

ADEME



Agence de l'Environnement et
de la Maîtrise de l'Energie



ADEME

**Bilan environnemental du chauffage
collectif (avec réseau de chaleur) et
industriel au bois**

Note de synthèse

Décembre 2005

Bio Intelligence Service - La mesure du facteur santé
Ecologie industrielle - Santé nutritionnelle

Bio Intelligence Service S.A.S. - bio@biois.com
1 rue Berthelot - 94200 Ivry-sur-Seine - France
Tél. +33 (0)1 56 20 28 98 - Fax. +33 (0)1 58 46 09 95

Contacts Bio Intelligence Service S.A.S.

Eric LABOUZE

Yannick LE GUERN

+ 33 (0) 1 56 20 28 98

eric.labouze@biois.com

yannick.lequern@biois.com

Sommaire

AVANT PROPOS	3
1. PRESENTATION GENERALE	4
1.1. Principe	4
1.2. Méthodologie	4
1.3. Sources des données d'inventaire.....	5
1.4. Indicateurs environnementaux	5
2. CHAUFFAGE COLLECTIF	6
2.1. Scénarios considérés	6
2.2. Résultats	6
2.2.1. Bilan énergie primaire d'origine non renouvelable	6
2.2.2. Bilan Effet de serre	8
2.2.3. Acidification atmosphérique	9
2.2.4. Eutrophisation des eaux	9
2.2.5. Emissions de métaux toxiques dans l'air et dans les sols (METOX)	9
3. CHAUFFAGE INDUSTRIEL	11
3.1. Scénarios considérés	11
3.2. Résultats	11
3.2.1. Bilan énergie primaire d'origine non renouvelable	11
3.2.2. Bilan Effet de serre	13
3.2.3. Acidification atmosphérique	14
3.2.4. Eutrophisation des eaux	14
3.2.5. Emissions de métaux toxiques dans l'air et dans les sols (METOX)	14
4. CONCLUSIONS	15
4.1. Bilan énergétique.....	15
4.2. Bilan effet de serre	15
4.3. Autres indicateurs.....	15
4.4. Pistes d'amélioration possibles du bilan environnemental du chauffage collectif et industriel au bois	16
4.4.1. Au niveau de l'approvisionnement en combustible	16
4.4.2. Au niveau des équipements auxiliaires de la chaudière	16
4.4.3. Au niveau de la chaudière et de la combustion.....	16

AVANT PROPOS

Cette étude a été :

- commandée par la Direction des énergies renouvelables, des réseaux et des marchés énergétiques de l'ADEME, suivie par Luc BODINEAU du département bioressources.
- réalisée par BIO Intelligence Service.

BIO Intelligence Service est un bureau d'études qui possède une forte expertise en évaluation environnementale et en Analyse de Cycle de Vie. Depuis sa création en 1989, BIO Intelligence Service a réalisé plusieurs dizaines d'ACV pour des secteurs d'activités très variés (énergie, déchet, industrie, biens de consommation, transport, bâtiment).

Une revue critique effectuée par un expert indépendant (d'avril à novembre 2005 par Monsieur LECOULS) a validé la conformité de l'étude aux normes internationales ISO 14040 à 14043 relatives aux analyses de cycle de vie.

Rédacteurs du rapport : Yannick LE GUERN
Eric LABOUZE

BIO IS

Adresse : 1, rue Berthelot
94200 Ivry-sur-seine
Téléphone : 01 56 20 28 98
Fax : 01 58 46 09 95
Mél : bio@biois.com

MARCHE 0301 C 0004 DU 23 OCTOBRE 2003

N° du marché : 0301 C 0004
Date du marché : 23 Octobre 2003
Durée : 5 mois

1. PRESENTATION GENERALE

Cette note synthétise les principaux résultats de l'étude du bilan environnemental du chauffage collectif et industriel au bois.

Cette étude a valeur de prospective et elle se place dans des hypothèses de meilleures technologies disponibles : chaudières présentant les meilleurs rendements, fonctionnement à la puissance nominale, valorisation des cendres, camions neufs, etc.

1.1. PRINCIPE

L'étude est basée sur la méthode de l'analyse de cycle de vie. L'analyse de cycle de vie appliquée au chauffage industriel et collectif consiste à quantifier les impacts sur l'environnement de l'ensemble des activités qui lui sont liées : extraction du combustible, distribution, utilisation finale chez l'utilisateur...

Les différents systèmes étudiés, propres à chaque combustible, se décomposent tous selon trois grandes étapes :

- extraction des matières premières,
- transport des combustibles jusqu'au lieu de stockage ou de distribution,
- utilisation (combustion ou production amont d'énergie dans le cas de l'électricité),
- gestion des cendres.

