

COMBUSTIBLES SOLIDES DE RECUPERATION (CSR)

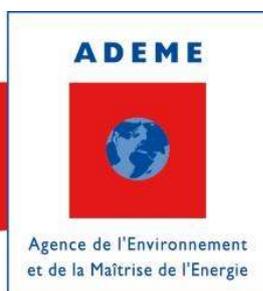
Caractérisation et évaluation de leurs performances en combustion

Décembre 2015

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : FEDEREC et COMPTE-R

N° de contrat : 1406C0039

Coordination technique ADEME : André Kunegel
Service\Direction : *Direction Economie Circulaire et Déchets*



RAPPORT D'ETUDE

En partenariat avec :

REMERCIEMENTS

Citer les membres du Comité de pilotage et/ou du comité de suivi ou de relecture et/ou du consortium de recherche.

Prénom et Nom (Organisme)

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME. Auteur(s). Année de publication. Titre – Rapport. Nombre de pages.

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.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Résumé | 5 |
| 1. Contexte du projet | 7 |
| 1.1. Généralités | 7 |
| 1.2. Objectifs | 7 |
| 2. Méthodologie | 8 |
| 3. Bilan / Principaux résultats obtenus | 9 |
| 3.1. Etat de l'art | 9 |
| 3.1.1. Origine des CSR | 9 |
| 3.1.2. Définition des CSR | 11 |
| 3.1.3. Cadre réglementaire | 11 |
| 3.1.4. La production des CSR | 13 |
| 3.1.5. L'utilisation des CSR | 16 |
| 3.1.6. Le développement des CSR en Europe | 17 |
| 3.2. Caractérisation des CSR | 21 |
| 3.2.1. Prélèvement des échantillons | 21 |
| 3.2.2. Analyse physique | 22 |
| 3.2.3. Analyse élémentaire | 29 |
| 3.2.4. Corrélations entre composition macroscopique et composition chimique des CSR | 32 |
| 3.3. Essais de combustion des CSR | 33 |
| 3.3.1. Première campagne d'essais | 33 |
| 3.3.2. Deuxième campagne d'essais | 34 |
| 3.3.3. Conclusions des essais | 39 |
| 3.4. Etude des systèmes de combustion | 40 |
| 3.4.1. Principes de base appliqués à la combustion des combustibles solides | 40 |
| 3.4.2. Equipements employés pour la combustion des combustibles solides | 44 |
| 3.4.3. Autres équipements importants associés aux chaudières à grille ou à lit fluidisé | 56 |
| 3.4.4. Adéquation entre CSR et équipements | 62 |
| 3.5. Enquête réalisée auprès des fabricants de chaudières et des utilisateurs potentiels de CSR | 69 |
| 3.5.1. But de l'enquête et méthodologie | 69 |
| 3.5.2. Outils utilisés pour l'enquête | 69 |
| 3.5.3. Segmentation opératoire et déroulement de l'enquête | 69 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.5.4. | Résultats de l'enquête | 71 |
| 3.6. | Projet de nomenclature | 72 |
| 3.6.1. | Rappel réglementaire..... | 72 |
| 3.6.2. | Rappel des systèmes de classement existants | 73 |
| 3.6.3. | Conclusions de la tâche de caractérisation des CSR..... | 76 |
| 3.6.4. | Proposition de nomenclature française | 78 |
| 3.6.5. | Conclusion | 82 |
| 4. | Conclusions / Perspectives | 84 |
| 4.1. | Tâche 1..... | 84 |
| 4.2. | Tâche 2..... | 85 |
| 4.3. | Tâche 3..... | 86 |
| | Références bibliographiques..... | 87 |
| | Index des tableaux et figures | 88 |
| | Sigles et acronymes | 90 |

Résumé

FEDEREC, dont certains adhérents sont producteurs de CSR (combustibles solides de récupération), a décidé d'engager des actions qui visent à aider au développement des marchés desdits CSR en France, notamment dans d'autres applications que celles existant à ce jour, grâce à une meilleure connaissance des gisements et à une nomenclature claire, précise et justifiée, qui prenne en compte chacun des types d'équipement dans lesquels les CSR peuvent être brûlés.

D'une manière plus générale, le développement de l'usage des CSR répond aussi à une volonté des Pouvoirs publics, exprimée en particulier lors du Grenelle de l'Environnement, avec pour objectifs :

- De réduire les quantités de déchets mis en décharge.
- De limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES).
- De préserver les ressources naturelles.
- De réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

La présente étude a permis de fournir à FEDEREC les éléments, essentiellement techniques et scientifiques, qui vont lui permettre de développer et de faciliter l'usage des CSR en France, voire à l'export, grâce notamment à une meilleure connaissance du gisement, à des spécifications des CSR claires, suffisantes et justifiées.

Il en ressort notamment que :

- La définition même des CSR manque de clarté, que ce soit au niveau national ou au niveau européen. Cela a pour conséquence un manque de lisibilité ; ce qui contribue à la méfiance des Pouvoirs publics et des citoyens vis-à-vis de la valorisation thermique des CSR. En outre, cela rend également difficile la collecte et l'interprétation des données, en particulier sur les volumes des gisements existants et sur les méthodes de valorisation.
- Concernant la qualité des CSR, une norme a été mise en place mais reste moyennement appliquée et ne renseigne que partiellement l'utilisateur sur le contenu réel des CSR. En outre, elle est assez stricte et par conséquent la plupart des CSR sont classés dans les catégories les plus défavorables ; ce qui n'est pas forcément représentatif des possibilités et des performances du produit en combustion.
- En termes réglementaires, la valorisation des CSR reste assez contraignante, que ce soit en France ou en Europe. Aujourd'hui, les principales voies restent la cimenterie et les incinérateurs d'OM. Les autres voies de valorisation sont très limitées et restent encore à développer. Il est à noter cependant que seule la France fait actuellement le choix de limiter la composition des CSR, tout en maintenant des contraintes de combustion sensiblement identiques à celle de l'incinération des OM.
- Il y a des variations importantes d'un CSR à un autre. En revanche la composition d'un même CSR reste assez stable dans le temps. Les principaux matériaux qui les composent sont les plastiques, le bois, les textiles et les papiers cartons. La granulométrie est assez bien maîtrisée avec des tailles de particules qui sont la plupart du temps inférieure à 30 mm. La densité des produits est assez faible avec des valeurs comprises généralement entre 75 et 250 kg/m³. Hors cas particulier, la teneur en minéraux est assez faible (quelques %) notamment pour les DIB et les encombrants.
- Les analyses physiques couplées aux analyses élémentaires ont également permis de déterminer des corrélations entre certains éléments et les matériaux, comme par exemple les origines du chlore, du soufre et de l'azote. Ainsi cela permettra aux producteurs de CSR d'améliorer la qualité de leurs produits en essayant d'optimiser l'extraction de certains matériaux comme les mousses de polyuréthane, les films métallisés, ...
- Les deux technologies retenues pour la valorisation des CSR sont la grille et le lit fluidisé :
 - La chaudière à grille n'est pas très exigeante sur les caractéristiques physiques des combustibles. Elle demande en premier lieu que les cendres aient des températures de fusion suffisamment élevées pour éviter la formation de mâchefers. L'humidité peut être comprise entre 15 et 50 % sur brut, voire 60 % avec certains équipements spécialement conçus pour des charges très humides. Elle admet des combustibles aussi variées que des plaquettes, des granulés, de la paille, etc. Les exigences se situent plutôt au niveau de l'alimentation en combustible du foyer, car c'est souvent à cet endroit que sont localisés les problèmes rencontrés (blocage de convoyeur, de vis, etc.). Enfin, les taux de cendres ne doivent pas être trop importants (sauf cas particulier, on se limite généralement à 15 %). En outre les masses volumiques trop faibles peuvent être synonymes de voûtage et de mauvais avancement sur les grilles.
 - Concernant les systèmes à lit fluidisé, ils sont à la fois moins exigeants sur la nature des combustibles admissibles et plus contraignants quant à leurs caractéristiques physiques. En d'autres termes, un foyer à lit fluidisé pourra utiliser une large palette de combustibles (biomasse, déchets, mais aussi charbons, cokes, etc.), y compris des combustibles qui ont des teneurs en cendres très

élevées (jusqu'à 50 % voire plus dans certains cas). En revanche, il faut que la granulométrie soit maîtrisée, plutôt inférieure à 50 mm et éviter d'avoir des objets non désirés tels que cailloux, pièces métalliques, etc., surtout sur les petits lits fluidisés (quelques MW) où les systèmes d'extraction sont trop coûteux. Cette flexibilité du foyer à lit fluidisé dense vis-à-vis du combustible suppose toutefois que les dispositifs auxiliaires du foyer (alimentation en combustible, dosage en combustible, extraction des cendres, etc.) soient conçus pour l'emploi d'une grande variété de charges. Enfin le lit fluidisé peut présenter l'avantage par rapport aux foyers à grille de mieux contrôler la combustion (température et rapport locaux comburant/combustible). En outre, il est possible de minimiser la formation de certains polluants comme les acides et les NOx en intégrant des absorbants dans le lit et en étageant mieux la combustion. En revanche ce sont des équipements plus chers en coûts opératoires qui demandent une meilleure maîtrise technique et offre moins de souplesse que les grilles.

- Enfin le travail sur la nomenclature a permis d'isoler 7 critères de classement (avec quatre ou trois catégories pour chacun) : le PCI, la somme des halogènes (Cl + F + Br), le taux de soufre (S), le taux de cendres, la teneur en azote, la granulométrie et la masse volumique apparente.

1. Contexte du projet

1.1. Généralités

L'utilisation des CSR (Combustibles Solides de Récupération – SRF en anglais pour Solid Recovered Fuels) s'est développée dans un certain nombre de pays européens comme l'Italie, la Finlande, l'Autriche, l'Irlande, la Norvège, les Pays-Bas, l'Allemagne. Ce dernier pays constitue le premier marché européen des CSR avec plus de 7,6 Mt (estimation 2013) consommés par an, dans des installations dédiées, dans des cimenteries ou encore en co-combustion dans des centrales au charbon ou au lignite.

En France, les cimentiers sont les premiers utilisateurs de CSR, mais avec des quantités au moins un ordre de grandeur inférieur à celles consommées en Allemagne de l'ordre de 240 kt en 2014, ce qui représente à peine plus de 3% de la consommation de CSR en Allemagne. Il existe toutefois un intérêt grandissant des industries à forte intensité énergétique pour cette nouvelle ressource combustible.

FEDEREC, dont certains adhérents sont producteurs de CSR, a décidé d'engager des actions qui visent à aider au développement des marchés desdits CSR en France, notamment dans d'autres applications que celles existant à ce jour, grâce à une meilleure connaissance des gisements et à une nomenclature claire, précise et justifiée, qui prenne en compte chacun des types d'équipement dans lesquels les CSR peuvent être brûlés.

D'une manière plus générale, le développement de l'usage des CSR répond aussi à une volonté des Pouvoirs publics, exprimée en particulier lors du Grenelle de l'Environnement, avec pour objectifs :

- De réduire les quantités de déchets mis en décharge.
- De limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES).
- De préserver les ressources naturelles.
- De réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

Les Pouvoirs publics ont aussi le souci de redonner de la compétitivité aux entreprises dont la rentabilité est fortement impactée par les coûts de l'énergie, grâce à l'accès à des ressources à coûts attractifs, telles que les CSR.

La loi de transition énergétique, prévoit notamment de :

- Mieux valoriser les déchets.
- Mettre en place un nouveau dispositif de soutien aux énergies renouvelables avec la possibilité de vendre directement sur le marché de l'électricité produite tout en bénéficiant d'une prime.
- Favoriser les schémas basés sur l'économie locale et circulaire.
- Simplifier les procédures pour la réalisation des projets.

1.2. Objectifs

La présente étude a pour objectif de fournir à FEDEREC les éléments, essentiellement techniques et scientifiques, qui vont lui permettre de développer et de faciliter l'usage des CSR en France, voire à l'export, grâce notamment à une meilleure connaissance du gisement, à des spécifications des CSR claires, suffisantes et justifiées pour chaque type de système de combustion et à une réglementation qui ne pénalise pas la valorisation énergétique de cette ressource.

En conséquence, l'objet de l'étude est de :

- Caractériser les CSR produits en France à l'heure actuelle et dans les prochaines années, notamment les CSR préparés par les membres de FEDEREC qui participent à la présente étude.
- Evaluer les potentialités des différents systèmes de combustion de combustibles solides existant sur le marché (système à grille, système à projecteur, lit fluidisé, etc.), à brûler des CSR, en fonction des caractéristiques de ceux-ci et ce, dans une fourchette de puissance de 1 à 20 MW.
- Réaliser des premiers essais de combustion de CSR, sélectionnés pour être représentatifs du gisement et bien adaptés à l'usage en chaudière, avec une installation à grille de 0,5 MW de la société COMPTE R, comportant un premier étage de gazéification suivi d'une enceinte de postcombustion. Ce type de technologie est destiné en premier lieu à des combustibles humides et/ou de formes hétérogènes.

- Compléter la nomenclature sur les CSR établie par l'AFNOR (nota : aujourd'hui, cette nomenclature AFNOR ne s'appuie que sur 3 critères ; ce qui semble insuffisant pour garantir un usage paisible desdits CSR en combustion, compte tenu des charges extrêmement variables à partir desquelles ils sont préparés, alors que d'autres nomenclatures, comme par exemple au Royaume-Uni, se basent sur un nombre de critères plus large). Si nécessaire, la nomenclature sera définie pour chaque type d'équipement de combustion.
- Fournir à FEDEREC les éléments qui lui permettront d'engager des discussions avec les Pouvoirs publics, afin de faire évoluer la réglementation pour un usage plus facile des CSR, en particulier si certains CSR peuvent passer de la rubrique 2771 des ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) à la nouvelle rubrique 2971 dédiée à la valorisation thermique des CSR.

2. Méthodologie

Afin de répondre aux objectifs, l'étude est divisée en trois tâches dont le contenu se résume à :

- L'établissement d'un état de l'art sur la situation des CSR en Europe.
- Une caractérisation approfondie d'un panel de CSR issus du territoire français.
- Des essais de combustion sur une chaudière d'essai à grille de 400 kW (société COMPTE R) prévue initialement pour de la plaquette de bois.
- Une étude des systèmes de combustion les mieux adaptés à consommer des CSR et une enquête auprès des acteurs de la filière énergie (fabricants, consommateurs de chaleur, ..),
- Une proposition de nomenclature des CSR pour faciliter leur classement et leur utilisation.

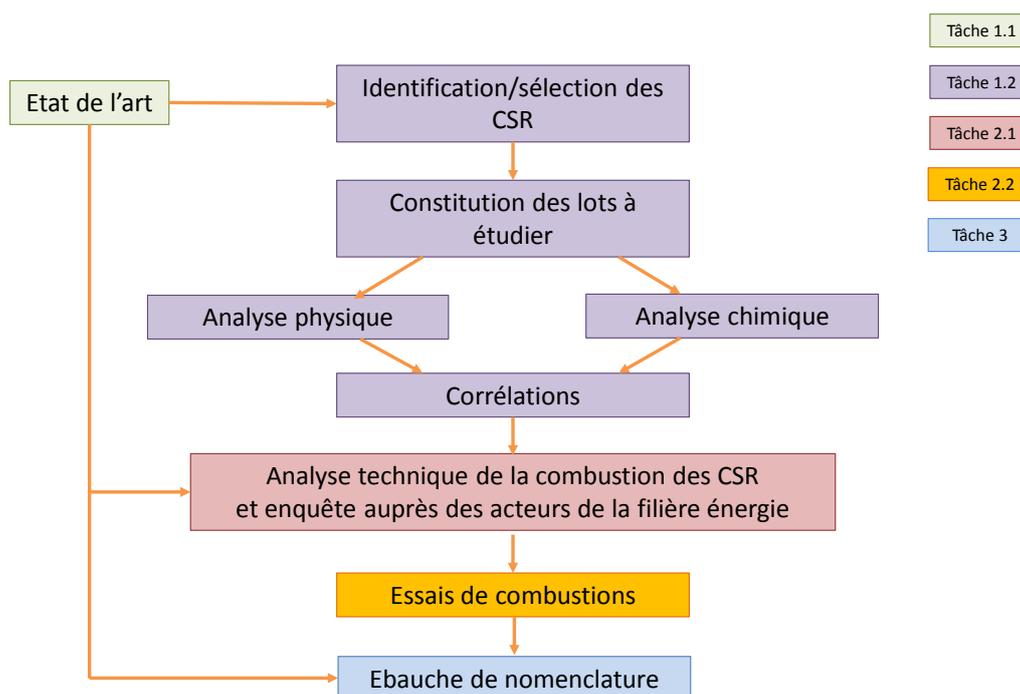


Figure 1 : Méthodologie de l'étude

3. Bilan / Principaux résultats obtenus

3.1. Etat de l'art

Cette partie de l'étude offre une synthèse des connaissances liées aux CSR : définitions, production, réglementation et principaux chiffres économiques.

