-06	2.4E-06	1.8E-06
IR (kBq 235 eq)	125	132	176	-411	-447	-518	-111	-122	-138

Tableau 32 : Impact unitaire pour les 6 indicateurs retenus, pour 1t de CSR (volet 2)

Chaleur seule ($\eta_{th}=80\%$)				Cogénération sans débouché continu ($\eta_{th}=0-80\%$ / $\eta_{el} = 0-45\%$)			Cogénération avec débouché continu ($\eta_{th}=75\%$ / $\eta_{el} = 10\%$)		
Pour 1 MWh de chaleur produite	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio	PCI 13 / 55% bio	PCI 14 / 40% bio	PCI 16 / 30% bio
CC (kg CO ₂ eq)	-195	-131	-83	-127	28	141	-202	-133	-83
Res_f (MJ)	-3195	-3203	-3098	-11483	-11493	-11499	-5049	-5053	-5056
Ac (mole H ⁺ eq)	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	0.02	-0.01	-0.07	-0.05	-0.07
Eu_m (kg N eq)	-0.4	-0.4	-0.4	-0.9	-0.9	-0.8	-0.4	-0.4	-0.4
PM (incidence des maladies)	1.0E-06	1.4E-06	1.2E-06	3.5E-07	1.2E-06	5.7E-07	4.4E-07	8.3E-07	5.3E-07
IR (kBq 235 eq)	44	43	49	-343	-345	-342	-41	-42	-41

Tableau 33 : Impact unitaire pour les 6 indicateurs retenus, pour 1MWh de chaleur produite (volet 2)

5.6. Volet 3 – Déploiement de la filière CSR – Mono critère

Rappel :

Le volet 3 vise à simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030-2040 en termes d'émissions de GES en vue de communiquer celui-ci aux acteurs de la filière et des acteurs institutionnels par rapport :

- aux filières actuelles de traitement de ces déchets
- aux filières actuelles de production de chaleur

Le volet 3-A traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte l'évitement du stockage de ces déchets entrants dans la composition du CSR en ISDND.

Le volet 3-B traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte la valorisation de l'énergie produite par la chaufferie et la non-production d'énergie (chaleur et électricité) par d'autres moyens de production (électricité et gaz naturel).

Les différentes typologies de CSR indiquées dans les appels à projets de l'ADEME ont été analysées afin de déterminer la part de CSR se rapprochant des 3 types de CSR étudiés en cas de base (dont les compositions sont présentées au Tableau 14) dans cette étude. La répartition des 3 types de CSR retenue est la suivante :

- 45 % du CSR ayant un PCI de 13, avec un taux de carbone biogénique de 55 %,
- 29 % du CSR ayant un PCI de 14, avec un taux de carbone biogénique de 40 %,
- 26 % du CSR ayant un PCI de 16, avec un taux de carbone biogénique de 30 %.

Ainsi, la composition moyenne de CSR est la suivante :

Flux	Répartition
Plastiques	20%
Bois	34%
Papier/carton	8%
Autres combustibles	5%
Autres non combustibles	18%
Eau additionnelle	15%
Taux biogénique moyen (en énergie)	44%
Masse de CSR mobilisable (Mt)	3,1 à 6,7

Tableau 34 : Composition moyenne du CSR (basée sur les compositions des 3 CSR considérés en cas de base)

Les flux considérés pour ces volets sont les suivants :

		Quantité de DAE/DMA en entrée de préparation (Mt)	Efficacité de préparation (%)	Quantité de CSR entrant en chaufferie, dont eau additionnelle (Mt)	Quantité de flux hors CSR (Mt)
2030	PCI 13,5 / 50% bio	4,08 à 4,21	65%	3,11 à 3,21	1,45 à 1,49
2040	PCI 13,5 / 50% bio	4,47 à 8,80	65%	3,41 à 6,70	1,59 à 3,12

Tableau 35 : Flux considérés dans le volet 3, pour le gisement potentiel de CSR envoyée en chaufferie dédiée

5.6.1. Gisement de déchets valorisables et potentiel de production de chaleur suite au déploiement de la filière CSR

Le déploiement de la filière CSR en France permettrait :

- De préparer et valoriser en chaufferie sous forme de CSR :
 - entre 3,1 et 3,2 Mt de déchets à l'horizon 2030
 - et entre 3,4 et 6,7 Mt de déchets à l'horizon 2040
- D'éviter le stockage de :
 - entre 3,1 et 3,2 Mt de déchets en installations de stockage à l'horizon 2030
 - et entre 3,4 et 6,7 Mt de déchets en installations de stockage à l'horizon 2040
- De produire :
 - entre 8,2 et 9,5 TWh de chaleur en 2030
 - et entre 9,0 et 19,9 TWh de chaleur en 2040.

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats pour le scénario A et le scénario C (ces scénarios sont définis au Chapitre 2.2.2), afin de montrer les bornes minimum et maximum. Le scénario B se situe entre les deux autres scénarios et n'a pas été retenu.

La quantité de chaleur produite pour les différentes compositions et les différents scénarios est présentée dans le tableau suivant, pour le rendement minimum et maximum :

	2030		2040	
	Min (SC)	Max (SA)	Min (SA)	Max (SC)
Masse entrant en chaufferie CSR (Mt)	3,1	3,2	3,4	6,7
Quantité d'électricité produite (TWh)	0,5 à 1,2	0,5 à 1,3	0,5 à 1,4	1,1 à 2,7
Quantité de chaleur produite⁶⁸ (TWh)	8,2 à 9,2	8,4 à 9,5	9,0 à 10,1	17,6 à 19,9

Tableau 36 : Quantité de chaleur produite pour les différents scénarios en 2030 et 2040, pour les tonnages estimés

⁶⁸ Par comparaison, 1 TWh représente la consommation de chaleur de 63 logements français raccordés au réseau de chaleur sur un an (Source : Nos gestes climats)

5.6.2. Emissions de GES suite au déploiement de la filière CSR

[A] Le déploiement de la filière CSR pour la valorisation de déchets en France en lieu et place d'un stockage dans des installations de stockage (ISDND) engendrera des émissions nettes de GES situées :

- En 2030 entre 1,4 et 1,5 Mt CO₂ éq.
- En 2024 entre 1,5 et 3,0 Mt CO₂ éq.

en prenant en compte les hypothèses rappelées ci-dessous :

- Le taux de biogénique en énergie du gisement de CSR est de 44%.
- Le CSR n'est pas considéré comme entrant en compétition avec la valorisation matière du bois, papier et carton.
- Le carbone biogénique est comptabilisé sous le postulat de la neutralité carbone (approche FC 0/0)
- La répartition des types de chaufferies est la suivante.⁶⁹ :
 - 53% en cogénération avec débouché continu
 - 39% en production de chaleur seule
 - 8% en cogénération sans débouché continu

[B] Le déploiement de la filière CSR en France pour la production de chaleur issue de la valorisation de déchets en chaufferie dédiée en lieu et place d'une production à partir de gaz naturel engendrera ou évitera des émissions de GES. Cela représente, suivant le rendement des chaufferies et la quantité de CSR produit :

- En 2030 entre - 0,16 et 0,12 Mt CO₂ éq.
- En 2040 entre - 0,33 et 0,25 Mt CO₂ éq.

en prenant en compte les hypothèses rappelées ci-dessous :

- Le taux de biogénique du gisement de CSR est de 44%.
- Le CSR n'est pas considéré comme entrant en compétition avec la valorisation matière du bois, papier et carton.
- Le carbone biogénique est comptabilisé sous le postulat de la neutralité carbone (approche FC 0/0)
- La répartition des types de chaufferies est la suivante :
 - 53% en cogénération avec débouché continu
 - 39% en production de chaleur seule
 - 8% en cogénération sans débouché continu

⁶⁹ Source : Sept appels à projet ADEME

- Le rendement global des chaufferies est le suivant :

	η therm min	η therm max	η elec min	η elec max
Chaleur seule	70%	80%	N.A.	N.A.
Cogénération avec débouché continu pour la chaleur	70% (5 mois)	80% (5 mois)	0% (5 mois)	0% (5 mois)
	0% (7 mois)	0% (7 mois)	30% (7 mois)	45% (7 mois)
Cogénération sans débouché continu pour la chaleur	70%	78%	5%	15%

Les résultats bruts sont présentés dans l'Annexe 9.

Pour le volet 3A, les émissions de GES contribuant au changement climatique liés à la production et l'utilisation de CSR pour le potentiel minimal (SA) et maximal (SC) pour 2030 et 2040 sont présentées ci-dessous :

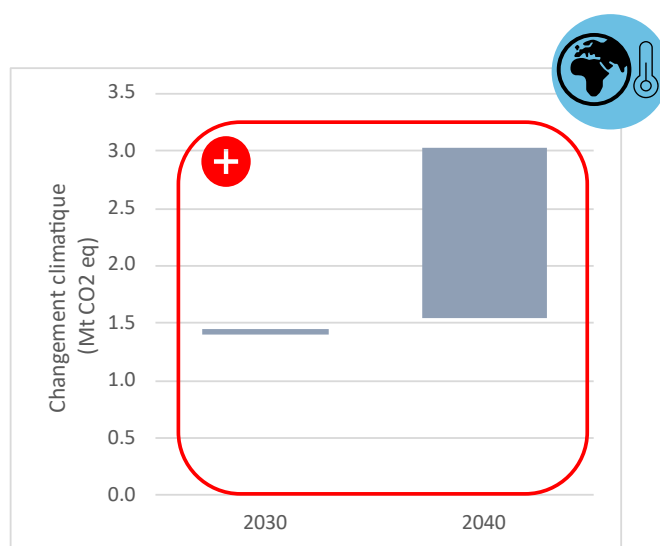


Figure 40 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040 en fonction du tonnage entrant en chaufferie - volet 3A

Pour le volet 3B, les émissions de GES contribuant au changement climatique liés à la production et l'utilisation de CSR pour les rendements minimum et maximum pour 2030 et 2040 sont présentées ci-dessous :

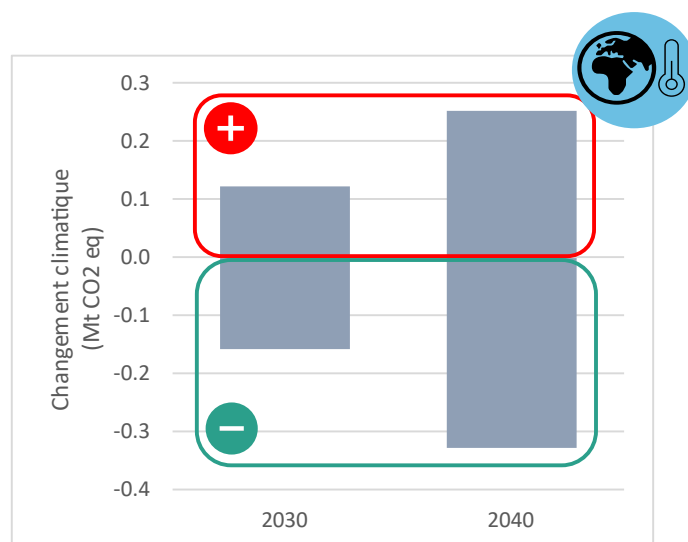


Figure 41 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040 en fonction du tonnage et des rendements - volet 3B

Il est possible d'observer sur ce graphique que selon le rendement des chaufferies, le déploiement de la filière CSR peut soit engendrer soit éviter des émissions de GES. Le graphique suivant détaille, pour les rendements minimum et maximum, les émissions potentielles de GES selon le gisement potentiel (SA ou SC) :

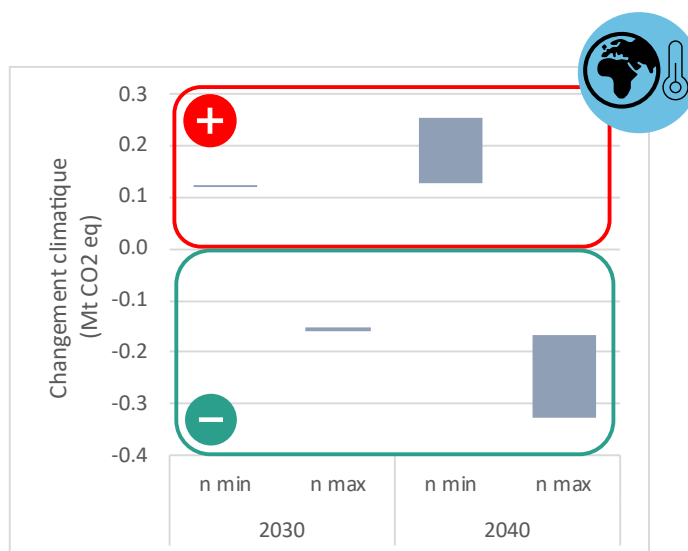


Figure 42 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040, détaillée selon le rendement en fonction des tonnages et du rendement - volet 3B

En effet, une moindre performance en termes de rendement des chaufferies peut annuler les bénéfices du déploiement de la filière. Cela représente une émission nette lorsque le rendement est faible alors que cela évite une émission lorsque le rendement est élevé.

5.6.3. Résultats totaux pour les volets 3A et 3B

Les résultats totaux pour les volets 3A et 3B sont précisés dans le tableau ci-dessous :

	2030		2040	
	Min (SC)	Max (SA)	Min (SA)	Max (SC)
Masse entrant en chaufferie CSR (Mt)	3,1	3,2	3,4	6,7
Quantité d'électricité produite (TWh)	0,5 à 1,2	0,5 à 1,3	0,5 à 1,4	1,1 à 2,7
Quantité de chaleur produite (TWh)	8,2 à 9,2	8,4 à 9,5	9,0 à 10,1	17,6 à 19,9
Préparation et combustion (1) (Mt CO₂ eq)	2,11	2,17	2,31	4,53
Traitement des déchets évité (2) (Mt CO₂ eq)	- 0,70	- 0,72	- 0,77	- 1,51
Energie évitée (3) (Mt CO₂ eq)	- 0,27 à - 1,99	- 0,28 à - 2,05	- 0,29 à - 2,18	- 0,58 à - 4,28
Contribution au changement climatique (Mt CO₂ eq) – Volet 3A⁷⁰ (1+2)	1,41	1,45	1,54	3,03
Contribution au changement climatique (Mt CO₂ eq) – Volet 3B⁷¹ (1+3)	- 0,15 à 0,12	- 0,16 à 0,12	- 0,17 à 0,13	- 0,33 à 0,25

Tableau 37 : Impact sur le changement climatique des différentes compositions et scénarios pour 2030 et 2040, pour les tonnages estimés

Le volet 3A présente les émissions de GES du déploiement de la filière CSR pour la valorisation de déchets à la place du stockage de ces déchets en ISDND. Pour ce volet, pour la composition moyenne, en 2030 et en 2040, selon les hypothèses retenues, ce déploiement engendrera plus d'émissions de GES que le traitement de ces déchets en ISDND. En effet, la contribution au changement climatique est supérieure à 0.

Le volet 3B présente les émissions de GES du déploiement de la filière CSR pour la production de chaleur issue de la valorisation de déchets en chaufferie dédiée à la place de la production à partir de gaz naturel. Pour ce volet, pour la composition moyenne, en 2030 et en 2040, selon les hypothèses retenues, ce déploiement engendrera plus ou moins d'émissions de GES que la production de la même quantité de chaleur à partir de gaz naturel, selon si le rendement des chaufferies est faible ou élevé. En effet, la contribution au changement climatique est supérieure à 0 lorsque le rendement est faible, et inférieur à 0 lorsque le rendement est élevé.

La comparaison de la filière CSR à l'incinération et à d'autres sources de chaleur fossile minoritaires (charbon, fioul) est réalisée en analyse de sensibilité.

⁷⁰ En prenant en compte l'évitement lié au traitement des déchets

⁷¹ En prenant en compte l'évitement lié à la production de chaleur

6. Résultats des analyses additionnelles de sensibilité

6.1. Introduction

6.1.1. Liste des analyses de sensibilité

Des analyses de sensibilité ont été réalisées pour affiner les résultats des volets 2 et 3 de l'étude.

- Les analyses suivantes ont été réalisées dans le périmètre du **volet 2** :
 - Par flux de déchets composant le CSR

Une analyse par flux a été réalisée, afin de mieux comprendre quels sont les contributions à la combustion en chaufferie CSR de chaque flux unitaire (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles). Cette analyse est théorique et ne correspond pas à des réalités de terrain.
 - En fonction du rendement thermique et électrique des chaufferies

L'influence du rendement thermique et électrique des chaufferies a été étudiée, afin de déterminer à quel point l'impact environnemental évolue avec celui-ci.
 - Pour différentes compositions données de CSR

De nouvelles compositions ayant un taux biogénique en énergie entre 40% et 55% sont évaluées afin de connaître plus finement l'impact sur le changement climatique de ces CSR, et d'identifier plus finement un point de bascule des conclusions en fonction du taux biogénique en énergie.
 - En comparant avec la production d'énergie (chaleur et électricité) en unité de cogénération alimentée en gaz naturel

Une comparaison avec la production d'électricité et de chaleur en cogénération à partir de gaz naturel a été réalisée, afin de ne pas comparer les chaufferies CSR uniquement au mix électrique français (pour l'électricité) et à la production de chaleur à partir d'un mix moyen européen de chaudières au gaz naturel (chaleur).
 - En comparant avec la production de chaleur dans une chaufferie alimentée par d'autres combustibles fossiles

Une comparaison avec la production de chaleur à partir d'autres sources d'énergie fossiles (fioul, charbon) a été réalisée, afin de ne pas uniquement comparer les chaufferies CSR au gaz naturel.
 - En comparant au traitement des déchets en UVE

Une comparaison avec le traitement des déchets en UVE a été réalisée afin de ne pas uniquement comparer les chaufferies CSR à l'ISDND.
 - En comparant à différents types d'installation de stockage en ce qui concerne la valorisation du biogaz

Une comparaison avec l'ISDND mettant en place la valorisation du biogaz en chaudière à cogénération a été réalisée, en complément de la comparaison avec l'ISDND brûlant le biogaz en torchère.
- Les analyses suivantes ont été réalisées dans le périmètre du **volet 3** :
 - Deux méthodologies supplémentaires ont été utilisées pour la prise en compte du carbone biogénique (voir Chapitre 3.2.3.4)

Les analyses de sensibilité ont été menées chacune de manière séparée en comparant pour chacune d'entre elles les résultats par rapport au cas de base. Or le bilan net réel des chaufferies dépend de plusieurs paramètres à la fois (Ex : le rendement de la chaufferie et le type de chaleur évité). Ainsi, les données chiffrées dans les conclusions présentées dans ces chapitres ne sont que des exemples de cas particuliers et non pas des vérités générales.

6.1.2. Organisation des résultats

Les résultats pour chaque volet et chaque section sont organisés en 3 temps :

1/	Rappel de l'objectif du volet étudié et de l'unité fonctionnelle dans un encadré noir
2/	Présentation des principaux enseignements en début de section dans un encadré de couleur « rose »
3/	Présentation des résultats détaillés dans le corps du texte

6.2. Analyses de sensibilité pour le volet 2

Rappel :

Le volet 2 vise à alimenter un outil d'aide à l'instruction de l'empreinte environnementale de nouveaux projets en territoire (outil à développer par la suite par l'ADEME) afin de guider les acteurs de la filière et les acteurs institutionnels sur l'intérêt environnemental d'une filière CSR comparée à une orientation vers des installations de stockage des déchets.

Le volet 2 traite de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée, en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND et l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

6.2.1. Analyse par flux (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles)

Une analyse par flux a été réalisée, afin de mieux comprendre quels sont les contributions à la combustion en chaufferie CSR de chaque flux unitaire (bois, papier-carton, plastique, autres combustibles).

!! Point d'attention : La composition et les caractéristiques techniques du CSR modélisé par flux est purement théorique et ne correspond pas à des réalités de terrain observables. L'objectif de cette analyse est de comparer l'impact unitaire de la combustion en chaufferie CSR de chacun de ces flux.

Cette analyse est réalisée avec le périmètre du volet 2, c'est-à-dire en considérant ;

- la préparation et la combustion à la chaufferie
- l'évitement de l'envoi en installation de stockage des déchets valorisés en CSR
- l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR.

Cette analyse est réalisée pour un four à grille, dans une chaufferie à cogénération :

- avec débouché continu,
- ayant un rendement thermique de 75%
- et un rendement électrique de 10%.

Les principaux enseignements de l'analyse par flux sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Selon le flux de déchet étudié, la contribution de la phase de préparation et de combustion aux impacts environnementaux varie fortement :

- Les déchets d'origine biogénique ont une contribution au changement climatique plus faible que les déchets d'origine fossile.
- Cette constatation est valable pour le mode de comptabilisation en cas de base (approche FC 0/0) qui considère que les émissions de CO₂ biogénique à la combustion ne contribuent pas au changement climatique.

Selon le flux de déchet étudié, les bénéfices environnementaux liés à l'évitement du stockage en ISDND peuvent varier fortement. Au plus le déchet est dégradé en installation de stockage (papier-carton > bois), au plus les bénéfices sont élevés.

Selon le flux de déchet étudié, les bénéfices environnementaux liés à l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité (mix moyen FR) varient proportionnellement au PCI du déchet pour tous les indicateurs. Plus le PCI est élevé (plastique>autres combustibles>papier-carton>bois), plus les bénéfices sont élevés.

Une analyse par flux a été réalisée pour les flux suivants :

- Bois
- Papier-carton
- Plastiques
- Autres combustibles (comprenant les textiles et la mousse polyuréthane)

Selon le flux de déchet étudié, la contribution de la phase de préparation et de combustion aux impacts environnementaux varie :

- La contribution au changement climatique est nulle pour le bois, le papier-carton et les textiles d'origine végétale puisque ces déchets sont d'origine biogénique et sous le mode de comptabilisation de base du CO₂ biogénique (approche FC 0/0)

En revanche, pour les plastiques et les autres combustibles, la contribution au changement climatique est plus élevée de par la comptabilisation du CO₂ d'origine fossile.

- La contribution à l'acidification de l'air des flux d'origine fossile est plus élevée que ceux d'origine biogénique du fait de l'émission d'une part plus élevée de NOx.

Selon le flux de déchet étudié, les bénéfices environnementaux liés à l'évitement du stockage en ISDND peuvent varier fortement :

- Les bénéfices liés à l'évitement du stockage du papier-carton sont très élevés pour le changement climatique, car il est considéré que le C contenu dans le papier se dégrade à raison de 32,4% sur 100 ans et que la dégradation se fait sous forme de CH₄ dans 50% des cas et qu'une partie de celui-ci est émis directement dans l'air. Le CH₄ étant un contributeur au changement climatique 29,8 fois plus élevé que le CO₂, cela engendre une contribution élevée au changement climatique de l'ISDND et donc des bénéfices élevés si on évite le stockage.

Par comparaison, le bois se dégrade moins (1,5% sur 100 ans) et a donc un bénéfice plus faible sur le changement climatique.

- Pour les autres combustibles, l'évitement du stockage en ISDND du polyuréthane ressort beaucoup sur l'eutrophisation marine, car l'enfouissement de polyuréthane émet de l'ammonium⁷², qui contribue à cet indicateur.

Selon le flux de déchet étudié, les bénéfices environnementaux liés à l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité (mix moyen FR) varient proportionnellement au PCI du déchet pour tous les indicateurs. Plus le PCI est élevé (plastique>autres combustibles>papier-carton>bois), plus les bénéfices sont élevés.

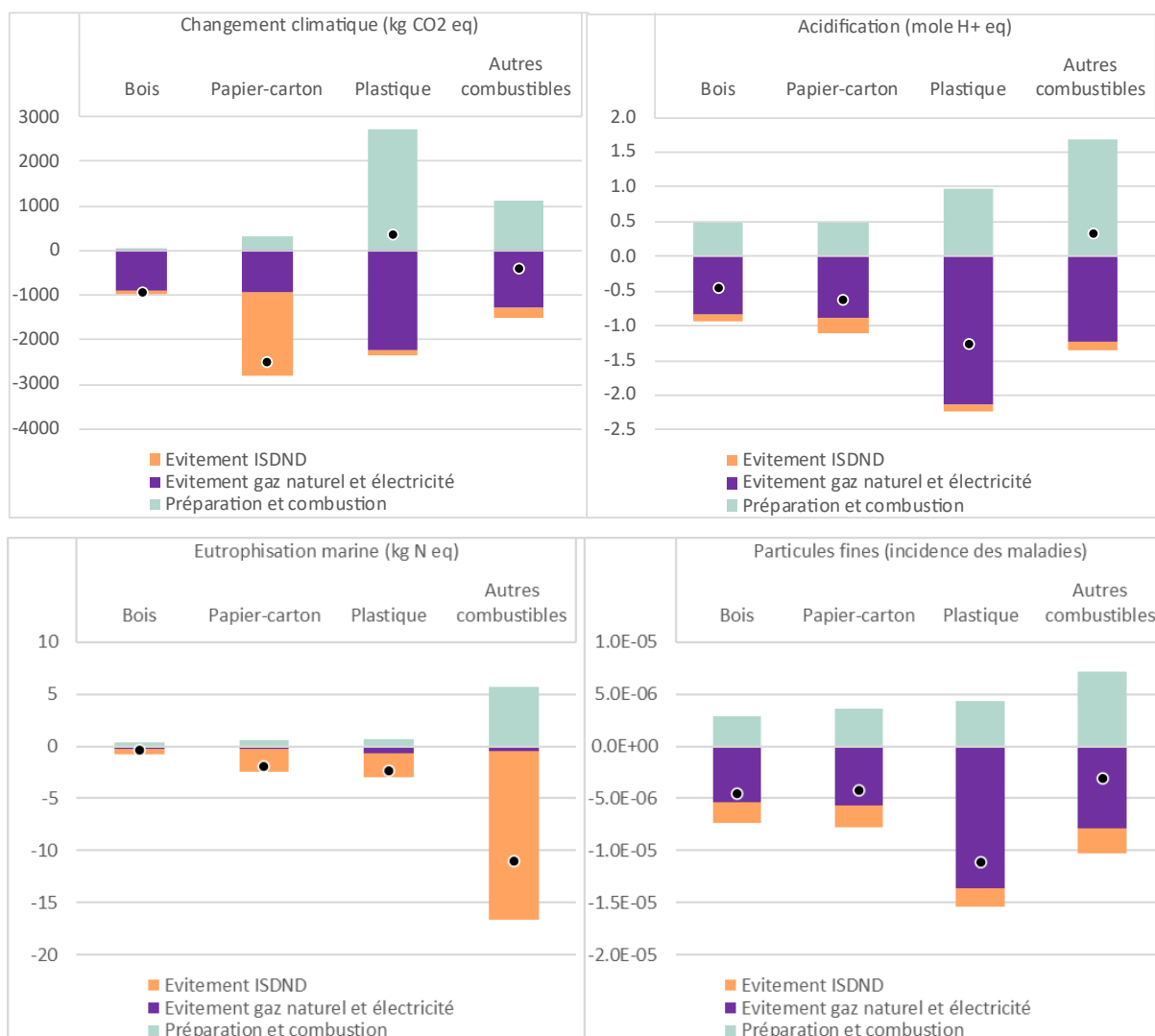
Selon les flux de déchets et le critère environnemental étudié, le bilan net (point noir sur les figures qui suivent) pour le volet 2, qui pour rappel reprend :

- la préparation et la combustion à la chaufferie
- l'évitement de l'envoi en installation de stockage des déchets valorisés en CSR
- l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR.

présente :

⁷² Cela est dû aux émissions à long terme des lixiviats vers l'eau, voir Chapitre 5.4.2

- des bénéfices pour les critères environnementaux « eutrophisation marine », « émissions de particules », « consommations de ressources fossiles et nucléaires » et « émissions de radiations ionisantes »
- des bénéfices pour la majorité des flux hormis pour le flux :
 - « plastique » pour le changement climatique
 - « autres combustibles » pour l'acidification.⁷³



⁷³ La quantité de NOx combustible est proportionnelle à la quantité d'azote contenue dans les déchets. Les textiles (nylon) et le polyuréthane sont composés d'azote.