Le cycle de vie des équipements (fabrication et fin de vie) est exclu des frontières du système.

Pour faciliter la comparaison des différents systèmes de chauffage collectif et industriel, on introduit une référence commune servant à exprimer le bilan matières et énergies du cycle de vie de chaque système. C'est l'unité fonctionnelle du bilan environnemental. L'unité fonctionnelle (UF) retenue pour cette étude est la suivante :

« Produire 1 MWh de chaleur chez l'utilisateur ».

1.2. METHODOLOGIE

Le bilan environnemental d'un système donné, dans une perspective de cycle de vie, repose sur le recensement et la quantification de tous les flux entrants et sortants du système considéré. Ces flux servent à quantifier :

- la consommation de matières premières (eau, minerais...),
- la consommation d'énergie (fossile, nucléaire et renouvelable),
- les émissions atmosphériques (CO₂ fossile, CH₄, CO, COV, poussières, métaux...),
- les rejets liquides (DCO, MES, métaux lourds,...),
- les émissions dans les sols (métaux lourds...),
- la production de déchets solides (dangereux, banals, inertes).

L'inventaire de ces flux, sur l'ensemble d'une filière ou d'un système donné, se décompose en deux phases :

- la première consiste à quantifier l'ensemble de ces flux de manière distincte pour chaque étape de la filière,
- la seconde a pour objet de sommer ces flux : cette étape nécessite de relier ou d'agréger les étapes du système entre elles. Dans l'étude toutes les étapes sont agrégées selon l'unité fonctionnelle choisie : 1 MWh rendu chez l'utilisateur ou l'exploitant.

Cette phase d'analyse des flux permet ensuite une approche synthétique au travers de l'étude des indicateurs d'impacts environnementaux.

1.3. SOURCES DES DONNEES D'INVENTAIRE

Pour les filières bois, les données utilisées sont issues d'une enquête de terrain (pour la détermination des flux dans la phase de mise à disposition du combustible) et d'une enquête bibliographique (essentiellement pour les facteurs d'émission lors de la combustion : données CITEPA¹).

Pour les autres sources d'énergie, il s'agit de données bibliographiques : ETHZ² Zürich (références utilisées pour toutes les ACV) et CITEPA (facteurs d'émission de combustion).

1.4. INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX

L'étude des impacts environnementaux est réalisée au travers de la lecture de différents indicateurs qui sont regroupés de la manière suivante :

- bilan énergétique ;
- bilan effet de serre ;
- autres indicateurs environnementaux :
 - pollution de l'air (acidification) ;
 - pollution de l'eau (eutrophisation) ;
 - émissions de métaux toxiques dans l'air et dans les sols.

La définition des indicateurs environnementaux utilisés dans cette étude se trouve en annexe de la présente synthèse.

¹ Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

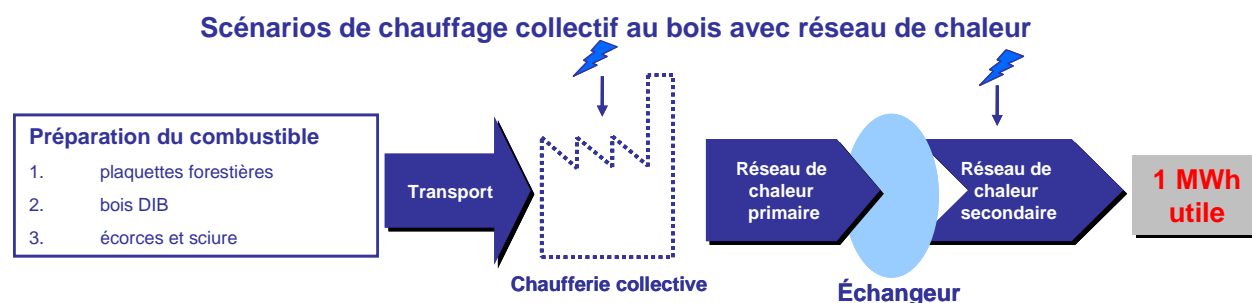
² Okoinventare für energiesysteme ETH, Zurich (1996)

2. CHAUFFAGE COLLECTIF (avec réseau de chaleur)

2.1. SCENARIOS CONSIDERES

Pour l'évaluation environnementale du chauffage collectif au bois, on se place dans le cas d'une chaudière à alimentation automatique d'une puissance de 2 MW. La chaleur fournie par la chaudière est distribuée grâce à un réseau de chaleur d'une longueur de 1 500 m environ. Cette chaleur peut être desservie à un hôpital, des logements HLM, des écoles primaires et maternelles. Cette chaudière est alimentée par les coproduits de l'industrie locale : plaquettes issues de l'exploitation forestière, connexes de scieries et déchets de bois.