3.1.1. Origine des CSR

Un déchet est défini par le Code de l'Environnement comme « tout résidu d'un processus de production, toute substance, matériau, produit abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

En 2010, la production de déchets sur le territoire français a atteint quasiment 345 millions de tonnes. Sa répartition est donnée dans le tableau ci-dessous.

| Catégorie de déchets | Secteurs | | | | | | Total |
|--------------------------------------|----------------------|-------------|--------------|---|-------------|-------------|--------------|
| | Agriculture et pêche | Industrie | Construction | Traitement des déchets, assainissement, dépollution | Tertiaire | Ménages | |
| Déchets minéraux | | 2,6 | 238,1 | 1,1 | 0,5 | 2,6 | 245,0 |
| Déchets non minéraux – non dangereux | 0,9 | 18,4 | 12,4 | 9,1 | 21,7 | 26,7 | 89,1 |
| Déchets dangereux | 0,4 | 2,8 | 2,5 | 3,1 | 2,0 | 0,1 | 10,9 |
| Ensemble | 1,3 | 23,8 | 253,0 | 13,3 | 24,2 | 29,3 | 345,0 |

Tableau 1 : Quantités de déchets produites en France par catégorie et par secteur (Mt)

Les déchets non minéraux et non dangereux sont les seuls potentiellement utilisables pour la préparation des CSR ; ce qui donne un gisement de près de 90 millions de tonnes par an.

Les déchets peuvent être incinérés avec ou sans récupération d'énergie, recyclés, épandus ou mis en décharge. On note que pour les déchets non minéraux et non dangereux, plus de 30 % vont encore en décharge.

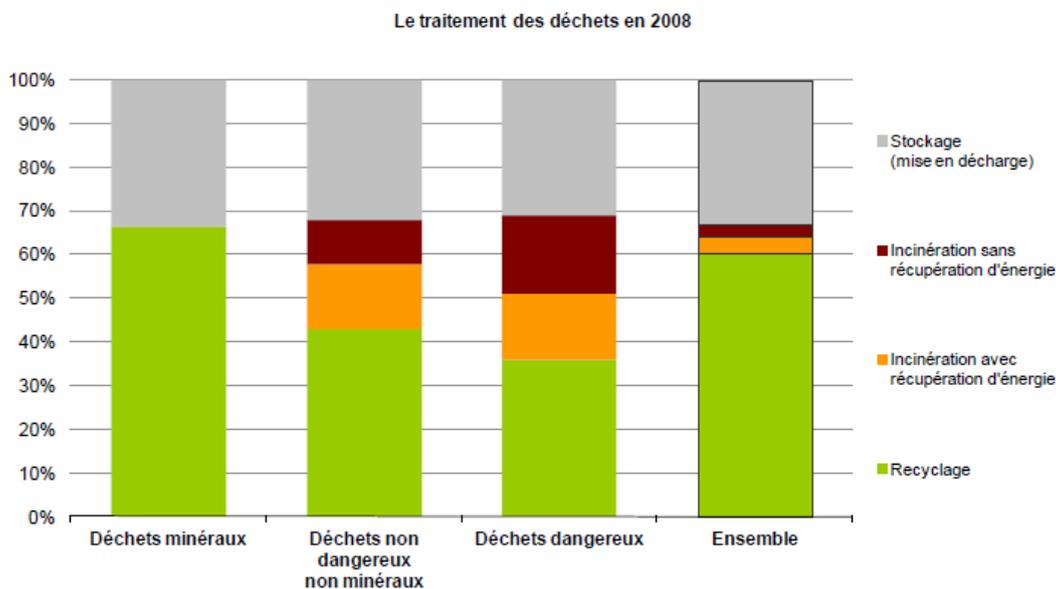


Figure 2 : Répartition des filières de traitement des déchets en France

3.1.2. Définition des CSR

L'appellation CSR, pour combustible solide de récupération, est un terme assez large qui regroupe tout type de déchets non dangereux solides, non constitués de biomasse uniquement, dont le pouvoir calorifique est suffisamment élevé pour présenter un intérêt en valorisation par combustion.

Largement développé à l'échelle européenne, on trouve également les expressions suivantes pour qualifier ces combustibles : Refuse Derived Fuel (RDF), Fluff, Solid Recovered Fuel (SRF), Substitute Fuel, Secondary Fuel....

Produits à partir de gisements de déchets municipaux ou industriels, ils peuvent être composés de un ou plusieurs éléments suivants :

- Pneus.
- Plastiques.
- RBA.
- Papiers/cartons.
- Bois et déchets de bois (classe B).
- Papiers, cartons et boues de papeterie.
- Boues de STEP.
- Textiles.
- Déchets ménagers.

Ils proviennent notamment :

- Des refus de tri de collecte sélective.
- Des encombrants de déchèterie.
- Des refus de tri mécano-biologique.
- Des refus de tri de DIB.

Il n'y a pas de composition type de CSR. Elle varie en fonction des pays, des sites de production, de la saison et des utilisations qui en sont faites. Généralement, produits directement sur des sites de tri et de traitement de déchets, les CSR ont une composition qui est liée aux rebus des filières de valorisation « matière ». De façon assez générale, la valorisation « matière » conduit à des produits dont les valeurs sont comprises entre quelques centaines d'euros à quelques milliers d'euros la tonne, soit jusqu'à un ordre de grandeur au-dessus d'un produit à vocation énergétique. Ainsi, la valorisation énergétique est à l'origine plus perçue comme une voie d'élimination pour valoriser des produits, qui initialement ne rapportent rien, voire qui ont un coût important de mise en décharge.

Le concept de CSR a donc été créé pour faciliter la mise sur le marché de déchets à vocation de combustibles en :

- Introduisant des standards de qualité (taux d'humidité, teneur maximale en chlore, ...).
- Développant des systèmes de production dédiés et une traçabilité claire.
- Homogénéisant le produit (composition, taille, densité), afin de simplifier leur manipulation, leur transport et leur valorisation thermique.

Issus de gisements fatals, la composition des CSR est cependant travaillée pour correspondre aux attentes des clients utilisateurs de CSR. Cela implique par conséquent une possible production de fractions ultimes non valorisables en matière ou en énergie.

3.1.3. Cadre réglementaire

Au démarrage de l'étude (Décembre 2014), pour tous les pays de l'Union Européenne, le cadre réglementaire de l'exploitation des CSR est défini à travers la décision 2001/118/CE du 16 janvier 2001 (catalogue européen des déchets) et la directive 2008/98/CE relative aux déchets.

Il en ressort notamment que l'utilisation de déchets comme combustible est considérée comme un mode de valorisation à part entière (sous la nomenclature R1). L'incinération des déchets entre dans ce cadre si l'efficacité énergétique est supérieure ou égale à 0,60 pour les installations mises en place avant le 01/01/2009 et 0,65 pour les installations créées après cette date.

Au niveau national, la gestion des déchets est régie par le Code de l'Environnement (art. R541) et par les textes issus des Grenelles 1 et 2 de l'Environnement (loi 2009-967 du 03/08/2009 et loi du 11/05/2010). Il en ressort

principalement des objectifs de valorisation des déchets fixé à 35 % en 2012 et 45 % en 2015. En outre, la valorisation énergétique est perçue comme une alternative pertinente aux déchets qui ne peuvent pas être valorisés en matière.

Concernant l'exploitation des CSR dans des installations de valorisation thermique, les deux principales voies sont décrites ci-dessous (cf. Figure 3).

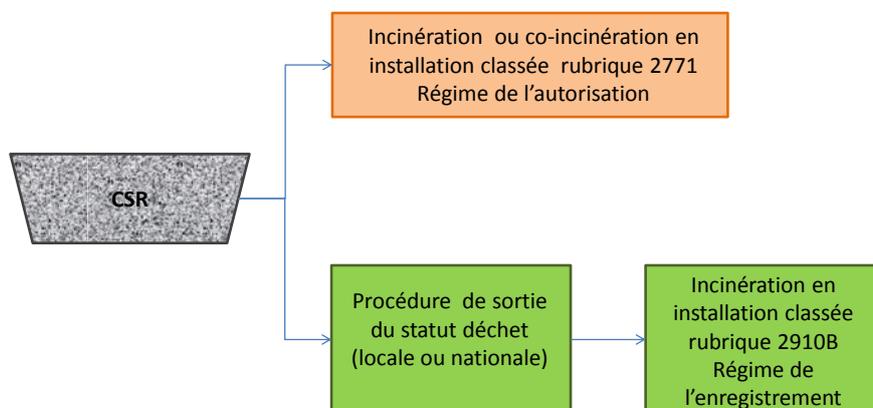


Figure 3 : Cadres réglementaires possibles pour la valorisation thermique des CSR

En France, les CSR sont toujours assimilés à des déchets et par conséquent, leur combustion doit se faire dans le cadre de l'arrêté du 20/09/2002 qui stipule les conditions d'incinération et de co-incinération des déchets.

Nota : il est très important de bien retenir qu'en droit français, le terme co-incinération correspond à de la combustion avec valorisation de la chaleur produite.

Cet arrêté fixe entre autres :

- Les conditions de combustion (température, temps de séjour).
- Les caractéristiques principales de l'installation (brûleur de secours, vitesse d'éjection des fumées, analyse des polluants atmosphériques en continu, ...).
- Les teneurs maximales en polluants atmosphériques (également pour les déchets valorisés en cimenterie) et la qualité des résidus de combustion.
- La qualité des rejets solides et aqueux.

Depuis la fin de l'étude, les pouvoirs publics ont présenté un nouvel arrêté dédié spécifiquement à la combustion des CSR. En pratique il est très proche de l'arrêté du 20/09/2002 (rubrique 2771) mais modifie partiellement les VLE des installations de combustion. Dans les deux arrêtés, elles sont fonction du contexte de combustion : incinération (combustion du déchet sans valorisation de la chaleur), co-incinération (combustion du déchet avec valorisation de la chaleur) ou valorisation en cimenterie.

| Critères | Incineration (mg/Nm ³ sec à 11 % d'O ₂) | Co-incineration (mg/Nm ³ sec à 6 % d'O ₂) | Cimenterie (mg/Nm ³ sec à 10 % d'O ₂) |
|---|--|--|--|
| CO | 50 | 50 | 50 |
| COT | 10 | 10 | 10 |
| NOx (exprimés en NO ₂) | 200 | 200 | 500 |
| Poussières | 10 | 50 | 30 |
| SO ₂ | 50 | 50 | 50 |
| HCl | 10 | 10 | 10 |
| HF | 1 | 1 | 1 |
| PCDD/F | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ |
| Cd + Tl | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Hg | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Tableau 2 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2771)

Globalement, ces VLE sont très contraignantes et imposent quasi systématiquement des équipements d'épuration des fumées, et ce quelle que soit la teneur en éléments polluants dans les CSR (comme le chlore, le soufre ou encore les métaux).

Concernant le nouvel arrêté (rubrique 2971), les VLE sont données dans le tableau ci-après.

| Critères | Incinération (mg/Nm ³ sec à 11% d'O ₂) | Co-incinération (mg/Nm ³ sec à 11% d'O ₂) | Cimenterie (mg/Nm ³ sec à 10 % d'O ₂) |
|--|---|--|---|
| CO | 50 | 50 | 50 |
| COT | 10 | 10 | 10 |
| NOx (exprimés en NO ₂) | 200 | 450 (à 6 % O ₂) | 500 |
| Poussières | 10 | 20 (à 6 % O ₂) | 30 |
| SO ₂ | 50 | 400 (à 6 % O ₂) | 50 |
| HCl | 10 | 10 | 10 |
| HF | 1 | 1 | 1 |
| PCDD/F | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ |
| Cd + Tl | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Hg | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Tableau 3 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2971)

On constate que les VLE « incinération » et « cimenterie » sont identiques à celles de l'arrêté du 20/09/2002. En revanche, elles sont un peu différentes pour dans le cas de la co-incinération. Le taux de NOx passe de 200 à 450 mg/Nm³, celui de SOx est multiplié par 8 (de 50 à 400 mg/Nm³). A l'inverse, le taux de poussières est abaissé de 50 à 20 mg/Nm³.

En parallèle, les Pouvoirs publics ont également en projet de mettre en place un arrêté qui encadre la préparation des CSR. Il impose un certain nombre d'exigences sur la qualité des CSR avant combustion.

Les principaux critères sont les suivants :

- Préparation des CSR à partir de déchets non dangereux.
- PCI brut > 12 000 kJ/kg. Le CSR a fait l'objet d'un tri permettant d'écartier les métaux et les inertes qui peuvent être extraits et valorisables dans les conditions technico-économiques du moment
- Taux de mercure < 3 mg/kg.
- Taux de chlore < 1,5 % MS
- Taux de brome < 1,5 % MS
- Somme des halogènes (brome, chlore, fluor et iode) < 2 % MS

Au moment la rédaction de ce rapport les deux nouveaux textes dédiés aux CSR sont en phase de consultation publique et devraient être effectifs pour le 01/01/2016.

3.1.4. La production des CSR

La production des CSR est réalisée par environ une centaine d'acteurs en Europe, dont une vingtaine en France pour une production nationale qui atteignait 100 000 t en 2011. Les chiffres ne sont pas connus précisément, mais la consommation de CSR est estimée entre 250 et 500 000 t en 2014 (dont environ 50 % pour la cimenterie). Deux types d'installation sont utilisées pour produire les CSR : les installations de tri mécano-biologique (TMB) qui concernent généralement les gisements d'OM et celles de tri mécanique (TM) pour les autres gisements.

3.1.4.1. Installations de TM

Les installations de traitement mécanique (TM ou simplement centre de tri) sont des installations qui produisent des CSR par tri et traitement mécanique des déchets (broyage notamment), et éventuellement une étape de séchage. Elles se caractérisent par les aspects suivants :

- Les déchets en entrée ont des Pci assez élevés.
- Ces déchets ont souvent subi des prétraitements dans d'autres installations ou sont issus de collectes spécifiques. En Allemagne, les TM n'ont pas l'autorisation de traiter des OMR directement. Il faut auparavant qu'elles aient subi a minima un prétraitement.
- Les CSR produits sont de haute qualité et leurs caractéristiques techniques sont compatibles avec les exigences des utilisateurs (co-incinérateurs notamment) avec peu ou pas de traitement préalable.