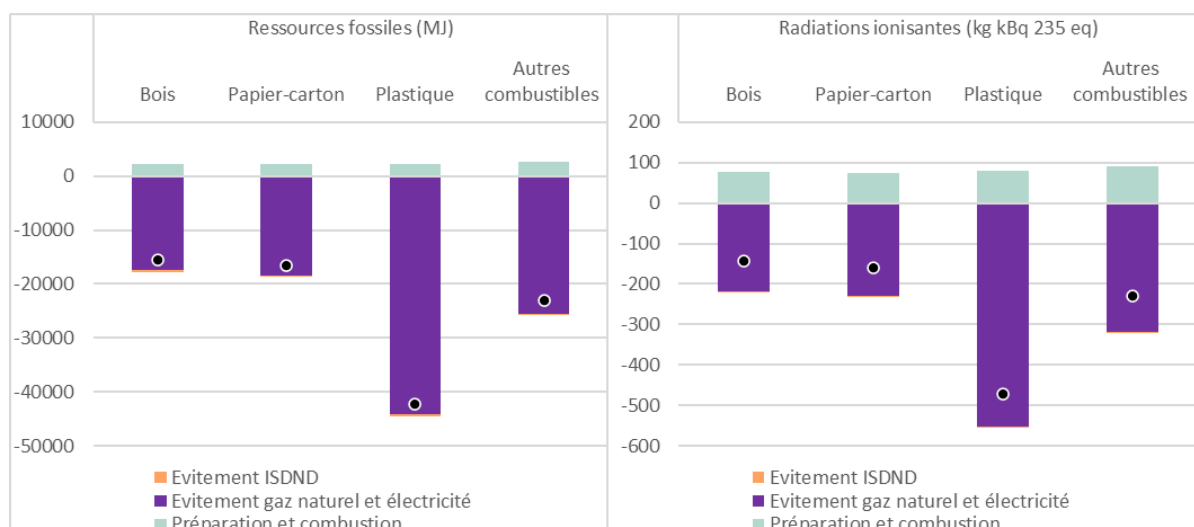


Figure 43 : Impacts environnementaux pour des flux unitaires pour 1t de CSR valorisé en chaufferie à cogénération - volet 2

6.2.2. Influence de la méthodologie de prise en compte du CO₂ biogénique (sans et avec)

Une analyse de l'influence de la méthodologie de prise en compte du CO₂ biogénique sur la contribution aux différents critères environnementaux des flux composant le CSR a été réalisée.

Les méthodologies analysées (voir Chapitre 3.2.3.4) sont :

- **NC - FC 0/0**

Cette approche ne considère que les contributions du CO₂ fossile et du CH₄ fossile et biogénique (les émissions de CO₂ biogéniques ne sont ni inventoriées, ni caractérisées tandis que les émissions de CH₄ biogénique sont inventoriées et caractérisées comme du CH₄ fossile).

- **NC - FC -1/1**

Cette approche compte l'absorption de CO₂ biogénique ainsi que son émission.

Dans cette approche, le CO₂ biogénique est inventorié et le facteur de caractérisation du CH₄ biogénique est adapté.

Ces différentes méthodologies ont été appliquées aux flux suivants :

- Bois
- Papier-carton
- Autres combustibles
- Plastique

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

La contribution au changement climatique :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

varie suivant la méthodologie de comptabilisation du CO₂ biogénique.

Ainsi,

- Plus le taux biogénique en énergie est élevé, plus l'écart entre les deux méthodes de comptabilisation est élevé.

En effet, la méthode FC 0/0 considère que le carbone biogénique est neutre du point de vue du changement climatique, or dans le cas de l'ISDND, une partie du carbone biogénique reste stockée.

- Plus le taux de dégradation des flux biogéniques en installation de stockage est élevé, plus les bénéfices sont grands car avec un fort taux de dégradation émettent du CH₄ en installation de stockage, ce qui mène à des bénéfices plus grands pour ces flux. Ainsi, la contribution au changement climatique est d'autant plus faible que le taux biogénique en énergie est fort.

La contribution au changement climatique varie suivant la méthodologie de comptabilisation du carbone biogénique et suivant les flux considérés :

- Pour le **bois**, la contribution au changement climatique est :
 - négative lorsque le CO₂ biogénique est considéré comme ne contribuant pas au changement climatique,
 - positive dans le cas où le CO₂ biogénique est considéré comme contribuant au changement climatique.

En effet, dans ce cas, les émissions de CO₂ biogénique lors de la combustion ne sont pas compensées par des émissions évitées en ISDND, puisque le bois se dégrade très peu en ISDND (1,5% de dégradation après 100 ans selon la base de données Ecoinvent).

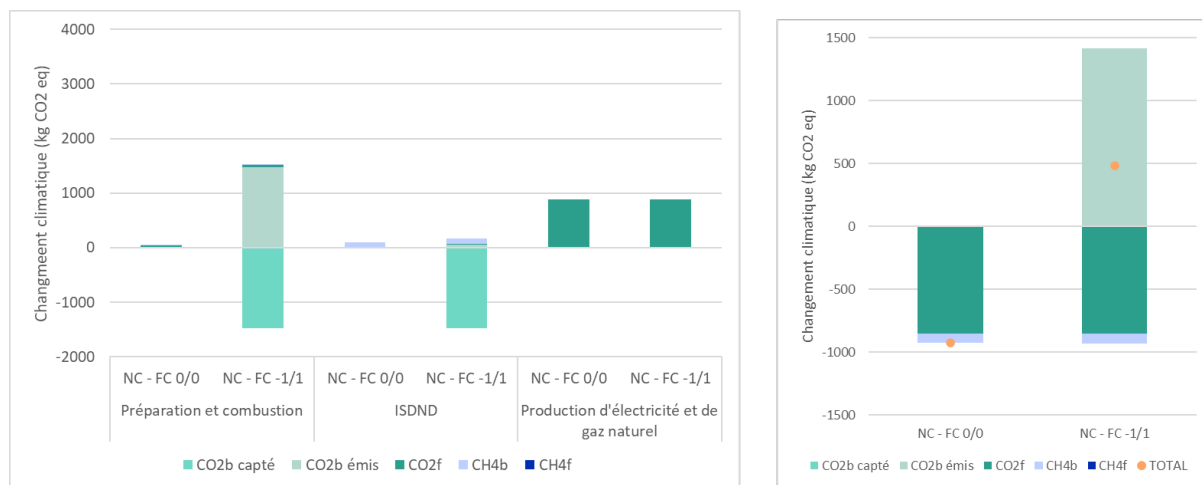


Figure 44 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de bois (volet 2)

- Pour le **papier-carton**, la contribution au changement climatique est négative pour les deux méthodologies considérées.

En effet, le papier-carton se dégrade plus en ISDND (32,44% de dégradation après 100 ans selon la base de données Ecoinvent). Cela se traduit par des émissions des CH₄ biogénique lors de sa dégradation, ce qui correspond pour le CSR à de plus grands bénéfices liés à l'évitement de cette émission en ISDND (voir figure ci-dessous).

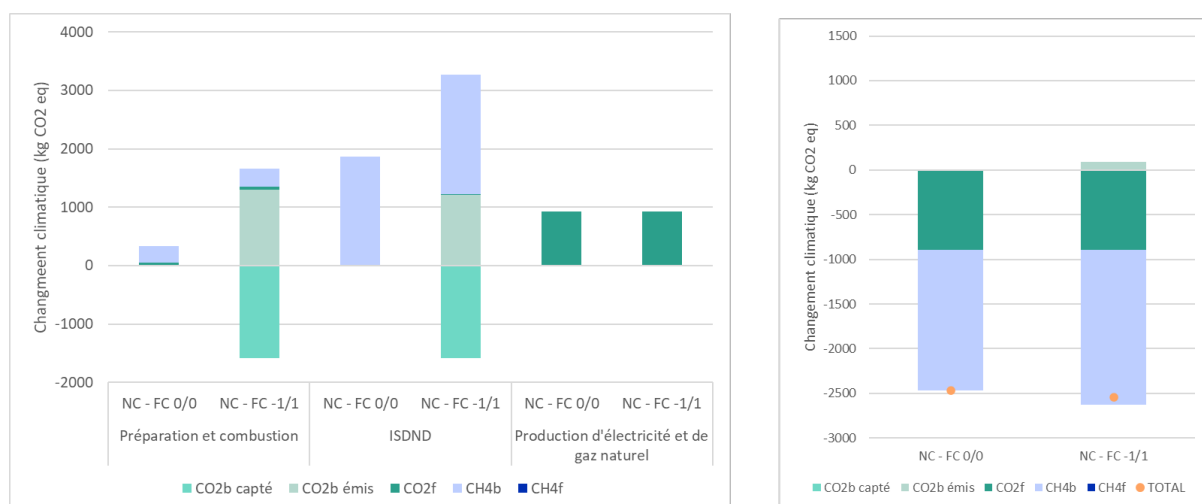


Figure 45 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de papier-carton (volet 2)

- Pour les **autres combustibles** (composés en partie de textiles tels que le coton), la contribution au changement climatique est :
 - négative lorsque le CO₂ biogénique est considéré comme ne contribuant pas au changement climatique,
 - positive dans le cas où le CO₂ biogénique est considéré comme contribuant au changement climatique.

En effet, dans ce cas, les émissions de CO₂ biogénique lors de la combustion ne sont pas compensées par des émissions évitées en ISDND, puisque seule la fraction coton du flux « autres combustibles » se dégrade et relativement peu en ISDND (12% de dégradation après 100 ans selon la base de données Ecoinvent).

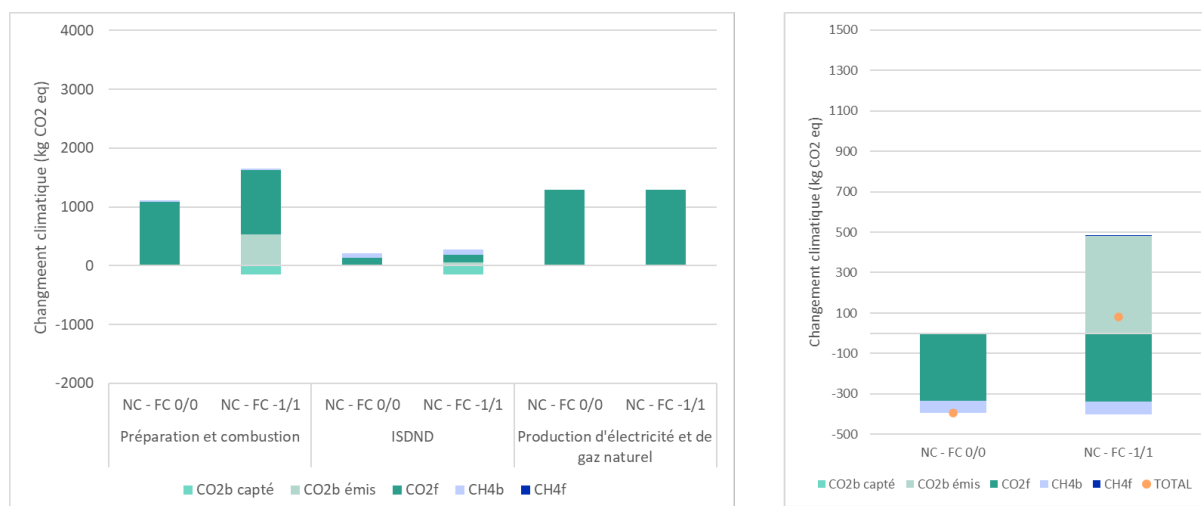


Figure 46 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne d'autres combustibles (textiles, mousse polyuréthane, ...) (volet 2)

- Enfin, les **plastiques** ne contiennent pas de matière biogénique, et leur contribution est donc la même quelle que soit la méthode de comptabilisation utilisée.

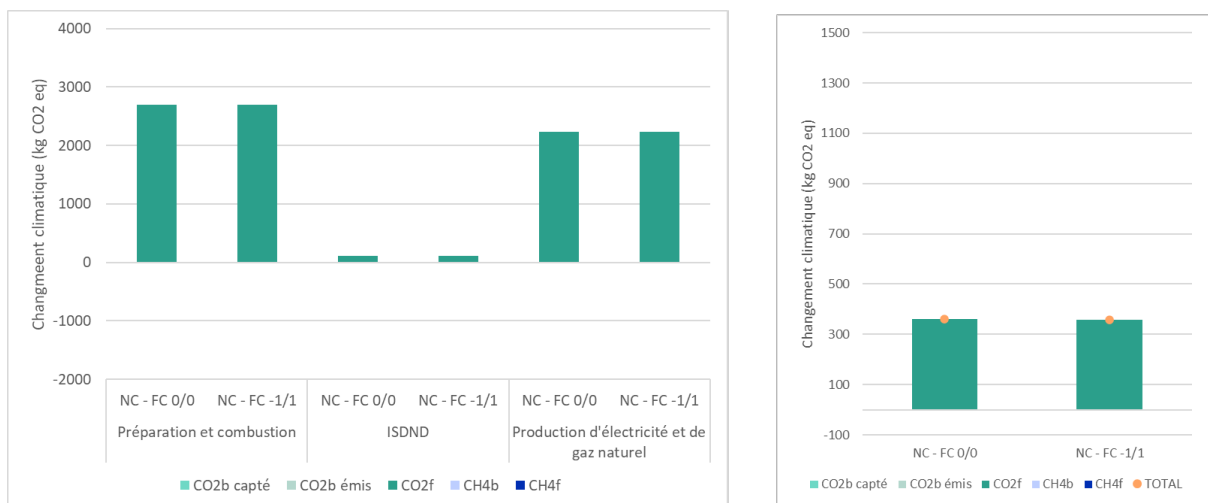


Figure 47 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de plastiques (volet 2)

6.2.3. Influence du rendement de la chaufferie

L'influence du rendement sur les résultats a été étudiée pour trois compositions de CSR et trois types de chaufferies. Le rendement minimum retenu correspondant au minimum réglementaire, et le maximum correspondant aux rendements opérationnels transmis par les acteurs. Les rendements étudiés sont les suivants :

		Chaleur seule	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Rendement thermique	Minimum	70%	70% (5 mois) 0% (7 mois)	70%
	Maximum	80%	80% (5 mois) 0% (7 mois)	78%
Rendement électrique	Minimum	-	0% (5 mois) 30% (7 mois)	5%
	Maximum	-	0% (5 mois) 45% (7 mois)	15%

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

La contribution aux différents critères environnementaux :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

est sensible au rendement atteint.

- Plus le rendement est élevé.⁷⁴, plus la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR est élevée et engendre des contributions aux critères environnementaux plus faibles.

Les variabilités de rendement étudiées n'engendrent pas pour autant de changement de conclusions sur le bilan net ; elles restent similaires à celles établies pour des rendements plus faibles, seule la valeur du bilan change légèrement.

Il ressort de cette analyse que plus le rendement de la chaufferie est élevé, plus la quantité d'énergie produite est élevée. Cela se traduit sur le graphique suivant par une part plus grande liée à la phase « production d'énergie évitée » (en violet). Les bénéfices additionnels issus de la variation du rendement étant représentés en violet clair sur le graphique.

Les critères environnementaux particulièrement sensibles au rendement sont ceux corrélés à la production d'énergie à savoir les indicateurs « changement climatique », « épuisement des ressources fossiles et nucléaires » et « émission de radiations ionisantes » (voir graphiques ci-dessous).

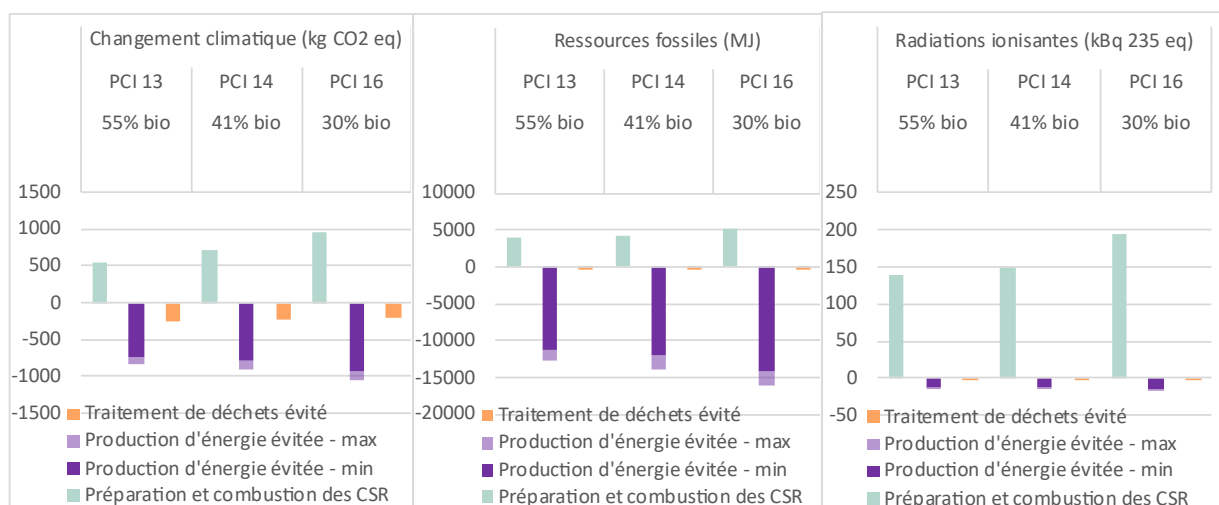
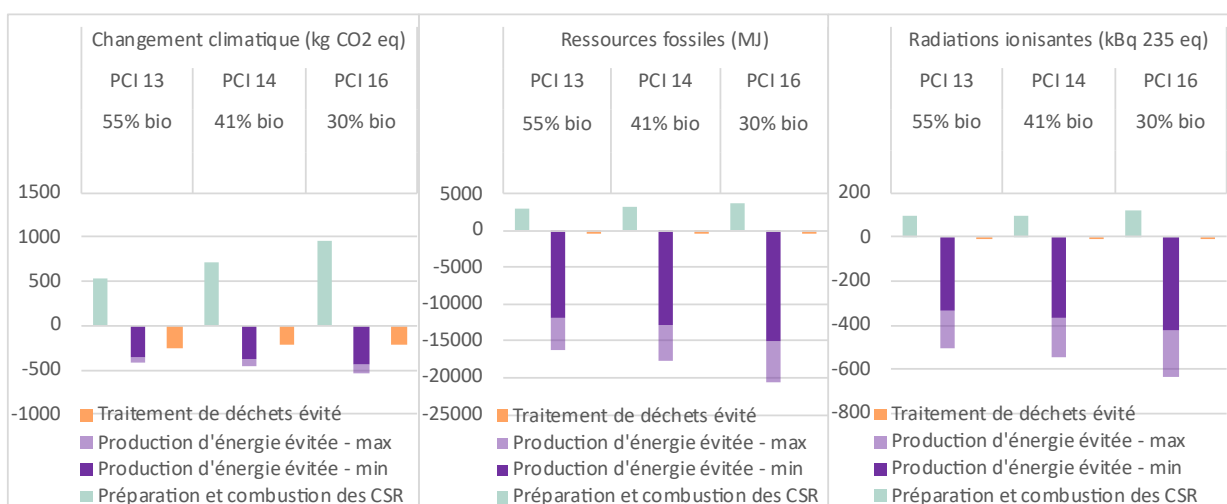


Figure 48 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie produisant de la chaleur seule, pour une tonne de CSR (volet 2)



⁷⁴ L'utilisation de technologies plus performantes, via de potentielles améliorations futures pourraient amener à augmenter ce rendement.

Figure 49 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie en cogénération sans débouché continu pour la chaleur, pour une tonne de CSR (volet 2)

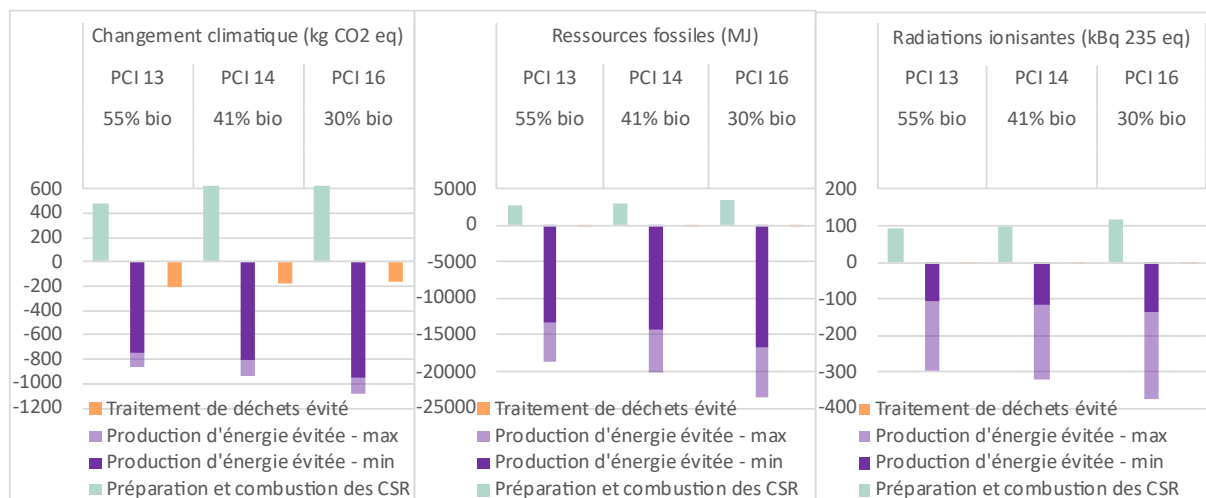


Figure 50 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie en cogénération, raccordée à l'industrie, pour une tonne de CSR (volet 2)

Lorsque le rendement évolue, les impacts liés à la préparation, à la combustion et au traitement des résidus de combustion, ainsi que les bénéfices liés au traitement de déchets évité restent identiques au cas de base.

En revanche, les bénéfices liés à la production d'énergie évitée augmentent avec le rendement. Plus le rendement augmente (grâce à un débouché continu pour la chaleur ou via des améliorations technologiques par exemple), plus les impacts nets diminuent. Cette variation est encore plus marquée lorsque la chaufferie produit de l'électricité, en plus de la chaleur. L'influence du rendement est surtout marquée sur les indicateurs sensibles aux enjeux énergétiques, en particulier les indicateurs « ressources fossiles et nucléaires » et « émissions de radiations ionisantes ».

Cela est vrai lorsque les résultats sont exprimés pour une tonne de CSR. En revanche, ce n'est pas le cas lorsque les résultats sont exprimés par MWh de chaleur produite. En effet, lorsque les résultats sont exprimés par MWh de chaleur produite, l'impact des phases de préparation, combustion et les évitements liés au traitement de déchets diminue lorsque le rendement augmente, tandis que l'impact des évitements liés à la production d'énergie reste identique.

6.2.4. Influence du taux de biogénique du CSR (45% et 50%)

De nouvelles compositions de CSR sont évaluées en analyses de sensibilité, afin de connaître plus finement l'influence sur la contribution au changement climatique des CSR ayant un taux de biogénique en énergie compris entre 40% et 55% pour les chaufferies en cogénération mais sans débouché continu pour la chaleur.

Pour rappel, la contribution au changement climatique (voir Chapitre 0) :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

présente un bénéfice ou un dommage pour la chaufferie produisant de la chaleur et de l'électricité par cogénération sans débouché continu pour la chaleur, selon sa composition :

- A savoir un bénéfice pour la composition à 55% de biogénique en énergie
- et un dommage pour des compositions de 30% à 40% de biogénique en énergie.

Pour la chaufferie produisant de la chaleur seule ou la chaufferie en cogénération avec débouché continu pour la chaleur, cela représente toujours un bénéfice pour le changement climatique, quelle que soit la composition du CSR.

C'est pour cela que l'analyse se concentre sur les chaufferies à cogénération sans débouché continu pour la chaleur dans cette section.

Ainsi, deux nouvelles compositions ont été déterminées, sur base des compositions déjà existantes, en adaptant les quantités de plastiques, et de matières biogéniques (bois, papier, carton). Les flux adaptés sont soulignés dans le tableau ci-dessous :

	Taux biogénique en énergie : 50% Composition basée sur le CSR à 55% de biogénique	Taux biogénique en énergie : 45% Composition basée sur le CSR à 40% de biogénique
Plastiques (%)	<u>16,5 %</u>	<u>18,5 %</u>
Bois (%)	<u>37,2 %</u>	<u>33,2 %</u>
Papier/carton (%)	<u>9,3 %</u>	<u>8,3 %</u>
Autres combustibles (%)	5 %	
Autres incombustibles (%)	15 %	20 %
Eau additionnelle (%)	17 %	15 %
Taux d'humidité total (%)	15,7 %	23,0 %
Part biogénique en énergie (%)	50,0 %	44,7 %
PCI (MJ/kg)	13,5	13,5
Technologie de four	Four à lit fluidisé	Four à grille

Tableau 38 : Composition des CSR ayant un taux de biogénique en énergie de 45% et 50%

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

La contribution au changement climatique :

- de la préparation d'une tonne de CSR (avec un PCI de 13.5 MJ/kg) et de sa valorisation en chaufferie à cogénération sans débouché continu pour la chaleur,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

présente un point de changement de conclusion pour les CSR étudiés pour des **taux biogéniques en énergie se situant entre 40% et 45%**.