La figure suivante schématise les systèmes considérés pour les scénarios de chauffage collectif.



Pour la comparaison avec les énergies classiques, ont été considérés :

- Une chaudière à condensation ayant un rendement de 95% pour le gaz ;
- Une chaudière ayant un rendement de 90% pour le fioul ;
- Un convecteur électrique ayant un rendement de 100%.

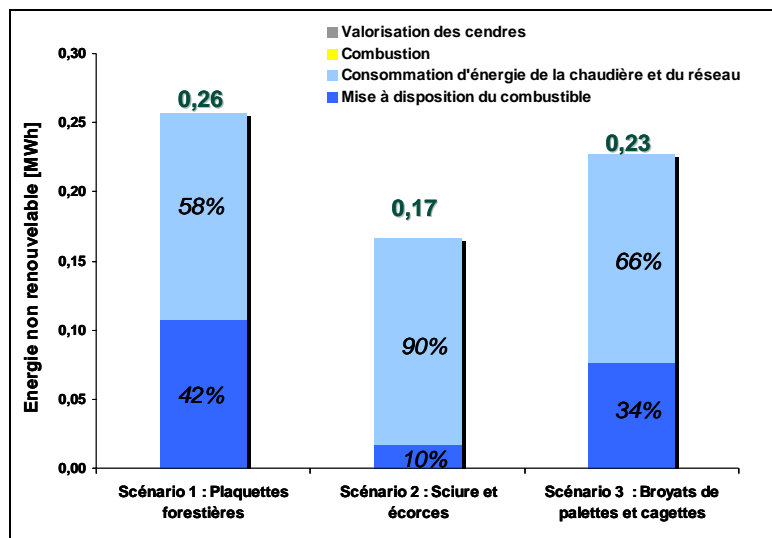
2.2. RESULTATS

2.2.1. BILAN ENERGIE PRIMAIRE D'ORIGINE NON RENOUVELABLE

Le tableau suivant présente le bilan de la consommation d'énergie primaire non renouvelable des scénarios de chauffage collectif au bois.

	MWh énergie non renouvelable / MWh utile	Unité d'énergie utile rendue par unité d'énergie non renouvelable consommée
Chauffage collectif		
Plaquettes forestières	0.26	3.9
Sciure et écorces	0.17	6.0
Broyats de palettes et cagettes	0.23	4.4

Les résultats montrent que le chauffage collectif au bois restitue plus d'énergie que ce qu'il consomme en terme d'énergie non renouvelable : une unité d'énergie non renouvelable consommée restitue entre 4 et 6 unités de chaleur selon le scénario.



Le graphique précédent met en évidence la contribution significative de la consommation d'électricité liée au fonctionnement des auxiliaires de la chaudière et des pompes du réseau de distribution de la chaleur dans le bilan énergie non renouvelable.

La contribution de l'étape de mise à disposition du combustible est variable selon le combustible. Elle est liée à l'utilisation d'engins mécaniques pour la préparation du combustible (déchiqueteuse, broyeur...).

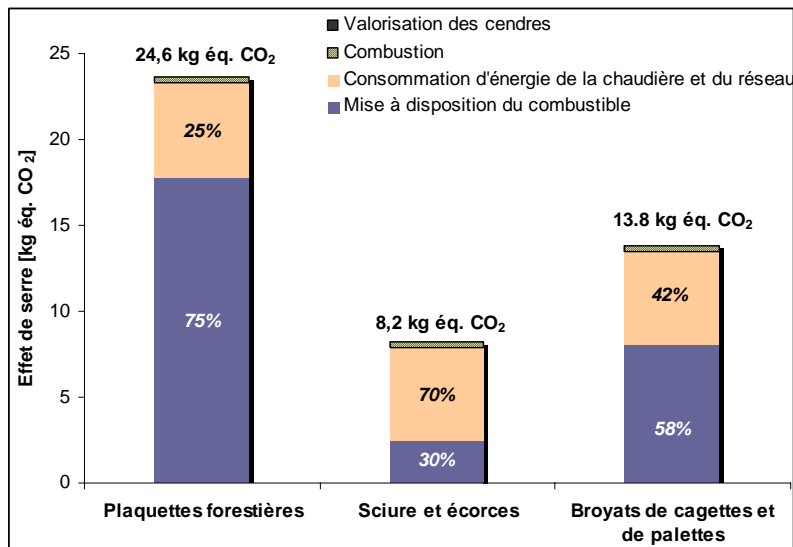
On présente la comparaison avec les énergies classiques dont les résultats ont été établis à partir de données bibliographiques dans le tableau suivant.