Parmi les TM, on peut distinguer plusieurs types d'installation :

- Les installations utilisant une seule nature de DIB : il s'agit souvent d'installations valorisant les déchets produits sur une usine proche comme une usine de production de papier par exemple. Les intrants n'ont pas subi de prétraitement et le procédé intègre des étapes de séchage et de tri (criblage, tri aéroulique, tri optique pour les plastiques, tri magnétique) pour garantir la qualité des CSR produits. La qualité des CSR produits est généralement adaptée à un type d'utilisateur spécifique et est peu adaptée aux besoins d'autres utilisateurs.
- Les installations de broyage/formulation de DIB : ces installations utilisent des intrants aux qualités très homogènes et déjà optimisées pour la production de CSR. Le nombre et la diversité des intrants permettra ou non à l'installation de produire une gamme variée de CSR.
- Enfin, les installations utilisant des intrants non homogènes : ces installations peuvent utiliser divers déchets tels que les fractions légères d'OM issues de TMB, des refus de tri d'OM et de DIB issus d'autres TM, des encombrants, des DIB et même de la biomasse pure. Elles ont donc recours à des phases de tri plus importantes que les installations de broyage, mais les déchets utilisés étant néanmoins de bonne qualité, ces tris permettent de produire plusieurs gammes de CSR qui serviront à des utilisateurs différents.

Il est à noter que les frontières entre les types d'installations présentées ci-dessus restent relatives et certaines installations sont à cheval entre deux types.

Les installations de TM traitent des volumes allant de 10 000 à 100 000 t/an. Bien que les déchets utilisés possèdent tous un haut pouvoir calorifique, les sources restent très variées : fraction résiduelle légère des OM (issue d'autres installations TMB ou TM), DIB (plastiques, cartons, textiles, etc.) et refus de DIB, refus de collecte séparée (CS) et refus d'encombrants. Cette sélection à l'entrée est à l'origine des forts rendements de production en CSR qui vont de 50 % pour les installations plus orientées vers le recyclage des déchets (et pour lesquelles la collecte sélective des OM n'est pas très développée) à environ 65 % à 80 % de valorisation des intrants.

Les CSR produits sont caractérisés par leur grande qualité par rapport à ceux issus des centres de TMB :

- Faible taux d'humidité : souvent inférieur à 15 %.
- Haut Pci : souvent supérieur à 18 MJ/kg.
- Faible taux de cendres (important notamment pour l'utilisation dans les fours à chaux) : < 9 %.

La prise en charge des déchets représente, comme pour les installations de TMB, la principale source de revenu des installations de préparation de CSR, sauf lorsqu'il s'agit de caoutchouc (pneus et débris) qui sont payés environ 10 €/t, compte tenu de leur forte homogénéité et leur fort Pci. Les prix perçus par le préparateur de CSR pour la prise en charge de DIB sont très variables, de 20 à 120 €/t en fonction du type de déchets et notamment de leur teneur énergétique.

De même, les CSR de TM représentent parfois un coût allant jusqu'à 30 €/t lorsque leur prise en charge est assimilée à une filière alternative pour leur traitement et non pas un réel substitut d'énergie fossile. Il s'agit de cas où la demande est en mesure d'imposer ses tarifs. En revanche, certains producteurs ont réussi à mettre en place des prix de vente aux consommateurs de CSR qui vont de 0 à 15 €/t et sont liés notamment au Pci des CSR, et à leur contenu en éléments perturbateurs (taux de chlore, de cendres, d'humidité, de métaux, etc.).

Enfin, le coût d'élimination des refus de tri est très important, de 80 à 150 €/t, mais les rendements de production des CSR étant élevés (entre 50 % et 80 %), l'influence du coût d'élimination des refus sur le bilan global reste modérée.

3.1.4.2. Installations de TMB

Les installations de TMB ont pour but de maximiser la valorisation des ordures ménagères résiduelles (OMR) et d'éviter l'enfouissement de déchets pouvant être recyclés ou valorisés. Le traitement de type TMB permet généralement sur un flux d'OMR ou d'ordures ménagères et assimilées (OMA), de séparer les biodéchets qui vont être orientés vers une valorisation organique (production de biogaz et de compost ou résidu stabilisé), les fractions

qui sont valorisables par recyclage ou valorisation énergétique et les éventuelles fractions résiduelles qui seront enfouies. C'est sur la fraction valorisable énergétiquement que peut être réalisée la production de CSR.

La préparation de CSR à moyen ou haut Pci dans les installations de TMB peut être réalisée avant biodégradation ou après biodégradation. Certaines installations combinent ces deux étapes et effectuent un premier tri mécanique sur les déchets entrants, puis un second tri après la phase de traitement biologique. Les nombreuses configurations existantes des installations TMB sont liées aux diverses fonctions que peuvent remplir ces installations.

Elles ont pour but de :

- Réaliser un prétraitement (stabilisation, réduction de la concentration en C organique, etc.) des déchets en vue de leur enfouissement ultérieur.
- Récupérer les déchets pouvant être recyclés ou valorisés avant l'enfouissement de la fraction résiduelle.
- Produire du compost pouvant être utilisé comme amendement.
- Produire du combustible sous forme de biogaz.
- Sécher et trier des déchets pour la production de CSR.

À titre d'exemple, en Allemagne, les TMB ont été conçus comme une solution alternative aux incinérateurs municipaux pour le traitement des OMR. Ils devaient ainsi produire des CSR de qualité, utilisables en co-incinération, à partir de la fraction à haut pouvoir calorifique et non destinée à l'enfouissement. Ils devaient également permettre la mise en décharge d'une partie des déchets organiques (après avoir abaissé le taux de carbone à moins de 5 % suite à des traitements biologiques) ; ce qui intéressait de nombreuses villes voulant rentabiliser leurs investissements dans les décharges.

Les tailles des installations de TMB produisant des CSR sont assez variables, allant de 25 000 à 220 000 tonnes de capacité entrante annuelle. Ces unités produisent entre 10 000 et 90 000 tonnes de CSR, avec un taux de conversion variant également de façon importante (entre 15 % et 50 % des déchets entrants, avec une moyenne de 45 % en Allemagne par exemple). La plupart des installations sont conçues pour le traitement d'OMR, certaines d'entre elles acceptant également des déchets non dangereux d'activité économique, déchets de déchèteries, boues.

Elles produisent généralement une seule ou deux qualités de CSR, différenciées :

- Par leur Pci qui peut varier entre 11 et 22 MJ/kg suivant les installations. Le Pci du CSR déterminera, entre autres, s'il peut être utilisé ou non en co-incinération dans une cimenterie, un four à chaux ou une centrale thermique ou électrique.
- Par leur taux de chlore (variant de 0,15 % à 0,78 % dans les TMB observés) et leur taux de soufre (variant de 0,13 % à 0,3 %), qui ne doivent pas être trop élevés pour que les CSR soient utilisés dans des installations utilisant une méthode sèche de traitement des fumées (souvent le cas des incinérateurs industriels). Ces taux sont couramment assez élevés dans les CSR issus de TMB à cause de la forte teneur en Cl et S dans les OMR (dus notamment à la grande diversité des plastiques contenant du PVC, à l'origine de fortes concentrations en Cl) et de la difficulté à les trier efficacement.
- Par leur taux de cendres (variant de 10 % à 16 % dans les TMB observés), qui n'est pas un problème pour les cimenteries où elles font partie de la charge minérale entrante, mais qui peut être une difficulté pour les autres installations de combustion, les fours à chaux notamment.

Les écarts importants que l'on peut observer pour ces différents paramètres reflètent aussi bien la diversité des technologies utilisées dans les TMB, que la qualité des flux entrants (taux d'humidité, taux de matières à haut Pci comme les plastiques, etc.). La composition des CSR produits varie également de façon importante (de moins de 10 % à 70 % de plastiques, de 20 % à plus de 70 % de papiers/cartons), le contenu en carbone biogénique variant donc également de manière importante.

La principale source de revenus de ces installations sont les revenus liés à la prise en charge des déchets entrants (de 70 à 140 €/tonne, variable selon la situation locale). La situation locale dépend de la densité des installations de traitement d'OM, de l'ajustement des capacités de traitement globales en fonction des ressources disponibles et des éventuels facteurs de pressions extérieures pouvant conduire à l'exportation des déchets. En revanche, la valorisation en combustion des CSR ne génère pas forcément une recette pour le producteur. La prise en charge des CSR (transfert à un utilisateur) peut représenter un coût pour le producteur (entre 30 et 80 €/tonne), qui reste cependant bien moindre que les coûts alternatifs d'élimination comme la mise en décharge. Pour ces installations, l'intérêt de produire des CSR n'est donc pas que ceux-ci représentent un revenu, mais bien que leur coût de traitement global soit moins onéreux que leur incinération ou leur mise en décharge.

À titre d'exemple, les installations de TMB allemandes ont parfois du mal à être rentables pour les raisons suivantes :

- La qualité des CSR produits ne permet pas de les vendre ou de baisser suffisamment significativement le coût de leur prise en charge par l'utilisateur.
- Le contenu en matières organiques de l'air vicié émis par les TMB doit être aussi faible que pour les fumées des installations d'incinération d'OM ; ce qui oblige parfois à brûler ces gaz avec un apport supplémentaire de combustible (gaz naturel).
- La difficulté d'approvisionnement en OM réduit les coûts de traitement pour les producteurs de déchets et donc les gains des TMB.
- Le recours à l'importation d'OM prétraités représente également un coût supplémentaire pour l'installation.

3.1.5. L'utilisation des CSR

En raison de la réglementation, les installations qui utilisent les CSR comme combustible doivent disposer d'une autorisation au titre des ICPE. Actuellement, les CSR sont essentiellement utilisés en Europe dans trois grandes catégories d'installations :

- En co-incinération : contrairement à l'incinération dont le but premier est de détruire un déchet, il s'agit d'installations dont le principal objectif est la production d'énergie par combustion, nécessitant des combustibles de substitution de bonne qualité énergétique, chimique et physique pour qu'ils soient compatibles avec les technologies utilisées. Les installations faisant de la combustion de CSR sont principalement les cimenteries, les fours à chaux et les centrales thermiques à charbon. Il existe également quelques exemples de chaudières à biomasse (comme COGE Vitry en France), qui substituent leur combustible issu à 100 % de la biomasse forestière par des CSR de bois de fin de vie.
- Dans des équipements industriels de combustion (également appelés centrales thermiques dédiées) : installations conçues pour la production d'énergie par l'incinération de CSR. L'énergie produite est utilisée dans une unité industrielle située à proximité. Il est d'ailleurs très fréquent que le propriétaire de l'installation soit également le propriétaire de l'usine utilisant l'énergie produite et qu'une partie des déchets à l'origine des CSR soit produite dans cette même usine. Il s'agit principalement de chaudières industrielles associées aux industries du papier, de la chimie, des déchets et de l'énergie. Ces filières largement développées dans plusieurs pays européens (Allemagne et Autriche en tête) sont moins développées en France (une dizaine d'unités en 2011), où ces installations existent principalement chez les papetiers. Bien que ces installations puissent également être considérées comme des co-incinérateurs du point de vue de la Directive 2000/76/CE, elles sont généralement classées comme incinérateurs, car elles ne brûlent que des déchets et disposent d'une technologie similaire à celle des incinérateurs d'OM.
- Dans des incinérateurs d'OM : ils ont pour objectif de traiter les OM et non les CSR, cependant un certain nombre d'entre eux brûlent également des CSR. Trois raisons principales permettent de l'expliquer :
 - La qualité de certains CSR produits n'est pas suffisante pour être utilisés en co-incinérateur ou dans des incinérateurs industriels.
 - Les incinérateurs d'OM utilisent essentiellement une technologie de combustion en grille qui ne permet pas d'incinérer des déchets dont le PCI est inférieur à 8 MJ/kg. Il leur est cependant possible de mélanger ces déchets avec d'autres, tels que les CSR, dont le PCI est supérieur pour atteindre des PCI moyens entre 8 et 12 MJ/kg.
 - Enfin, lorsque les gisements d'OM sont limités, comme en Allemagne, ils peuvent utiliser des CSR pour augmenter la rentabilité de leur installation. Dans ce cas, ils entrent en concurrence directe avec les incinérateurs industriels et les CSR seront dirigés vers les installations acceptant les prix de traitement les plus faibles.

En France, la seule réelle filière de consommation des CSR (autre que l'autoconsommation) est l'activité cimentière, dont l'objectif est d'atteindre une substitution des combustibles fossiles par des CSR à hauteur de 25 % d'ici 2016. Pour ce faire, les cimentiers travaillent sur la mise en place d'équipements de combustion dédiés au sein des cimenteries, pour ne plus être limités à une injection des CSR uniquement à la tuyère. En outre, les critères d'admissibilité des CSR sont de plus en plus élevés chaque année avec des exigences en termes de granulométrie, de PCI, voire de taux de cendres et de chlore (qui varient en fonction des consommateurs).

Si les cimentiers rencontrent assez peu de difficultés réglementaires, d'un point de vue technique, ils doivent fixer un cahier des charges aux producteurs pour éviter de nuire au procédé de fabrication du ciment (rendement et qualité). Les principaux éléments de ce cahier des charges sont le Pci, le taux de chlore et de mercure, l'humidité et la teneur en biomasse (pour les quotas de CO2)

D'un point de vue économique, les cimentiers restent assez vagues sur les gains réalisés grâce à la substitution des énergies fossiles par des CSR. Il en résulte un marché assez tendu pour les producteurs de CSR qui ont du mal à garder les rennes de leur filière. En tout état de cause, les bénéfices pour les cimentiers sont doubles : gain sur le combustible et gain sur les quotas CO2 grâce aux fractions biogéniques des CSR. Si tous les accords entre cimentiers et producteurs de CSR ne sont pas connus, on estime cependant que les premiers touchent une redevance comprise entre 10 et 35 €/t en fonction de la qualité des CSR.

3.1.6. Le développement des CSR en Europe

Le marché européen, en augmentation constante ces dix dernières années, atteint un potentiel de déchets valorisables thermiquement de l'ordre de 70 Mt par an. Environ 12 millions de tonnes sont valorisées via des cimenteries, des incinérateurs avec récupération d'énergie ou des centrales thermiques (en complément au charbon ou au coke de lignite) ; ce qui, dans tous les cas de figure, correspond à des équipements d'une puissance supérieure à quelques dizaines, voire centaine, de mégawatts.

Tous les pays européens sont soumis aux mêmes contraintes réglementaires qui empêchent l'emploi des CSR dans des petites unités industrielles dédiées.

Les données statistiques sont très disparates et il reste assez difficile d'avoir des chiffres fiables et récents en particulier à cause de l'absence de définitions claires des CSR. En effet, certains comptabilisent tous les déchets (ménagers et industriels) quand d'autres prennent en compte uniquement des déchets préparés, voire que des CSR de bonne qualité (Pci élevé).

Néanmoins, nous pouvons retenir que le taux de valorisation thermique des déchets varie de quelques pourcent à 35 % environ suivant les pays (Figure 5).

En parallèle, on constate que certains pays ne valorisent pas forcément les CSR directement sur leur territoire. Il n'y a pas de chiffre précis, mais la carte suivante (Figure 4) donne une idée des flux observés entre les principaux pays européens. Les Îles britanniques sont plutôt exportatrices de CSR, tandis que l'Allemagne (plus gros producteur de CSR en Europe) est un peu la plateforme centrale de transit des CSR entre l'Ouest et l'Est de l'Europe.