Les résultats pour les deux compositions sont les suivants :

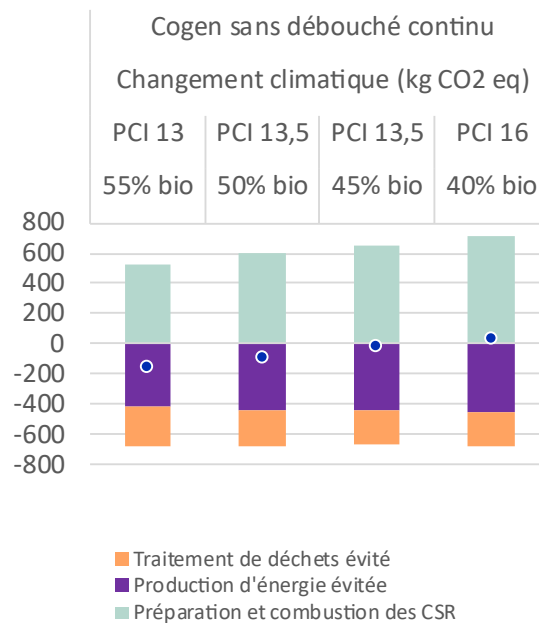


Figure 51 : Impact sur le changement climatique des compositions à 45% et 50% de biogénique en énergie, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie cogénération sans débouché continu (volet 2)

	PCI 13 55% bio	PCI 13,5 50% bio	PCI 13,5 45% bio	PCI 14 40% bio
Préparation et combustion (1) (kg CO ₂ eq)	530	596	652	718
Traitement des déchets évité (2) (kg CO ₂ eq)	-260	-242	-224	-224
Energie évitée (3) (kg CO ₂ eq)	-422	-440	-440	-457
Contribution au changement climatique (kg CO₂ eq) – Volet 2 (1+2+3)	-152	-86	-12	37

Tableau 39 : Impact sur le changement climatique des compositions à 45% et 50% de biogénique en énergie, pour 1t de CSR, pour une chaufferie à cogénération sans débouché continu (volet 2)

Pour les compositions étudiées à 50% et à 45% biogénique, la préparation et combustion d'une tonne en chaufferie dédiée émet moins de gaz à effet de serre que ses alternatives (la production de chaleur par gaz naturel et le stockage en ISDND). En effet, la contribution au changement climatique est inférieure à 0 pour les compositions étudiées et un PCI de 13.5 MJ/kg.

Ainsi, pour des CSR avec un taux de biogénique en énergie situé entre 40% et 45%, la contribution au changement climatique des étapes de préparation et de combustion, ainsi que les impacts évités liés au traitement des déchets est équivalent à la contribution au changement climatique de la production d'électricité (pour le mix FR) et de chaleur (chaufferie au gaz naturel).

6.2.5. Influence du choix du type de systèmes de production d'énergie évitée (électricité produite à partir de gaz)

Pour rappel, en cas de base, il est considéré que l'énergie évitée suite à la préparation et à la valorisation du CSR est produite de manière dissociée, et est :

- Le mix électrique moyen français pour l'électricité,
- Une production de chaleur à partir de gaz naturel pour une moyenne des chaudières produisant de la chaleur seule ou en cogénération, utilisées en Europe.

L'analyse de sensibilité réalisée dans cette section, considère que l'énergie évitée est produite de manière conjointe et est :

- Une production d'électricité à partir de gaz naturel dans une unité de cogénération,
- Une production de chaleur à partir de gaz naturel dans une unité de cogénération.

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Les enseignements par indicateur sont :

- Pour les indicateurs « changement climatique », les évitements considérés dans le cas de base (production dissociée) sont :
 - toujours plus élevés que lorsque la production d'énergie évitée est issue d'une chaufferie au gaz naturel en cogénération (production conjointe) pour les typologies de chaufferies « Chaleur » et « Cogénération avec débouché continu »
 - toujours plus élevés pour la chaufferie à cogénération sans débouché continu pour la chaleur
- Pour les indicateurs « eutrophisation marine » et « acidification », les évitements considérés dans le cas de base (production dissociée) sont :
 - toujours plus élevés que lorsque la production d'énergie évitée est issue d'une chaufferie au gaz naturel en cogénération (production conjointe) pour les typologies de chaufferies « Chaleur » et « Cogénération sans débouché continu »
 - similaires pour la chaufferie de type « Cogénération avec débouché continu »
- Pour les indicateurs « particules fines », « ressources fossiles et nucléaires » et « radiations ionisantes », les évitements considérés dans le cas de base (production dissociée) sont toujours plus élevés que lorsque la production d'énergie évitée est issue d'une chaufferie au gaz naturel en cogénération (production conjointe).

Changement climatique

Chaleur

Production dissociée > Production conjointe

	<i>Cogénération sans débouché continu</i>	Production dissociée < Production conjointe
	<i>Cogénération avec débouché continu</i>	Production dissociée > Production conjointe
Acidification Eutrophisation marine	<i>Chaleur</i>	Production dissociée > Production conjointe
	<i>Cogénération sans débouché continu</i>	Production dissociée > Production conjointe
	<i>Cogénération avec débouché continu</i>	Production dissociée ≈ Production conjointe
Particules fines Ressources fossiles et nucléaires Radiations ionisantes	<i>Chaleur</i>	Production dissociée > Production conjointe
	<i>Cogénération sans débouché continu</i>	
	<i>Cogénération avec débouché continu</i>	

La contribution au changement climatique (voir Chapitre 0):

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

présente un bénéfice ou un dommage selon le type de chaufferie, la composition et le type de production de chaleur évitée :

<u>Chan. clim.</u>	Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Production dissociée	Bénéfice quelle que soit la composition	Bénéfice pour la composition au plus fort taux biogénique en énergie (55%) Dommage pour les compositions à plus faible taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice quelle que soit la composition
Production conjointe	Bénéfice pour la composition au plus fort taux biogénique en énergie (55%) Dommage pour les compositions à plus faible taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice quelle que soit la composition	Bénéfice quelle que soit la composition

La contribution aux autres indicateurs environnementaux (voir Chapitre 0) :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
 - en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

présente un bénéfice ou un dommage selon le type de chaufferie et si la chaleur et l'électricité évitées sont produites de manière conjointe ou séparée :				
<u>Autres indicateurs</u>		Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Bilan net pour l'acidification	Production dissociée	Bénéfice	Neutre	Bénéfice
	Production conjointe	Dommage	Bénéfice	Bénéfice
Bilan net pour l'eutrophisation marine	Production dissociée	Bénéfique quel que soit le type de chaufferie et le type de production d'énergie évité.		
	Production conjointe			
Bilan net pour les particules fines	Production dissociée	Dommage quel que soit le type de chaufferie et le type de production d'énergie évité		
	Production conjointe			
Bilan net pour les ressources fossiles	Production dissociée	Bénéfique quel que soit le type de chaufferie et le type de production d'énergie évité.		
	Production conjointe			
Bilan net pour les radiations ionisantes	Production dissociée	Dommage	Bénéfice	
	Production conjointe	Dommage		

La production d'électricité et de chaleur en unité de cogénération (violet clair dans les graphes ci-dessous) a :

- pour le cas d'une chaufferie CSR à cogénération sans débouché continu,
 - un impact plus élevé sur le « changement climatique », l'« eutrophisation marine » et l'« acidification ».
 - un impact environ équivalent sur l'indicateur « ressources fossiles et nucléaires ».
 - un impact inférieur sur les indicateurs « radiations ionisantes » et « particules fines ».

qu'une production dissociée représentée en violet foncé sur les graphiques ci-dessous.

Cela s'explique par le bilan de l'électricité produite à partir de gaz naturel dans une unité de cogénération qui a :

- un impact plus élevé que celui du mix électrique moyen français sur le « changement climatique », l'« eutrophisation marine » et l'« acidification ».
- un impact environ équivalent à celui du mix électrique moyen sur l'indicateur « ressources fossiles et nucléaires ».
- un impact inférieur au mix électrique moyen FR sur les indicateurs « radiations ionisantes » et « particules fines ».
- pour le cas d'une chaufferie CSR cogénération,
 - un impact environ équivalent sur l'indicateur « eutrophisation marine » et « acidification ».
 - un impact inférieur sur les indicateurs « radiations ionisantes », « particules fines », « changement climatique » et « ressources fossiles et nucléaires ».

qu'une production dissociée représentée en violet foncé sur les graphiques ci-dessous.

- pour le cas d'une chaufferie CSR produisant uniquement de la chaleur, un impact inférieur sur l'ensemble des indicateurs étudiés qu'une production dissociée représentée en violet foncé sur les graphiques ci-dessous.

La chaleur produite à partir de gaz naturel dans une unité de cogénération (production conjointe) a quant à elle un impact moins élevé que la chaleur produite à partir de gaz naturel pour un mix de chaleur moyen européen sur tous les indicateurs (entre 1,4 et 7,4 fois moins élevé selon les indicateurs).

Les résultats pour les deux types d'évitement sont présentés ci-dessous :



Figure 52 : Comparaison de la production d'énergie évitée selon si la chaleur et l'électricité sont produites de manière dissociée (cas de base) ou conjointe (analyse de sensibilité), pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)

Les résultats pour les différentes étapes du cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant pour l'indicateur « changement climatique » :

	Changement climatique (kg CO ₂ eq)								
	PCI 13, 55% bio			PCI 14, 40% bio			PCI 16, 30% bio		
	Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogén avec débouché continu
Préparation et combustion	537	530	530	726	718	718	968	957	957
Evitement gaz naturel et électricité produits de manière dissociée	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
Evitement chaleur et électricité produits de manière conjointe	-411	-903	-664	-445	-978	-719	-519	-1142	-839
Evitement ISDND	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-210
<i>Bilan net si production dissociée</i>	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
<i>Bilan net si production conjointe</i>	-133	-632	-393	57	-484	-225	239	-395	-93

Tableau 40 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si l'énergie évitée est produite de manière conjointe ou dissociée, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)

Lorsque l'énergie évitée passe d'une production dissociée (mix électrique FR et chaleur à partir de gaz naturel) à une production conjointe (cogénération à partir de gaz naturel), le bilan net de la contribution au changement climatique est

- **dégradé** pour les chaufferies à cogénération avec débouché continu et les chaufferies produisant de la chaleur seule, ce qui mène à un changement de signe pour ces dernières lorsque le taux biogénique en énergie est plus bas (40% et 30%).
- **amélioré** pour les chaufferies à cogénération sans débouché continu, ce qui mène à un changement de signe lorsque le taux biogénique en énergie est plus bas (40% et 30%).

6.2.6. Influence de la source d'énergie fossile évitée (gaz naturel, charbon, fioul)

En cas de base, la production de chaleur lors de la combustion d'une tonne de CSR a été comparée avec la production de chaleur à partir de gaz naturel, qui est la source de chaleur principale entrant en compétition avec les CSR selon l'analyse du lot 4.

En analyse de sensibilité, d'autres sources de chaleur fossiles sont analysées la production de chaleur :

- à partir de charbon
- et à partir de fioul.

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Le type d'énergie évité a une influence sur les indicateurs « changement climatique », « épuisement des ressources fossiles et nucléaires » et « émission de radiations ionisantes » et « particules fines » tel que présenté dans le tableau ci-dessous.

Particules fines Changement climatique	Chaleur	Gaz naturel < fioul < charbon
	Cogen avec débouché continu	
	Cogen sans débouché continu	
Ressources fossiles et nucléaires	Chaleur	Charbon < gaz naturel < fioul
	Cogen avec débouché continu	
	Cogen sans débouché continu	Charbon ≈ gaz naturel ≈ fioul
Radiations ionisantes	Chaleur	Fioul < gaz naturel < charbon
	Cogen avec débouché continu	
	Cogen sans débouché continu	Fioul ≈ gaz naturel ≈ charbon

La contribution aux indicateurs environnementaux (voir Chapitre 0):

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

présente un bénéfice ou un dommage selon le type de chaufferie, la composition et le type de combustible évité pour la production de chaleur :

	Combustible évité pour la production de chaleur	Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Bilan net pour le changement climatique	Gaz naturel	Bénéfice quelle que soit la composition	Bénéfice si fort taux biogénique en énergie (55%) Dommage si faible taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice quelle que soit la composition
	Fioul		Bénéfice si fort taux biogénique en énergie (55% et 40%) Dommage si faible taux biogénique en énergie (30%)	
	Charbon		Bénéfice	
Bilan net pour les particules fines	Gaz naturel	Dommage	Dommage	Dommage
	Fioul	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice
	Charbon			
Bilan net pour les ressources fossiles et nucléaires	Gaz naturel	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice
	Fioul			
	Charbon			
Bilan net pour les radiations ionisantes	Gaz naturel	Dommage	Bénéfice	Bénéfice
	Fioul			
	Charbon			

La production de chaleur à partir de gaz naturel (violet foncé sur le graphique ci-dessous) a :

- pour le cas d'une chaufferie CSR produisant de la chaleur seule,
 - un impact plus faible sur le « changement climatique » et les « particules fines » par rapport au fioul et encore plus par rapport au charbon.
 - un impact plus élevé que le fioul et plus faible que le charbon sur l'indicateur « radiations ionisantes ».
 - un impact plus faible que le fioul et plus élevé que le charbon sur l'indicateur « ressources fossiles et nucléaires ».
- pour le cas d'une chaufferie CSR cogénération avec ou sans débouché continu,
 - un impact environ équivalent sur l'indicateur « ressources fossiles » et « radiations ionisantes ».

- un impact inférieur au fioul et encore plus inférieur au charbon sur les indicateurs « particules fines » et « changement climatique ».

Les résultats pour les trois types d'évitement sont présentés ci-dessous :

- Pour la chaufferie produisant de la chaleur seule :

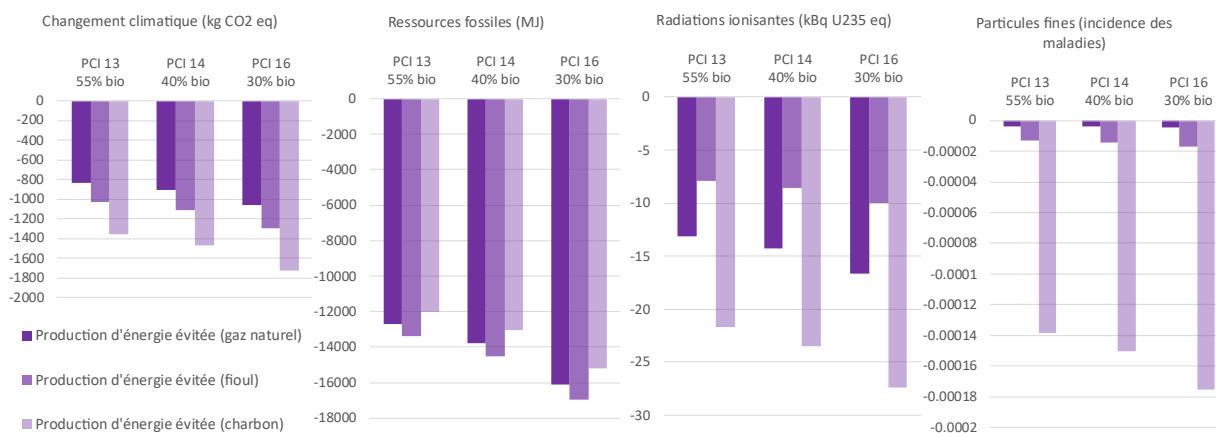


Figure 53 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie produisant de la chaleur seule (volet 2)

- Pour la chaufferie faisant de la cogénération sans débouché continu pour la chaleur :

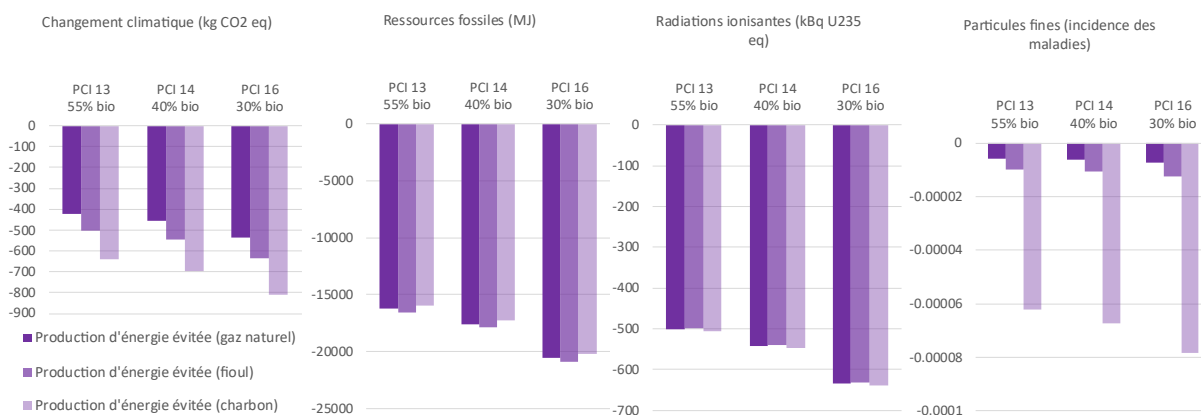


Figure 54 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie en cogénération sans débouché continu pour la chaleur (volet 2)

- Pour la chaufferie faisant de la cogénération avec raccordement à une industrie :

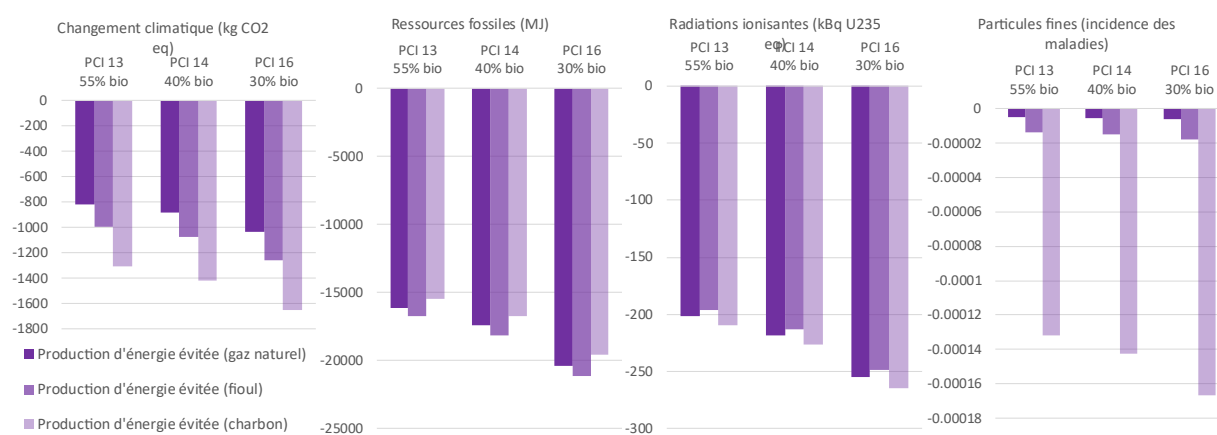


Figure 55 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie en cogénération raccordée à une industrie (volet 2)

Les résultats pour les différentes étapes du cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant pour le changement climatique :

	Changement climatique (kg CO ₂ eq)								
	Chaleur seule			Cogénération sans débouché continu pour la chaleur			Cogénération avec débouché continu pour la chaleur		
	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio	PCI 13 55% bio	PCI 14 40% bio	PCI 16 30% bio
Préparation et combustion	537	726	968	530	718	957	530	718	957
Evitement gaz naturel	-838	-907	-1060	-422	-457	-534	-813	-881	-1029
Evitement fioul	-1029	-1114	-1301	-502	-544	-635	-993	-1075	-1255
Evitement charbon	-1362	-1475	-1723	-641	-694	-810	-1305	-1413	-1650
Evitement ISDND	-260	-224	-210	-260	-224	-210	-260	-224	-210
Bilan net (évitement de gaz naturel)	-561	-406	-301.6	-152	37	213	-543	-387	-282
Bilan net (évitement de fioul)	-752	-613	-543.2	-231	-50	112	-722.1	-581	-508
Bilan net (évitement de charbon)	-1085	-974	-964.5	-370	-200	-64	-1034	-919	-903

Tableau 41 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si la chaleur évitée est produite à partir de gaz naturel, de fioul ou de charbon, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)

Lorsque la chaleur évitée passe d'une production à partir de gaz naturel à une production à partir de fioul ou de charbon, le bilan net de la contribution au changement climatique est **amélioré** pour tous les types de chaufferie et peut mener à un changement de signe pour la chaufferie à cogénération sans débouché continu pour la chaleur, passant d'un dommage à un bénéfice.

6.2.7. Influence du système de traitement de déchets évité

En cas de base, il est considéré que les déchets envoyés en CSR auraient été envoyés en ISDND sans la présence de chaufferies CSR dédiées (source : Lot 4).

En analyse de sensibilité, un autre système alternatif de traitement de déchets est étudié : il s'agit de l'incinération en UVE (unité de valorisation énergétique).

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Le système de traitement de déchets évité a une influence forte sur les indicateurs « changement climatique » et « eutrophisation marine ». Pour les autres indicateurs, l'influence du type de système de traitement de déchets n'est pas significative :

- Sur le changement climatique, l'ISDND a un impact plus faible que l'UVE.
- En revanche, sur l'eutrophisation marine, l'ISDND a un impact plus élevé que l'UVE.

La contribution au changement climatique et à l'eutrophisation marine :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité et de chaleur de manière dissociée ou conjointe.

présente un bénéfice ou un dommage selon la composition et le type de chaufferie et si le système de traitement des déchets évité est l'ISDND ou l'UVE :

	Système de traitement de déchets évité	Chaleur	Cogénération sans débouché continu pour la chaleur	Cogénération avec débouché continu pour la chaleur
Bilan net pour le changement climatique	ISDND	Bénéfice moyen si faible taux biogénique en énergie (55%) Bénéfice élevé si fort taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice moyen si fort taux biogénique en énergie (55%) Dommage si faible taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice moyen si faible taux biogénique en énergie (55%) Bénéfice élevé si fort taux biogénique en énergie (40% et 30%)
	UVE	Bénéfice élevé	Bénéfice moyen	Bénéfice élevé
Bilan net pour l'eutrophisation marine	ISDND	Bénéfice élevé		
	UVE	Bénéfice faible		Bénéfice faible à moyen (si faible taux biogénique en énergie)

En cas de base, la production de chaleur lors de la combustion d'une tonne de CSR a été comparée avec le stockage d'une tonne de déchets en ISDND, qui est le système de traitement des déchets entrant en compétition avec les CSR selon l'analyse du lot 4. En analyse de sensibilité, un autre système de traitement de déchets est analysé : l'incinération en UVE. Les résultats sont présentés ci-dessous, pour les indicateurs pour lesquels le traitement de déchets évité est un enjeu :

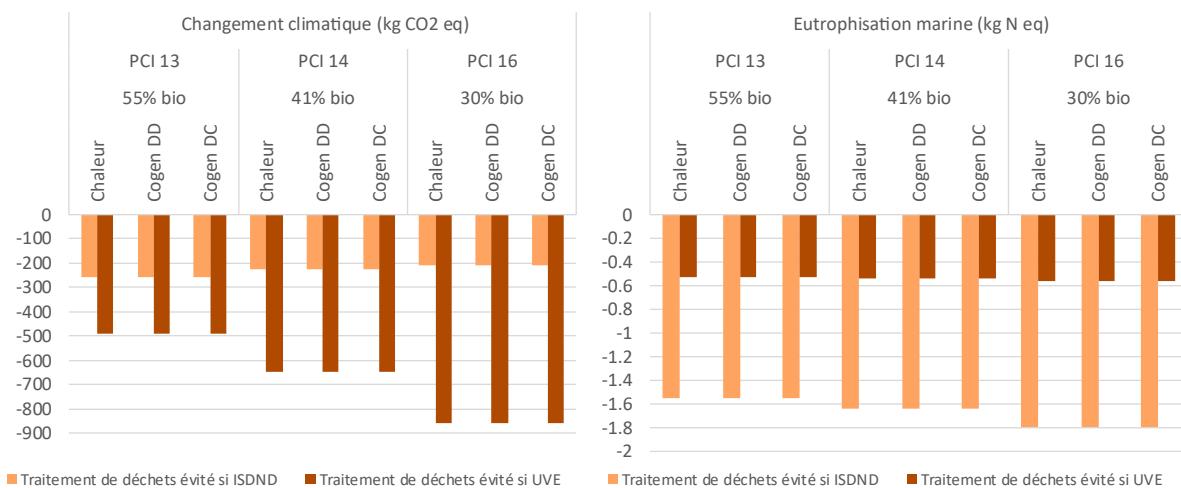


Figure 56 : Comparaison de la filière CSR avec l'ISDND, l'UVE, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie dédiée (volet 2)

Les résultats pour les différentes étapes du cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant pour le changement climatique :

	Changement climatique (kg CO ₂ eq)								
	PCI 13, 55% bio			PCI 14, 40% bio			PCI 16, 30% bio		
	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu
Préparation et combustion de CSR	537	530	530	726	718	718	968	957	957
Evitement ISDND	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-210
Evitement UVE	-490	-490	-490	-649	-649	-649	-856	-856	-856
Evitement production d'énergie	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
Bilan net (ISDND)	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
Bilan net (UVE)	-791	-382	-773	-831	-388	-812	-947	-433	-928

Tableau 42 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si le traitement de déchets évité est l'ISDND ou l'UVE, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)

Sur l'indicateur changement climatique, le traitement des déchets en chaufferie CSR est toujours moins impactant que l'incinération en UVE, quel que soit le type de chaufferie et la composition. En revanche, le traitement des déchets en chaufferie CSR est plus impactant que le stockage en ISDND pour des taux de biogénique en énergie de 40% et 30%, lorsque la chaufferie fait de la cogénération sans débouché continu pour la chaleur.

Sur l'indicateur eutrophisation marine, le traitement des déchets en chaufferie CSR est toujours moins impactant que le stockage en ISDND et que l'incinération en UVE, quel que soit le type de chaufferie et la composition.

6.2.8. Valorisation du biogaz capté en ISDND (torchère vs. cogénération)

En cas de base, le biogaz capté en ISDND est considéré comme étant brûlé en torchère.

En analyse de sensibilité, ce biogaz est considéré comme étant valorisé dans une chaufferie à cogénération.

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

Valoriser le biométhane issu de l'installation de stockage permet d'éviter la production et l'acheminement de gaz naturel fossile.

Le mode de gestion du biogaz a une influence sur les indicateurs « changement climatique » et « eutrophisation marine ». Pour les autres indicateurs, le mode de gestion du biogaz n'est pas significatif.

Sur le changement climatique et sur l'eutrophisation marine, l'impact évité du traitement de déchets est environ équivalent que le biogaz soit brûlé en torchère ou valorisé dans une chaufferie à cogénération.

Cela ne change que très légèrement le bilan net mais ne change pas les conclusions du cas de base de l'étude.

En effet, en considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production d'énergie, l'impact environnemental de la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR est très proche que le biogaz capté en ISDND soit brûlé en torchère ou valorisé dans une chaudière à cogénération pour produire de l'énergie (voir Figure ci-dessous pour le changement climatique et l'eutrophisation marine).