	MWh énergie non renouvelable / MWh utile	Unité d'énergie utile rendue par unité d'énergie non renouvelable consommée
Gaz	1.28	0.8
Fioul	1.50	0.7
Électricité	3.03	0.3

Le chauffage basé sur l'utilisation d'énergies traditionnelles consomme plus d'énergie qu'il n'en restitue.

2.2.2. BILAN EFFET DE SERRE

Le graphique suivant présente le bilan effet de serre des scénarios de chauffage collectif au bois (production d'1 MWh utile chez l'utilisateur).

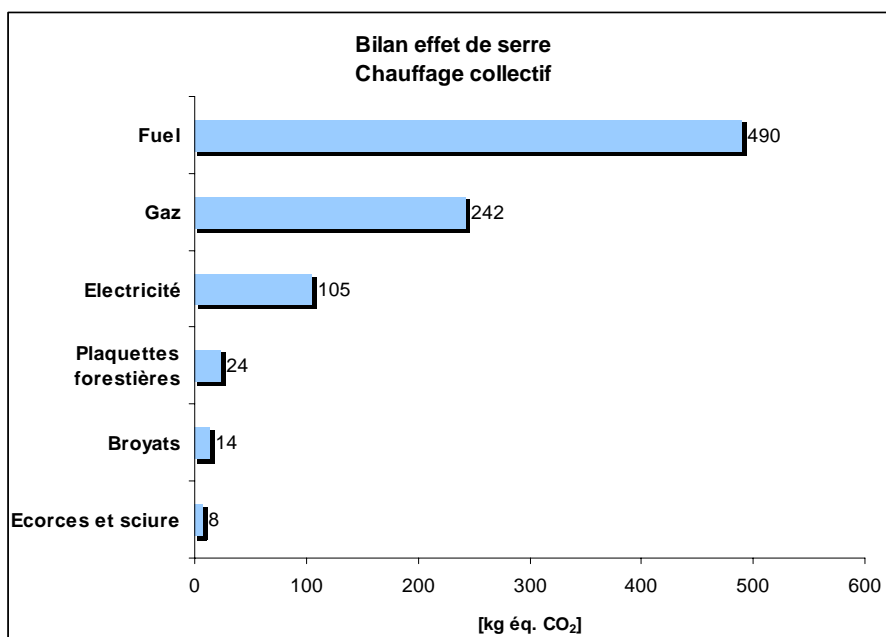


Les résultats montrent une importante contribution de l'étape de mise à disposition du combustible pour le scénario basé sur l'utilisation de plaquettes forestières. Ceci est lié à l'utilisation des engins intervenant pour la préparation et les transports des plaquettes.

Les émissions de méthane et de protoxyde d'azote lors de la combustion du bois ont une contribution négligeable au bilan effet de serre.

La consommation d'électricité de la chaudière et du réseau est responsable d'une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre.

La figure suivante montre le net avantage des filières bois en terme de bilan effet de serre comparativement aux énergies classiques.



2.2.3. ACIDIFICATION ATMOSPHERIQUE

Pour les scénarios bois, l'étape de combustion du bois est prédominante pour cette catégorie d'impact (entre 80% et 90%). Elle est essentiellement due aux émissions de d'oxyde d'azote et de soufre.

Le tableau suivant montre le positionnement des scénarios bois par rapport aux énergies classiques.

Acidification de l'air [g SO2 eq. / MWh utile]	
Chauffage collectif	
Plaquettes forestières	697
Sciure et écorces	599
Broyats de palettes et cagettes	635
Gaz	231
Fioul	4 814
Électricité	824

Les scénarios bois sont bien positionnés par rapport au fioul et à l'électricité pour cet indicateur. Le gaz apparaît comme la meilleure filière.

2.2.4. EUTROPHISATION DES EAUX

Pour les scénarios bois, les oxydes d'azote émis lors de la combustion sont les principaux contributeurs à l'eutrophisation des eaux. En effet, les oxydes d'azote émis dans l'air se retrouvent entraînés dans les sols et dans l'eau où ils se transforment en nitrates (NO₃⁻) et participent ainsi au bilan nutritif.

Eutrophisation de l'eau [g PO4 eq. / MWh utile]	
Chauffage collectif	
Plaquettes forestières	141
Sciure et écorces	120
Broyats de palettes et cagettes	126
Gaz	37
Fioul	110
Électricité	39

Le chauffage au gaz naturel et l'électricité apparaissent comme les plus bénéfiques pour cet indicateur.

2.2.5. EMISSIONS DE METAUX TOXIQUES DANS L'AIR ET DANS LES SOLS (METOX)

	METOX air [g]	METOX sols [g]
Chauffage collectif		
Plaquettes forestières	7.18	2.34
Sciure et écorces	7.16	41.86
Broyats de palettes et cagettes	7.18	14.06
Gaz	0.17	0.045
Fioul	16.98	0.002
Électricité	1.40	0.003

Le chauffage au gaz naturel se révèle comme le plus avantageux pour l'indicateur Metox air tandis que le chauffage au fioul présente le bilan le plus préjudiciable.