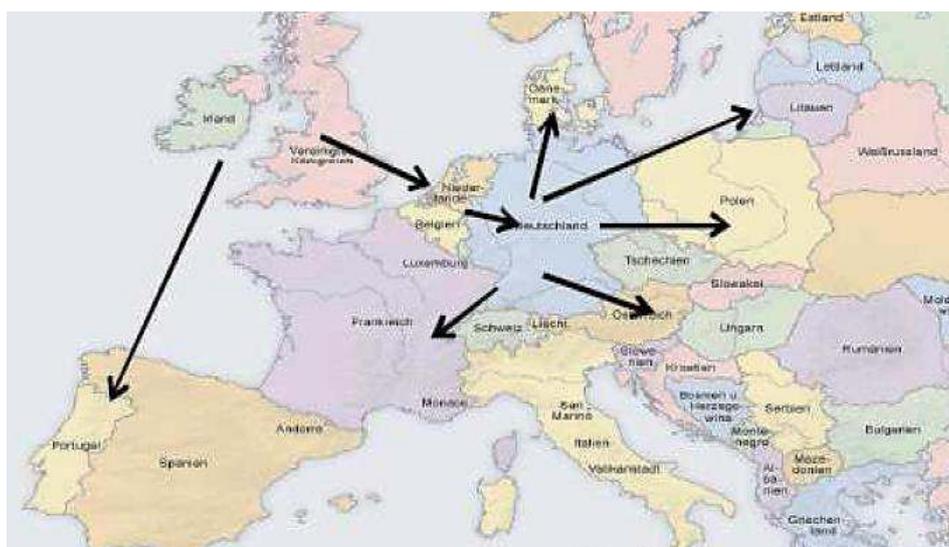


Figure 4 : Principaux flux de CSR entre pays en Europe

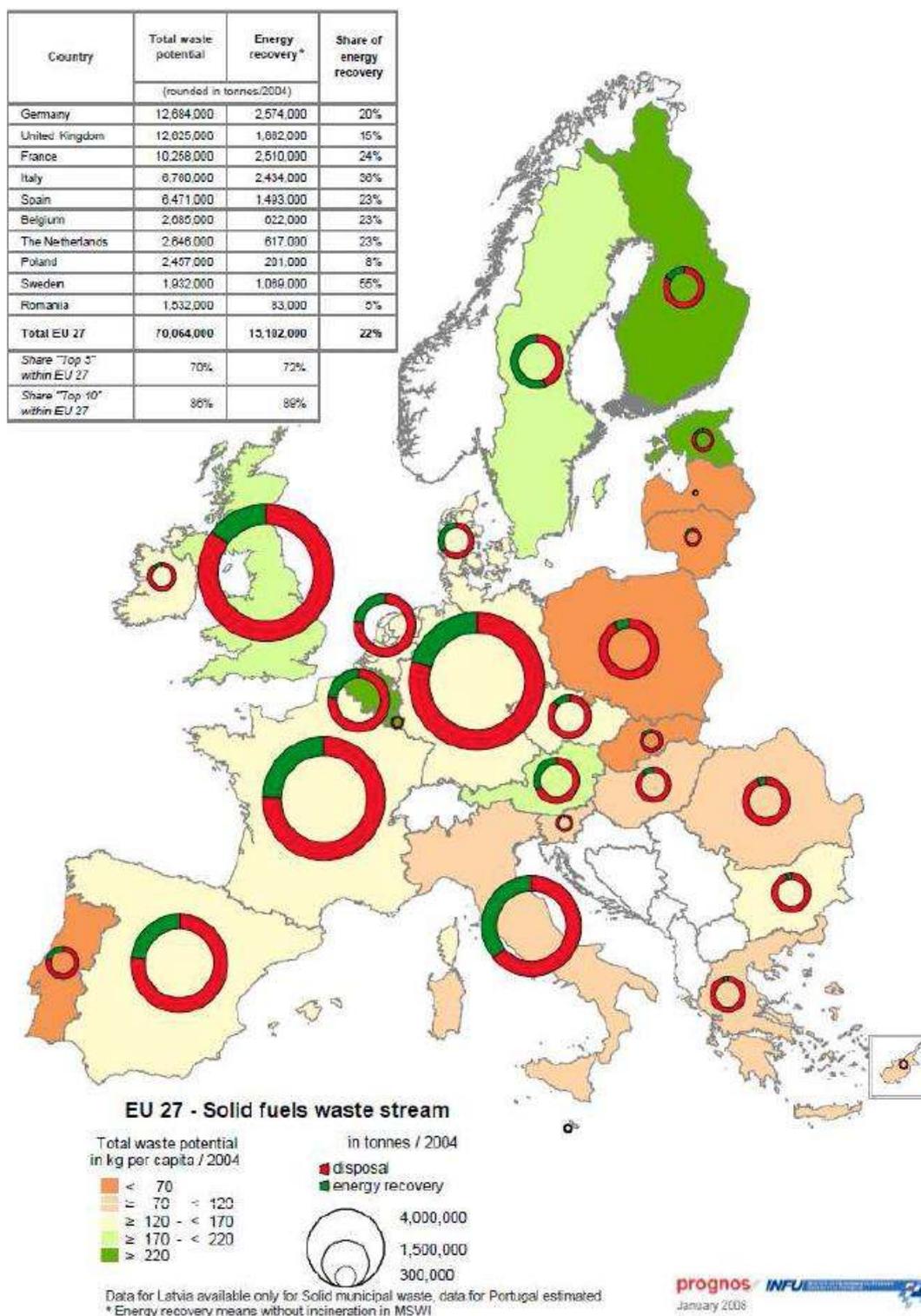


Figure 5 : Volumes de déchets produits en Europe par pays et taux de valorisation énergétique de ces gisements (données 2004)

En se focalisant plus précisément sur les CSR (c'est-à-dire les déchets préparés et optimisés pour la combustion), nous avons réuni les informations suivantes sur les différents pays européens.

3.1.6.1. Allemagne

L'Allemagne est le principal producteur de CSR en Europe avec environ 6 Mt en 2010. Au début des années 2000, les principaux consommateurs de CSR étaient les cimenteries, avec plus de 50 % de la production. En parallèle, l'utilisation des CSR en centrales thermiques a augmenté progressivement pour atteindre une valeur stable depuis

2006 – 2007, de l'ordre de 750 000 t/an. Enfin, les centrales industrielles (puissance de l'ordre de 10-50 MW, avec en tête l'industrie métallurgique et l'industrie papetière) ont vu leur part significativement augmenter depuis 2008 pour représenter plus de 50 % en 2010 avec une projection d'environ 65 % du marché capté en 2015.

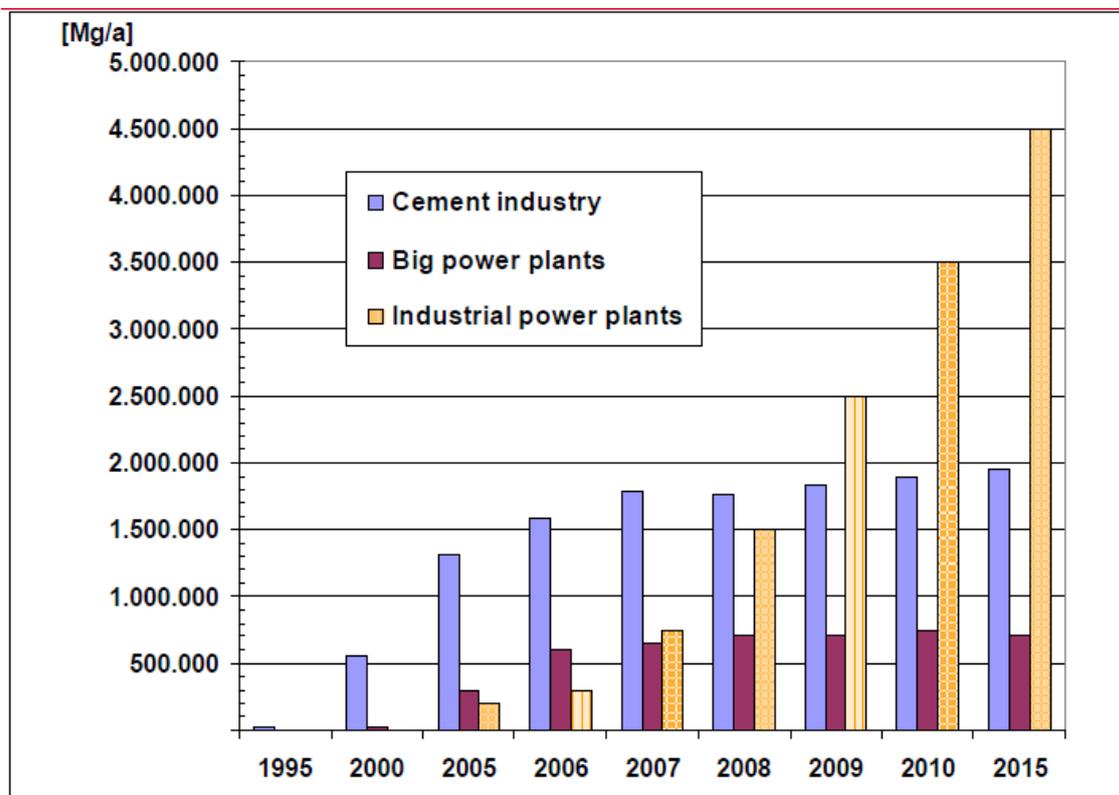


Figure 6 : Voies de valorisation des CSR en Allemagne (t/an, données 2011)

Deux facteurs expliquent cette forte progression de la production de CSR :

- L'interdiction d'enfouir des déchets ayant un Pci supérieur à 6 MJ/kg.
- La récente décision des Pouvoirs publics de s'affranchir de l'énergie nucléaire.

L'Allemagne a donc un rôle prépondérant sur le marché du CSR et son influence au niveau réglementaire européen est ainsi très élevée.

3.1.6.2. Italie

L'Italie collecte environ 30 Mt de déchets municipaux et 100 Mt de déchets industriels par an (toutes origines confondues), parmi lesquels un peu plus de 9 millions sont traités par des centres de tri qui produisent un peu plus de 1,2 Mt de CSR de qualité DIB et 7 Mt de CSR de qualité OM. 80 % sont valorisés par les incinérateurs et par conséquent 20 % par les autres voies déjà citées précédemment. Pour favoriser le développement des autres voies, l'Italie a déterminé par un décret ministériel (DM 22/2013, entré en vigueur le 29 mars 2013) un niveau de qualité des CSR et les spécificités des installations de production et de valorisation. Les CSR doivent être préparés dans les installations classées ICPE et ayant la norme EMAS. Pour qu'un CSR soit de qualité, le Pci doit être supérieur à 15 MJ/kg, le taux de chlore inférieur à 1 %, la teneur en Cd inférieure à 4 mg/kg, la teneur en Pb inférieure à 240 mg/kg... Cependant, cette procédure, qui a pour but de déclasser les CSR du statut déchet, reste insuffisante, car elle limite l'utilisation aux cimenteries produisant plus de 500 t/j de clinker ou aux centrales thermiques de plus de 50 MW.

Concernant les flux de CSR, l'Italie a exporté en 2013 un peu plus de 100 kt de CSR (probablement de qualité DIB) vers l'Autriche, l'Allemagne, la Slovaquie et la Hongrie.

3.1.6.3. Espagne

L'Espagne produit 350 kt de CSR de qualité DIB par an et les valorisent quasiment exclusivement en cimenterie. Le potentiel de valorisation sur l'ensemble du territoire est estimé à 5 Mt pour une valorisation en cimenterie et dans les chaudières industrielles.

Un plan d'énergie renouvelable a été mis en place en 2011 avec pour objectif de produire en 2020 113 GWh d'électricité et 4 000 GWh de chaleur à partir de CSR.

3.1.6.4. Îles Britanniques

Le Royaume-Uni recycle (en chaleur ou en matière) environ 40 % de ses déchets. Un peu plus de 40 Mt sont enfouis chaque année (14 Mt d'OM et 28 Mt de DIB). L'enfouissement est facturé en moyenne 80 £/t. Les déchets sont relativement peu triés à la source, mais davantage sur les sites de tri et de traitement.

Après tri, on retrouve les deux catégories de combustibles : les RDF (CSR OM) qui sont destinés aux incinérateurs et les SRF (CSR DIB) qui sont valorisés en cimenterie ou en industries.

Le tableau suivant donne les principaux chiffres de gisements de déchets et de gisement potentiel de CSR. On constate que l'Irlande et le Royaume-Uni ont un gisement potentiel de CSR de plus de 26 Mt/an.

| Catégorie de déchets | Angleterre | Pays de Galles | Ecosse | Irlande du Nord | Irlande |
|---|------------|----------------|--------|-----------------|---------|
| Gisement OM en Mt (2011) | 25,6 | 1,6 | 3,1 | 1,0 | 2,8 |
| Gisement DIB en Mt (2011) | 47,9 | 3,6 | 6,5 | 1,3 | 0,6 |
| Gisement total de déchets après recyclage (objectif 2025) | 36,3 | 2,5 | 1,9 | 1,1 | 1,7 |
| Gisement potentiel RDF/SRF | 21,8 | 1,5 | 1,1 | 0,7 | 1,0 |

Tableau 4 : Marché potentiel de CSR dans les Îles Britanniques

En outre, comme indiqué précédemment, le Royaume-Uni est un gros exportateur de CSR, en particulier vers les Pays-Bas et les Pays scandinaves, notamment parce que la valorisation thermique des déchets sur le sol britannique se heurte souvent à une opposition locale.

3.2. Caractérisation des CSR

Cette seconde phase de l'étude concerne les travaux de caractérisations des CSR qui ont été menés : sélection, échantillonnage, analyses matières et physiques, corrélations.

3.2.1. Prélèvement des échantillons

Pour la réalisation de cette tâche, des CSR ont été sélectionnés pour la réalisation des étapes et fourni par une quinzaine d'adhérents de FEDEREC. Ils sont issus de 4 catégories différentes :

- ceux issus majoritairement de DIB,
- les résidus de broyage (RB),
- les CSR faits à base d'OM,
- les mélanges.

| Code CSR | Type de CSR |
|------------|----------------------------|
| FED_ECH001 | RB légers |
| FED_ECH002 | DIB |
| FED_ECH003 | Refus de CS |
| FED_ECH005 | RB Lourds |
| FED_ECH006 | DIB |
| FED_ECH007 | OM |
| FED_ECH008 | Mélange OM/DIB/Refus CS |
| FED_ECH009 | DIB |
| FED_ECH010 | Mélange refus de CS et DIB |
| FED_ECH012 | OM |
| FED_ECH013 | OM |
| FED_ECH014 | DIB |
| FED_ECH015 | RB légers |
| FED_ECH016 | Encombrants |
| FED_ECH017 | Encombrants |
| FED_ECH018 | RB Légers |
| FED_ECH019 | DIB |

Tableau 5 : Liste des CSR étudiés

Pour l'étape d'échantillonnage, les adhérents ont réalisé directement les prélèvements grâce aux consignes fournies par Catherine Clauzade, de la société REEVALU, spécialiste du domaine, en particulier pour les pneumatiques usagés et plus généralement pour les déchets industriels. Il leur a été notamment demandé de préparer deux lots :

- Un lot pour des essais de combustion qualitatifs d'une masse totale de l'ordre de 1 000 kg.
- Un lot représentatif du lot précédent pour des analyses d'une masse totale de 10 kg.

Le mode opératoire :

- Réaliser 1 à 2 prélèvements quotidiens sur la sortie de la chaîne de production de CSR pendant 15 à 20 jours maximum, soit des quantités comprises entre 50 et 70 kg, dans la mesure où ces quantités ne dépassent pas 5 % de la production journalière. Les prélèvements sont à effectuer si possible en situation de marche nominale de l'installation, à plus d'une heure du démarrage ou de l'arrêt de chaîne, afin d'être bien assuré que ladite chaîne fonctionne en régime établi (s'il y a des arrêts évidemment).
- Extraire dans chacun des prélèvements précédents, une quantité comprise entre 500 et 700 g, afin de constituer l'échantillon pour analyse.



Figure 7 : Schéma de prélèvement des échantillons de CSR sur les sites de production

3.2.2. Analyse physique

Le but de l'analyse physique est d'identifier et de quantifier les matériaux ou les familles de matériaux qui composent les CSR, pour déterminer des corrélations entre leurs teneurs en ces matériaux et leur composition élémentaire. Par exemple, si la présence de chlore est révélée lors de l'analyse élémentaire, il s'agit de trouver quel(s) matériau(x) est à l'origine de cette présence de chlore.