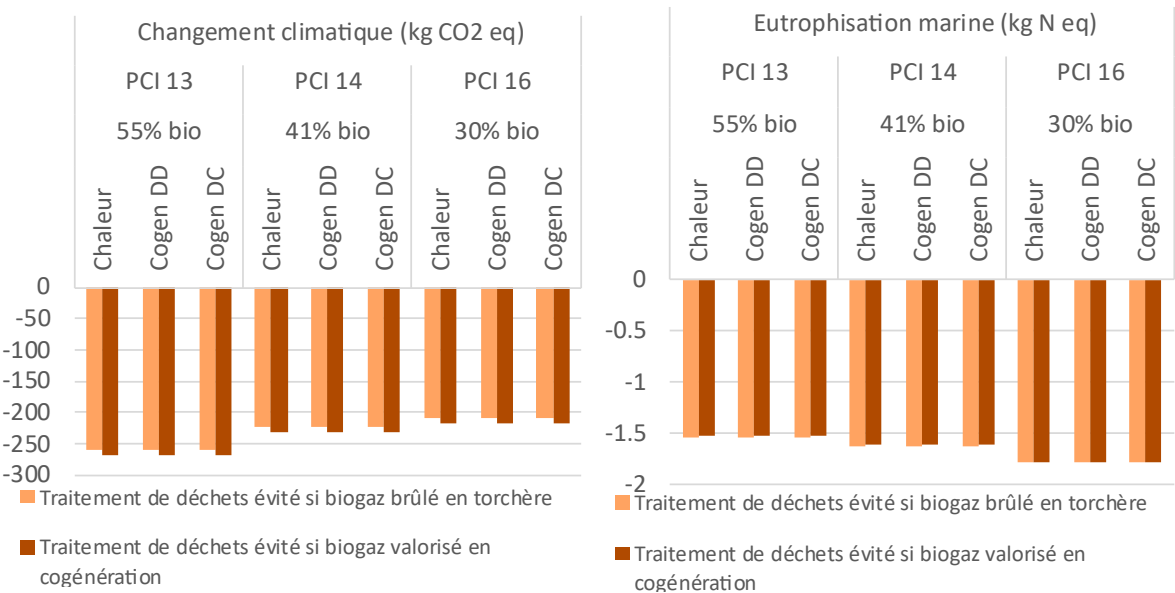


Figure 57 : Comparaison de la filière CSR avec combustion en torchère ou valorisation en chaudière du biogaz capté en ISDND, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie dédiée (volet 2)

Les résultats pour les différentes étapes du cycle de vie sont présentés dans le tableau suivant pour le changement climatique :

Changement climatique (kg CO ₂ eq) pour 1 tonne de CSR									
	PCI 13, 55% bio			PCI 14, 40% bio			PCI 16, 30% bio		
	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu	Chaleur	Cogén sans débouché continu	Cogén avec débouché continu
Préparation et combustion	537	530	530	726	718	718	968	957	957
Traitement de déchets évité (brûlé en torchère)	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-260
Traitement de déchets évité (valorisation du biogaz en cogé)	-269	-269	-269	-232	-232	-232	-216	-216	-269
Evitement production d'énergie	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
Bilan net (torchère)	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
Bilan net (valorisation)	-570	-161	-552	-413	29	-394	-308	206	-288

Tableau 43 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si le traitement de déchets évité est l'ISDND ou l'UVE, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)

6.3. Analyses de sensibilité pour le volet 3

Rappel :

Le volet 3 vise à simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030-2040 en termes d'émissions de GES en vue de communiquer celui-ci aux acteurs de la filière et des acteurs institutionnels par rapport :

- aux filières actuelles de traitement de ces déchets
- aux filières actuelles de production de chaleur

Le volet 3-A traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte l'évitement du stockage de ces déchets entrants dans la composition du CSR en ISDND.

Le volet 3-B traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte la valorisation de l'énergie produite par la chaufferie et la non-production d'énergie (chaleur et électricité) par d'autres moyens de production (mix électrique FR et gaz naturel).

Une analyse de l'influence de la méthodologie de prise en compte du CO₂ biogénique sur la contribution aux différents critères environnementaux des flux composants le CSR a été réalisée.

Les méthodologies analysées (voir Chapitre 3.2.3.4) sont :

- **NC - FC 0/0 (cas de base)**

Cette approche ne considère que les contributions du CO₂ fossile et du CH₄ fossile et biogénique (les émissions de CO₂ biogéniques ne sont ni inventoriées, ni caractérisées tandis que les émissions de CH₄ biogénique sont inventoriées et caractérisées comme du CH₄ fossile).

- **NC – FC -1/1 – incl**

Cette approche compte l'absorption de CO₂ biogénique ainsi que son émission.

Dans cette approche, le CO₂ biogénique est inventorié et le facteur de caractérisation du CH₄ biogénique est adapté.

- **NC – FC -1/1 – excl**

Cette approche compte l'émission de CO₂ biogénique mais pas son absorption. En effet, il l'absorption du CO₂ biogénique est alloué à la première vie du produit, avant qu'il soit un déchet.

Dans cette approche, le CO₂ biogénique est inventorié et le facteur de caractérisation du CH₄ biogénique est adapté.

Ces méthodologies sont appliquées aux estimations de compositions pour 2030 et 2040.

Les principaux enseignements de l'analyse de ce chapitre sont résumés dans l'encadré ci-dessous :

La contribution au changement climatique en 2030 et 2040 de la filière CSR par rapport :

- aux filières actuelles de traitement de ces déchets (volet 3A)
- aux filières actuelles de production de chaleur (volet 3B)

varie suivant la méthodologie de comptabilisation du CO₂ biogénique.

Pour le volet 3A, quelque soit la méthodologie de comptabilisation du CO₂ biogénique appliquée, le déploiement de la filière CSR engendre des émissions nettes de CO₂eq.

Pour le volet 3B, selon la méthode de comptabilisation du carbone biogénique utilisée, une inversion des conclusions peut avoir lieu. La non-considération du concept de neutralité carbone induit que le déploiement de la filière CSR engendre des émissions nettes de CO₂eq.

En 2030, la contribution au changement climatique représente entre 460 et 950 kg CO₂ eq par tonne de CSR consommée pour le volet 3-A. Pour ce volet, il est possible d’observer une différence dans les résultats entre la méthode FC 0/0 (cas de base) et les deux autres méthodes (FC -1/1 incl et excl). En effet, le carbone biogénique émis lors de la combustion n’est pas caractérisé dans la première méthode, alors qu’il l’est dans les deux autres, ce qui engendre un impact supplémentaire (environ 500 kg CO₂ eq par tonne de CSR en plus).

En 2030, la contribution au changement climatique représente entre -80 et 550 kg CO₂ eq par tonne de CSR consommée pour le volet 3-B. Pour ce volet, il y a une différence entre le cas de base (FC 0/0) et la méthode excluant l’absorption de CO₂ biogénique (FC -1/1 Excl). Cette différence mène à une inversion des conclusions selon la méthode suivie. En effet, lorsque seules les émissions de carbone biogénique sont comptées, mais pas son absorption, cela augmente fortement l’impact total (environ 630 kg CO₂ eq par tonne de CSR en plus).

Les résultats ci-dessous sont montrés pour les volets 3A et 3B en 2030 pour 1 tonne de CSR entrant en chaufferie dédiée. Des résultats très similaires sont observés en 2040.



Figure 58 : Trois méthodes de comptabilisation de carbone biogénique, pour les différentes étapes du cycle de vie du CSR, pour une tonne de CSR (volet 3)

À partir des résultats ci-dessus pour la préparation et combustion du CSR, le stockage en ISDND, et la production d’électricité et de chaleur, il est possible de déterminer les résultats pour le volet 3A et 3B :

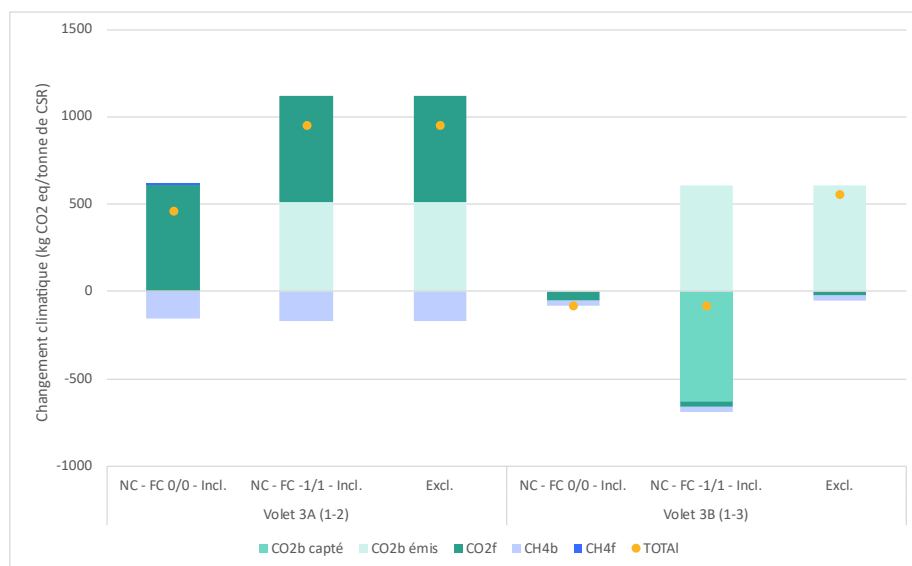


Figure 59 : Influence de la méthode de comptabilisation du carbone biogénique sur les résultats, pour 1t de CSR (volet 3)

7. Conclusions des cas de base

7.1. Conclusions du volet 1

Pour rappel, le volet 1 considère les impacts environnementaux de la préparation et la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de déchets, sans prendre en compte les bénéfices liés aux évitements.

Conclusion 1.1 Pour la préparation et la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de déchets, sans prendre en compte les bénéfices liés aux évitements, les étapes les plus contributrices dépendent des enjeux environnementaux étudiés.

- Pour les enjeux « changement climatique » et « acidification », ce sont les émissions directes lors de la combustion qui représentent 45 à 88% de la contribution.
- Pour les enjeux « ressources fossiles et nucléaires » et « radiations ionisantes », l'électricité utilisée pour la préparation et le fonctionnement de la chaufferie représente la contribution principale.
- Pour l'enjeu « particules », le traitement des résidus de combustion est le principal contributeur.
- Pour l'enjeu « eutrophisation marine », le traitement des flux hors CSR est le principal contributeur.

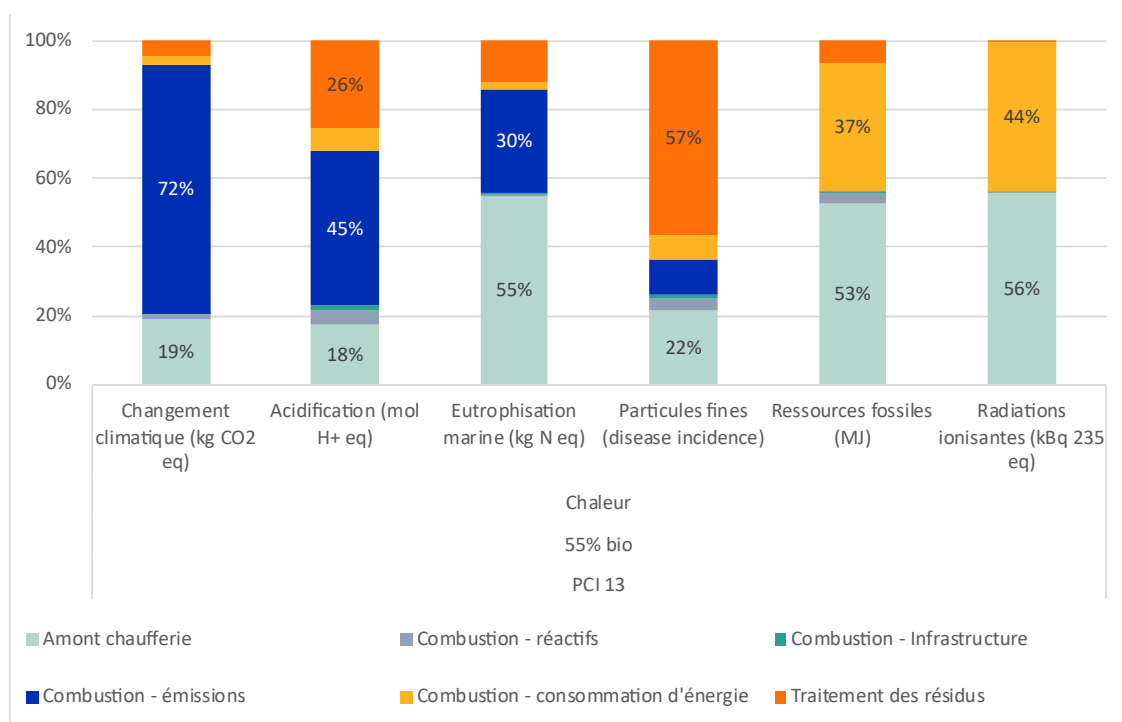


Figure 60 : Répartition de la contribution des étapes du cycle de vie aux différents enjeux environnementaux (Volet 1)

Conclusion 1.2 La préparation et la valorisation en chaufferie dédiée d'une tonne de CSR avec :

- Un taux de biogénique en énergie situé entre 30-55%
- Des rendements de production de chaleur allant de 0-80% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 33% / Avec débouché continu : rendement de 75%)
- Des rendements de production d'électricité allant de 0-45% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 26% / Avec débouché continu : rendement de 10%)
- Sous le postulat d'une neutralité carbone,

permet de produire entre 0 et 1,2 MWh d'électricité et entre 1,2 et 3,6 MWh de chaleur suivant la composition des CSR et la typologie de chaufferie utilisée.

Conclusion 1.3

La préparation et la valorisation en chaufferie dédiée d'une tonne de CSR avec :

- Un taux de biogénique en énergie situé entre 30-55%
- Des rendements de production de chaleur allant de 0-80% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 33% / Avec débouché continu : rendement de 75%)
- Des rendements de production d'électricité allant de 0-45% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 26% / Avec débouché continu : rendement de 10%)
- Sous le postulat d'une neutralité carbone,

présente une contribution au changement climatique située entre :

- 0,5 et 1 t CO₂ eq par tonne de CSR
- ou entre 0,21 et 0,26 t CO₂ eq par MWh de chaleur produite.

Conclusion 1.4

La préparation et la valorisation en chaufferie dédiée d'une tonne de CSR avec :

- Un taux de biogénique en énergie situé entre 30-55%
- Des rendements de production de chaleur allant de 0-80% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 33% / Avec débouché continu : rendement de 75%)
- Des rendements de production d'électricité allant de 0-45% suivant les typologies de chaufferie (Sans débouché continu : rendement lissé sur l'année de 26% / Avec débouché continu : rendement de 10%)
- Sous le postulat d'une neutralité carbone,

présente pour les autres enjeux environnementaux, par tonne de CSR, les contributions suivantes :

- *Entre 0,7 et 0,9 moles H⁺ pour l'acidification,*
- *Entre 0,7 et 0,8 kg N eq pour l'eutrophisation marine,*
- *Entre 8E-6 et 11E-6 incidence des maladies pour les particules,*
- *Entre 2800 et 5200 MJ pour les ressources fossiles et nucléaires et*
- *Entre 90 et 200 kg kBq 235 eq pour les radiations ionisantes*

Conclusion 1.5

La préparation et la valorisation en chaufferie dédiée d'une tonne de CSR présente des contributions au changement climatique d'autant plus faibles que le taux de biogénique est élevé (sous le postulat d'une neutralité carbone).

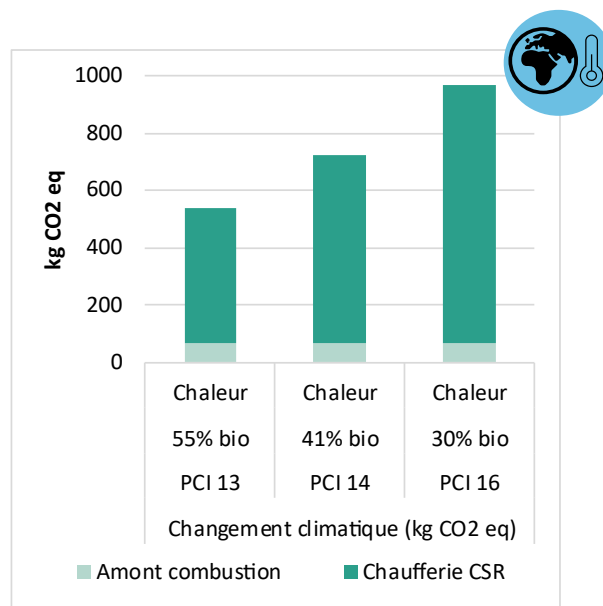


Figure 61 : Contribution au changement climatique pour différentes compositions de CSR, pour 1t de CSR (Volet 1)

7.2. Conclusions du volet 2

Pour rappel, le volet 2 considère les impacts environnementaux de la préparation et la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de déchets, ainsi que les bénéfices liés aux évitements de la production de chaleur à partir de gaz naturel, d'électricité à partir du mix électrique français et du traitement des déchets en ISDND.

Conclusion 2.1 En considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR, la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR présente des contributions aux enjeux environnementaux d'autant plus faibles que le rendement global de production d'énergie est élevé (que ce soit via la production de chaleur seule, ou via la production conjointe de chaleur et d'électricité en cogénération).

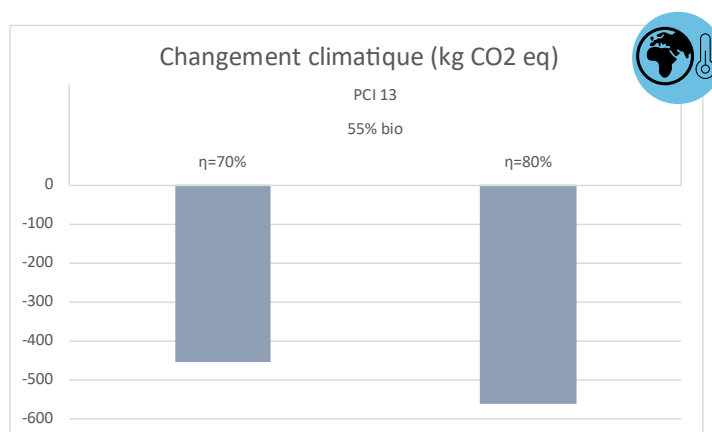


Figure 62 : Contribution au changement climatique pour différents rendements de chaufferie produisant de la chaleur seule pour 1t de CSR (Volet 2)

Conclusion 2.2 En considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR,

la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR présente un intérêt variable en fonction des enjeux environnementaux considérés :

- Elle représente un bénéfice pour les ressources fossiles et nucléaires et l'eutrophisation marine, quelle que soit la composition ou le type de chaufferie.
- Elle représente un bénéfice ou un dommage pour l'acidification, le changement climatique et les émissions de radiations ionisantes, selon la composition et le type de chaufferie.
- Elle représente un dommage pour les particules fines, pour toutes les compositions et types de chaufferies.

En considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR, la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR présente :

- un bénéfice pour l'acidification
 - Si la chaufferie produit de la chaleur seule ou
 - Si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et qu'elle a un débouché continu pour la chaleur (raccordement à l'industrie).
- une contribution neutre pour l'acidification
 - Si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et qu'elle n'a pas de débouché continu pour la chaleur (raccordement au réseau de chaleur).

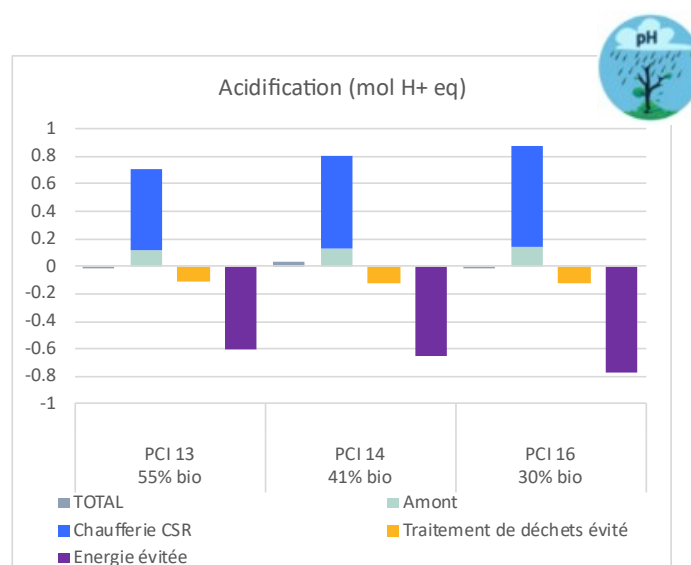


Figure 63 : Contribution à l'acidification pour les différentes compositions et les différents types de chaufferies, pour 1t de CSR (Volet 2)

Conclusion 2.3

En considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR, la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR présente

- un bénéfice pour le changement climatique

- Si la chaufferie produit de la chaleur seule ou
 - Si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération et qu'elle a un débouché continu pour la chaleur (raccordement à l'industrie) ou
 - Si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération sans débouché continu pour la chaleur et que le CSR a un taux de biogénique de plus de 40%.
- un dommage pour le changement climatique si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération sans débouché continu pour la chaleur (raccordement au réseau de chaleur) et que le CSR a un taux de biogénique en énergie de 40% ou moins.

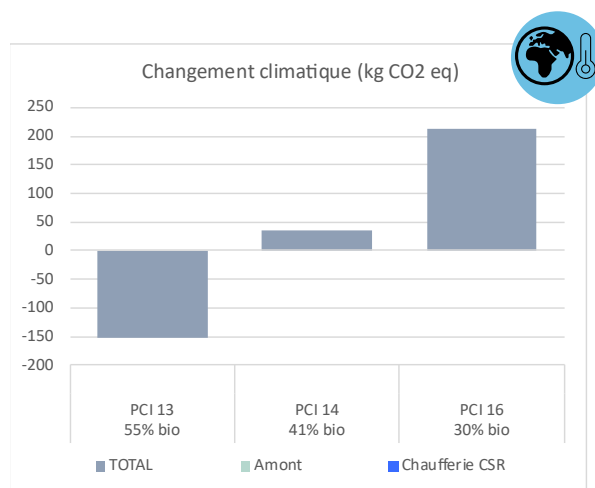


Figure 64 : Contribution au changement climatique pour différentes compositions de CSR pour une chaufferie cogénération sans débouché continu pour la chaleur, pour 1t de CSR (Volet 2)

Conclusion 2.4

En considérant l'évitement du stockage des déchets valorisés en CSR, et l'évitement de la production de chaleur à partir de gaz naturel et d'électricité à partir du mix moyen FR, la production d'énergie à partir d'une tonne de CSR présente :

- un bénéfice pour l'émission de radiations ionisantes
 - Si la chaufferie produit de la chaleur et de l'électricité par cogénération (avec ou sans débouché continu)
- un dommage pour l'émission de radiations ionisantes
 - Si la chaufferie produit de la chaleur seule, ce qui ne permet pas l'évitement de la production d'électricité avec des centrales nucléaires.

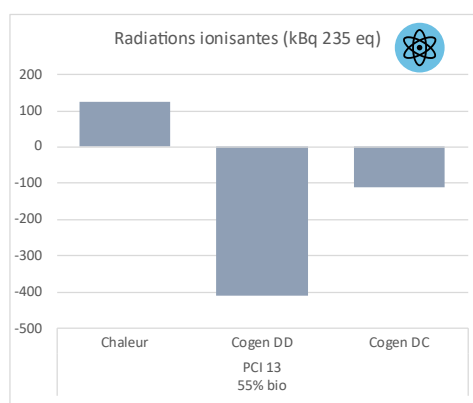


Figure 65 : Contribution aux radiations ionisantes pour les différents types de chaufferie, pour 1t de CSR (Volet 2)

7.3. Conclusions pour le volet 3-A

Pour rappel, le volet 3A considère les impacts environnementaux de la préparation et la combustion en chaufferie CSR de 3,1 à 6,7 Mt de déchets en 2030 et en 2040, ainsi que les bénéfices liés aux évitements du traitement des déchets en ISDND.

Conclusion 3A.1

Sur base des hypothèses suivantes :

- Sous le postulat de la neutralité carbone,
- S'il n'y a pas de compétition avec la valorisation matière du bois, du papier et du carton,
- pour un CSR ayant un taux de biogénique de 44% en énergie,
- pour une répartition des chaufferies représentatives des projets déclarés en France.⁷⁵
- et en considérant uniquement les évitements liés au traitement des déchets,

le déploiement de la filière CSR permet de détourner des installations de stockage :

- Entre 3,1 et 3,2 Mt de déchets en 2030.
- Entre 3,4 et 6,7 Mt de déchets en 2040.

Conclusion 3A.2

Sur base des hypothèses suivantes :

- Sous le postulat de la neutralité carbone,
- S'il n'y a pas de compétition avec la valorisation matière du bois, du papier et du carton,
- pour un CSR ayant un taux de biogénique de 44% en énergie,
- pour une répartition des chaufferies représentatives des projets déclarés en France.⁷⁵
- et en considérant uniquement les évitements liés au traitement des déchets,

le déploiement de la filière CSR engendrera en France :

- **en 2030** des émissions nettes de GES entre 1,4 et 1,5 Mt CO₂ eq.
- **en 2040** des émissions nettes de GES entre 1,5 et 3,0 Mt CO₂ eq.

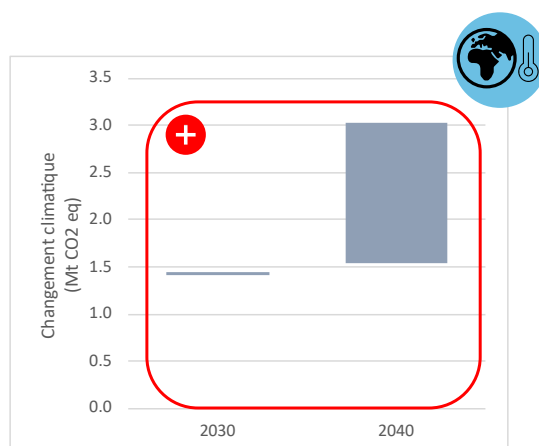


Figure 66 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR, pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3-A)

⁷⁵ 53% en cogénération avec débouché continu, 39% en production de chaleur seule et 8% en cogénération sans débouché continu

7.4. Conclusions pour le volet 3-B

Pour rappel, le volet 3B considère les impacts environnementaux de la préparation et la combustion en chaufferie CSR de 3,1 de déchets en 2030 à 6,7 Mt en 2040, ainsi que les bénéfices liés aux évitements de la production de chaleur à partir de gaz naturel, d'électricité à partir du mix électrique français.