Concernant les émissions de métaux toxiques dans les sols, les scénarios bois ressortent comme les plus préjudiciables. Les métaux contenus dans les cendres, émis lors de l'épandage agricole, sont les principaux facteurs d'impact.

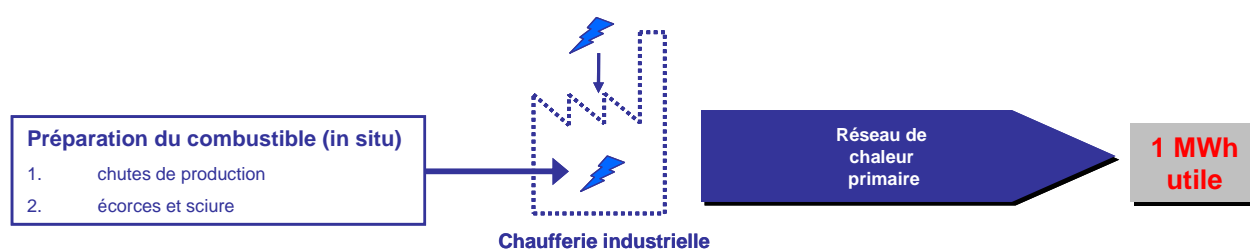
3. CHAUFFAGE INDUSTRIEL

3.1. SCENARIOS CONSIDERES

L'évaluation du chauffage industriel se place dans un contexte de valorisation énergétique des sous-produits des industries du bois pour le séchage des sciages. La chaudière, d'une puissance de 2MW, est à alimentation automatique et accepte un mélange de sciure et d'écorces ou des chutes de panneaux.

La figure suivante schématise les systèmes considérés pour les scénarios de chauffage industriel.

Scénarios de chauffage industriel au bois



Pour la comparaison avec les énergies classiques, ont été considérées :

- Une chaudière à condensation ayant un rendement de 95% pour le gaz ;
- Une chaudière ayant un rendement de 90% pour le fioul ;
- Une pompe à chaleur électrique ayant un coefficient de performance (COP) de 3.

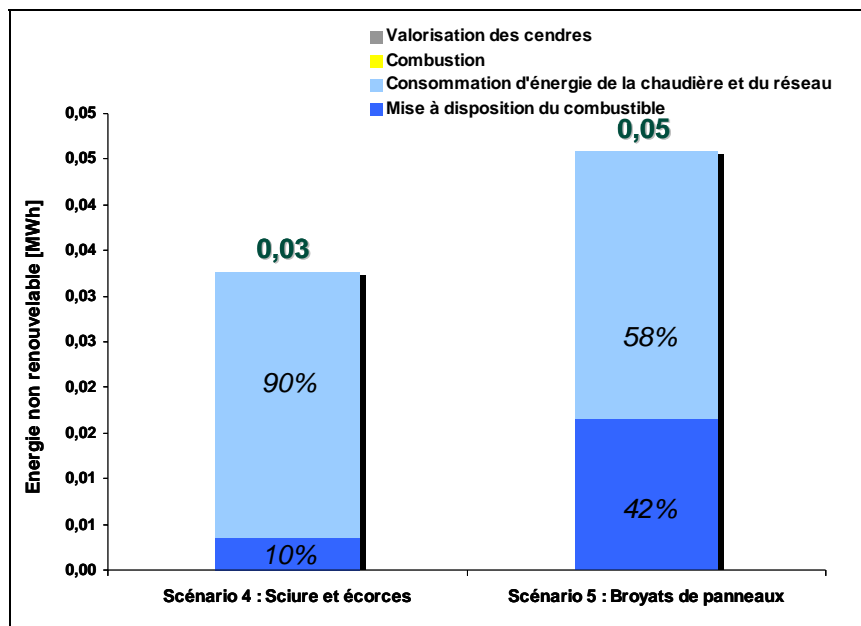
3.2. RESULTATS

3.2.1. BILAN ENERGIE PRIMAIRE D'ORIGINE NON RENOUVELABLE

Le tableau suivant présente le bilan de la consommation d'énergie primaire non renouvelable des scénarios de chauffage collectif au bois.

	MWh énergie non renouvelable / MWh utile	Unité d'énergie utile rendue par unité d'énergie non renouvelable consommée
Chauffage industriel		
Sciure et écorces	0.03	30.7
Broyats de panneaux	0.05	21.9

Comme pour le chauffage collectif, les résultats montrent l'intérêt du chauffage industriel au bois en terme de consommation d'énergie non renouvelable : une unité d'énergie non renouvelable consommée restituée entre 31 et 22 unités de chaleur selon le scénario.