Les catégories de matériaux identifiées sont :

- Bois.
- Plastiques souples.
- Plastiques durs.
- Films métallisés.
- Textiles.
- Minéraux.
- Métaux.
- Mousses.
- Papiers/cartons.
- Pneumatiques/élastomères.
- Broyat fin (< 5 mm).
- Polystyrène.
- Nylon, fibres plastiques
- Compost.

Ces différents matériaux sont illustrés ci-après (Figure 8).



Textiles



Polystyrène



Papiers/cartons



Nylon



Minéraux



Métaux



Mousses



Plastiques durs



Plastiques souples



Films métallisés



Broyat fin



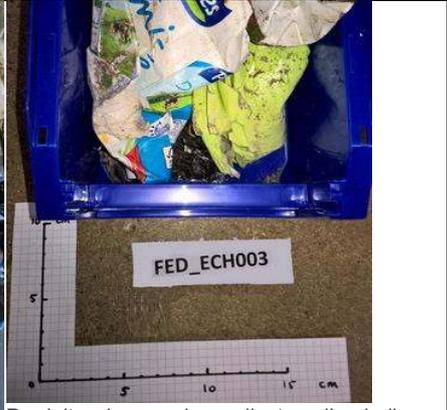
Bois



Pneumatiques/
élastomères

Figure 8 : Illustrations des différents matériaux triés dans les échantillons

Chaque lot est décrit « grossièrement » ci-dessous (le détail est fourni dans des fiches individuelles transmises à chaque adhérent qui a fourni des échantillons).

| FED_ECH001 | FED_ECH002 | FED_ECH003 |
|--|--|--|
|  <p data-bbox="124 741 564 875">Apparence très hétérogène en termes de granulométrie (de 5 à 200 mm) et de composition. Fraction volumique importante de mousses de polyuréthane.</p> |  <p data-bbox="576 741 1038 842">Produit peu ou pas broyé avec une présence importante de matériaux métalliques (aluminium, fer, cuivre) et « d'intrus » comme la peau de lapin présente sur la photo.</p> |  <p data-bbox="1050 741 1497 931">Produits issus de collecte d'emballage alimentaires. La filière de production de CSR de l'adhérent n'est pas encore mise en place. Cet échantillon a été envoyé simplement pour donner un aperçu de ce qui constituera le CSR. En l'état, l'échantillon n'est pas représentatif et n'a pas été envoyé au laboratoire pour analyse chimique.</p> |
|  <p data-bbox="124 1346 564 1424">Granulométrie élevée avec des morceaux compris entre 50 et 200 mm. Présence importante de broyats de bois.</p> |  <p data-bbox="576 1346 1038 1447">Produit plus homogène que les précédents avec une granulométrie inférieure à 30 mm. L'échantillon paraît relativement humide comme s'il avait été exposé à la pluie.</p> |  <p data-bbox="1050 1346 1497 1464">Produit assez fin partiellement décomposé. Cette décomposition donne un aspect similaire à l'ensemble des matières qui le composent et rend donc délicat le tri physique.</p> |
|  <p data-bbox="124 1883 564 1951">Produit assez léger qui semble contenir beaucoup d'emballages plastiques.</p> |  <p data-bbox="576 1883 1038 1939">Produit broyé un peu plus finement que la plupart des autres CSR 100 % DIB.</p> |  <p data-bbox="1050 1883 1497 1951">Comme le précédent, c'est un produit assez léger avec beaucoup d'emballages.</p> |

| | | |
|--|--|--|
| <p>FED_ECH012</p> <p>ECH012</p> <p>C'est le seul CSR issu totalement d'OM qui ne présente pas un état peu ou beaucoup composté.</p> | <p>FED_ECH013</p> <p>ECH013</p> <p>Issu d'un traitement spécifique de compost d'OM, c'est un produit intégralement dégradé, très homogène, avec une granulométrie assez fine (< 5-10 mm). Son état ne permet pas de réaliser un tri physique.</p> | <p>FED_ECH014</p> <p>ECH014</p> <p>CSR issu de DIB, plutôt homogène et très semblable au CSR ECH006.</p> |
| <p>FED_ECH015</p> <p>ECH015</p> <p>Granulométrie élevée avec des éléments compris entre 50 et 200 mm. Certains éléments comme les morceaux de pneumatiques semblent mal déchiquetés. En outre, il y a une importante disparité de densité au sein des différents composants (écart d'au moins 1 à 10).</p> | <p>FED_ECH016</p> <p>ECH016</p> <p>Produit en apparence assez sec et broyé finement (< 15 mm).</p> | <p>FED_ECH017</p> <p>ECH017</p> <p>Echantillon très semblable à l'échantillon ECH016, mais avec une granulométrie légèrement plus étalée (jusqu'à 20-25 mm).</p> |
| <p>FED_ECH018</p> <p>ECH018</p> <p>Broyat très fin et produit à apparence terreuse.</p> | <p>FED_ECH019</p> <p>ECH019</p> <p>Echantillon très similaire aux échantillons ECH006 et ECH014.</p> | |

Figure 9 : Visualisation et principales caractéristiques des CSR étudiés

Ce premier aperçu confirme ce qui a déjà été énoncé dans l'état de l'art. On observe une très grande disparité d'un CSR à un autre, que ce soit en termes de composition ou de granulométrie.

Les résultats du tri physique sont donnés dans le tableau ci-après. La première partie, dite « entrants », correspond aux données fournies par les adhérents sur leur « recette » d'élaboration des CSR. La deuxième partie « analyse physique » donne la composition des CSR que nous avons mesurée.

Les constats que l'on peut faire à la suite de ces analyses physiques et les premières conclusions que l'on peut en tirer pour un usage de ces CSR en chaudière à grille sont les suivants :

- Pour une même catégorie de CSR, il y a des écarts de composition considérables. Par exemple, si on compare les 3 échantillons de RB légers (ECH001, ECH015 et ECH018), on s'aperçoit que la teneur en plastiques (plastiques souples + plastiques durs) varie de 6,5 à 58 %, la proportion de textiles va de 0 à 20,8 %, celle de mousses de 0 à 10 %, etc. Cela est vrai pour toutes les catégories de CSR.
- Les DIB sont majoritairement composés de bois, plastiques souples, plastiques durs, et papiers/cartons.
- La plupart des échantillons contiennent des films métallisés. Ces films sont problématiques à plusieurs égards. Composés généralement d'aluminium, ils peuvent fondre pendant la combustion et par conséquent former des agglomérats avec les cendres, qui risquent alors d'entraîner des bouchages, voire des blocages, notamment au niveau des systèmes d'évacuation des cendres sous foyer. D'autre part, ces films métallisés sont susceptibles d'accroître fortement la teneur en métaux lourds dans les fumées.
- Ce problème se répète également avec la présence de métaux dans les CSR, en particulier du cuivre (fils électriques) et de l'aluminium (issu souvent de menuiseries).
- La part de textiles est assez élevée dans plusieurs CSR (jusqu'à 20 % en masse). Les textiles peuvent être valorisés thermiquement sans difficulté grâce à un pouvoir calorifique substantiel (le Pci des textiles est de l'ordre de 17,5 MJ/kg), mais ils contiennent souvent des pigments dont certains élaborés avec des métaux lourds (comme le cadmium, le chrome et le plomb). En outre, il est important qu'ils soient finement broyés, car les matières fibreuses ont tendance à coincer les équipements de convoyage et de dosage comme les vis sans fin.
- La teneur apparente en minéraux est globalement assez contenue, sauf pour les échantillons 009 et 012. L'incidence sur la combustion reste assez faible, mais une meilleure extraction permettrait de limiter les quantités de cendres produites et augmenterait sensiblement le Pci.
- Plusieurs CSR ont des teneurs élevées en mousse de polyuréthane. Outre les émissions accrues de NOx qu'elles induisent (point qui sera étudié et développé en tâche 2), les mousses sont responsables d'une forte rétention d'eau en cas d'exposition à la pluie, d'une diminution de la masse volumique (et donc d'une augmentation des coûts de transport) et du phénomène de voûtage dans les trémies (phénomène de voûtage également favorisé par la présence de polystyrène).

| | Ech001 | Ech002 | Ech005 | Ech006 | Ech007 | Ech008 | Ech009 | Ech010 | Ech012 | Ech013 | Ech014 | Ech015 | Ech016 | ECH017 | Ech018 | Ech019 |
|-------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------------------|--------|-------------------|--------|--------|--------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------|
| Tests | RB légers | DIB | RB lourds | DIB | OM | DIB/OM/refus de CS | DIB | DIB / refus de CS | OM | OM | DIB/OM | RB légers | Encombrants | Encombrants | RB légers | DIB |

Entrants

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|--|----|--|-----|----|
| OM | | | | | 100 | 50 | | | 100 | 100 | 45 | | | | | |
| Refus de collecte sélective | | 3 | | | | 4 | | 24 | | | 5 | | 20 | | | 5 |
| RBA | | | 100 | | | | | | | | | | | | 100 | |
| Plastiques (DEEE) | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pneus | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DIB / Encombrants de déchetteries | | 83 | | 88 | | 46 | 100 | 57 | | | 47 | | 75 | | | 80 |
| Ameublement | | | | | | | | | | | | | 5 | | | |
| Chutes de fabrication | | | | | | | | 9 | | | | | | | | |
| Bois classe B | | | | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Autres | | 14 | | 10 | | | | 10 | | | 3 | | | | | 15 |

Analyses physiques

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|-------|------|
| Bois | 8,4 | 21,4 | 13,9 | 22,7 | 24,4 | 2,6 | 18,0 | 7,5 | 2,2 | 0 | 6,9 | 14,2 | 23,2 | 32,4 | 3,175 | 2,4 |
| Plastiques souples | 7,4 | 29,5 | 22,1 | 8,6 | 24,4 | 18,8 | 7,9 | 16,7 | 9,1 | 0 | 26,8 | 5,0 | 5,3 | 10,4 | 3,175 | 26,7 |
| Plastiques durs | 23,4 | 10,9 | 40,4 | 3,4 | 0,5 | 15,6 | 21,3 | 13,8 | 12,9 | 0 | 22,9 | 52,9 | 8,4 | 15,4 | 3,175 | 34,8 |
| Films métallisés | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,6 | 0,0 | 3,9 | 1,1 | 1,3 | 1,1 | 0 | 1,1 | 0,2 | 1,1 | 1,8 | 0 | 3,2 |
| Textiles | 20,8 | 12,2 | 0,8 | 6,6 | 0,0 | 21,4 | 2,2 | 5,2 | 9,0 | 0 | 18,3 | 3,3 | 2,1 | 1,8 | 0 | 7,0 |
| Minéraux | 0,1 | <0,1 | 1,1 | 1,7 | 3,0 | 0,0 | 10,1 | 2,5 | 7,5 | 0 | 0,5 | 0,0 | 2,1 | 0,4 | 0 | 0,4 |
| Métaux | 4,4 | 5,0 | 0,7 | 0,6 | 0,0 | 1,3 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,4 | 0 | 0,4 |
| Mousses | 9,8 | 0,1 | 0,5 | 17,8 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,0 | <0,1 | 0 | 1,1 | 6,5 | 6,3 | 31,5 | 0 | 2,0 |
| Papier/carton | 7,9 | 17,6 | 0,1 | 20,7 | 24,4 | 22,1 | 6,7 | 35,8 | 19,4 | 0 | 21,5 | 3,5 | 17,9 | 0,0 | 3,175 | 23,0 |
| Pneus/élastomères | 5,1 | 0 | 20,5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3,7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Broyat fin (< 5mm) | 10,4 | 0,7 | 0,1 | 17,4 | 23,3 | 10,4 | 27,0 | 13,2 | 37,6 | 0 | 0,0 | 2,9 | 31,4 | 5,8 | 87,3 | 0 |
| Polystyrène | 2,2 | <0,1 | 0 | 0,0 | 0 | 1,3 | 1,1 | 3,9 | 1,1 | 0 | 1,1 | 5,1 | 1,1 | <0,1 | 0 | 0 |
| Nylon, fibres plastiques | 0 | 2,3 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compost | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 0,0 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 6 : Comparatif entre les entrants et l'analyse physique des échantillons de CSR (% massique)

3.2.3. Analyse élémentaire

Pour chaque CSR, le laboratoire mandaté (EUROFINS à Saverne, 67) a procédé aux analyses suivantes : Teneurs en carbone et en hydrogène, qui sont les deux principaux éléments impliqués dans la combustion. Elles servent à calculer la composition des fumées entre autres.

- Teneurs en azote, en chlore, en soufre, en fluor et en brome, éléments qui sont responsables de la formation des polluants atmosphériques acides et des oxydes d'azote.
- Composition chimique et fusibilité des cendres. La fusibilité des cendres (températures de fusion) renseigne sur la possibilité ou non d'utiliser telle ou telle technologie de combustion. Quant à la composition chimique, sa connaissance permet de savoir notamment si les cendres peuvent jouer un rôle sur le captage par absorption des substances acides formées pendant la combustion ; ce captage pouvant intervenir dans le foyer directement et/ou en aval du foyer, dans le parcours des fumées jusqu'au dépoussiéreur final.
- Pouvoir calorifique inférieur. Il permet de déterminer par calcul la température maximale atteinte pendant la combustion, en absence d'échange de chaleur (température dite adiabatique). Par exemple, dans le cas de combustibles très cendreux, donc à très faible pouvoir calorifique, on vérifie que cette température adiabatique est suffisante pour que la combustion puisse se dérouler normalement, sans formation d'imbrûlés (il faut que cette température soit au minimum de 900 °C). A l'inverse, avec les combustibles très énergétiques, la connaissance de la température adiabatique permet une première estimation du pourcentage d'énergie produite qu'il faudra extraire dans le foyer, pour éviter que celui-ci n'atteigne des températures excessives, qui endommageraient ledit foyer et seraient susceptibles de conduire à la formation de mâchefers.
- Teneurs en métaux lourds et en dioxines/furanes.

Les résultats des analyses sont donnés dans le tableau ci-dessous (Tableau 7). Dans ce tableau, il a été ajouté une colonne « bois classe A » pour donner un élément de comparaison. Par ailleurs, pour chaque critère, la case repérée en rouge correspond à la valeur maximale observée, tandis que la case en vert est celle de la valeur minimale.

Sur la base de ces résultats, on peut faire les constatations et en tirer les premières conclusions suivantes, quant à l'usage des CSR en combustion :

- Les teneurs en humidité sont comprises typiquement entre 5 et 25 %, sauf l'échantillon ECH006 qui est à 35 %. Comparés à la biomasse, les CSR sont donc des combustibles secs. La conception et les réglages du foyer devront être similaires à ceux appliqués aux biomasses sèches, notamment en ce qui concerne la répartition des airs de combustion et pour éviter des surchauffes locales.
- Les teneurs en cendres sont élevées, voire très élevées, avec des valeurs allant de 10 à plus de 65 %. Elles dépassent de très loin ce que l'on observe avec les biomasses. Elles sont aussi supérieures à celles des charbons (à titre de repère, on notera que les charbons utilisés par EDF dans ses centrales thermiques – EDF étant le plus gros consommateur national – ont des teneurs en cendres qui se situent entre 8 et 15 %). Sur le plan technologique, les foyers et les systèmes de gestion de cendres à mettre en œuvre pour les CSR seront plus proches de ceux employés pour la valorisation énergétique des déchets ménagers (dont les teneurs en éléments minéraux est généralement comprise entre 25 et 30 % sur base sèche), que ceux utilisés pour les biomasses, dont les teneurs en cendres ne dépassent quasiment jamais 10 %.
- A l'exception de l'échantillon Ech018 qui a un Pci particulièrement bas à cause de sa forte teneur en cendres, les autres CSR ont des pouvoirs calorifiques sur brut (cette grandeur étant la plus importante à considérer, car elle intègre la teneur en humidité du combustible), qui se situent entre 10 et 25 MJ/kg. Cette plage de Pci est très étendue et il est peu probable qu'elle puisse être couverte par les foyers actuels. Le diagramme de combustion d'un incinérateur donné ci-après à titre d'exemple montre que le foyer dont il est équipé peut admettre des déchets dont le Pci est compris entre 6,3 MJ /kg (1500 kcal/kg sur la figure) et 10,5 MJ/kg (2500 kcal/kg) (Figure 10).
- Les teneurs en azote vont de 0,5 et 2,1 %. Ce sont des teneurs élevées qui exigeront de systèmes DeNOx en aval du foyer, pour la plupart des CSR.
- Il en est de même pour les teneurs en soufre et chlore (0,2 à 0,9 % pour le soufre et 0,5 à 3,3 % pour le chlore), qui sont très nettement supérieures à celle du bois (à titre de comparaison, on rappelle que la teneur en soufre des fuels lourds brûlés en France est maintenant inférieure à 1 % dans la plupart des cas, que la teneur en soufre des charbons est comprise entre 0,5 et 1,0 % et que la teneur en chlore des ordures ménagères varie de 0,3 à 0,5 %). De tels taux de soufre et chlore dans les CSR engendreront inévitablement la formation de polluants acides comme HCl et SO₂, à des teneurs très largement au-delà des valeurs fixées par la réglementation. Des traitements de fumées à haut rendement vont être impératifs. Par ailleurs, ces fortes teneurs en agents acides imposeront des températures de sortie des fumées assez élevées (typiquement, 170 – 180 °C), afin d'éviter la corrosion acide des éléments situés en aval de la chaudière (ventilateur, cheminée, etc.)