Conclusion 3B.1

Sous le postulat de la neutralité carbone, qu'il n'y ait pas de compétition avec la valorisation matière du bois, du papier et du carton, pour un CSR ayant un taux de biogénique de 44% en énergie, pour une répartition des chaufferies représentative des projets déclarés en France⁷⁵, pour des gammes de rendements représentatives du terrain et du minimum réglementaire⁷⁶ et en considérant uniquement les évitements liés à la production d'énergie, le déploiement de la filière CSR permet de produire l'énergie suivante :

- Entre 0,5 et 1,2 TWh d'électricité et entre 8,2 et 9,5 TWh de chaleur en 2030.
- Entre 0,5 et 2,7 TWh d'électricité et entre 9,0 et 19,9 TWh de chaleur en 2040.

Conclusion 3B.2

Sous le postulat de la neutralité carbone, qu'il n'y ait pas de compétition avec la valorisation matière du bois, du papier et du carton, pour un CSR ayant un taux de biogénique de 44% en énergie, pour une répartition des chaufferies représentative des projets déclarés en France⁷⁵, pour des gammes de rendements représentatives du terrain et du minimum réglementaire⁷⁶ et en considérant uniquement les évitements liés à la production d'énergie :

- Le déploiement de la filière CSR engendrera ou évitera en 2030 des émissions de GES. Cela représente entre -0,16 et 0,12 Mt CO₂ eq suivant le rendement des chaufferies et la quantité de CSR produite.
- Le déploiement de la filière CSR, engendrera ou évitera en **2040** des émissions de GES. Cela représente entre -0,33 et 0,25 Mt CO₂ eq suivant le rendement des chaufferies et la quantité de CSR produite.

⁷⁶ Les hypothèses sur les rendements des chaufferies sont les suivantes :

	η therm min	η therm max	η elec min	η elect max
Chaleur seule	70%	80%	N.A.	N.A.
Cogénération sans débouché continu	70% (5 mois) 0% (7 mois)	80% (5 mois) 0% (7 mois)	0% (5 mois) 30% (7 mois)	0% (5 mois) 45% (7 mois)
Cogénération avec débouché continu	70%	78%	5%	15%

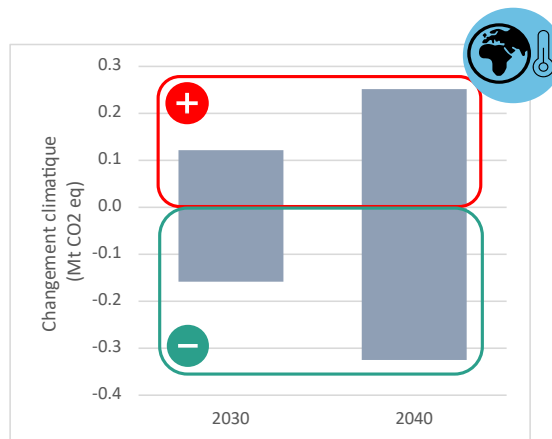


Figure 67 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR, pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3B)

Conclusion 3B.3

Une moindre performance en termes de rendement des chaufferies peut annuler les bénéfices pour le changement climatique

- En 2030, cela engendre une fourchette d'émission d'environ 0,12 Mt CO₂ eq par année lorsque le rendement est faible alors que cela évite une fourchette d'émission entre 0,15 et 0,16 Mt CO₂ eq par année lorsque le rendement est élevé.
- En 2040, cela engendre une émission entre 0,13 et 0,25 Mt CO₂ eq par année lorsque le rendement est faible alors que cela évite une émission entre 0,17 et 0,33 Mt CO₂ eq par année lorsque le rendement est élevé.

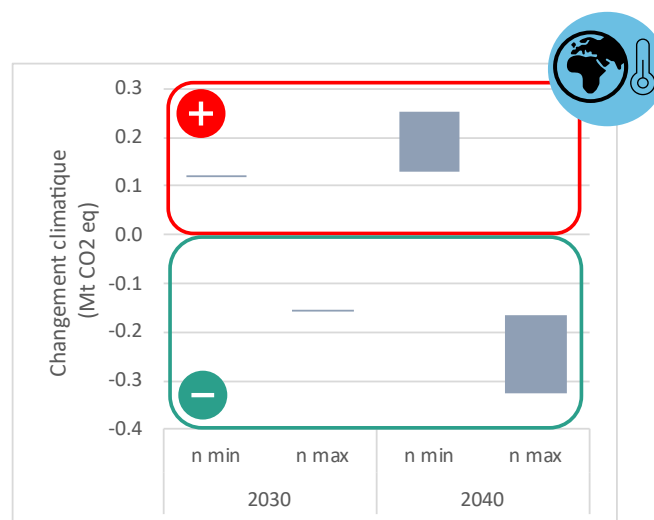


Figure 68 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR pour les rendements min et max et pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3B)

8. Conclusions des analyses additionnelles de sensibilité

8.1. Analyses de sensibilité relatives au volet 2

Rappel : Le volet 2 traite de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée, en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND et l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

Conclusion AS.1 Influence du type de déchet composant le CSR : La proportion des flux de déchets composant le CSR influence fortement la contribution aux différents critères environnementaux :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

Les déchets d'origine biogénique ont une contribution nette au changement climatique plus faible que les déchets d'origine fossile car il est considéré que les émissions de CO₂ biogénique ne contribuent pas au changement climatique selon la méthode de comptabilisation des émissions de CO₂b retenue en cas de base.

Les déchets se dégradant plus en installation de stockage (papier-carton) présentent pour le volet 2 une contribution nette au changement climatique plus faible que les autres déchets, car les bénéfices liés à l'évitement des émissions de GES lors du stockage sont plus élevés.

	Critères environnementaux					
Flux composant le CSR	CC.	Ac.	Eutro_m	PM	Res_f	IR
Bois	+	+	0	+	+	+
Papier-Carton	++	+	+	+	+	+
Plastique	-	++	+	++	++	++
Autres combustibles	+	-	++	+	+	+

Légende : + bénéfice faible / ++ bénéfice moyen / +++ bénéfice élevé / - impact / 0 neutre

Conclusion AS.2 Influence de la méthode de comptabilisation du CO₂ biogénique :

La méthodologie de comptabilisation des émissions de CO₂ biogénique choisie influence fortement la contribution au changement climatique pour les flux avec un taux de biogénie en énergie élevé.

Les flux avec un haut taux de biogénie en énergie et se dégradant peu en installation de stockage sur 100 ans voient leur contribution changer de signes suivant la méthodologie de comptabilisation des émissions de CO₂ biogénique appliquée (ex : le bois, les autres combustibles).

Conclusion AS.3 Influence du rendement de la chaufferie :

La contribution aux différents critères environnementaux :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND,
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

diminue plus le rendement est élevé.

Toutefois, les variabilités de rendement étudiées n'engendrent pas pour autant de changement de conclusions sur le bilan net ; elles restent similaires à celles établies pour des rendements plus faibles, seule la valeur du bilan change légèrement.

Conclusion AS.4 Influence du taux biogénique en énergie sur la contribution au changement climatique :

La contribution au changement climatique :

- de la préparation d'une tonne de CSR (avec un PCI de 13.5 MJ/kg) et de sa valorisation en chaufferie cogénération sans débouché continu pour la chaleur,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix moyen FR) et de chaleur à partir de gaz naturel.

dépend

- du système de traitement de déchets remplacé (évité),
- du type d'énergie remplacée (évitée),
- du type d'énergie valorisée et de la présence ou non d'un débouché,
- du rendement de la chaufferie,
- du taux biogénique en énergie.⁷⁷

Elle présente un point de changement de conclusion pour les CSR étudiés pour des taux biogéniques en énergie se situant entre 40% et 45%.

Conclusion AS.5 Influence du type de système de production d'énergie évité (production de chaleur et d'électricité de manière conjointe ou dissociée) :

La contribution aux différents critères environnementaux :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité et de chaleur de manière dissociée ou conjointe.

dépend :

- du système de traitement de déchets remplacé (évité),
- du type d'énergie remplacée (évitée).⁷⁸,
- du type d'énergie valorisée et de la présence ou non d'un débouché,
- du rendement de la chaufferie,
- du taux biogénique en énergie.

⁷⁷ Il est donc nécessaire d'évaluer ce point pour chaque projet spécifique. Ce point est illustré pour différents taux biogéniques en énergie (40%, 45%).

⁷⁸ Il est donc nécessaire d'évaluer ce point pour chaque projet spécifique. Ce point est illustré pour une production conjointe et dissociée d'électricité et de chaleur.

Elle présente un bénéfice ou un dommage selon le type de chaufferie et si la chaleur et l'électricité évitées sont produites de manière conjointe ou dissociée :

		Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Bilan net pour le changement climatique	Production dissociée	Bénéfice	Fonction du taux de biogénique en énergie	Bénéfice
	Production conjointe	Fonction du taux biogénique en énergie	Bénéfice	Bénéfice
Bilan net pour l'acidification	Production dissociée	Bénéfice	Neutre	Bénéfice
	Production conjointe	Dommage	Bénéfice	Bénéfice
Bilan net pour l'eutrophisation marine	Production dissociée	Bénéfice		
	Production conjointe			
Bilan net pour les particules fines	Production dissociée	Dommage		
	Production conjointe			
Bilan net pour les ressources fossiles	Production dissociée	Bénéfice		
	Production conjointe			
Bilan net pour les radiations ionisantes	Production dissociée	Dommage	Bénéfice	
	Production conjointe	Dommage		

Conclusion AS.1 Influence du type de système de production de chaleur évité (Production à partir de gaz naturel, charbon ou fioul) :

La contribution aux différents critères environnementaux :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité (mix électrique FR) et de chaleur (gaz naturel ou fioul ou charbon).

dépend :

- du système de traitement de déchets remplacé (évité),
- du type d'énergie remplacée (évitée).⁷⁹,
- du type d'énergie valorisée et de la présence ou non d'un débouché,
- du rendement de la chaufferie,
- du taux biogénique en énergie.

⁷⁹ Il est donc nécessaire d'évaluer ce point pour chaque projet spécifique. Ce point est illustré pour une production de chaleur à partir de gaz naturel, de fioul et de charbon.

Elle présente un bénéfice ou un dommage selon le type de chaufferie, la composition et si le combustible évité pour la production de chaleur est du gaz naturel, du fioul ou du charbon :

	Combustible évité pour la production de chaleur	Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Bilan net pour le changement climatique	Gaz naturel	Bénéfice	Fonction du taux de biogénique en énergie	Bénéfice
	Fioul		Fonction du taux de biogénique en énergie	
	Charbon		Bénéfice	
Bilan net pour les particules fines	Gaz naturel	Dommage	Dommage	Dommage
	Fioul	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice
	Charbon			
Bilan net pour les ressources fossiles et nucléaires	Gaz naturel	Bénéfice	Bénéfice	Bénéfice
	Fioul			
	Charbon			
Bilan net pour les radiations ionisantes	Gaz naturel	Dommage	Bénéfice	Bénéfice
	Fioul			
	Charbon			

Conclusion AS.1

Influence du type de système de traitement de déchets évité (ISDND ou UVE) :

Le système de traitement de déchets évité a une influence forte sur les indicateurs « changement climatique » et « eutrophisation marine ». Pour les autres indicateurs, le système de traitement de déchets n'est pas significatif. Sur le changement climatique, l'ISDND a un impact plus faible que l'UVE, alors que sur l'eutrophisation marine, il a un impact plus élevé que l'UVE.

La contribution au changement climatique et à l'eutrophisation marine :

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité et de chaleur de manière dissociée ou conjointe.

dépend :

- du système de traitement de déchets remplacé (évité)⁸⁰,
- du système de production d'énergie évité,
- du type d'énergie valorisée et de la présence ou non d'un débouché,
- du rendement de la chaufferie,
- du taux biogénique en énergie.

⁸⁰ Il est donc nécessaire d'évaluer ce point pour chaque projet spécifique. Ce point est illustré pour un traitement en ISDND et en UVE.

Elle présente un bénéfice ou un dommage selon la composition et le type de chaufferie et si le système de traitement des déchets évité est l'ISDND ou l'UVE :

	Système de traitement de déchets évité	Chaleur	Cogénération sans débouché continu	Cogénération avec débouché continu
Bilan net pour le changement climatique	ISDND	Bénéfice moyen si faible taux biogénique en énergie (55%) Bénéfice élevé si fort taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice moyen si fort taux biogénique en énergie (55%) Dommage si faible taux biogénique en énergie (40% et 30%)	Bénéfice moyen si faible taux biogénique en énergie (55%) Bénéfice élevé si fort taux biogénique en énergie (40% et 30%)
	UVE	Bénéfice élevé	Bénéfice moyen	Bénéfice élevé
Bilan net pour l'eutrophisation marine	ISDND	Bénéfice élevé		
	UVE	Bénéfice faible		

Conclusion AS.2

Influence du type de système de production de chaleur évité (biogaz capté en ISDND brûlé en torchère ou valorisé en cogénération) :

L'impact environnemental du biogaz capté en ISDND est environ équivalent, qu'il soit brûlé en torchère ou valorisé en chaudière à cogénération. Cela ne change que très légèrement le bilan net de l'impact environnemental.

L'intérêt d'une valorisation en chaufferie

- de la préparation d'une tonne de CSR et de sa valorisation en chaufferie dédiée,
- en prenant en compte l'évitement du stockage des déchets en ISDND,
- et en prenant en compte l'évitement de la production d'électricité et de chaleur dépend :
- du système de traitement de déchets remplacé (évité),
- du système de production d'énergie remplacé (évité),
- du type d'énergie valorisée et de la présence ou non d'un débouché,
- du rendement de la chaufferie,
- du taux biogénique en énergie.

Il est donc nécessaire d'évaluer ce point pour chaque projet spécifique.

8.2. Analyses de sensibilité relatives au volet 3

Rappel :

- Le volet 3-A traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte l'évitement du stockage de ces déchets entrants dans la composition du CSR en ISDND.
- Le volet 3-B traite de la préparation d'un gisement de déchets et de sa valorisation en chaufferie CSR, en prenant en compte la valorisation de l'énergie produite par la chaufferie et la non-production d'énergie (chaleur et électricité) par d'autres moyens de production (électricité et gaz naturel).

Conclusion AS.3 La contribution au changement climatique en 2030 et 20240 de la filière CSR par rapport :

- aux filières actuelles de traitement de ces déchets (volet 3A)
- aux filières actuelles de production de chaleur (volet 3B)

varie suivant la méthodologie de comptabilisation du CO₂ biogénique.

Pour le volet 3A, quel que soit la méthodologie de comptabilisation du CO₂ biogénique appliquée, le déploiement de la filière CSR engendre des émissions nettes de CO₂e.

Pour le volet 3B, selon la méthode de comptabilisation du carbone biogénique utilisée, une inversion des conclusions peut avoir lieu. La non-considération du concept de neutralité carbone induit que le déploiement de la filière CSR engendre des émissions nettes de CO₂e.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bleu Safran. ACV comparatives entre différentes solutions d'emballages - Cadre de Référence | Version 01. 2022;

Agir pour la transition écologique | ADEME [Internet]. 2024 Appel à projet Énergie CSR (Combustibles solides de récupération) 2024. Disponible sur: <https://agir.ademe.fr/aides-financieres/aap/appel-projet-energie-csr-combustibles-solides-de-recuperation-2024>

Arrêté du 23 mai 2016 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement - Légifrance [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000042425949/#LEGIARTI000042425949>

Arrêté du 23 mai 2016 relatif aux installations de production de chaleur et/ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans des installations prévues à cet effet associés ou non à un autre combustible et relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement - Légifrance [Internet]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/IORFTEXT000032575814/>

Article L281-4 - Code de l'énergie - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043211331

Article L281-6 - Code de l'énergie - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043211349/2025-01-17

Article R541-8 - Code de l'environnement - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042662931

Article R541-8-1 - Code de l'environnement - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032554270

Article R541-48-3 - Code de l'environnement - Légifrance [Internet]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000044062074

Base de données Base Empreinte®[Internet]. Disponible sur: <https://base-empreinte.ademe.fr/ecoinvent> [Internet]. Base de données ecoinvent. Disponible sur : <https://ecoinvent.org/>

European Commission : Joint Research Centre, Cusano, G., Roudier, S., Neuwahl, F., Holbrook, S. et al. Best Available Techniques (BAT) reference document for waste incineration - Publications Office of the

EU [Internet]. 2019 Disponible sur : <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/075477b7-329a-11ea-ba6e-01aa75ed71a1/language-en>

SDES. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. Chiffres clés de l'énergie - Édition 2024. Disponible sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2024>

FEDEREC, COMPTE-R, ADEME. Combustibles solides de récupération (CSR). 2015 ;

Environmental Footprint Methods - European Commission [Internet]. 2024 Disponible sur : https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en

ADEME. Etat de l'art de la production et de l'utilisation de combustibles solides de récupération.

SCORELCA. étude n°2021-01 Analyse du cycle de vie de la biomasse énergie: état de l'art, enjeux méthodologiques et recommandations. 2021 ;

SCORELCA. étude n°2023-01 Comptabilisation des GES biogéniques. 2023 ;

European Platform on LCA | EPLCA [Internet]. Disponible sur : <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developEF.html>

CEREMA. Gestion des mâchefers d'incinération des déchets non dangereux (MIDND). 2014;

AMORCE. Gestion des REFIOM des UIOM françaises. 2012 ;

ADEME, RDC Environment. La librairie ADEME. 2019 Impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets des activités économiques. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/461-impacts-environnementaux-de-scenarios-de-valorisation-energetique-des-dechets-des-activites-economiques.html>

Beylot et al. Installations d'incinération françaises sur la période 2012-2015. 2017 ;

JRC. JRC Publications Repository. 2010 International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. Disponible sur : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC58190>

ISO [Internet]. ISO 14044 :2006. Disponible sur : <https://www.iso.org/fr/standard/38498.html>

Comission Européenne. Journal officiel C 101/2023 [Internet]. Disponible sur : https://publications.europa.eu/resource/cellar/f4513659-c464-11ed-a05c-01aa75ed71a1.0009.03/DOC_1

ADEME. L'ADEME LANCE SON 6ème APPEL À PROJETS « ENERGIE CSR » POUR CONTRIBUER A LA REDUCTION DES EMISSIONS CARBONE [Internet]. Agence de la transition écologique. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/presse/communique-national/lademe-lance-son-6eme-appel-a-projets-energie-csr-pour-contribuer-a-la-reduction-des-emissions-carbone/>

ANCRE. Les combustibles solides de récupération (CSR): Les verrous techniques, réglementaires, économiques et sociétaux de la filière en France. 2018;171.

Allegrini E, Vadenbo C, Boldrin A, Astrup TF. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. Journal of Environmental Management. 15 mars 2015 ; 151:132-43.

Doka. Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. 2017 ;

Loi anti-gaspillage économie circulaire [Internet]. 2020 Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire>

Loi de transition énergétique pour la croissance verte | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique [Internet]. 2016 Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/loi-transition-energetique-croissance-verte>

ADEME, BRGM. La librairie ADEME. 2017 Outil WILCI pour l'analyse du cycle de vie de l'incinération des déchets ménagers et assimilés en France. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/2687-outil-wilci-pour-l-analyse-du-cycle-de-vie-de-l-incineration-des-dechets-menagers-et-assimiles-en-france.html>

SA.107668 - Régime cadre temporaire relatif aux aides visant à accélérer le déploiement des énergies renouvelables grâce aux investissements en faveur de l'utilisation de combustibles solides de récupération (CSR) | L'Europe s'engage en France, le portail des Fonds européens [Internet]. 2023 Disponible sur : <https://www.europe-en-france.gouv.fr/aides-d-etat/regimes-d-aide/sa107668-sa107668-regime-cadre-temporaire-relatif-aides-visant>

AMORCE. Saturation actuelle ou prochaine des ISDND : où en est-on aujourd'hui dans les discussions ? [Internet]. 2019 Disponible sur : <https://amorce.asso.fr/actualite/saturation-actuelle-ou-prochaine-des-isdnd-ou-en-est-on-aujourd-hui-dans-les-discussions>

ADEME, FEDEREC, RAGT, INDDIGO. La librairie ADEME. 2019 Technologies innovantes de valorisation des CSR (Combustibles Solides de Récupération). Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4641-technologies-innovantes-de-valorisation-des-csr-combustibles-solides-de-recuperation.html>

ADEME. Transition(s) 2050 : choisir maintenant, agir pour le climat. Angers : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ; 2021. 685 p. (Horizons).

RECORD. Utilisation des CSR et des RDF en Europe : Synthèse bibliographique et situations administratives rencontrées sur le terrain. 2018 ;331.
ATEE. Webinaire Conception et Design des chaufferies CSR. 2021 ;

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 2 : Gisement de bois et de papier-carton utilisable pour la préparation des CSR en France (2030 et 2040)	27
Tableau 3 : Unité fonctionnelle	32
Tableau 4 : Synthèse des frontières du système par volet	33
Tableau 5 : Synthèse des paragraphes à considérer pour chaque volet	34
Tableau 6 : Résumé des différentes approches de comptabilisation du carbone biogénique pour l'ensemble des installations étudiées (stockage, incinération et chaufferie CSR)	40
Tableau 7: Catégories d'impacts potentiels étudiées (EF 3.1 ⁴⁵)	42
Tableau 8 : Critères d'évaluation de la qualité des jeux de données secondaires	45
Tableau 9 : Critères de notation de la qualité des jeux de données d'inventaire du cycle de vie	45
Tableau 10 : Synthèse des chapitres à considérer par volet	46
Tableau 11 : Efficacités de préparation dans les centres de préparation CSR (Source : Etude ADEME Impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques)	47
Tableau 12 : Consommations associées aux centres de préparation CSR	48
Tableau 13 : Calcul de la masse de la fraction hors CSR	48
Tableau 14 : Composition des trois types de CSR	50
Tableau 15 : Potentiel de production de CSR en Mt	51
Tableau 16 : Taux biogénique en énergie par flux de déchet	51
Tableau 17 : Rendement énergétique des unités	55
Tableau 18 : Procédés d'arrière-plan du modèle	64
Tableau 19 : Récapitulatif des données pour les unités dédiées	65
Tableau 20 : Mix électrique moyen français	65
Figure 28 : Mix électriques français en 2030 selon "transition 2050"	66
Figure 29 : Mix électriques français en 2040 selon "Transition 2050"	66
Tableau 21 : Mix électriques retenus, basé sur les scénarios "Transition 2050"	66
Tableau 22 : Facteurs d'émission des différentes sources d'énergie (Base Empreinte ®)	67
Tableau 23 : Déchets non envoyés en installation de stockage	69
Tableau 24 : ICV utilisés pour modéliser le stockage en ISDND	69
Tableau 25 : Phases du cycle de vie étudiées dans les résultats	72
Tableau 26 : Quantité d'énergie produite pour une tonne de CSR envoyée en chaufferie dédiée	74
Tableau 27 : Flux contributeurs principaux lors de la préparation et de la combustion de CSR	77
Tableau 28 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR (production de chaleur seule) - volet 1	79
Tableau 29 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR (cogénération avec ou sans débouché continu pour la chaleur) - volet 1	79
Tableau 30 : Impacts environnementaux pour les systèmes alternatifs – Volet 2	83
Tableau 31 : Flux contributeurs principaux pour les évitements du stockage des déchets – volet 2	86
Tableau 32 : Impact unitaire pour les 6 indicateurs retenus, pour 1t de CSR (volet 2)	87
Tableau 33 : Impact unitaire pour les 6 indicateurs retenus, pour 1MWh de chaleur produite (volet 2) ..	87
Tableau 34 : Composition moyenne du CSR	88
Tableau 35 : Flux considérés dans le volet 3, pour le gisement potentiel de CSR envoyée en chaufferie dédiée	88
Tableau 36 : Quantité de chaleur produite pour les différents scénarios en 2030 et 2040, pour les tonnages estimés	89
Tableau 37 : Impact sur le changement climatique des différentes compositions et scénarios pour 2030 et 2040, pour les tonnages estimés	93
Tableau 39 : Impact sur le changement climatique des compositions à 45% et 50% de biogénique en énergie, pour 1t de CSR, pour une chaufferie à cogénération sans débouché continu (volet 2)	105
Tableau 40 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si l'énergie évitée est produite de manière conjointe ou dissociée, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)	110

Tableau 41 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si la chaleur évitée est produite à partir de gaz naturel, de fioul ou de charbon, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)	115
Tableau 42 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si le traitement de déchets évité est l'ISDND ou l'UVE, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)	117
Tableau 43 : Contribution au changement climatique des différentes étapes du cycle de vie, selon si le traitement de déchets évité est l'ISDND ou l'UVE, pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)	119
Tableau 44 : Evaluation de la qualité des jeux de données utilisés dans le modèle (Voir Chapitre 3.2.6 pour la méthodologie)	145
Tableau 45: Coefficients de transfert en unités dédiées - CSR.....	146
Tableau 46 : Facteurs de normalisation et pondération des impacts.....	149
Tableau 47 : Comparaison des différentes compositions de CSR en unité CSR dédiée destinée à la production de chaleur ou à la cogénération – Pour une tonne de CSR entrant en chaufferie dédiée (Volet 2).....	151
Tableau 48 : Comparaison des différentes compositions de CSR en unité CSR dédiée destinée à la production de chaleur ou à la cogénération – Pour 1 MWh de chaleur utile (Volet 2).....	153
Tableau 49 : Extrapolation au gisement français - volet 3	154
Tableau 50 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de déchets envoyée en chaufferie	155
Tableau 51 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie en fonction du rendement de la chaufferie	157
Tableau 52 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie	158
Tableau 53 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie par rapport aux modes de traitement des déchets alternatifs	159
Tableau 54 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie par rapport aux modes de production de chaleur alternatifs	162
Tableau 55 : Processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel (market for heat, district or industrial, natural gas, Europe without Switzerland)	163

FIGURES

Figure 1 : Décomposition de la mission en 4 lots distincts	10
Figure 2 : Schéma de l'évolution des obligations réglementaires en lien avec la gestion des DAE/DMA (lot 2)	12
Figure 3 : Schéma représentant les différents acteurs de la filière CSR (source : Lot 4)	16
Figure 4 : Etapes du calcul du potentiel de production des CSR à horizon 2030 et 2040 (Source : Lot 4).....	18
Figure 5 : Cadrage des scénarios Transitions 2050 (ADEME, 2021) (Source : Lot 4).....	19
Figure 6 : Taux de refus de tri des DAE par secteur et scénario, 2030 et 2040 issus du lot 4 (Source : Lot 4)	21
Figure 7 : Destination des refus de DAE (partie non envoyée en valorisation matière) entre la préparation de CSR, l'UVE et l'ISDND – 2030 et 2040 (Source : Lot 4)	22
Figure 8 : Exutoire des déchets selon Transition 2050 (r=rendement de préparation)	22
Figure 9 : Rendement de préparation de CSR par scénario - 2030 et 2040 (Source : Lot 4)	23
Figure 10 et Tableau 1: Evolution du potentiel de production de CSR (2030-2040) pour les différents scénarios (Source : Lot 4).....	24
Figure 11 : Demande en chaleur fossile substituable par du CSR en Mt/an (Source : lot 4, hypothèses lot 3)	26
Figure 12 : Part de la demande en énergie techniquement substituable par du CSR qui peut être remplie par le potentiel de production de CSR calculé pour chaque scénario à partir du gisement produit (max) et du gisement traité (min) (Source : Lot 4)	26
Figure 13 : Exemple de gisement réellement mobilisable et non mobilisé pour deux scénarios	27
Figure 14 : Volet 1 - Frontières du système de préparation et de valorisation de CSR en chaufferie dédiée	34
Figure 15 : Frontières du système pour les trois volets de l'étude	36
Figure 16 : Volet 2/3A - Frontières du système alternatif – Installation de stockage	38
Figure 17 : Répartition des sources d'énergie utilisées dans les réseaux de chaleur (Source : SDES, Bilan énergétique de la France).....	39
Figure 18 : Schéma présentant les différentes approches de comptabilisation du carbone biogénique illustrée pour la préparation et la valorisation du CSR en chaufferie	41
Figure 19 : Masse mobilisée pour les 3 compositions (bio=biogénique).....	47
Figure 20 : Principe de modélisation de valorisation en chaufferie dédiée	52