Comme dans le cas du chauffage collectif, la consommation d'électricité liée au fonctionnement des auxiliaires de la chaudière a une contribution significative sur le bilan énergie non renouvelable.

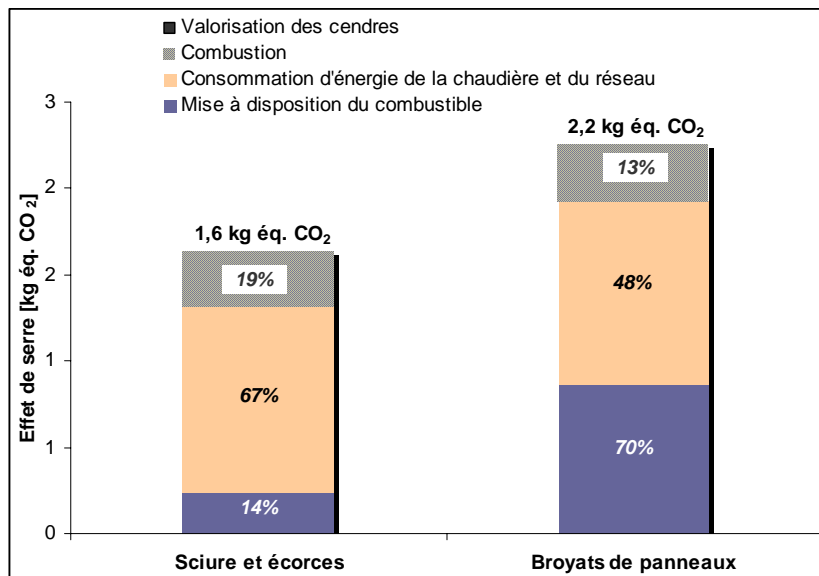
A titre de comparaison, on présente ci-dessous les résultats avec les énergies classiques obtenus à partir de données bibliographiques.

	MWh énergie non renouvelable / MWh utile	Unité d'énergie utile rendue par unité d'énergie non renouvelable consommée
Gaz	1.13	0.9
Fioul	1.28	0.8
Électricité	0.95	1.1

Le chauffage basé sur l'utilisation du gaz ou du fioul consomme plus d'énergie qu'il n'en restitue. Seule l'utilisation d'une pompe à chaleur permet de restituer autant d'énergie qu'elle n'en consomme.

3.2.2. BILAN EFFET DE SERRE

Le graphique suivant présente le bilan effet de serre des scénarios de chauffage industriel au bois (production d'1 MWh utile chez l'utilisateur).

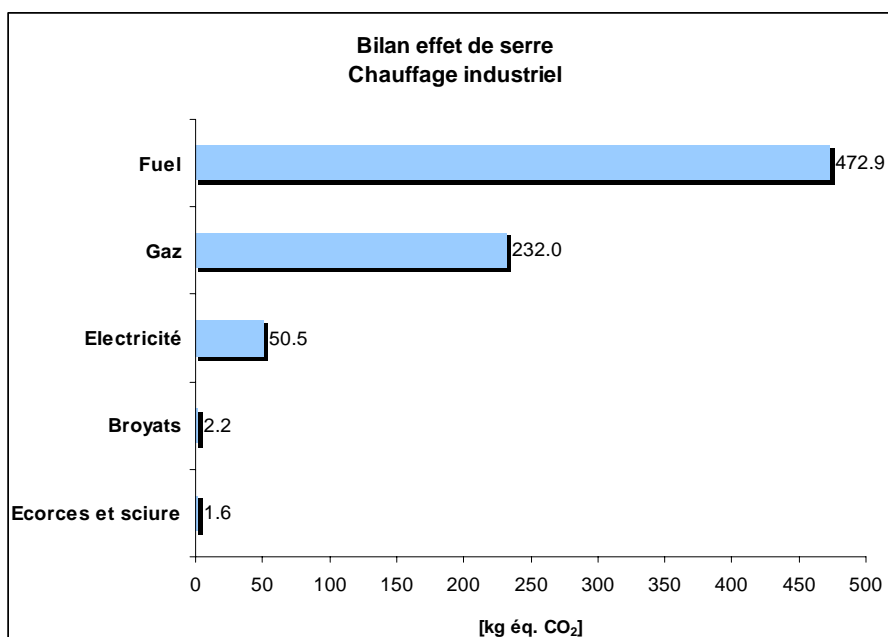


Les résultats montrent une importante contribution de l'étape de mise à disposition du combustible pour le scénario utilisant des broyats de panneaux comme combustible. Le système de transfert par insufflation des chutes de panneaux, consommateur d'électricité, est fortement contributeur au bilan effet de serre.