- Ce constat est également valable pour le brome et le fluor qui sont présents dans les CSR à des teneurs allant de moins de 50 mg/kg jusqu'à environ 1000 mg/kg. Ces teneurs sont nettement plus faibles que celle du chlore, mais les exigences réglementaires sont plus fortes. Les systèmes d'abattement de ces deux halogènes devront donc être aussi très performants.
- Les températures de fusion des cendres se situent pour la plupart au-delà de celles des bois de classe A. L'emploi des CSR en combustion ne devrait donc pas poser de problèmes tels que formation de mâchefers, de vitrifiats, dégradation des matériaux constitutifs du foyer (aussi bien parties métalliques que réfractaires), dysfonctionnement de la combustion à cause d'injections d'air dont on a perdu le contrôle, etc. On notera que pour ce critère « fusibilité des cendres », qui est très important puisqu'il conditionne la marche même de la chaudière, les CSR sont plus attractifs que beaucoup de biomasses autres que le bois (paille, miscanthus, cultures énergétiques, etc.), avec lesquelles on rencontre souvent des problèmes de fusion de cendres qui nuisent à la qualité de la combustion.
- Les cendres sont essentiellement composées de silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), oxyde de fer (Fe₂O₃) et oxyde de calcium (CaO). Les teneurs importantes en oxyde de calcium permettent d'envisager un abattement partiel des gaz acides par réaction desdits gaz avec CaO, dès l'étape de combustion. Il y a également un peu d'alcalins (potassium et sodium), ainsi que du phosphore, agents corrosifs potentiels, mais il ne devrait pas y avoir de problèmes majeurs dans ce domaine, compte tenu des faibles teneurs observées.

Les métaux lourds sont particulièrement présents dans les CSR et notamment dans les résidus de broyage. Les teneurs en chrome, cadmium, plomb, nickel, zinc et cuivre sont très importantes. Il y a également un peu de mercure dans certains échantillons (toujours les RBA). Ces métaux vont se retrouver dans les résidus d'épuration des fumées et seront certainement une des difficultés majeures dans l'usage des CSR, puisque ces résidus d'épuration constitueront des volumes importants, compte-tenu de la teneur élevée en cendres des CSR, qui devront être soit traités, soit mis en décharge. Dans tous les cas, la gestion des résidus d'épuration avec leurs métaux risque de représenter un coût important. Par ailleurs, quand les métaux sont présents dans les CSR au travers de fils ou de gaines électriques, ces derniers ont tendance à fondre en formant des agglomérats de taille importante avec les cendres, lesquels agglomérats peuvent être à l'origine de blocages, en particulier au niveau du dispositif d'extraction des cendres.

- Les teneurs en dioxines et furanes des CSR sont également fournies. Elles se situent entre 2,5 et 35 ng/kg. On rappelle qu'il n'y a pas de lien entre la teneur en dioxines et furanes relevée dans un combustible et celle mesurée à la cheminée, après combustion dudit combustible. La teneur en dioxines et furanes mesurée à la cheminée dépend pour l'essentiel de la performance de la chambre de combustion et du système d'épuration des fumées.

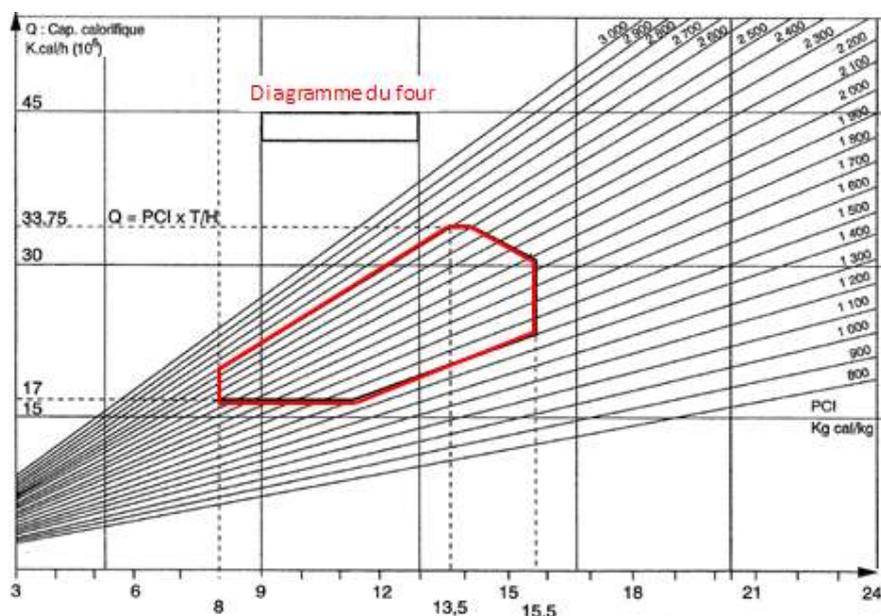


Figure 10 : Exemple de diagramme de combustion d'un foyer équipant une unité de valorisation énergétique de déchets ménagers

| Critères | Unité | Ech001 | Ech002 | Ech005 | Ech006 | Ech007 | Ech008 | Ech009 | Ech010 | Ech012 | Ech013 | Ech014 | Ech015 | Ech016 | ECH017 | Ech018 | Ech019 | Moyenne | Bois |
|----------|-------|-----------|--------|-----------|--------|--------|---------------------------|--------|----------------------|--------|--------|--------|-----------|------------------|------------------|-----------|--------|---------|----------|
| | | RB légers | DIB | RB lourds | DIB | OM | DIB/OM/ refus de CS | DIB | DIB / refus de CS | OM | OM | DIB/OM | RB légers | Encom- brants | Encom- brants | RB légers | DIB | | Classe A |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Humidité | % sur PB | 15,1 | 10,2 | 10,3 | 35,5 | 16,1 | 17,4 | 10,7 | 18,3 | 10,8 | 24,3 | 21,5 | 5,2 | 8,9 | 16,4 | 7,8 | 3,6 | 13,8 | 7,8 |
| Teneur en cendres à 550 °C | % MS | 37,6 | 16,5 | 27,9 | 21,8 | 35 | 13,9 | 26,7 | 20 | 44,4 | 41,5 | 16,4 | 17,9 | 9,8 | 14,1 | 66,6 | 12,7 | 26,4 | 1,5 |
| Teneurs en matières volatiles | % MS | 67,5 | 94 | 66,3 | 67,9 | 56,5 | 77 | 68,2 | 71,1 | 48,9 | 50,9 | 77,4 | 74,3 | 76,3 | 75,8 | 34,6 | 80,9 | 68,0 | 81,1 |
| Pci (sec) | kJ/kg MS | 20 225 | 27 668 | 20 274 | 16 965 | 13 289 | 23 811 | 17 196 | 19 093 | 13 717 | 11 313 | 23 946 | 22 827 | 21 210 | 18 692 | 8 007 | 25 459 | 18 981 | 16 450 |
| Pci (brut) | kJ/kg PB | 16 834 | 24 605 | 17 951 | 10 128 | 10 780 | 19 275 | 15 105 | 15 171 | 11 985 | 8 002 | 18 299 | 21 530 | 19 127 | 15 246 | 7 205 | 24 460 | 15 981 | 18 050 |
| Carbone (C) | % MS | 45,1 | 66,9 | 47,5 | 46,3 | 38,8 | 56,2 | 42,7 | 52,8 | 39,1 | 32,4 | 51,5 | 58,6 | 50,7 | 47,8 | 19,9 | 53,6 | 46,9 | 50 |
| Hydrogène (H) | % MS | 5,7 | 11 | 6 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 5,6 | 7,1 | 5 | 3,3 | 6,9 | 7,4 | 6 | 6,7 | 2,2 | 7,2 | 6,1 | 6,2 |
| Azote (N) | % MS | 1,8 | <0,50 | 1,17 | 2,07 | 1,74 | 1,5 | 1,11 | 0,8 | 1,48 | 1,89 | 1,27 | 1,37 | 1,57 | 1,8 | 0,81 | 0,9 | 1,4 | 0,17 |
| Soufre (S) | % MS | 0,24 | 0,24 | 0,45 | 0,48 | 0,55 | 0,19 | 0,86 | 0,4 | 0,2 | 0,55 | 0,54 | 0,33 | 0,25 | 0,91 | 0,32 | 0,38 | 0,4 | 0,01 |
| Chlore (Cl) | % MS | 1,1 | 0,48 | 3,3 | 0,69 | 0,66 | 1,3 | 1,1 | 0,88 | 0,78 | 0,59 | 1,4 | 1,7 | 1,2 | 1,1 | 0,59 | 1,1 | 1,1 | 0,03 |
| Brome (Br) | mg/kg | 941 | <50 | 236 | 68 | <50 | <50 | 301 | 110 | <50 | <50 | 106 | 359 | 112 | 231 | 373 | <50 | 283,7 | |
| Fluor (F) | mg/kg | 562 | 51 | 1010 | 103 | 161 | 145 | 261 | 81 | 102 | 202 | 65 | 728 | 95 | 157 | 399 | 65 | 261,7 | |

| <i>Métaux lourds</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|----------|-----------|-------|---------|-------|
| Arsenic (As) | mg/kg MS | 9,69 | <1,01 | 6,14 | 1,55 | 3,25 | 1,11 | 5,26 | 1,10 | 1,71 | 3,34 | 2,02 | 4,22 | 2,98 | 13,00 | 12,70 | <1,00 | 4,3 | <1 |
| Cadmium (Cd) | mg/kg MS | 12,90 | <0,41 | 7,56 | 7,87 | 0,48 | 0,76 | 3,22 | 1,17 | 1,14 | 0,56 | 1,96 | 7,30 | 1,74 | 0,68 | 18,50 | 0,96 | 4,2 | <0,40 |
| Chrome (Cr) | mg/kg MS | 830,00 | 8,30 | 46,30 | 99,40 | 139 | 35,20 | 80,80 | 61,50 | 193 | 71,80 | 106 | 60,10 | 95,20 | 36,30 | 225,00 | 52,10 | 133,8 | 6,9 |
| Cuivre (Cu) | mg/kg MS | 23 800,00 | 54,30 | 1140 | 629 | 135 | 99,40 | 95,10 | 2570 | 271 | 95,90 | 1 800 | 15 300 | 52,60 | 2 040,00 | 22 900,00 | 3 820 | 4 675,1 | 6,5 |
| Nickel (Ni) | mg/kg MS | 321,00 | 4,74 | 33,10 | 40,00 | 59,30 | 14,50 | 27,30 | 30,20 | 54,20 | 33,70 | 83,60 | 52,80 | 6,63 | 9,08 | 390,00 | 18,90 | 73,7 | 7,1 |
| Plomb (Pb) | mg/kg MS | 1 020,00 | 9,55 | 575 | 66,50 | 54,80 | 23,50 | 307 | 82,30 | 250 | 47,90 | 149 | 706 | 43,70 | 50,10 | 1 330,00 | 64,40 | 298,7 | <5,0 |
| Zinc (Zn) | mg/kg MS | 13 400,00 | 239 | 1490 | 468 | 369 | 429 | 533 | 275,00 | 4630 | 218,00 | 360 | 3210 | 274 | 261,00 | 22 700,00 | 213 | 3 066,8 | 13,0 |
| Mercure (Hg) | mg/kg MS | 1,63 | <0,10 | 0,50 | 0,35 | 0,80 | 0,11 | 0,20 | 0,66 | <0,10 | 0,21 | 0,51 | 0,60 | <0,10 | 0,16 | 5,80 | 0,30 | 0,8 | <0,1 |
| Antimoine (Sb) | mg/kg MS | 747,00 | 3,23 | 67,40 | 31,60 | 3,28 | 5,02 | 64,10 | 29,30 | 9,82 | 2,73 | 39,50 | 102 | 50,40 | 44,40 | 112,00 | 10,80 | 82,7 | |
| Cobalt (Co) | mg/kg MS | <1,00 | <1,01 | <1,00 | <1,00 | <1,00 | 14,90 | 8,99 | <1,02 | 124,00 | <1,01 | <1,00 | <1,00 | <1,00 | <1,00 | <1,00 | 2,24 | 10,1 | |
| Manganèse (Mn) | mg/kg MS | 588,00 | 31,60 | 96,80 | 92,30 | 763 | 112 | 198 | 88,30 | 182 | 154,00 | 97,50 | 251 | 83,30 | 64,90 | 658,00 | 40,70 | 218,8 | |
| Vanadium (V) | mg/kg MS | 18,10 | 1,91 | 3,98 | 4,57 | 7,51 | 2,41 | 10,50 | 3,17 | 4,16 | 7,33 | 3,46 | 7,12 | 2,53 | 3,14 | 16,40 | 1,70 | 6,1 | |
| Thallium (Tl) | mg/kg MS | <5,00 | <5,07 | <5,00 | <5,00 | <5,01 | <5,00 | <5,00 | <5,08 | <5,00 | <5,06 | <5,00 | <5,00 | <5,00 | <5,00 | <5,00 | <5,00 | 5,0 | |

Tableau 7 : Analyses immédiate et élémentaire des échantillons de CSR

PB : Produit brut

MS : matière sèche

Remarque : les valeurs précédées du symbole « < » signifie que le composant est sous le seuil de détection des analyses. Elles sont assimilées à zéro dans le calcul des moyennes.

3.2.4. Corrélations entre composition macroscopique et composition chimique des CSR

A partir des résultats des analyses physiques et des analyses élémentaires, nous avons pu déterminer un ensemble de corrélations, qui relie la composition chimique des CSR à la distribution des différentes fractions qui les constituent. L'intérêt de ces corrélations est de permettre aux producteurs de CSR d'ajuster la formulation de leurs produits, en fonction des exigences de leurs clients (Pci plus élevé, moins de chlore, moins de soufre, etc.).