Figure 21 : Traitement des gaz acides et dépoussiérage - répartition du parc d'unités dédiées par classe de technologie	58
Figure 22 : Groupes de technologies combinant les traitements DeNOx et DeDiox - répartition du parc d'UVE par classe de technologies.....	58
Figure 23 : Calcul des quantités d'émissions gazeuses, aqueuses et REFIOM spécifiques aux déchets	59
Figure 24 : Calcul des quantités d'émissions vers les mâchefers	59
Figure 25 : Emissions de poussières, CO, COV, dioxines	60
Figure 26 : Mode de traitement des REFIOM (AMORCE, 2012).....	62
Figure 27 : Exutoire des mâchefers.....	63
Figure 30 : Volet 3B - Frontières des systèmes évités.....	68
Figure 31 : Part envoyée en ISDND et non envoyée ISDND (r=rendement de préparation).....	68
Figure 32 : Contribution des catégories d'impacts au score unique pour le volet 1 (résultats normalisés et pondérés).....	73
Figure 33 : Contribution des catégories d'impacts au score unique pour le volet 2 (résultats normalisés et pondérés).....	73
Figure 34 : Contribution des catégories d'impacts pour le volet 2, avec iso-pondération.....	74
Figure 35 : Flux considérés dans le volet 1, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie dédiée	75
Figure 36 : Contribution des étapes du cycle de vie aux impacts environnementaux de la filière CSR - volet 1	76
Figure 37 : Impacts environnementaux de la combustion d'une tonne de CSR - volet 1	80
Figure 38 : Flux considérés dans le volet 2, pour une tonne de CSR envoyée en chaufferie dédiée.....	82
Figure 39 : Impacts environnementaux de la filière CSR pour une tonne de CSR en chaufferie dédiée - volet 2 (2/2).....	85
Figure 40 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040 en fonction du tonnage entrant en chaufferie - volet 3A	91
Figure 41 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040 en fonction du tonnage et des rendements - volet 3B	92
Figure 42 : Fourchette de contribution aux émissions de gaz à effet de serre de la filière CSR en 2030 et en 2040, détaillée selon le rendement en fonction des tonnages et du rendement - volet 3B.....	92
Figure 43 : Impacts environnementaux pour des flux unitaires pour 1t de CSR valorisé en chaufferie à cogénération - volet 2	98
Figure 44 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de bois (volet 2)	99
Figure 45 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de papier-carton (volet 2)	100
Figure 46 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne d'autres combustibles (textiles, mousse polyuréthane, ...) (volet 2)	100
Figure 47 : Contribution au changement climatique de la préparation, combustion et évitements liés à la combustion en chaufferie CSR d'une tonne de plastiques (volet 2).....	101
Figure 48 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie produisant de la chaleur seule, pour une tonne de CSR (volet 2)	102
Figure 49 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie en cogénération sans débouché continu pour la chaleur, pour une tonne de CSR (volet 2).....	103
Figure 50 : Evolution de la contribution au changement climatique, acidification, ressources fossiles et nucléaires et radiations ionisantes avec le rendement thermique pour la chaufferie en cogénération, raccordée à l'industrie, pour une tonne de CSR (volet 2).....	103
Tableau 38 : Composition des CSR ayant un taux de biogénique en énergie de 45% et 50%.....	104
Figure 51 : Impact sur le changement climatique des compositions à 45% et 50% de biogénique en énergie, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie cogénération sans débouché continu (volet 2).....	105
Figure 52 : Comparaison de la production d'énergie évitée selon si la chaleur et l'électricité sont produites de manière dissociées (cas de base) ou conjointe (analyse de sensibilité), pour 1t de CSR en chaufferie (volet 2)	109
Figure 53 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie produisant de la chaleur seule (volet 2).....	113
Figure 54 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie en cogénération sans débouché continu pour la chaleur (volet 2).....	113
Figure 55 : Comparaison de la filière CSR avec le gaz naturel, le fioul, le charbon, pour 1t de CSR en chaufferie en cogénération raccordée à une industrie (volet 2)	114
Figure 56 : Comparaison de la filière CSR avec l'ISDND, l'UVE, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie dédiée (volet 2)	117
Figure 57 : Comparaison de la filière CSR avec combustion en torchère ou valorisation en chaudière du biogaz capté en ISDND, pour 1t de CSR envoyée en chaufferie dédiée (volet 2)	118

Figure 58 : Trois méthodes de comptabilisation de carbone biogénique, pour les différentes étapes du cycle de vie du CSR, pour une tonne de CSR (volet 3).....	121
Figure 59 : Influence de la méthode de comptabilisation du carbone biogénique sur les résultats, pour 1t de CSR (volet 3).....	122
Figure 60 : Répartition de la contribution des étapes du cycle de vie aux différents enjeux environnementaux (Volet 1).....	123
Figure 61 : Contribution au changement climatique pour différentes compositions de CSR, pour 1t de CSR (Volet 1).....	125
Figure 62 : Contribution au changement climatique pour différents rendements de chaufferie produisant de la chaleur seule pour 1t de CSR (Volet 2)	125
Figure 63 : Contribution à l'acidification pour les différentes compositions et les différents types de chaufferies, pour 1t de CSR (Volet 2).....	126
Figure 64 : Contribution au changement climatique pour différentes compositions de CSR pour une chaufferie cogénération sans débouché continu pour la chaleur, pour 1t de CSR (Volet 2)	127
Figure 65 : Contribution aux radiations ionisantes pour les différents types de chaufferie, pour 1t de CSR (Volet 2).....	127
Figure 66 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR, pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3-A)	128
Figure 67 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR, pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3B).....	130
Figure 68 : Contribution au changement climatique du déploiement de la filière CSR pour les rendements min et max et pour le gisement de CSR à horizon 2030-2040 (Volet 3B)	130
Figure 69 : Composition par flux (issue des données des préparateurs et opérateurs de chaufferie).....	147
Figure 70 : Composition chimique (issue des données des préparateurs et opérateurs de chaufferie)..	147
Figure 71 : Part de carbone biogénique dans les CSR (données issues des enquêtes et entretiens)	148
Figure 72 : PCI dans les CSR (données issues des enquêtes et entretiens)	148
Figure 73 : Processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel (market for heat, district or industrial, natural gas, Europe without Switzerland)	163

SIGLES ET ACRONYMES

AAP	Appel A Projets
ACV	Analyse du Cycle de Vie
AGEC	Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CSR	Combustible Solide de Récupération
DAE	Déchets d'Activités Économiques
DEEE	Déchets D'équipements Electriques et Electroniques
DMA	Déchets Ménagers et Assimilés
DNDAE	Déchets Non Dangereux d'Activités Économiques
DNDNI	Déchets non dangereux non inertes
GES	Gaz à Effet de Serre
ISDND	Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux
LTECV	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte
OMR	Ordures Ménagères Résiduelles
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PMCB	Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment
Filière REP	Filières à Responsabilité Élargie des Producteurs
SPGD	Service Public de Gestion des Déchets
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
UIOM	Unité d'Incinération d'Ordures Ménagères
UVE	Unité de Valorisation Énergétique
VHU	Véhicules Hors d'Usage
WILCI	« Waste Incineration Life Cycle Inventory »

ANNEXES

Annexe 1 Limites de l'étude

Dans cette étude, certaines étapes du cycle de vie ont été considérées comme négligeables :

- Les bénéfices liés au recyclage de l'acier et de l'aluminium issu des mâchefers ne sont pas comptabilisés dans les frontières du système car il est supposé qu'ils auraient subi un traitement identique s'il n'y avait pas de chaufferie CSR.

Le périmètre de l'étude a été restreint à comparer la filière CSR à certaines filières alternatives : la filière gaz naturel pour la chaleur, et la filière stockage pour le traitement des déchets

- La pyrogazéification est exclue de l'étude car elle n'est pas pertinente. En effet, il n'existe aucune installation de pyrogazéification de CSR en Europe.
- Les chaufferies biomasse et les incinérateurs ne sont pas considérés comme étant des alternatives aux chaufferies CSR, d'après le lot 4.
- La production d'énergie à partir de charbon, d'électricité et de fioul ainsi que les énergies renouvelables ne sont pas des alternatives aux chaufferies CSR, d'après le lot 4.

Certaines données ont été approximées :

- Les 3 compositions de CSR présentées sont basées sur les données des appels à projet de l'ADEME et adaptés pour obtenir les parts de carbone biogénique souhaitée. Elles ne sont pas basées sur des données réelles.
- Les CSR à destination des cimenteries et des fours à chaux ne sont pas étudiés. Les cimenteries acceptent des compositions ayant des gammes de PCI plus élevées que celles présentées dans cette étude.
- La composition des CSR en différents flux a été définie à l'aide d'entretiens réalisés avec les acteurs du secteur, ainsi que les appels à projets de l'ADEME. Les trois compositions présentées sont donc hypothétiques et étudiées afin de correspondre à des gammes de PCI et des taux biogéniques en énergie transmises par les acteurs du secteur.
- Les technologies de fours utilisées et leur efficacité a été estimée à l'aide de l'outil WILCI, qui est basé sur des données de la bibliographie.
- Les systèmes de traitement des fumées et résidus solides modélisés sont basés sur le modèle WILCI pour les UVE. En particulier pour les technologies de traitement DeNOx et DeDiox qui correspondent au parc d'UVE français pour la période 2012-2015, par manque d'information plus spécifiques et récentes.
- La qualité des données sur les réactifs utilisés pour l'épuration des fumées est faible car elles sont basées sur des données représentatives des techniques utilisées en France sur la période 2012-2015 pour les UVE.
- Les mêmes coefficients de transferts ont été utilisés pour les fours à grille et les fours à lit fluidisé par manque de données spécifiques à chacun des fours.
- Les efficacités de préparation ont été estimées à partir de l'étude ADEME sur les impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets non dangereux des activités économiques (2019).
- L'enfouissement du carton est modélisé de la même manière que l'enfouissement du papier
- Les extrapolations faites pour le volet 3 sont réalisées sur base des données du lot 4 sur le gisement de papier et de bois, qui a de fortes incertitudes. Le gisement total calculé dépend donc des hypothèses formées dans le lot 4, ainsi que les hypothèses formées dans le lot 3 sur la quantité de bois et de papier dans les CSR.
- Les traitements des fumées acides sont modélisés comme utilisant des procédés secs uniquement.

- Les hypothèses sur l'efficacité de préparation n'évoluent pas dans le temps. Elles sont supposées être les mêmes en 2024, 2030 et 2040.

Annexe 2 Qualité des données utilisées

La qualité des différents jeux de données utilisés dans le modèle est évaluée et présentée dans le tableau ci-dessous. Les jeux de données sont regroupés par étapes de la gestion des CSR. Il est possible qu'un jeu de données soit utilisé dans différentes phases, cependant, il n'est présenté qu'une seule fois puisque l'évaluation ne dépend pas de la phase dans laquelle il est impliqué.

Il est important de noter que les données contribuant le plus doivent être les plus justes possible, et que les données ayant une contribution négligeable peuvent avoir une incertitude plus forte.

A noter qu'une grande partie de l'impact environnemental n'est pas modélisée à l'aide des jeux de données ecoinvent, mais plutôt directement à l'aide des flux élémentaires pour modéliser les différentes émissions qui se produisent pendant la combustion des déchets, et le traitement des fumées (par exemple : l'abattement des NO_x dans la chaufferie).

Étape de la gestion des CSR	Procédé	Données de premier plan			Données d'arrière-plan		
		TiR	TeR	GR	TiR	TeR	GR
Composition des CSR	Composition des CSR	1	1	1	1	1	1
Préparation des CSR	Consommation d'électricité	3	3	2	1	1	1
	Consommation de chaleur et d'eau	3	3	2	1	1	2
	Traitement de la fraction hors CSR : bois, papier-carton, plastique, inertes, mousse PU	2	1	1	1	1	2
	Traitement de la fraction hors CSR : métaux, textiles	2	1	1	1	2	2
	Transport de la fraction hors CSR	1	1	1	1	2	2
Transport centre de préparation - chaufferie	Transport des CSR	1	1	1	1	2	2
Combustion en chaufferie CSR (intrants)	Consommation de réactifs	3	3	3	1	2	2
	Infrastructures	2	3	2	2	2	2
Combustion en chaufferie CSR (émissions)	Facteur d'émission des REFIOM	1	3	2			
Combustion en chaufferie CSR (consommation d'électricité)	Consommation d'électricité dans la chaufferie	3	2	1	1	1	1
Combustion en chaufferie CSR (consommation de chaleur)	Consommation de chaleur dans la chaufferie	3	2	1	1	1	2
Traitement des résidus	ISDD	2	2	2	1	1	2
	Fin de vie du ciment	2	2	2	1	1	2
	Exutoire des mâchefers	3	3	2			
	Exutoire des REFIOM	2	3	2			

Étape de la gestion des CSR	Procédé	Données de premier plan			Données d'arrière-plan		
		TiR	TeR	GR	TiR	TeR	GR
Composition des CSR	Composition des CSR	1	1	1	1	1	1
Evitement d'un système de traitement des déchets	Evitement du stockage du bois, papier carton, plastique, mousse PU, internes	1	1	1	1	1	2
	Evitement du stockage des textiles, des métaux	1	1	1	1	2	2
Evitement d'un système de production de chaleur	Production d'électricité	1	1	1	1	1	1
	Production de chaleur	1	1	1	1	1	2

Tableau 44 : Evaluation de la qualité des jeux de données utilisés dans le modèle (Voir Chapitre 3.2.6 pour la méthodologie)

Annexe 3 L'outil WILCI

WILCI⁸¹ est un outil Excel développé par le BRGM permettant de réaliser l'ACV de l'incinération des déchets. Des données par défaut sont disponibles et sont représentatives du secteur français de l'incinération des DMA. En particulier, des données par défaut sur les technologies d'abattement des fumées, les émissions et l'énergie ont été collectées auprès de 90 incinérateurs français, représentatifs des technologies utilisées sur la période 2012-2015. Ces valeurs par défaut peuvent être adaptées par l'utilisateur afin de correspondre au contexte évalué (par exemple, il est possible de modifier les quantités de déchets traités, leur composition, les technologies de traitement des fumées utilisées ou encore les consommations d'énergie de la chaufferie, ...). L'approche de calcul pour la modélisation des flux élémentaires est principalement basée sur la publication de Doka (2013), dont les travaux servent de base aux ICV d'incinération utilisés par ecoinvent. En sortie, WILCI fournit les ICV relatifs au « traitement thermique de x tonnes de DMA », tel que défini par l'utilisateur. WILCI doit donc être associé à un logiciel d'ACV (ici RangeLCA) afin d'obtenir les résultats sur différents indicateurs d'impact.

Annexe 4 Coefficients de transfert

Les coefficients de transfert moyens du parc d'UVE sont calculés d'après l'outil WILCI. Ils sont indiqués au Tableau 45.

Eléments		Coefficients de transfert (g/kg)			
Symbole	Nom	Vers l'air	Vers les mâchefers	Vers les Refiom	Vers l'eau
H2O	Eau	1000,0	0,0	0,0	0
O	Oxygène	961,0	24,5	14,9	0
H	Hydrogène	1000,0	0,0	0,0	0
C	Carbone	994,0	4,0	2,0	0
S	Soufre	13,7	543,6	442,7	0
N	Azote	989,0	10,0	1,0	0
P	Phosphore	1,0	854,0	145,2	0

⁸¹ Source : Antoine Beylot, Stéphanie Muller, Marie Descat, Yannick Ménard, Pascale Michel, et al.. WILCI: a LCA tool dedicated to MSW incineration in France. 16th Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia Symposium 2017., Oct 2017, S. Margherita di Pula, Italy.

B	Bore	120,0	384,0	497,0	0
Cl	Chlore	7,0	11,0	982,0	0
Br	Brome	0,5	190,0	810,0	0
F	Fluor	3,0	414,6	582,4	0
I	Iode	0,6	11,0	988,6	0
Ag	Argent	0,4	721,0	278,4	0
As	Arsenic	7,8	300,0	692,2	0
Ba	Baryum	3,9	500,0	496,5	0
Cd	Cadmium	14,3	65,8	920,0	0
Co	Cobalt	1,8	777,0	221,6	0
Cr	Chrome	0,9	534,0	464,5	0
Cu	Cuivre	0,1	889,0	111,0	0
Hg	Mercur	147,6	17,91	834,6	0
Mn	Manganèse	0,2	614,0	386,4	0
Mo	Molybdène	1,3	760,0	238,4	0
Ni	Nickel	1,3	939,0	60,0	0
Pb	Plomb	0,1	481,0	519,3	0
Sb	Antimoine	0,0	22,7	977,2	0
Se	Sélénium	11,9	31,6	956,7	0
Sn	Etain	0,0	373,0	627,5	0
V	Vanadium	21,2	426,0	552,6	0
Zn	Zinc	0,7	295,0	703,8	0
Be	Béryllium	1,0	696,0	303,0	0
Sc	Scandium	0,5	999,0	0,5	0
Sr	Strontium	0,1	999,0	0,9	0
Ti	Titanium	0,8	785,0	214,3	0
Tl	Thallium	14,3	343,4	642,4	0
W	Tungstène	0,0	751,0	249,0	0
Si	Silicium	0,0	907,0	93,4	0
Fe	Fer	0,0	970,0	30,5	0
Ca	Calcium	7,9	725,0	267,3	0
Al	Aluminium	0,0	820,0	180,2	0
K	Potassium	4,9	412,0	583,3	0
Mg	Magnésium	1,1	875,0	123,9	0
Na	Sodium	8,2	417,0	575,4	0

Tableau 45: Coefficients de transfert en unités dédiées - CSR

Annexe 5 Composition des CSR établie suite aux enquêtes et entretiens

i. Principaux flux

Les principaux flux composant le CSR sont les plastiques, les papiers-cartons, le bois, les métaux et inertes, et les autres combustibles. Suite aux enquêtes et entretiens et au vu de la grande variabilité dans les données recueillies (voir Figure 69), il n'est pas possible de déterminer une composition « type » par flux. Une autre méthode a donc été utilisée pour définir les flux de CSR étudiés dans cette étude. Les valeurs obtenues dans les enquêtes et les entretiens, sont utilisées comme ordres de grandeur pour confirmer les données obtenues par cette autre méthode.

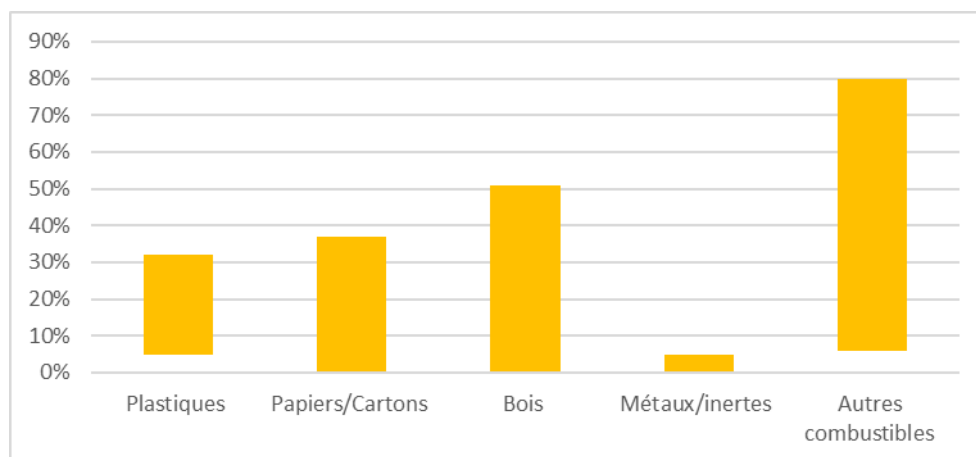


Figure 69 : Composition par flux (issue des données des préparateurs et opérateurs de chaufferie)

De larges plages de valeurs sont obtenues à l'issue de cette analyse (une composition comprenant entre 8 et 80% d'autres combustibles) ne permettant pas de définir de composition type des CSR.

ii. Composition chimique

Il est également peu représentatif d'utiliser les données fournies par les préparateurs et opérateurs de chaufferie, puisque la quantité de données recueillies en termes de composition chimique est faible (moins de 5 enquêtes) et n'est donc pas assez représentative du marché.

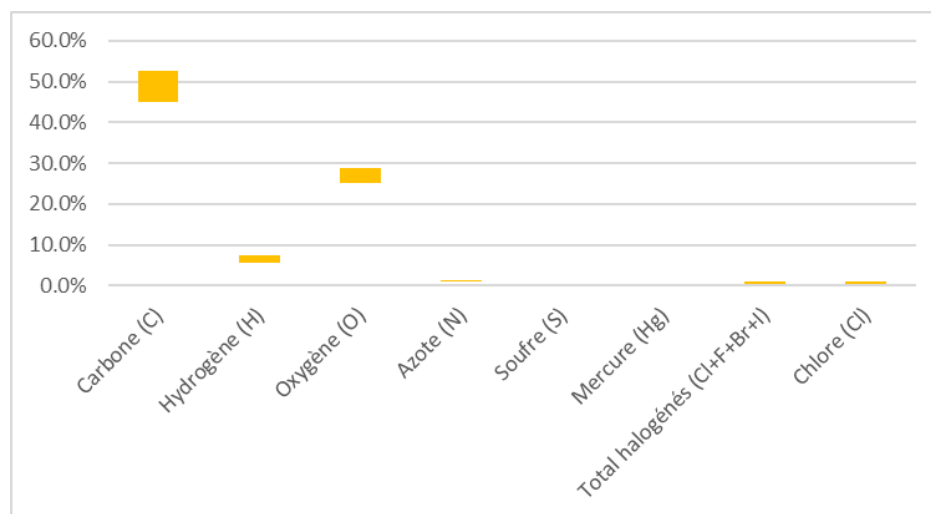


Figure 70 : Composition chimique (issue des données des préparateurs et opérateurs de chaufferie)

Suite aux enquêtes et entretiens, au vu de la faible quantité d'information reçue et de sa dispersion, une autre source de données a été choisie. Ainsi, les données utilisées pour la composition des différents types de CSR est issue des données des appels à projet. Les flux de matériaux présents dans les CSR ont été déterminés (plastique, papier/carton, bois, métaux/inertes, autres) et la composition chimique de ces différents flux a ensuite été identifiée (voir Chapitre 4.2)

Les gammes de valeurs recueillies lors des enquêtes et entretiens ont alors été utilisées pour vérifier et valider les choix des données ressortant des appels à projet.

iii. PCI et taux de carbone biogénique en énergie

Pour la part de carbone biogénique et le PCI des CSR, il y a également une grande variabilité. En effet, le PCI indiqué par les préparateurs et opérateurs des chaufferies est compris entre 12 et 20 MJ/kg, et la part de carbone biogénique est comprise entre 30% et 80%.

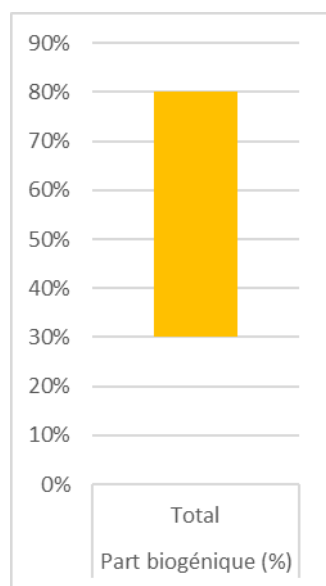


Figure 71 : Part de carbone biogénique dans les CSR (données issues des enquêtes et entretiens)

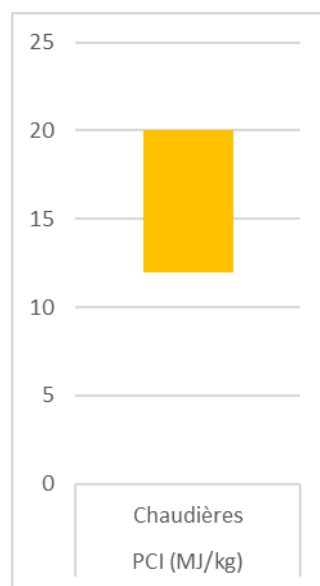


Figure 72 : PCI dans les CSR (données issues des enquêtes et entretiens)

Annexe 6 Facteurs de normalisation et pondération des impacts

Les facteurs de normalisation et pondération suivants, développés par la commission européenne avec la méthode EF 3.1, sont utilisés.

Catégorie d'impact	Unité	Facteur de normalisation	Facteur de pondération
Changement climatique	kg CO ₂ eq. / FU	7,55E+03	21,06%
Épuisement de la couche d'ozone	kg CFC11 eq. / FU	5,23E-02	6,31%
Toxicité cancérogène	CTUh / FU	1,73E-05	2,13%
Toxicité non cancérogène	CTUh / FU	1,29E-04	1,84%
Effet respiratoire – émissions de particules	DALY / FU	5,95E-04	9,00%
Radiations ionisantes	kBq Uranium 235 eq. / FU	4,22E+03	5,01%
Formation d'ozone photochimique	kg NMVOC eq. / FU	4,09E+01	4,78%
Acidification	Moles H eq. / FU	5,56E+01	6,20%
Eutrophisation terrestre	Moles N eq. / FU	1,77E+02	3,71%
Eutrophisation des eaux douces	kg P eq. / FU	1,61E+00	2,80%
Eutrophisation marine	kg N eq. / FU	1,95E+01	2,96%
Ecotoxicité	CTUe / FU	5,67E+04	1,92%
Utilisation des terres	pt / FU	8,19E+05	7,94%
Épuisement de la ressource en eau	m ³ / FU	1,15E+04	8,51%
Épuisement des ressources minérales	kg Sb eq. / FU	6,36E-02	7,55%
Utilisation des ressources fossiles/nucléaires	MJ / FU	6,50E+04	8,32%

Tableau 46 : Facteurs de normalisation et pondération des impacts

Annexe 7 Présentation des catégories d'impact étudiées

- Changement climatique

L'effet de serre est un processus naturel de réchauffement global impliqué dans l'équilibre de rayonnement de la terre. Il est causé par l'émission de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, notamment la vapeur d'eau (le plus gros contributeur de l'effet de serre), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement infra-rouge et causent de ce fait une augmentation de la température atmosphérique. Ce phénomène naturel devient un problème du fait de l'augmentation des gaz à effet de serre provenant des activités humaines.