La consommation d'électricité de la chaudière est responsable d'une majeure partie de cet impact.

La contribution de l'étape de combustion du bois est liée aux émissions de méthane et de protoxyde d'azote.

Les bilans effet de serre du chauffage industriel utilisant des sources d'énergies classiques montrent que la filière bois est mieux positionnée.



3.2.3. ACIDIFICATION ATMOSPHERIQUE

Pour les scénarios bois, l'étape de combustion du bois est prédominante pour cette catégorie d'impact (entre 80% et 90%). Elle est essentiellement due aux émissions de d'oxyde d'azote et de soufre.

Acidification de l'air [g SO2 eq. / MWh utile]	
Chauffage industriel	
Sciure et écorces	542
Broyats de panneaux	547
Gaz	198
Fioul	4 664
Électricité	541

La comparaison avec les énergies classiques montre que les scénarios bois sont bien positionnés par rapport au fioul et à l'électricité pour cet indicateur. Le gaz apparaît comme la meilleure filière.

3.2.4. EUTROPHISATION DES EAUX

Pour les scénarios bois, les oxydes d'azote émis lors de la combustion sont les principaux contributeurs à l'eutrophisation des eaux. Ils se transforment en nitrates et participent ainsi au bilan nutritif.

Eutrophisation de l'eau [g PO4 eq. / MWh utile]	
Chauffage industriel	
Sciure et écorces	113
Broyats de panneaux	113
Gaz	34
Fioul	106
Électricité	15

L'utilisation d'une pompe à chaleur apparaît comme le scénario le plus bénéfique pour cet indicateur.

3.2.5. EMISSIONS DE METAUX TOXIQUES DANS L'AIR ET DANS LES SOLS (METOX)

	METOX air [g]	METOX sols [g]
Chauffage industriel		
Sciure et écorces	6.91	40.80
Broyats de panneaux	6.92	13.66
Gaz	0.11	0.04
Fioul	16.49	0.001
Électricité	0.90	0.01

Les résultats montrent des tendances similaires au bilan du chauffage collectif. Le chauffage au gaz naturel apparaît comme le plus avantageux pour l'indicateur Metox air tandis que le chauffage au fioul présente le bilan le plus préjudiciable.

Concernant les émissions de métaux toxiques dans les sols, les scénarios bois ressortent comme les plus préjudiciables. Les métaux contenus dans les cendres, émis lors de l'épandage agricole, sont les principaux facteurs d'impact.

4. CONCLUSIONS

4.1. BILAN ENERGETIQUE

Le bilan des consommations d'énergie non renouvelable est largement favorable pour les systèmes de chauffage collectif avec réseau de chaleur et industriel au bois.

4.2. BILAN EFFET DE SERRE

Concernant le bilan effet de serre, les systèmes de chauffage collectif et industriel au bois sont bien positionnés même par rapport à l'électricité, quel que soit le modèle de production d'électricité considéré (Français ou Européen).

Le gaz et surtout le fioul sont nettement moins bien positionnés.

4.3. AUTRES INDICATEURS

Dans le tableau récapitulatif ci-dessous, le symbole ↗ indique un impact potentiel additionnel (préjudice environnemental) des modes de chauffage traditionnels par rapport au chauffage au bois. A contrario, le symbole ↘ indique un bénéfice environnemental des modes de chauffage traditionnels par rapport aux scénarios bois. Le symbole « = » indique un impact environnemental peu différent des scénarios bois.

Écart par rapport aux scénarios de chauffage collectif et industriel au bois	Filière gaz	Filière fioul	Filière électricité
Acidification de l'air	↘↘	↗↗↗	↗↗
Eutrophisation de l'eau	↘↘	=	↘↘
Déchets ménagers et assimilés	↗↗↗	↗↗↗	↗↗↗
METOX air	↘↘	↗↗	↘
METOX sols	↘↘↘	↘↘↘	↘↘↘

Ces tendances ne changent pas quel que soit le modèle électrique (Français ou Européen) choisi. Le mode de valorisation des cendres (épandage agricole ou valorisation de la chaux en tant que matière) peut influencer l'indicateur Metox sols.

Pour les autres indicateurs considérés dans cette étude, les scénarios bois ressortiraient comme défavorables pour le risque toxique potentiel pour l'homme par rapport au gaz et à l'électricité et favorables par rapport au fioul. En terme d'écotoxicité, le gaz ressort favorable devant le chauffage au bois ou le chauffage électrique et le fioul présente les plus fortes valeurs pour ces indicateurs. Mais, les incertitudes sur la caractérisation des ces indicateurs de risques toxiques potentiels ne permettent aucune comparaison robuste entre filières.