Ces corrélations qualitatives (elles ne sont pas exprimées sous la forme de relations mathématiques) sont récapitulées dans le tableau qui suit (Tableau 8).

| | |
|--------------------------------|--|
| Taux de cendres | Les CSR ont des taux de cendres élevés, qui sont liés notamment à la présence de métaux et de terres et gravats (ces terres et gravats sont notamment présents dans les RBA et proviennent, soit des véhicules eux-mêmes, soit de leur manipulation sur le chantier de broyage). Par ailleurs, certains polymères composites, ainsi que les silicones ont des charges importantes en matières minérales. |
| Taux d'humidité | Les CSR sont des produits relativement secs. Quand ils contiennent une fraction de mousses importante, leur humidité peut augmenter substantiellement s'ils ne sont pas correctement préservés de la pluie. |
| Azote | L'azote dans les CSR a généralement pour principale origine les mousses de polyuréthanes ; ces pouvant avoir des teneurs en azote allant jusqu'à 8 %. Remarque : Les mousses sont également fortement responsables des problèmes de voûtage dans les équipements de stockage de combustible. Certains papiers peuvent également contenir jusqu'à près de 2% en masse d'azote. |
| Chlore | L'une des principales sources de chlore dans les CSR est sans conteste le PVC. Certains papiers présentent également des traces importantes de chlore liées à la fabrication. |
| Soufre | Le soufre a des origines diverses, à la fois minérales et organiques. Cependant, les élastomères (caoutchoucs et pneumatiques) en contiennent des proportions importantes. |
| Brome | Le brome est utilisé comme retardateur de flamme dans les polymères pour limiter les risques d'incendie, notamment avec les appareils électriques. |
| Fluor | Les principaux responsables de la présence de fluor dans les CSR sont les polymères fluorés comme le PTFE (polytétrafluoroéthylène, encore communément appelé téflon) ou le PVDF (polyfluorure de Vinylidène). |
| Métaux et métaux lourds | Comme il a été vu précédemment, certains échantillons de CSR contiennent encore des quantités importantes de métaux : morceaux d'acier, d'aluminium et fils de cuivre. On retrouve également des métaux dans les pigments des tissus et des plastiques, ainsi que dans les gaines électriques. |

Tableau 8 : Influence des matériaux sur les teneurs en éléments chimiques des CSR

3.3. Essais de combustion des CSR

Les essais ont été réalisés chez la société COMPTE-R située à Arlanc (63). COMPTE-R est le premier fabricant français de chaudières biomasse sur technologie à grille mobile. Nous avons choisi de travailler avec cette société car :

- Le foyer de combustion à grille mobile est la technologie la plus répandue en France.
- L'expérience de la société COMPTE-R avec les combustibles solides est très importante pour jauger et qualifier le comportement des CSR en combustion.
- COMPTE-R dispose d'une chaudière d'essais de 400-500 kW, représentative d'une gamme de puissances allant de 1 à plusieurs mégawatts.

Deux campagnes d'essais ont été effectuées avec une première série destinée à qualifier le comportement des CSR en combustion sur une grille mobile, puis une deuxième série pour quantifier les essais et contrôler les émissions atmosphériques.

3.3.1. Première campagne d'essais

3.3.1.1. Introduction et déroulement

Le but de ces essais a été d'observer le comportement en combustion d'un panel varié de CSR, afin de déterminer lesquels se prêteront le mieux à la deuxième phase d'essais.

Nous avons choisi cinq CSR de façon quelque peu subjective, avec en premier critère leur aspect physique. En effet, l'alimentation d'une chaudière biomasse, en outre ici de petite taille, est souvent le point critique lors d'un essai de combustion. Nous avons donc écarté les combustibles qui semblaient délicats à convoier et doser. Parmi les CSR restants, nous avons essayé d'en sélectionner 5 suffisamment différents pour couvrir le panel d'échantillons.

Remarque : comme l'un des essais (celui relatif au CSR référencé ECH005) a dû être rapidement interrompu à cause des difficultés rencontrées lors de la combustion, l'échantillon a été remplacé par un autre.

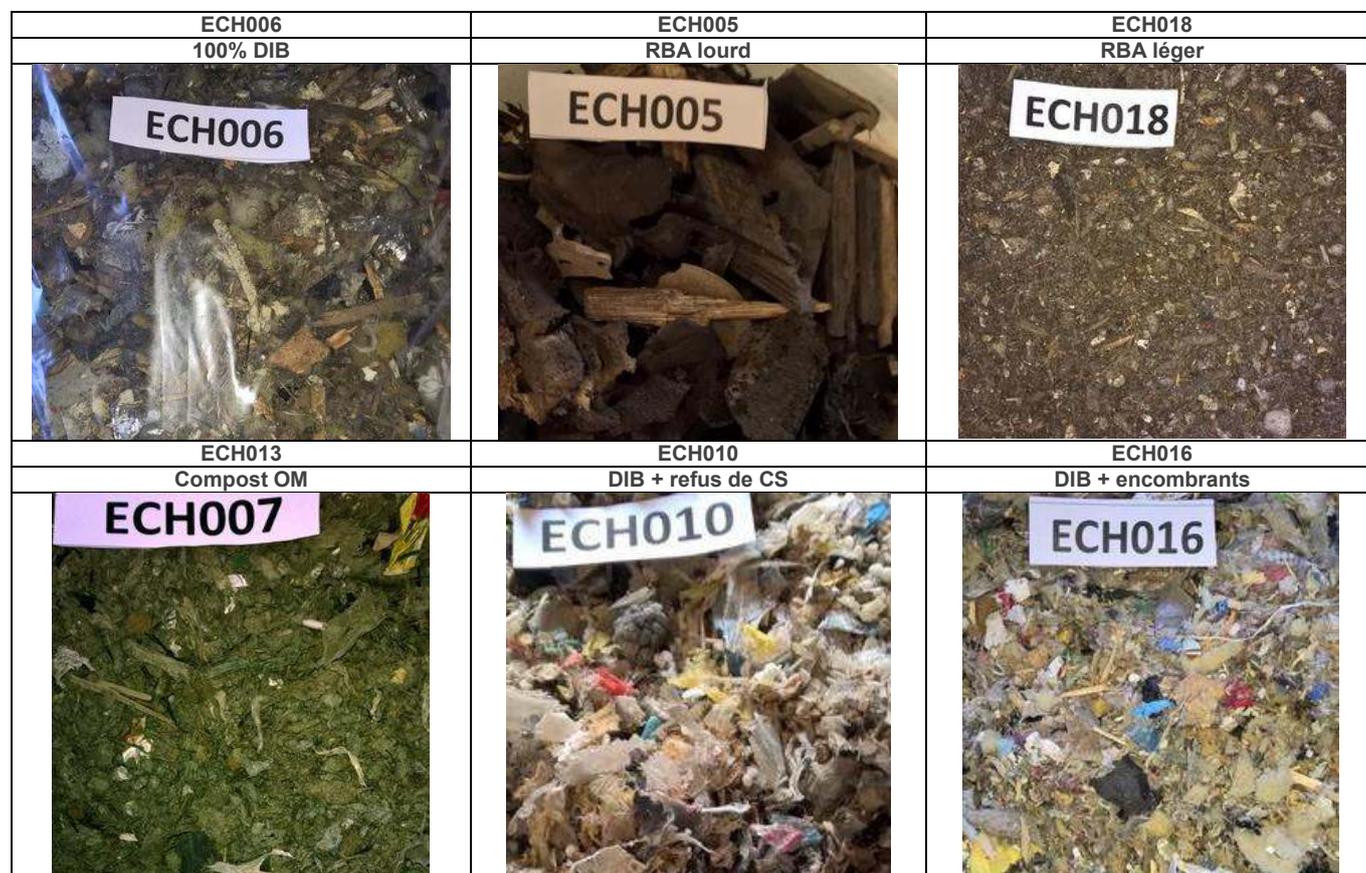


Figure 11 : Aperçu des échantillons sélectionnés pour la première campagne d'essais

Une fois la sélection faite, nous avons demandé aux producteurs de CSR concernés de fournir un minimum d'une tonne de produit pour la réalisation des essais.

Chaque test a été réalisé sur une journée suivant le protocole suivant :

- Démarrage et mise en température de la chaudière avec du combustible granulés bois.
- Basculement de l'alimentation sur le combustible CSR.
- Stabilisation de la combustion et réalisation de mesures sur les fumées de combustion (O₂, CO, NO_x).
- Arrêt et nettoyage complet du foyer.

3.3.1.2. Résultats

Les essais ont mis en évidence la principale difficulté de la combustion des CSR sur une chaudière à grille : la gestion des cendres. Pour les taux de plus de 30 %, la quantité produite de cendres est trop importante pour la grille et conduit aux problèmes suivants :

- Stagnation des cendres sur la grille et risque de formations locales de mâchefers.
- Perturbation de la combustion par création de chemins préférentiels dans le circuit de distribution de l'air primaire ; ce qui amène à un manque d'homogénéité du mélange comburant/combustible. Il en découle alors la formation de points chauds au milieu du lit et une production importante d'imbrûlés solides et gazeux.

La deuxième difficulté est le voûtage dans la trémie de stockage et les réservoirs tampon le long du convoyage. Les CSR sont des produits assez légers et forment rapidement des voûtes qui empêchent le combustible d'avancer régulièrement. Or, en combustion de solides (et même en combustion en général), il est nécessaire d'avoir un débit de combustible le plus régulier possible pour éviter des déséquilibres récurrents de rapport comburant/combustible dans le foyer.

Ensuite, les essais ont également montré que les films métallisés présents dans certains CSR conduisent, par leur fonte pendant la combustion, à la formation d'agglomérats de cendres qui sont ensuite difficiles à extraire automatiquement du foyer.

Enfin, un des combustibles, celui à base de RBA lourds, a montré également les limitations en termes de granulométrie. Une granulométrie importante, combinée ici à un taux de cendres élevé et une vitesse d'injection d'air comburant trop faible, ne permet pas de maintenir un état stable de la combustion.

En conclusion, les combustibles qui semblent davantage compatibles avec la chaudière d'essais pour mener la deuxième campagne sont les mélanges DIB+refus de CS (ECH010) et DIB+encombrants (ECH016).

3.3.2. Deuxième campagne d'essais

3.3.2.1. Introduction et déroulements

La deuxième campagne a eu pour objectif de réaliser des essais de combustion avec deux CSR tout en effectuant des mesures des émissions atmosphériques par un organisme accrédité, afin de déterminer les performances d'une chaudière à grille avec ce type de combustible.

Pour réaliser cet essai dans les meilleures conditions possibles, et sachant que les analyses de fumées demandent un minimum de stabilité de combustion, nous avons préalablement sélectionné les échantillons ECH010 et ECH016 dont les tests s'étaient correctement déroulés. Mais suite à notre proposition, les adhérents ont souhaité connaître les résultats avec un CSR à base d'OM, ces derniers représentant une part non négligeable du marché. Nous avons donc remplacé l'échantillon ECH010 par ECH014 qui est un combustible constitué d'un mélange de DIB et d'OM. Les deux nouveaux CSR testés sont nommés respectivement ECH021 (ex ECH016) et ECH022 (ex ECH014).

Les mesures ont été confiées à la société IRH environnement, basée à Chaponnay (69).

L'organisme a été chargé de contrôler les rejets gazeux cités dans le tableau suivant (Tableau 9). Il est également précisé si la mesure est accréditée ou non. En effet, ce type de mesure est habituellement réalisé sur des installations plus grandes. En outre, la difficulté à maintenir un régime de chaudière constant et l'absence d'équipements de dépoussiérage type filtre à manches ou électrofiltre n'a pas permis de garder les conditions réglementaires pour les mesures de dioxines et furanes et HAP (les métaux lourds non COFRAC et l'acide bromique ne sont pas réglementés).

En parallèle, nous avons fait réaliser des analyses sur les CSR utilisés pour les essais, de même que sur les cendres recueillies après combustion. Ainsi, nous avons pu réaliser un bilan matière sur la combustion, en particulier sur les éléments polluants, et un contrôle de l'évolution de la composition des CSR depuis les analyses réalisées 2 mois plus tôt.

| Paramètre | Accréditation COFRAC de la mesure |
|---|-----------------------------------|
| Débit gazeux | oui |
| Humidité des gaz | oui |
| O ₂ | oui |
| SO ₂ | oui |
| COV totaux | oui |
| COVNM | oui |
| Poussières | oui |
| CO | oui |
| HCl | oui |
| PCDD/PCDF | non |
| CO ₂ | non |
| NOx | oui |
| HF | oui |
| HAP | non |
| NH ₃ | oui |
| Mercuré | oui |
| Métaux lourds (Arsenic, Cadmium, Chrome, Cobalt, Cuivre, Manganèse, Nickel, Plomb, Antimoine, Thallium, Vanadium) | oui |
| Métaux lourds (Sélénium, Tellure, Zinc et Etain) | non |
| HBr | non |

Tableau 9 : Paramètres de mesure des rejets gazeux

Il a été choisi pour chaque combustible d'effectuer un essai avec air primaire (injection sous la grille) et air secondaire (injection au-dessus de la grille) et un essai avec air primaire et air tertiaire (injection dans la partie supérieure située après le foyer de combustion).

Hormis la difficulté pour le prestataire de réaliser les mesures de dioxines/furanes et HAP, les essais se sont globalement bien déroulés, compte tenu des combustibles et du temps imparti pour les réaliser.

3.3.2.2. Résultats - combustibles

Le tableau ci-après donne la composition des deux CSR utilisés pour les essais, ECH021 et ECH022, ainsi que la composition mesurée deux mois plus tôt (respectivement les échantillons ECH016 et ECH014).

Concernant les caractéristiques majeures comme l'humidité, le taux de cendres et le P_{ci}, on observe une assez bonne stabilité pour des combustibles d'apparence aussi hétérogène. Il en est de même pour la teneur en éléments principaux C, H, O, N et S. Seul le chlore est sujet à d'importantes variations (dans un sens ou dans l'autre).

Pour les cendres, on retrouve également les mêmes proportions d'un échantillon à un autre. En outre, il faut bien garder en mémoire que les analyses de cendres sont réalisées après une oxydation à 550 °C, qui ne permet pas de distinguer tous les éléments des cendres et donne donc une composition incomplète de ces dernières.