- Acidification

L'acidification est causée par l'émission de substances acidifiantes dans l'air (principalement NH₃, NO_x et SO₂ notamment issus de la combustion). Elles provoquent le phénomène de « pluies acides » intervenant à des centaines voire des milliers de kilomètres du lieu de leur émission. Les effets de ces pluies acides dépendent de la capacité du milieu récepteur à les neutraliser. Cette capacité s'exprime par la « charge critique » correspondant aux quantités de pluies acides que le milieu peut recevoir sans être affecté

- Eutrophisation marine

Les substances comprenant l'azote et le phosphore, sont considérées comme des substances responsables de l'eutrophisation. L'azote et le phosphore sont essentiels à la survie des êtres vivants, mais l'exposition excessive à ces substances provoque des phénomènes indésirables pour l'écosystème. L'augmentation des nutriments dans l'eau contribue à la formation de phytoplancton qui peut augmenter le risque d'émergence de marées rouges et priver l'eau d'oxygène qui sera utilisée pour la dégradation du phytoplancton.

- Particules fines

Cette catégorie mesure les effets sur la santé humaine de l'exposition aux particules fines. La catégorie des particules couvre les effets des particules fines d'un diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 µm (PM_{2,5}) émises directement (particules primaires) ou formées à partir de précurseurs tels que le NO_x et le SO₂ (particules secondaires). Des études épidémiologiques ont montré une corrélation entre l'exposition aux particules et la mortalité due aux maladies respiratoires ainsi qu'un affaiblissement du système immunitaire

- Ressources fossiles et nucléaires

Cette catégorie évalue l'épuisement de ressources énergétiques naturelles non-renouvelables telles que le pétrole, le gaz, le charbon ou l'uranium. Les consommations sont évaluées au regard des réserves disponibles sur terre et des rythmes actuels d'épuisement.

- Radiations ionisantes

Les radionucléides peuvent être rejetés au cours d'un certain nombre d'activités humaines. Lorsque les radionucléides se désintègrent, ils libèrent des rayonnements ionisants. L'exposition de l'homme aux rayonnements ionisants provoque des altérations de l'ADN, qui peuvent à leur tour entraîner différents types de cancer et des malformations congénitales. Des effets similaires doivent être attendus chez d'autres organismes vivants, mais les dommages causés aux écosystèmes ne sont pas quantifiés à l'heure actuelle. Par conséquent, le seul domaine de protection couvert est celui de la santé humaine.

Annexe 8 Résultats bruts pour une tonne de CSR et pour 1 MWh – Volet 2

Les résultats présentés dans les figures ci-dessus pour une tonne de CSR entrant en chaufferie dédiée sont résumés dans le tableau suivant :

Pour une tonne de CSR envoyée en chaufferie		PCI 13 55% bio			PCI 14 40% bio			PCI 16 30% bio		
Type d'installation	Chaleur	Cogen sans débranché continu	Cogen avec débranché continu		Chaleur	Cogen sans débranché continu	Cogen avec débranché continu	Chaleur	Cogen sans débranché continu	Cogen avec débranché continu
Rendement thermique	80%	80% (5mois)	75%		80%	80% (5mois)	75%	80%	80% (5mois)	75%
Rendement électrique		45% (7 mois)	10%			45% (7 mois)	10%		45% (7 mois)	10%
Quantité de chaleur produite (MWh)	2,87	1,20	2,69		3,11	1,30	2,91	3,63	1,51	3,40
Quantité d'électricité produite (MWh)		0,94	0,36			1,02	0,39		1,19	0,45
Changement climatique (kg CO ₂ eq)	Impacts (1)	537	530	530	726	718	718	968	957	957
	Evitement stockage (2)	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-210
	Evitement énergie (3)	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
	Total (1+2+3)	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
Acidification (Moles H+ eq)	Impacts	0,74	0,71	0,71	0,84	0,81	0,81	0,92	0,87	0,87
	Evitement stockage	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12
	Evitement énergie	-0,71	-0,61	-0,78	-0,76	-0,66	-0,85	-0,89	-0,77	-0,99
	Total	-0,08	-0,01	-0,18	-0,05	0,03	-0,16	-0,09	-0,01	-0,24
Eutrophisatio n marine (kg N eq)	Impacts	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
	Evitement stockage	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,6	-1,6	-1,8	-1,8	-1,8
	Evitement énergie	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,3
	Total	-1,1	-1,0	-1,1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3	-1,4
Particules fines (incidence des maladies)	Impacts	8,8E-6	8,4E-6	8,4E-6	1,1E-05	1,0E-05	1,0E-05	1,1E-05	1,1E-05	1,1E-05
	Evitement stockage	-2,3E-6	-2,3E-6	-2,3E-6	-2,5E-6	-2,5E-6	-2,5E-6	-2,5E-6	-2,5E-6	-2,5E-6
	Evitement énergie	-3,6E-6	-5,7E-6	-5,0E-6	-3,9E-6	-6,2E-6	-5,4E-6	-4,5E-6	-7,2E-6	-6,3E-6
	Total	3,0E-6	4,2E-7	1,2E-6	4,4E-6	1,6E-6	2,4E-6	4,2E-6	8,6E-7	1,8E-6
Ressources fossiles (et nucléaire) (MJ)	Impacts	3907	2864	2864	4212	3096	3096	5239	3546	3546
	Evitement stockage	-352	-352	-352	-388	-388	-388	-393	-393	-393
	Evitement énergie	-12727	-16247	-16100	-13781	-17594	-17435	-16092	-20544	-20358
	Total	-9171	-13735	-13588	-9956	-14886	-14726	-11246	-17390	-17205
Radiations ionisantes (kBq U235 eq)	Impacts	92	92	148	98	98	195	118	118	92
	Evitement stockage	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	Evitement énergie	-502	-201	-14	-543	-218	-17	-634	-255	-502
	Total	-411	-111	132	-447	-122	176	-518	-138	-411

Tableau 47 : Comparaison des différentes compositions de CSR en unité CSR dédiée destinée à la production de chaleur ou à la cogénération – Pour une tonne de CSR entrant en chaufferie dédiée (Volet 2)

Dans certains cas (surlignés en vert dans le Tableau 47) l'utilisation de CSR a un impact environnemental plus faible que ses alternatives pour la production d'énergie (chaleur et électricité) et le traitement des déchets. Dans d'autres cas (surlignés en orange dans le Tableau 47), l'utilisation de CSR a un impact environnemental plus important que ses alternatives.

Les résultats présentés ci-dessus pour une tonne de CSR peuvent également être présentés pour 1 MWh de chaleur utile. Le tableau ci-dessous résume cela :

Pour 1MWh de chaleur utile		PCI 13 55% bio			PCI 14 40% bio			PCI 16 30% bio		
Type d'installation	Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogen avec débouché continu		Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogen avec débouché continu	Chaleur	Cogen sans débouché continu	Cogen avec débouché continu
Rendement thermique	80%	80% (5mois)	75%		80%	80% (5mois)	75%	80%	80% (5mois)	75%
Rendement électrique		45% (7 mois)	10%			45% (7 mois)	10%		45% (7 mois)	10%
Changement climatique (kg CO ₂ eq)	Impacts (1)	187	443	197	233	554	246	267	633	281
	Evitement stockage (2)	-91	-217	-97	-72	-173	-77	-58	-139	-62
	Evitement énergie (3)	-292	-353	-302	-292	-353	-302	-292	-353	-302
	Total (1+2+3)	-195	-127	-202	-131	28	-133	-83	141	-83
Acidification (Moles H+ eq)	Impacts	0,26	0,59	0,26	0,27	0,62	0,28	0,25	0,58	0,26
	Evitement stockage	-0,04	-0,09	-0,04	-0,04	-0,09	-0,04	-0,03	-0,08	-0,04
	Evitement énergie	-0,25	-0,51	-0,29	-0,25	-0,51	-0,29	-0,25	-0,51	-0,29
	Total	-0,03	-0,01	-0,07	-0,02	0,02	-0,05	-0,03	-0,01	-0,07
Eutrophisation marine (kg N eq)	Impacts	0,2	0,6	0,3	0,2	0,6	0,3	0,2	0,5	0,2
	Evitement stockage	-0,5	-1,3	-0,6	-0,5	-1,3	-0,6	-0,5	-1,2	-0,5
	Evitement énergie	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
	Total	-0,4	-0,9	-0,4	-0,4	-0,9	-0,4	-0,4	-0,8	-0,4
Particules fines (incidence des maladies)	Impacts	3,1E-6	7,0E-6	3,1E-6	3,4E-6	7,9E-6	3,5E-6	3,1E-6	7,0E-6	3,1E-6
	Evitement stockage	-7,9E-7	-1,9E-6	-8,4E-7	-8,0E-7	-1,9E-6	-8,5E-7	-7,0E-7	-1,7E-6	-7,4E-7
	Evitement énergie	-1,2E-6	-4,8E-6	-1,8E-6	-1,2E-6	-4,8E-6	-1,8E-6	-1,2E-6	-4,8E-6	-1,8E-6
	Total	1,0E-6	3,5E-7	4,4E-7	1,4E-6	1,2E-6	8,3E-7	1,2E-6	5,7E-7	5,3E-7
Ressources fossiles (et nucléaire) (MJ)	Impacts	1361	2395	1064	1355	2390	1062	1443	2344	1042
	Evitement stockage	-123	-294	-131	-125	-299	-133	-108	-260	-115
	Evitement énergie	-4434	-13584	-5983	-4433	-13584	-5983	-4433	-13583	-5983
	Total	-3195	-11483	-5049	-3203	-11493	-5053	-3098	-11499	-5056
Radiations ionisantes (kBq U235 eq)	Impacts	49	77	34	48	75	34	54	78	35
	Evitement stockage	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1
	Evitement énergie	-5	-419	-75	-5	-419	-75	-5	-419	-75
	Total	44	-343	-41	43	-345	-42	49	-342	-41

Tableau 48 : Comparaison des différentes compositions de CSR en unité CSR dédiée destinée à la production de chaleur ou à la cogénération – Pour 1 MWh de chaleur utile (Volet 2)

Annexe 9 Résultats bruts extrapolés pour les scénarios A et C pour les rendements minimum et maximum – Volet 3

Pour le gisement de 2030 et 2040	2030				2040			
	Scénario A		Scénario C		Scénario A		Scénario C	
	η min	η max	η min	η max	η min	η max	η min	η max
Quantité d'électricité produite (TWh)	0,5	1,3	0,5	1,2	0,5	1,4	1,1	2,7
Quantité de chaleur produite (TWh)	8,4	9,5	8,2	9,2	9,0	10,1	17,6	19,9
Masse entrant en chaufferie CSR (Mt)	3,2		3,1		3,4		6,7	
Préparation et combustion (Mt CO ₂ eq) (1)	2,2	2,2	2,1	2,1	2,3	2,3	4,5	4,5
Traitement de déchets évité (Mt CO ₂ eq) (2)	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-1,5	-1,5
Energie évitée (Mt CO ₂ eq) (3)	-2,1	-2,3	-2,0	-2,3	-2,2	-2,5	-4,3	-4,9
TOTAL (Mt CO ₂ eq) (1+2)	1,5	1,5	1,4	1,4	1,5	1,5	3,0	3,0
TOTAL (Mt CO ₂ eq) (1+3)	0,1	-0,2	0,1	-0,2	0,1	-0,2	0,3	-0,3
TOTAL (Mt CO₂ eq) (1+2+3)	-0,6	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-0,9	-1,3	-1,8

Tableau 49 : Extrapolation au gisement français - volet 3

Annexe 10 Résultats bruts des analyses de sensibilité

En fonction du flux considéré :

Pour 1t de déchets		Bois	Papier-carton	Plastiques	Autres combustibles
Changement climatique (kg CO2 eq)	Préparation et combustion des CSR	61	331	2703	1110
	Energie évitée	-881	-927	-2235	-1288
	Traitement de déchets évité	-102	-1870	-107	-215
	Bilan net	-922	-2466	362	-393
Acidification (mole H+ eq)	Préparation et combustion des CSR	0.47	0.48	0.96	1.69
	Energie évitée	-0.85	-0.89	-2.15	-1.24
	Traitement de déchets évité	-0.08	-0.23	-0.08	-0.11
	Bilan net	-0.46	-0.63	-1.26	0.34
Eutrophisation marine (kg N eq)	Préparation et combustion des CSR	0.3	0.6	0.6	5.7
	Energie évitée	-0.3	-0.3	-0.7	-0.4
	Traitement de déchets évité	-0.5	-2.2	-2.3	-16.2
	Bilan net	-0.4	-1.9	-2.4	-11.0
Particules fines (incidence des maladies)	Préparation et combustion des CSR	2.8E-06	3.6E-06	4.3E-06	7.2E-06
	Energie évitée	-5.4E-06	-5.7E-06	-1.4E-05	-7.9E-06
	Traitement de déchets évité	-2.0E-06	-2.2E-06	-1.8E-06	-2.4E-06
	Bilan net	-4.6E-06	-4.2E-06	-1.1E-05	-3.1E-06
Ressources fossiles (MJ)	Préparation et combustion des CSR	2176	2162	2282	2754
	Energie évitée	-17438	-18345	-44234	-25485
	Traitement de déchets évité	-304	-339	-260	-363
	Bilan net	-15566	-16522	-42212	-23094
Radiations ionisantes (kg kBq 235 eq)	Préparation et combustion des CSR	77	73	81	91
	Energie évitée	-218	-229	-553	-319
	Traitement de déchets évité	-1	-4	-1	-2
	Bilan net	-142	-160	-473	-230

Tableau 50 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de déchets envoyée en chaufferie

En fonction du rendement de la chaufferie :

Pour 1t de CSR		Chaleur seule			Cogénération sans débouché continu			Cogénération avec débouché continu		
		PCI 13	PCI 14	PCI 16	PCI 13	PCI 14	PCI 16	PCI 13	PCI 14	PCI 16
Changement climatique (kg CO2 eq)	Préparation et combustion des CSR	537	725	967	530	718	957	485	678	919
	Traitement de déchets évité	-256	-221	-203	-260	-224	-210	-211	-181	-166
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-733	-794	-927	-354	-457	-534	-859	-930	-1086
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-838	-907	-1060	-422	-384	-448	-747	-809	-945
	Bilan net (rendement min)	-453	-290	-163	-84	37	213	-585	-433	-333
	Bilan net (rendement max)	-558	-403	-296	-152	110	299	-474	-312	-192
Acidification (mol H+ eq)	Préparation et combustion des CSR	0.74	0.84	0.92	0.71	0.81	0.87	0.67	0.76	0.82
	Traitement de déchets évité	-0.11	-0.12	-0.12	-0.11	-0.12	-0.12	-0.07	-0.07	-0.07
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-0.62	-0.67	-0.78	-0.47	-0.66	-0.77	-0.87	-0.94	-1.10
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-0.71	-0.76	-0.89	-0.61	-0.50	-0.59	-0.68	-0.73	-0.86
	Bilan net (rendement min)	0.01	0.05	0.02	0.13	0.03	-0.01	-0.27	-0.25	-0.34
	Bilan net (rendement max)	-0.08	-0.05	-0.09	-0.01	0.18	0.16	-0.08	-0.05	-0.10
Eutrophisation marine (kg N eq)	Préparation et combustion des CSR	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	0.4	0.4	0.4
	Traitement de déchets évité	-1.5	-1.6	-1.8	-1.5	-1.6	-1.8	-1.2	-1.3	-1.4
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
	Bilan net (rendement min)	-1.0	-1.1	-1.3	-1.0	-1.1	-1.3	-1.1	-1.2	-1.4
	Bilan net (rendement max)	-1.1	-1.1	-1.3	-1.0	-1.1	-1.2	-1.1	-1.1	-1.3
Particules fines (incidence des maladies)	Préparation et combustion des CSR	8.8E-06	1.1E-05	1.1E-05	8.4E-06	1.0E-05	1.1E-05	7.5E-06	9.2E-06	9.6E-06
	Traitement de déchets évité	-2.3E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.3E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-1.4E-06	-1.4E-06	-1.5E-06
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-3.1E-06	-3.4E-06	-4.0E-06	-4.1E-06	-6.2E-06	-7.2E-06	-5.9E-06	-6.4E-06	-7.5E-06
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-3.6E-06	-3.9E-06	-4.5E-06	-5.7E-06	-4.5E-06	-5.2E-06	-3.9E-06	-4.3E-06	-5.0E-06
	Bilan net (rendement min)	3.4E-06	4.8E-06	4.8E-06	2.0E-06	1.6E-06	8.6E-07	2.4E-07	1.4E-06	6.3E-07
	Bilan net (rendement max)	3.0E-06	4.4E-06	4.2E-06	4.2E-07	3.3E-06	2.9E-06	2.2E-06	3.5E-06	3.1E-06
Ressources fossiles (MJ)	Préparation et combustion des CSR	3907	4212	5239	2864	3096	3546	2717	2919	3371
	Traitement de déchets évité	-352	-388	-392	-352	-388	-393	-205	-211	-218
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-11136	-	-	-	-	-	-	-	-
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bilan net (rendement min)	-7580	-8234	-9235	-9424	14886	17390	-16151	17501	20444
	Bilan net (rendement max)	-9171	-9956	11246	13735	10217	11939	10708	11608	13564

Radiations ionisantes (kBq 235 eq)	Préparation et combustion des CSR	140	148	195	92	98	118	92	97	117
	Traitement de déchets évité	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1
	Production d'énergie évitée (rendement min)	-11	-12	-15	-335	-543	-634	-296	-321	-375
	Production d'énergie évitée (rendement max)	-13	-14	-17	-502	-363	-424	-106	-115	-134
	Bilan net (rendement min)	127	134	178	-245	-447	-518	-206	-225	-258
	Bilan net (rendement max)	125	132	176	-411	-267	-308	-15	-19	-18

Tableau 51 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie en fonction du rendement de la chaufferie

En fonction du taux de biogénique du CSR :

Pour 1t de CSR		PCI 13,5 50% bio			PCI 13,5 45% bio		
		Chaleur	cogen débouché discontinu	Cogen débouché continu	Chaleur	cogen débouché discontinu	Cogen débouché continu
Changement climatique (kg CO2 eq)	Préparation et combustion des CSR	603	596	596	659	652	652
	Production d'énergie évitée	-873	-440	-847	-873	-440	-847
	Traitement de déchets évité	-242	-242	-242	-224	-224	-224
	Bilan net	-512	-86	-493	-438	-12	-419
Acidification (moles H+ eq)	Préparation et combustion des CSR	0.76	0.73	0.73	0.83	0.79	0.79
	Production d'énergie évitée	-0.74	-0.63	-0.81	-0.74	-0.63	-0.81
	Traitement de déchets évité	-0.11	-0.11	-0.11	-0.12	-0.12	-0.12
	Bilan net	-0.08	-0.01	-0.19	-0.03	0.04	-0.14
Eutrophisation marine (kg N eq)	Préparation et combustion des CSR	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Production d'énergie évitée	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3
	Traitement de déchets évité	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
	Bilan net	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-1.1	-1.1
Particules fines (incidence des maladies)	Préparation et combustion des CSR	9.0E-06	8.6E-06	8.6E-06	1.1E-05	1.0E-05	1.0E-05
	Production d'énergie évitée	-3.7E-06	-6.0E-06	-5.2E-06	-3.7E-06	-6.0E-06	-5.2E-06
	Traitement de déchets évité	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06
	Bilan net	3.0E-06	3.6E-07	1.1E-06	4.5E-06	1.8E-06	2.6E-06
Ressources fossiles (MJ)	Préparation et combustion des CSR	4293	3216	3216	4176	3093	3093
	Production d'énergie évitée	-13252	-16918	-16765	-13255	-16922	-16770
	Traitement de déchets évité	-350	-350	-350	-389	-389	-389

	Bilan net	-9310	-14052	-13899	-9467	-14217	-14065
Radiations ionisantes (kBq 235 eq)	Préparation et combustion des CSR	157	108	108	147	98	98
	Production d'énergie évitée	-14	-522	-210	-14	-522	-210
	Traitement de déchets évité	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	Bilan net	142	-415	-103	131	-426	-114

Tableau 52 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie

En fonction du type de système de traitement de déchets évité :

Pour 1t de CSR envoyée en chaufferie		PCI 13 55% bio			PCI 14 41% bio			PCI 16 30% bio		
		Chaleur	Cogéné- besoin discontin- u	Cogéné- besoin continu	Chaleur	Cogéné- besoin discontin- u	Cogéné- besoin continu	Chaleur	Cogéné- besoin discontin- u	Cogéné- besoin continu
Changement climatique (kg CO2 eq)	Préparation et combustion des CSR (1)	537	530	530	726	718	718	968	957	957
	Production d'énergie évitée (2)	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-210
	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-490	-490	-490	-649	-649	-649	-856	-856	-856
	Bilan net ISDND (1+2+3)	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
	Bilan net UVE (1+2+4)	-791	-382	-773	-831	-388	-812	-947	-433	-928
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	-41%	-152%	-42%	-105%	-1158%	-110%	-214%	-304%	-229%
Acidification (mol H+)	Préparation et combustion des CSR (1)	0.74	0.71	0.71	0.84	0.81	0.81	0.92	0.87	0.87
	Production d'énergie évitée (2)	-0.71	-0.61	-0.78	-0.76	-0.66	-0.85	-0.89	-0.77	-0.99
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-0.11	-0.11	-0.11	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12
	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-0.37	-0.37	-0.37	-0.40	-0.40	-0.40	-0.43	-0.43	-0.43
	Bilan net ISDND (1+2+3)	-0.08	-0.01	-0.18	-0.05	0.03	-0.16	-0.09	-0.01	-0.24
	Bilan net UVE (1+2+4)	-0.34	-0.27	-0.45	-0.32	-0.25	-0.43	-0.40	-0.32	-0.54
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	-331%	-2815%	-142%	-583%	-950%	-171%	-332%	-2081%	-130%
Eutrophisation marine (kg N)	Préparation et combustion des CSR (1)	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
	Production d'énergie évitée (2)	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6	-1.6	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8

	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6
	Bilan net ISDND (1+2+3)	-1.1	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4
	Bilan net UVE (1+2+4)	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	94%	98%	92%	96%	99%	93%	94%	98%	91%
Particules fines (incidence des maladies)	Préparation et combustion des CSR (1)	8.8E-06	8.4E-06	8.4E-06	1.1E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05
	Production d'énergie évitée (2)	-3.6E-06	-5.7E-06	-5.0E-06	-3.9E-06	-6.2E-06	-5.4E-06	-4.5E-06	-7.2E-06	-6.3E-06
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06
	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-3.4E-06	-3.4E-06	-3.4E-06	-3.6E-06	-3.6E-06	-3.6E-06	-3.9E-06	-3.9E-06	-3.9E-06
	Bilan net ISDND (1+2+3)	3.0E-06	4.2E-07	1.2E-06	4.4E-06	1.6E-06	2.4E-06	4.2E-06	8.6E-07	1.8E-06
	Bilan net UVE (1+2+4)	1.9E-06	-6.6E-07	9.8E-08	3.2E-06	4.4E-07	1.3E-06	2.9E-06	-4.7E-07	4.9E-07
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	-36%	-258%	-92%	-27%	-72%	-48%	-31%	-154%	-73%
Ressources fossiles (MJ)	Préparation et combustion des CSR (1)	3907	2864	2864	4212	3096	3096	5239	3546	3546
	Production d'énergie évitée (2)	-12727	-16247	-16100	-13781	-17594	-17435	-16092	-20544	-20358
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-352	-352	-352	-388	-388	-388	-393	-393	-393
	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-343	-343	-343	-406	-406	-406	-438	-438	-438
	Bilan net ISDND (1+2+3)	-9171	-13735	-13588	-9956	-14886	-14726	-11246	-17390	-17205
	Bilan net UVE (1+2+4)	-9162	-13726	-13579	-9975	-14904	-14745	-11292	-17436	-17250
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Radiations ionisantes (kBq U235 eq)	Préparation et combustion des CSR (1)	140	92	92	148	98	98	195	118	118
	Production d'énergie évitée (2)	-13	-502	-201	-14	-543	-218	-17	-634	-255
	Traitement de déchets évité si ISDND (3)	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	Traitement de déchets évité si UVE (4)	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3
	Bilan net ISDND (1+2+3)	125	-411	-111	132	-447	-122	176	-518	-138
	Bilan net UVE (1+2+4)	125	-411	-111	132	-448	-123	176	-519	-139
	Ecart entre le bilan net UVE et ISDND	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%

Tableau 53 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie par rapport aux modes de traitement des déchets alternatifs

En fonction de la source d'énergie fossile évitée :

Pour 1t de CSR envoyée en chaufferie		PCI 13 55% bio			PCI 14 41% bio			PCI 16 30% bio		
		Chaleur	Cogen besoin discontinu	Cogen besoin continu	Chaleur	Cogen besoin discontinu	Cogen besoin continu	Chaleur	Cogen besoin discontinu	Cogen besoin continu
Changement climatique (kg CO2 eq)	Préparation et combustion des CSR	537	530	530	726	718	718	968	957	957
	Traitement de déchets évité	-260	-260	-260	-224	-224	-224	-210	-210	-210
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-838	-422	-813	-907	-457	-881	-1060	-534	-1029
	Production d'énergie évitée (fioul)	-1029	-502	-993	-1114	-544	-1075	-1301	-635	-1255
	Production d'énergie évitée (charbon)	-1362	-641	-1305	-1475	-694	-1413	-1723	-810	-1650
	Bilan net (gaz naturel)	-561	-152	-543	-406	37	-387	-302	213	-282
	Bilan net (fioul)	-752	-231	-722	-613	-50	-581	-543	112	-508
	Bilan net (charbon)	-1085	-370	-1034	-974	-200	-919	-965	-64	-903
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	-34%	-52%	-33%	-51%	-235%	-50%	-80%	-47%	-80%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	-94%	-144%	-91%	-140%	-645%	-138%	-220%	-130%	-220%
Acidification (mol H+)	Préparation et combustion des CSR	0.74	0.71	0.71	0.84	0.81	0.81	0.92	0.87	0.87
	Traitement de déchets évité	-0.11	-0.11	-0.11	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12	-0.12
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-0.71	-0.61	-0.78	-0.76	-0.66	-0.85	-0.89	-0.77	-0.99
	Production d'énergie évitée (fioul)	-2.09	-1.18	-2.08	-2.26	-1.28	-2.25	-2.64	-1.50	-2.63
	Production d'énergie évitée (charbon)	-11.39	-5.06	-10.80	-12.34	-5.48	-11.70	-14.41	-6.40	-13.66
	Bilan net (gaz naturel)	-0.08	-0.01	-0.18	-0.05	0.03	-0.16	-0.09	-0.01	-0.24
	Bilan net (fioul)	-1.46	-0.59	-1.48	-1.54	-0.59	-1.56	-1.84	-0.74	-1.87
	Bilan net (charbon)	-10.77	-4.46	-10.20	-11.62	-4.79	-11.01	-13.61	-5.65	-12.91
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	- 1748%	- 6195%	-705%	- 3183%	- 2159%	-877%	-1893%	- 4941 %	-696%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	- 13517 %	- 47911 %	- 5453%	- 24617 %	- 16695 %	- 6780%	- 14643 %	- 38210 %	- 5384%
Eutrophisation marine (kg N eq)	Préparation et combustion des CSR	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
	Traitement de déchets évité	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6	-1.6	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3
	Production d'énergie évitée (fioul)	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.3	-0.5	-0.5	-0.3	-0.5
	Production d'énergie évitée (charbon)	-1.4	-0.7	-1.4	-1.5	-0.7	-1.5	-1.8	-0.9	-1.7
	Bilan net (gaz naturel)	-1.1	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.3	-1.4
	Bilan net (fioul)	-1.3	-1.1	-1.3	-1.3	-1.2	-1.4	-1.5	-1.4	-1.6
	Bilan net (charbon)	-2.3	-1.5	-2.2	-2.4	-1.6	-2.4	-2.8	-1.9	-2.8