4.4. PISTES D'AMELIORATION POSSIBLES DU BILAN ENVIRONNEMENTAL DU CHAUFFAGE COLLECTIF (AVEC RESEAU DE CHALEUR) ET INDUSTRIEL AU BOIS

4.4.1. AU NIVEAU DE L'APPROVISIONNEMENT EN COMBUSTIBLE

Optimiser les réseaux d'approvisionnement permettrait de limiter le taux de retour à vide des camions, et donc de réduire les impacts environnementaux des transports de moitié.

Par exemple, pour le scénario de chauffage collectif utilisant des écorces et sciure dont le transport du combustible représente plus de 80% des émissions de gaz à effet de serre, un retour du camion plein permettrait un gain d'environ 1 kg éq. CO₂, soit une réduction de 12% du bilan effet de serre global du MWh.

4.4.2. AU NIVEAU DES EQUIPEMENTS AUXILIAIRES DE LA CHAUDIERE

La consommation d'électricité du réseau de chaleur est très préjudiciable pour le bilan environnemental des scénarios de chauffage collectif. Or, une analyse de sensibilité sur la consommation d'énergie du réseau a montré qu'une diminution de la consommation d'électricité d'un facteur deux induit une amélioration significative pour de nombreux indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement, dont les effets bénéfiques les plus importants portent sur :

- le bilan « énergie non renouvelable » ;
- l'acidification atmosphérique ;
- les émissions de métaux dans l'air ;
- l'eutrophisation de l'eau.

4.4.3. AU NIVEAU DE LA CHAUDIERE ET DE LA COMBUSTION

■ Maîtrise de la combustion

Une amélioration de la combustion permettrait de réduire le taux d'imbrûlés et donc de réduire les impacts potentiels associés. Par ailleurs, toute augmentation du rendement de combustion permet de réduire d'autant les différents impacts liés aux activités amont.

Les oxydes d'azote et les oxydes de soufre, émis lors de la combustion ont un poids significatif dans le bilan environnemental. Des procédés de combustion optimisés permettraient une moindre émission de ces polluants (recirculation des gaz de combustion, injection étagée de l'air de combustion...)

■ Traitement des gaz de combustion

Des procédés secondaires permettent un traitement des émissions atmosphériques acidifiantes (c'est-à-dire qui traitent les polluants une fois formés) :

- pour les oxydes d'azote : réduction sélective non catalytique (SNCR) ou réduction sélective catalytique (SCR) ;
- pour les oxydes de soufre : désulfuration par injection de chaux.

■ Valorisation des cendres

La cendre peut suivre d'autres filières de fin vie que l'épandage agricole, par exemple la substitution à l'utilisation de chaux. Cette valorisation « matière » des cendres apparaît comme une filière privilégiée, sous réserve de satisfaire aux prescriptions techniques et à l'éco-compatibilité du couple « matériaux contenant des déchets / milieu », car elle permet d'une part d'éviter la production d'un matériau ayant un impact sur l'effet de

serre lors de sa fabrication, et d'autre part de « retenir » les métaux lourds qu'elles contiennent, ce qui évite leur dissémination dans l'environnement.

GLOSSAIRE



► Sur les impacts environnementaux

Acidification de l'air

Augmentation de la quantité de substances acides dans la basse atmosphère, à l'origine de « pluies acides », du dépérissement de certains écosystèmes forestiers et écosystèmes d'eau douce. L'unité retenue pour évaluer la contribution d'une substance à l'acidification est exprimée en g d'équivalent SO_2 .

Effet de serre

Augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances d'origine anthropique (CO_2 , CH_4 , CFC, etc.). L'indicateur retenu pour évaluer l'impact potentiel sur l'effet de serre d'une substance est le GWP (global warming potential), exprimé en kg d'équivalent CO_2 .

Eutrophisation des eaux

Introduction de nutriments, notamment sous la forme de composés azotés et phosphatés, qui conduisent à la prolifération d'algues. Ce phénomène peut conduire à la mort de la faune et la flore du milieu aquatique considéré (du fait de l'épuisement du milieu en oxygène). L'unité retenue pour évaluer l'eutrophisation est le kg d'équivalent phosphate (PO_4).

METOX

L'indicateur METOX est un paramètre établi par les Agences de l'Eau afin de percevoir les redevances de pollution. Le METOX est calculé par la somme pondérée de huit métaux, affectés des coefficients de pondération liés aux différences de toxicité des éléments : mercure 50, arsenic 10, plomb 10, cadmium 10, nickel 5, cuivre 5, chrome 1, zinc 1. Cette méthode appliquée aux rejets aqueux a été élargie aux rejets atmosphériques et aux rejets dans les sols dans le cadre de cette étude.