	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	-16%	-7%	-15%	-17%	-7%	-15%	-17%	-7%	-15%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	-109%	-47%	-100%	-112%	-48%	-102%	-114%	-49%	-104%
Particules fines (incidence des maladies)	Préparation et combustion des CSR	8.8E-06	8.4E-06	8.4E-06	1.1E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.1E-05	1.1E-05	1.1E-05
	Traitement de déchets évité	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.3E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06	-2.5E-06
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-3.6E-06	-5.7E-06	-5.0E-06	-3.9E-06	-6.2E-06	-5.4E-06	-4.5E-06	-7.2E-06	-6.3E-06
	Production d'énergie évitée (fioul)	-1.3E-05	-9.8E-06	-1.4E-05	-1.4E-05	-1.1E-05	-1.5E-05	-1.7E-05	-1.2E-05	-1.8E-05
	Production d'énergie évitée (charbon)	-1.4E-04	-6.2E-05	-1.3E-04	-1.5E-04	-6.7E-05	-1.4E-04	-1.8E-04	-7.8E-05	-1.7E-04
	Bilan net (gaz naturel)	3.0E-06	4.2E-07	1.2E-06	4.4E-06	1.6E-06	2.4E-06	4.2E-06	8.6E-07	1.8E-06
	Bilan net (fioul)	-6.8E-06	-3.7E-06	-8.0E-06	-6.2E-06	-2.8E-06	-7.5E-06	-8.1E-06	-4.3E-06	-9.8E-06
	Bilan net (charbon)	-1.3E-04	-5.6E-05	-1.3E-04	-1.4E-04	-5.9E-05	-1.3E-04	-1.7E-04	-7.0E-05	-1.6E-04
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	-329%	-972%	-778%	-243%	-275%	-409%	-292%	-598%	-636%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	-4551%	-13444%	-10762%	-3357%	-3805%	-5659%	-4039%	-8268%	-8801%
Ressources fossiles (MJ)	Préparation et combustion des CSR	3907	2864	2864	4212	3096	3096	5239	3546	3546
	Traitement de déchets évité	-352	-352	-352	-388	-388	-388	-393	-393	-393
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-12727	-16247	-16100	-13781	-17594	-17435	-16092	-20544	-20358
	Production d'énergie évitée (fioul)	-13395	-16525	-16727	-14505	-17895	-18113	-16938	-20896	-21151
	Production d'énergie évitée (charbon)	-12042	-15961	-15458	-13039	-17285	-16739	-15227	-20183	-19546
	Bilan net (gaz naturel)	-9171	-13735	-13588	-9956	-14886	-14726	-11246	-17390	-17205
	Bilan net (fioul)	-9840	-14013	-14215	-10680	-15187	-15405	-12092	-17743	-17997
	Bilan net (charbon)	-8487	-13449	-12946	-9215	-14577	-14031	-10381	-17030	-16393
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	-7%	-2%	-5%	-7%	-2%	-5%	-8%	-2%	-5%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	7%	2%	5%	7%	2%	5%	8%	2%	5%
Radiations ionisantes (kBq U235 eq)	Préparation et combustion des CSR	140	92	92	148	98	98	195	118	118
	Traitement de déchets évité	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	Production d'énergie évitée (gaz naturel)	-13	-502	-201	-14	-543	-218	-17	-634	-255
	Production d'énergie évitée (fioul)	-8	-499	-196	-9	-541	-213	-10	-631	-248
	Production d'énergie évitée (charbon)	-22	-505	-209	-23	-547	-227	-27	-639	-265
	Bilan net (gaz naturel)	125	-411	-111	132	-447	-122	176	-518	-138
	Bilan net (fioul)	130	-409	-106	138	-445	-117	183	-515	-132

	Bilan net (charbon)	116	-414	-119	123	-451	-131	165	-522	-148
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et fioul	4%	1%	4%	4%	1%	4%	4%	1%	4%
	Ecart entre le bilan net gaz naturel et charbon	-7%	-1%	-7%	-7%	-1%	-7%	-6%	-1%	-7%

Tableau 54 : Contribution aux impacts environnementaux de la préparation, combustion et fin de vie d'une tonne de CSR envoyée en chaufferie par rapport aux modes de production de chaleur alternatifs

Annexe 11 Processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel

Les processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel sont les suivants :

	Amont Production et acheminem ent de gaz naturel	Amont Production et acheminem ent d'électricité	Direct CO ₂ fossile	Direct Nox	Direct Particules fines <2.5µm
Changement climatique	21%	2%	77%		
Acidification	57%	14%		28%	
Eutrophisation marine	50%	7%		43%	
Particules fines	68%	10%		12%	8%
Ressources fossiles/nucléaires	97%	3%			
Radiations ionisantes	17%	83%			

Tableau 55 : Processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel (market for heat, district or industrial, natural gas, Europe without Switzerland)

Les processus les plus contributeurs sont liés à l'utilisation de gaz naturel, ou à l'utilisation d'électricité. Les autres processus sont liés à des émissions directes, comme les émissions de CO₂ fossile, de NOx ou de particules < 2.5 µm.

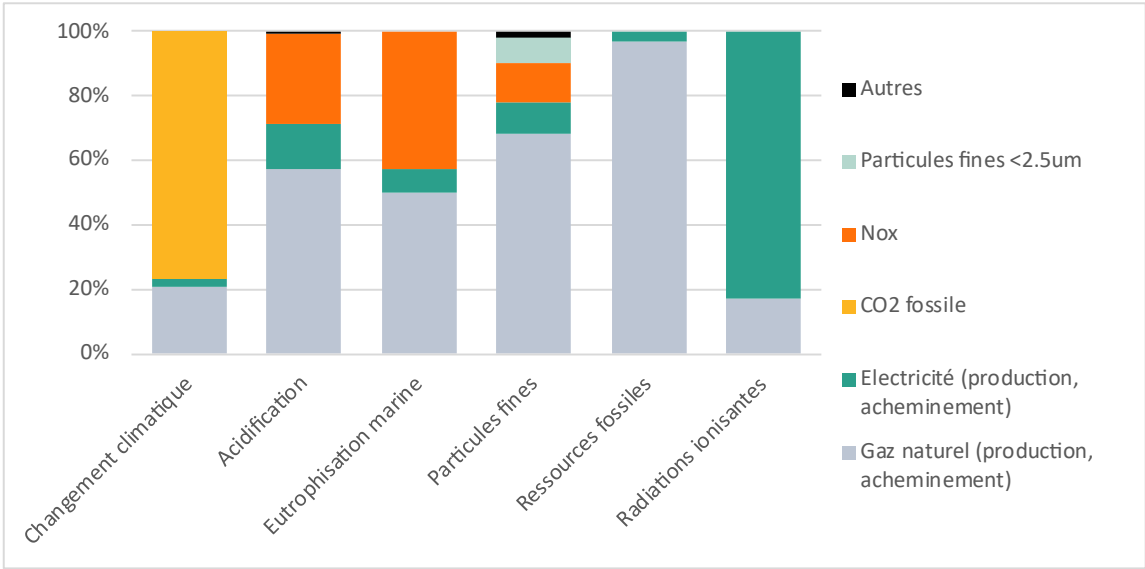


Figure 73 : Processus contributeurs à la production de chaleur à partir de gaz naturel (market for heat, district or industrial, natural gas, Europe without Switzerland)

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



ETUDE STRATEGIQUE SUR LES DECHETS D'ACTIVITES ECONOMIQUES ET LA FILIERE DES COMBUSTIBLES SOLIDES DE RECUPERATION.

Lot 3 : Études de l'empreinte
environnementale de la filière CSR

Cette étude vise à évaluer l'empreinte environnementale de la filière des Combustibles Solides de récupération (CSR), de leur production à partir des déchets d'activités économiques et des déchets ménagers et assimilés jusqu'à leur combustion dans des chaufferies spécifiques dédiées.

Le champ de l'évaluation environnementale comprend la préparation du CSR et sa valorisation en chaufferie dédiée (volet 1), la production d'énergie en comparaison avec d'autres sources d'énergie et types de gestion des déchets sans cet usage (volet 2) et les impacts sur le changement climatique liés à la production d'énergie à partir de CSR à horizon 2030 et 2040 (volet 3).

L'objectif de cette étude d'apporter un éclairage sur cette nouvelle filière utilisatrice de déchets par rapport à l'enfouissement et l'incinération d'une part et d'aider les porteurs de projets et les clients chaleur dans le processus d'aide à la décision concernant le choix de l'énergie utilisée d'autre part.

*Les résultats de l'ACV sont utilisés
pour définir certaines
recommandations qui peuvent être
utilisées pour guider les collectivités
et les industriels dans leur processus
de décision de création de
chaufferies CSR en substitution
d'autres sources d'énergie.*



Revue Critique du rapport
“Evaluation de l’empreinte environnementale
de la filière CSR
Avril 2025”

selon
ISO 14040 & ISO 14044
et ISO 14071

SOL 23-290.1

12 juin 2025

Rapport final pour

RDC Environment

et

ADEME

1. Introduction

L'ADEME (commanditaire) a lancé en 2022 une étude stratégique d'évaluation nationale des gisements de déchets d'activité économiques (DAE) et de CSR (Marché 2022MA000065). Cette étude dont le marché a été remporté par un consortium incluant RDC Environment, comporte plusieurs lots dont la réalisation d'une étude d'ACV de la filière CSR, en accord avec les exigences d'ISO 14044.

Les objectifs de cette étude stratégique étude étaient de : «

- Mieux connaître l'écosystème des filières DAE et CSR issus de DAE et Déchets Ménagers et Assimilés (DMA),
- Faire un état des lieux régional et national des flux des déchets mobilisables et des installations pour produire des CSR et les facteurs d'évolution,
- Définir un objectif de quantité de CSR valorisable pour 2030 et 2040, en cimenterie et en chaufferies spécifiques (proposition de scénarii d'évolution),
- Évaluer les impacts environnementaux de la filière CSR,
- Proposer des orientations pour une stratégie ADEME d'accompagnement des acteurs. » (page 10 du rapport ACV)

Ces différents objectifs ont été réalisés au travers de plusieurs lots de travaux donnant chacun lieu à un ou plusieurs rapports présentant les travaux réalisés et leurs conclusions.

Cette revue ne couvre que le rapport ACV du lot 3, intitulé « Études de l'empreinte environnementale de la filière CSR » et aucun autre rapport issu de cette étude stratégique, notamment les autres rapports mentionnés dans le rapport ACV, ces derniers n'ayant pas été communiqués au panel.

Le rapport ACV a lui-même des objectifs spécifiques explicités au chapitre 1.3 en page 15 : «

- Continuer à conforter les connaissances de l'ADEME sur [l'empreinte environnementale de] la filière CSR actuelle (volet 1 du lot 3 de l'étude) ;
- Servir de base à la création et à l'alimentation par l'ADEME d'un outil d'aide à l'instruction de nouveaux projets en territoire à destination des acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 2) à horizon 2030-2040 ;
- Simuler l'impact du déploiement de la filière CSR à horizon 2030-2040 en termes d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) en vue de communiquer celui-ci aux acteurs de la filière et des acteurs institutionnels (volet 3) par rapport :
 - aux filières actuelles de traitement de ces déchets,
 - aux filières actuelles de production de chaleur et d'électricité ;
- Construire des jeux de données d'inventaire afin d'alimenter la base de données d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) Base Empreinte® de l'ADEME, »

Ce rapport d'ACV contient des comparaisons (ex : comparaison avec des scénarios d'incinération, ou enfouissement de déchets, de scénarios de chaudière à gaz naturel, etc.) et est destiné à être communiqué au public. De ce fait et en conformité avec les exigences des normes ISO 14040 et 14044, le commanditaire a souhaité faire réaliser une revue critique par un comité de suivi (nommée « le panel » ou « les membres du panel » dans le reste du document).

Le présent rapport est le rapport final de revue critique, préparé par le panel de revue critique. Ce rapport, comprenant ses annexes, est destiné à être intégré au rapport final du praticien.

La revue couvre uniquement le rapport ACV et en aucun cas l'outil d'aide à l'instruction mentionné dans les objectifs de l'étude. Les jeux de données n'ayant pas été fournis au moment de la fin de cette revue, ils ne sont pas couverts par la revue.

2. Composition du panel / Présentation de l'expert

Les membres du panel qui ont réalisé la revue sont :

- Delphine BAUCHOT et Laure COUTEAU, de la société Solinnen, société spécialisée dans les applications de l'Analyse du Cycle de Vie. Delphine, Directrice chez Solinnen, a plus de 25 ans d'expérience en environnement et réalise régulièrement en tant qu'experte ACV des revues critiques. Elle est la présidente de panel. Laure a 10 ans d'expérience en environnement dont 7 ans en entreprise. Elles ont réalisé ensemble et séparément plusieurs revues critiques notamment sur des sujets similaires de valorisation de déchets.

- François RICOUL, de la société S3D, est spécialisé dans la valorisation de la biomasse et des déchets par voie thermochimique et plus particulièrement en gazéification. De formation thermique et énergie il bénéficie de 15 ans d'expérience. Avec son équipe, il accompagne divers acteurs (industriels, collectivités, développeurs, énergéticiens, etc.) dans le développement de leurs projets de production d'énergie à partir de déchets.
- Sébastien FOLLET et Yves BLANCHOZ, du bureau d'études TERRA, expert en économie circulaire, filières déchets, recyclage et système REP Sébastien, Président Directeur Général, a plus de 20 ans d'expérience au niveau de la gestion des déchets : il a notamment participé à différentes études concernant les DMA, les DAE ainsi que les centres de tri collecte sélective et pour DAE. Yves, Consultant Senior a plus de 25 ans d'expérience au niveau de la gestion des déchets : ses nombreuses interventions en entreprises dans le cadre de diagnostics déchets lui ont notamment permis d'acquérir une bonne connaissance des DAE.

Les membres du panel ont travaillé de la façon la plus indépendante possible vis à vis des praticiens et du commanditaire.

3. Nature du travail de Revue Critique, processus et limitations

Le panel a travaillé conformément aux exigences des normes mentionnées en référence. Il a de plus pris en compte l'ISO 14071. Enfin, conformément à ISO 14044, il a notamment travaillé afin de vérifier les points suivants :

- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont cohérentes avec les exigences de la norme ISO 14044,
- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont valables d'un point de vue scientifique et technique,
- les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude,
- les interprétations reflètent les limitations identifiées et les objectifs de l'étude,
- le rapport d'étude est transparent et cohérent.

Le premier objectif du panel été de fournir au praticien des commentaires détaillés afin qu'il améliore son travail. Ces commentaires ont couvert les choix méthodologiques et le mode de restitution des résultats. Les membres du panel ont vérifié la plausibilité des données utilisées au travers de tests aléatoires. Enfin, le présent rapport final de revue critique fournit au futur lecteur du rapport du praticien des informations qui lui permettront de mieux comprendre le rapport final du praticien pour le commanditaire.

Le travail de revue critique a été mené au fur et à mesure du travail du praticien, d'octobre 2023 à mai 2025. Ce travail commencé par la présentation de l'étude au panel le 9 octobre 2023 puis après la genèse d'un premier rapport par le praticien, soumis au panel fin décembre 2023 et s'est achevé au vu du rapport final du praticien soumis en avril 2025. Pendant la période de revue critique, des échanges oraux et écrits ont eu lieu entre les membres du panel et le praticien, incluant des clarifications concernant les commentaires produits, et la production de plusieurs versions successives du rapport par le praticien. Ce dernier a pris en compte la majeure partie des commentaires du panel et significativement modifié ainsi qu'amélioré son rapport.

Le présent rapport de revue critique est la synthèse finale des commentaires formulés par les membres du panel. Quelques commentaires détaillés clefs sont fournis au sein du présent rapport de revue critique, ainsi que l'ensemble des échanges en annexe.

Le présent rapport est livré par le panel au commanditaire et au praticien. Le panel ne peut pas être tenu pour responsable de l'usage de son travail par des tiers. Les conclusions du panel couvrent *l'ensemble du rapport du praticien* mentionné plus haut et aucun autre rapport, extrait, publication ou généralisation de tout type qui pourrait être fait. Les conclusions du panel ont été données dans le cadre de l'état de l'art courant, et de l'information qu'il a reçu au cours de son travail. Ces conclusions auraient pu être différentes dans un contexte différent.

Pour rappel, cette revue ne couvre ni les rapports établis dans le cadre des autres lots de cette étude stratégique (y compris ceux mentionnés dans le rapport ACV), ni l'outil d'aide à l'instruction de nouveaux projets en territoire à destination des acteurs de la filière et des acteurs institutionnels, mentionné dans les objectifs du rapport ACV, ni les jeux de données d'inventaire prévus pour alimenter la base de données d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) Base Empreinte® de l'ADEME.

4. Conclusions de la revue

Les 142 commentaires détaillés couvrent les points suivants :

- Méthodologie (ISO et science) : 43 commentaires ;
- Données et calculs : 79 commentaires ;
- Analyse et interprétations : 5 commentaires ;
- Rapport, éditorial et autres commentaires : 15 commentaires.

Un travail important a été réalisé par le praticien pour répondre aux commentaires de façon détaillée, et les prendre en compte au sein de son rapport final. La pertinence des modifications proposées a été discutée en réunion, et la réalisation effective des modifications vérifiée au vu du rapport final. La revue critique note l'effort du praticien qui a apporté très souvent des modifications en directe adéquation avec les commentaires de la revue.

Quelques commentaires nouveaux (29 commentaires dont 5 jugés importants) ont été remontés par le panel sur cette version finale : les principaux sont repris dans ce rapport ainsi que les points clefs de cette revue (voir commentaires détaillés ci-dessous). Ces commentaires complémentaires ont donné lieu à des échanges avec le praticien (listés dans le fichier sans modification du rapport (hormis des ajustements éditoriaux sans conséquence sur le sens du rapport).

Au vu du rapport final, le panel considère que les conclusions apportées répondent de façon adéquate et crédible aux objectifs mentionnés, et qu'elles ont été établies dans le respect des normes mentionnées. Ces conclusions s'inscrivent dans le cadre des limitations mentionnées en annexe 1 du rapport ACV. Le rapport du praticien s'inscrit ainsi bien dans le cadre général des exigences d'ISO 14044 concernant les rapports d'ACV communiqué à des tiers.

5. Commentaires détaillés

Les lignes suivantes apportent des éclairages spécifiques qu'un lecteur du rapport final du praticien pourra utiliser pour l'assister dans sa lecture et sa compréhension du rapport. Ces lignes récapitulent, les principaux nouveaux commentaires du panel faits sur la version finale, des commentaires essentiels faits sur les versions précédentes qui n'auraient pas été traités de façon appropriée selon les exigences des normes, en mentionnant les raisons apportées et l'implication sur les résultats que ces écarts peuvent avoir. Elles identifient également des recommandations d'amélioration pour les prochaines études. Les commentaires détaillés, et les réponses correspondantes, fournis au sein de l'annexe, sont disponibles pour mieux comprendre les points suivants.

1. *Adéquation des méthodes avec les exigences des normes de référence*

Les méthodes appliquées sont en accord avec les normes ISO14040 and 44 et en adéquation avec les objectifs de l'étude.

2. *Validité technique et scientifique*

L'ensemble des règles méthodologiques sont explicitées en détails et de manière claire tout au long du rapport.

3. *Adéquation des données utilisées en relation avec les objectifs de l'étude*

Les données utilisées par l'étude, sont issues pour la plupart des rapports des autres lots de l'étude. Le rapport est bien autoportant conformément aux exigences des normes et le panel n'a pas eu accès à ces rapports, ceux-ci étant en cours de rédaction lors de la revue et n'entrant pas dans le périmètre de travail prévu pour la revue. Le lecteur devrait lui avoir la possibilité d'accéder à ces rapports pour avoir des explications complémentaires sur les hypothèses retenues au-delà des explications apportées dans le présent rapport.

Comme explicité dans le chapitre 4.2, un enjeu de cette étude a été la détermination des compositions de déchets CSR à prendre en compte pour l'évaluation environnementale de scénario de traitement de CSR pour répondre aux objectifs de l'étude. Les sources prévues initialement ne permettant pas d'apporter les données espérées, l'étude se base sur 3 compositions fictives en termes de répartition des types de déchets entre plastiques, bois, papier-cartons, autres combustibles et autres incombustibles ainsi que le taux d'humidité totale, la part de biogénique en masse et en énergie.

Cette approche théorique est une limite significative à l'étude, que le lecteur doit avoir en tête lors de la lecture des conclusions. Par exemple, certaines caractéristiques de ces compositions post traitement semblent au panel assez éloignée d'une réalité observée : la proportion des métaux retenue est 7,5% en composition 1 et 10% en compositions 2 et 3 (sur une hypothèse de 50%/50% en composition sur la fraction « inertes + métaux » précisé par le praticien lors de la revue) alors que selon les experts, les taux observés dans les CSR sont en réalité beaucoup plus faibles (généralement inférieur à 1%).

Au niveau de la préparation, on notera aussi une hypothèse limitante de la fraction non CSR sortant de la préparation et allant en ISDND alors qu'une partie pourrait être valorisée (notamment les métaux, surtout s'ils sont dans les proportions indiquées ci-dessus).

Ces écarts vont par conséquent se retrouver au niveau des quantités de métaux présents dans les mâchefers à l'issu de la combustion des CSR.

Une analyse de sensibilité a été demandée au praticien afin d'évaluer l'ordre de grandeur de ces impacts. Cette analyse réalisée après la remise de la dernière version du rapport du praticien n'est pas incluse dans le présent rapport mais ses résultats sont disponibles dans le fichier de commentaires en annexe de ce rapport. Elle considère une part de métaux beaucoup plus faible correspondant à 5 fois moins de métaux que d'inerte dans la fraction « métaux + inertes », conformément à la position de l'ADEME et du praticien lors du premier tour de revue. Les conclusions de cette analyse montrent que l'ensemble des indicateurs est potentiellement surestimé. Cette surestimation peut aller de 1% à 6% pour le changement climatique à 78 à 150% pour l'acidification sur le volet 2. Il est donc important que le lecteur considère que les résultats établis dans le rapport sont plutôt conservateurs.

De même, l'approche des gisements mobilisables pour obtenir des CSR avec une certaine part de biogénique dans l'étude des scénarios prospectifs pour 2030 et 2040 est également théorique et il est important que le lecteur ait cette limite de l'étude en tête lors de la considération des conclusions.

Les hypothèses de rendements énergétiques présentées au chapitre 4.4 avec une valeur minimale correspondant à la réglementation et une valeur max correspondant aux valeurs opérationnelles observées par les acteurs du secteur s'inscrivent dans une approche pragmatique et sont cohérentes. Néanmoins le lecteur pourra éprouver des difficultés à comprendre ces hypothèses et les relier au tableau du chapitre 5.4 présentant l'énergie produite du cas de base selon les typologies de chaufferie et de CSR, notamment pour la « cogénération sans débouché continu pour la chaleur » et pour la « cogénération avec débouché continu pour la chaleur ». En effet des explications et des hypothèses sont manquantes dans le rapport et ont été transmises par la suite en réponse aux commentaires du panel.

Concernant la chaufferie en cogénération sans débouché continu pour la chaleur, où l'on comprend une production électrique uniquement en période estivale à 30% ou 45% de rendement pendant 7 mois et 0% les 5 mois restant, c'est bien une moyenne sur l'année qui a été considérée par la suite. Il en est de même pour la chaleur mais avec un inversement des périodes. Présentées ainsi, ces chiffres apportent de la confusion, car une chaufferie en cogénération produit simultanément de l'électricité et de la chaleur toute l'année. Le praticien aurait dû préciser que le rendement thermique moyen sur l'année est de 33% max et 29% min et que le rendement électrique moyen sur l'année est de 26% max et 17,5% min.

Concernant la chaufferie en cogénération avec débouché continu pour la chaleur, le praticien a appliqué en réalité pour le cas de base un troisième jeu d'hypothèses de rendements qui n'a pas été expliqué dans le rapport. Le praticien a en effet appliqué un rendement thermique de 75% et un rendement électrique de 10% qu'il considère comme un cas « typique ».

4. Validité des interprétations dans le cadre des limitations de l'étude

Les limitations techniques et méthodologiques (hypothèses) de l'étude sont mentionnées au niveau de l'annexe 2 du rapport. Certaines limitations dont celle de l'approche théorique de la composition des CSR et leurs gisements (en terme de répartition des types de déchets ainsi que le taux d'humidité totale, la part de biogénique en masse et en énergie) mais aussi de l'usage du modèle théorique WILCI développé pour les UVE pour approcher la combustion en chaudière dédiées CSR, ne nous semblent pas mises suffisamment en avant. Le lecteur devra les avoir en tête à la lecture de l'ensemble des conclusions. Il devra aussi avoir les limitations complémentaires soulignées par le panel et explicitées dans ce rapport.

5. Transparence et consistance

De manière générale, le rapport du praticien est très transparent et détaillé sur l'ensemble de la méthodologie appliquée. Les hypothèses, les différents scénarios sont bien clairement explicités et rappelés.

Les nombreuses analyses de sensibilité permettent de rendre robuste l'ensemble des conclusions émises dans ce contexte d'hypothèses de composition de déchets CSR théorique.

6. Annexes

Le tableau de commentaires détaillés échangés au cours du travail de revue critique, ainsi que les réponses des praticiens, sont une annexe du présent rapport de revue critique.