| Caractéristique | Unité | DIB/OM | | Variation % | Encombrants | | Variation % |
|--|----------|--------|--------|-------------|-------------|--------|-------------|
| | | ECH014 | ECH022 | | ECH016 | ECH021 | |
| Humidité | % PB | 21,5 | 25,3 | 17,7 | 8,9 | 11,6 | 30,3 |
| Teneur en cendres à 550 °C | % MS | 16,4 | 15,8 | -3,7 | 9,8 | 11,1 | 13,3 |
| Teneur en matières volatiles | % MS | 77,4 | 77,2 | -0,3 | 76,3 | 74,2 | -2,8 |
| Carbone (C) | % MS | 51,5 | 57,5 | 11,7 | 50,7 | 49,2 | -3,0 |
| Hydrogène (H) | % MS | 6,9 | 6,8 | -1,4 | 6 | 5,5 | -8,3 |
| Azote total (N) | % MS | 1,27 | 1,4 | 10,2 | 1,57 | 1,7 | 8,3 |
| Teneur en soufre (S) | % MS | 0,54 | 0,49 | -9,3 | 0,25 | 0,29 | 16,0 |
| Teneur en chlore (Cl) | % MS | 1,4 | 1,8 | 28,6 | 1,2 | 0,65 | -45,8 |
| Brome | mg/kg MS | 106 | <50 | / | 112 | 92 | -17,9 |
| Fluor | mg/kg MS | 65 | 64 | -1,5 | 95 | 151 | 58,9 |
| | | | | | | | |
| Pci (sec) | kJ/kg MS | 23 946 | 26 006 | 8,6 | 21 210 | 19 498 | -8,1 |
| Pci (brut) | kJ/kg PB | 18 299 | 18 835 | 2,9 | 19 127 | 16 971 | -11,3 |
| | | | | | | | |
| Silice SiO ₂ (550 °C) | % CS | 11,2 | 30,2 | 169,6 | 20,5 | 21,1 | 2,9 |
| Aluminium (Al) - Al ₂ O ₃ (550 °C) | % CS | 11,2 | 9,8 | -12,5 | 9 | 8,1 | -10,0 |
| Calcium (Ca) - CaO (550 °C) | % CS | 29,7 | 27,6 | -7,1 | 32,8 | 37,7 | 14,9 |
| Fer (Fe) - Fe ₂ O ₃ (550 °C) | % CS | 1,8 | 2,1 | 16,7 | 1,6 | 2,7 | 68,8 |
| Potassium (K) - K ₂ O (550 °C) | % CS | 1,2 | 1,4 | 16,7 | 1 | 1,3 | 30,0 |
| Magnésium (Mg) - MgO (550 °C) | % CS | 2,4 | 1,9 | -20,8 | 2,5 | 2,4 | -4,0 |
| Manganèse (Mn) - MnO (550 °C) | % CS | <0,1 | 1,8 | / | <0,1 | 0,1 | / |
| Sodium (Na) - Na ₂ O (550 °C) | % CS | 2,7 | 3,2 | 18,5 | 1,6 | 1,5 | -6,3 |
| Phosphore - P ₂ O ₅ (550 °C) | % CS | 0,6 | 0,5 | -16,7 | 0,5 | 0,6 | 20,0 |
| Sulfates (SO ₃ - 550 °C) | % CS | 9,4 | 7,6 | -19,1 | 5,5 | 8,3 | 50,9 |
| Titane(Ti) - TiO ₂ (550 °C) | % CS | 2,2 | 2,7 | 22,7 | 2,6 | 2,5 | -3,8 |
| | | | | | | | |
| <i>Métaux lourds</i> | | | | | | | |
| Arsenic (As) | mg/kg MS | 2,02 | <1,00 | / | 2,98 | <1,03 | / |
| Cadmium (Cd) | mg/kg MS | 1,96 | 5,48 | 179,6 | 1,74 | 2,92 | 67,8 |
| Chrome (Cr) | mg/kg MS | 106 | 77,7 | -26,7 | 95,2 | 36,7 | -61,4 |
| Cuivre (Cu) | mg/kg MS | 1800 | 58,8 | -96,7 | 52,6 | 22,8 | -56,7 |
| Nickel (Ni) | mg/kg MS | 83,6 | 19 | -77,3 | 6,63 | 5,3 | -20,1 |
| Plomb (Pb) | mg/kg MS | 149 | 99,7 | -33,1 | 43,7 | 53 | 21,3 |
| Zinc (Zn) | mg/kg MS | 360 | 284 | -21,1 | 274 | 196 | -28,5 |
| Mercure (Hg) | mg/kg MS | 0,51 | 0,18 | -64,7 | <0,10 | 0,48 | / |
| Antimoine (Sb) | mg/kg MS | 39,5 | 56,1 | 42,0 | 50,4 | 89,2 | 77,0 |
| Cobalt (Co) | mg/kg MS | <1,00 | <1,00 | / | <1,00 | 1,9 | / |
| Manganèse (Mn) | mg/kg MS | 97,5 | 77,7 | -20,3 | 83,3 | 46,4 | -44,3 |
| Vanadium (V) | mg/kg MS | 3,46 | 2,79 | -19,4 | 2,53 | 1,54 | -39,1 |
| Thallium (Tl) | mg/kg MS | <5,00 | <5,00 | / | <5,00 | <5,15 | / |
| | | | | | | | |
| <i>Dioxines/furanes</i> | | | | | | | |
| I-TEQ (NATO/CCMS) sans LQ | ng/kg MS | 44,8 | 14,9 | -66,7 | 31,7 | 40,1 | 26,5 |
| I-TEQ (NATO/CCMS) avec LQ | ng/kg MS | 45,4 | 15 | -67,0 | 32,6 | 40,7 | 24,8 |

Tableau 10 : Analyse et évolution des CSR utilisés pour la deuxième campagne d'essais

PB : produit brut
MS : matière sèche

CS : cendres sèches

Enfin, concernant les métaux lourds, les variations peuvent sembler importantes, mais il s'agit là de teneurs en mg/kg qui, au regard du poids des échantillons analysés, sont susceptibles d'évoluer de façon plus conséquente. Et les chiffres obtenus montrent que les teneurs restent dans le même ordre de grandeur, hormis pour le cuivre dont la mesure pour l'échantillon ECH014 a été probablement parasitée par la présence d'un petit morceau de fil de cuivre dans l'échantillon.

Globalement, seul le chlore varie réellement d'un échantillon à l'autre dans le temps. Il est important de mieux maîtriser cet élément à la fois d'un point de vue réglementaire et d'un point de vue technique. En effet, les Pouvoirs publics exigeront un meilleur contrôle (et la teneur la plus basse possible) de cet élément pour garantir une combustion plus propre et surtout des fumées exemptes de dioxines/furanes. Enfin, sur l'aspect matériel et régulation, il est important d'éviter des fortes variations pour garantir en toutes circonstances des conditions optimales de combustion et de neutralisation des polluants, au risque de dépasser les seuils réglementaires et d'endommager les équipements avec des condensats acides par exemple.

3.3.2.3. Résultats – fumées

Les données des quatre journées d'analyse sont récapitulées dans le tableau suivant.

| Caractéristique | Essai 1 | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 | VLE 20/09/2002 | Unité |
|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--|
| CSR | ECH021 | ECH021 | ECH022 | ECH022 | | |
| Réglage de l'alimentation en air | Primaire + Secondaire | Primaire + tertiaire | Primaire + Secondaire | Primaire + Tertiaire | | |
| Température foyer | 1 256 | 1 044 | 1 239 | 1 057 | | °C |
| Température chambre air tertiaire | 677 | 708 | 687 | 677 | | °C |
| Température prélèvement | 126 | 109 | 120 | 135 | | °C |
| <i>Polluants inorganiques</i> | | | | | | |
| O ₂ | 5,6 | 7 | 7,9 | 7,6 | | % vol |
| CO ₂ | 13,5 | 12 | 10,6 | 10,8 | | % vol |
| Humidité | 8,8 | 9,7 | 7,7 | 9,4 | | % vol |
| CO | 21 | 28 | 32 | 182 | 50 | mg/Nm ³ sec |
| Poussières | 181 | 505 | 480 | 768 | 50 | mg/Nm ³ sec |
| <i>Polluants organiques</i> | | | | | | |
| COV | 5,8 | 4,1 | 3,8 | 5,1 | 10 | mgC/Nm ³ sec |
| HAP | 0,24 | 0,03 | 0,016 | 0,16 | | mg/Nm ³ sec |
| PCDD/PCDF | 32 | 22 | 16 | 93 | 0,1 | ng/Nm ³ sec |
| <i>Polluants acides</i> | | | | | | |
| NO _x | 444 | 694 | 641 | 374 | 400 | mgNO ₂ /Nm ³ sec |
| SO ₂ | 258 | 767 | 560 | 1 870 | 50 | mg/Nm ³ sec |
| HCl | 537 | 1140 | 512 | 893 | 10 | mg/Nm ³ sec |
| HF | 0,95 | 24 | 0,95 | 24 | 1 | mg/Nm ³ sec |
| HBr | 0 | 0 | 0 | 0 | | mg/Nm ³ sec |
| <i>Métaux lourds</i> | | | | | | |
| Hg | 0,019 | 0,052 | 0,035 | 0,018 | 0,05 | mg/Nm ³ sec |
| Cd + Tl | 0,369 | 0,463 | 0,491 | 0,175 | 0,05 | mg/Nm ³ sec |
| Sb + As + Pb + C + Co + Cu + Mn + Ni + V | 16,058 | 22,667 | 22,530 | 10,561 | 0,5 | mg/Nm ³ sec |
| <i>Détail des métaux</i> | | | | | | |
| Arsenic (As) | 0,081 | 0,054 | 0,057 | 0,0264 | | mg/Nm ³ sec |
| Cadmium (Cd) | 0,36 | 0,45 | 0,48 | 0,171 | | mg/Nm ³ sec |
| Chrome (Cr) | 0,396 | 0,292 | 0,148 | 0,241 | | mg/Nm ³ sec |
| Cuivre (Cu) | 3,66 | 5,8 | 7,8 | 4,88 | | mg/Nm ³ sec |

| | | | | | | |
|----------------|---------|---------|---------|---------|--|------------------------|
| Nickel (Ni) | 0,0407 | 0,035 | 0,0406 | 0,0435 | | mg/Nm ³ sec |
| Plomb (Pb) | 7,7 | 10,9 | 13,2 | 3,85 | | mg/Nm ³ sec |
| Zinc (Zn) | 18,7 | 30,9 | 29,5 | 9,1 | | mg/Nm ³ sec |
| Mercure (Hg) | 0,0188 | 0,052 | 0,0349 | 0,018 | | mg/Nm ³ sec |
| Antimoine (Sb) | 3,76 | 5,09 | 0,9 | 1,31 | | mg/Nm ³ sec |
| Cobalt (Co) | 0,0087 | 0,0128 | 0,0125 | 0,0083 | | mg/Nm ³ sec |
| Manganèse (Mn) | 0,41 | 0,48 | 0,37 | 0,2 | | mg/Nm ³ sec |
| Vanadium (V) | 0,00135 | 0,00283 | 0,00156 | 0,00196 | | mg/Nm ³ sec |
| Thallium (Tl) | 0,00929 | 0,013 | 0,0114 | 0,00404 | | mg/Nm ³ sec |

Tableau 11 : Résultats de l'analyse des fumées de la deuxième campagne d'essais

On constate que seuls le CO et les COV sont sous les VLE fixées par l'arrêté d'incinération des déchets (20/09/2002) pour les trois premiers essais. Concernant l'essai 4, la température du foyer était un peu plus faible, ce qui peut expliquer la hausse du taux de CO. Pour tous les polluants acides, il faudra prévoir l'installation d'un équipement de traitement. Il en est de même pour les poussières, les métaux (sauf le mercure) et les dioxines/furanes (pour rappel les valeurs mesurées pour ces derniers ne sont pas certifiées).

En parallèle, ces analyses de fumées ont été couplées à des analyses de cendres. Nous avons comparé les teneurs en métaux entre le combustible et les produits sortants (fumées et cendres). Nous avons également observé l'évolution des éléments chalcogène et halogènes (S, Cl, Br et F) (cf. Tableau 12 et Tableau 13).

Les constats sont sensiblement les mêmes pour les deux échantillons (ECH021 et ECH022) :

- Premièrement, les quantités analysées ne sont pas suffisantes pour faire un bilan matière rigoureux entre l'entrée et la sortie de la chaudière. Il aurait fallu faire fonctionner la chaudière pendant plusieurs jours pour espérer avoir des bilans plus précis.
- Néanmoins, on remarque que le taux de NOx dépend davantage du réglage de la chaudière que du combustible. Les teneurs en azote des deux combustibles sont trop proches pour en tirer d'autres conclusions.
- Pour les polluants acides, la température de prélèvement était un peu basse et les résultats peuvent être plus ou moins biaisés par de possibles condensations en amont de l'analyseur. Cependant, on remarque que le soufre va jusqu'à 100 % de conversion en SO₂ tout comme le fluor qui peut se convertir en acide fluorhydrique et le chlore en acide chlorhydrique. Enfin, le brome ne produit pas d'acide bromhydrique. Il conviendra de pousser davantage les analyses lors de nouveaux essais pour identifier les produits bromés qui se forment.
- Pour les métaux, la plupart de ceux dont le point de fusion est inférieur à 1 000 °C ont tendance à partir dans les fumées, alors que les autres restent plutôt dans les cendres.

| Elément | Unité | ECH021 | Fumées Essai 1 | Fumées Essai 2 | Cendres Essai 1 | Température de fusion (°C) |
|---------|----------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| N | % MS | 1,7 | 0,08 | 0,14 | | |
| S | % MS | 0,29 | 0,08 | 0,25 | | |
| Cl | % MS | 0,65 | 0,31 | 0,73 | | |
| Br | mg/kg MS | 92 | 0 | 0 | | |
| F | mg/kg MS | 151 | 5,4 | 151,0 | | |
| As | mg/kg MS | - | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 616 |
| Cd | mg/kg MS | 2,92 | 2,1 | 3,0 | - | 321 |
| Cr | mg/kg MS | 36,7 | 0,9 | 1,6 | 24,4 | 1 907 |
| Cu | mg/kg MS | 22,8 | 21,8 | 38,3 | 124,3 | 1 083 |
| Ni | mg/kg MS | 5,3 | 0,2 | 0,2 | 4,7 | 1 450 |
| Pb | mg/kg MS | 53 | 45,8 | 71,9 | 1,8 | 327 |
| Zn | mg/kg MS | 196 | 111,3 | 203,9 | 56,1 | 420 |
| Hg | mg/kg MS | 0,48 | 0,1 | 0,3 | - | -39 |
| Sb | mg/kg MS | 89,2 | 22,4 | 33,6 | 27,6 | 637 |
| Co | mg/kg MS | 1,9 | 0,1 | 0,1 | - | 1 495 |

| | | | | | | |
|----|----------|------|-----|-----|------|-------|
| Mn | mg/kg MS | 46,4 | 2,4 | 3,2 | 34,6 | 1 246 |
| V | mg/kg MS | 1,54 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 1 910 |
| Tl | mg/kg MS | - | 0,1 | 0,1 | - | 304 |

Tableau 12 : Devenir des éléments polluants pendant la combustion de l'échantillon ECH021

| Elément | Unité | ECH021 | Fumées Essai 1 | Fumées Essai 2 | Cendres Essai 1 | Température de fusion (°C) |
|---------|----------|--------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|
| N | % MS | 1,4 | 0,14 | 0,08 | | |
| S | % MS | 0,49 | 0,21 | 0,69 | | |
| Cl | % MS | 1,8 | 0,37 | 0,64 | | |
| Br | mg/kg MS | - | 0 | 0 | | |
| F | mg/kg MS | 64 | 6,6 | 167,8 | | |
| As | mg/kg MS | - | 0,4 | 0,2 | 0,9 | 616 |
| Cd | mg/kg MS | 5,48 | 3,5 | 1,3 | - | 321 |
| Cr | mg/kg MS | 77,7 | 2,9 | 2,1 | 24,3 | 1 907 |
| Cu | mg/kg MS | 58,8 | 57,4 | 35,9 | 546,7 | 1 083 |
| Ni | mg/kg MS | 19 | 0,3 | 0,3 | 8,8 | 1 450 |
| Pb | mg/kg MS | 99,7 | 97,2 | 28,3 | 9,8 | 327 |
| Zn | mg/kg MS | 284 | 217,1 | 67,0 | 328,6 | 420 |
| Hg | mg/kg MS | 0,18 | 0,3 | 0,1 | - | -39 |
| Sb | mg/kg MS | 56,1 | 6,6 | 9,6 | 19,4 | 637 |
| Co | mg/kg MS | - | 0,1 | 0,1 | - | 1 495 |
| Mn | mg/kg MS | 77,7 | 2,7 | 1,5 | 64,5 | 1 246 |
| V | mg/kg MS | 2,79 | 0,0 | 0,0 | 2,5 | 1 910 |
| Tl | mg/kg MS | - | 0,1 | 0,0 | - | 304 |

Tableau 13 : Devenir des éléments polluants pendant la combustion de l'échantillon ECH022

3.3.3. Conclusions des essais

Ces essais ont permis de mettre en avant les limitations liées à la combustion des CSR dans des foyers à grille :

- Les taux de cendres très élevés constituent le principal défi. Cela nécessite d'utiliser des grilles spécifiquement conçues avec notamment une disposition en gradins.
- Le foyer et les injections d'air ont des règles de dimensionnement différentes de celles utilisées pour la biomasse (plus grand temps de séjour et meilleur étagement de la combustion).
- La légèreté des CSR implique aussi des équipements de stockage et de convoyage adéquats pour éviter le voûtage et les bourrages.
- Les installations de combustion devront être complétées par des systèmes de traitements de fumées adaptés à chaque CSR : filtre à manches, traitement des fumées acides et/ou abattement des NOx et des dioxines.

3.4. Etude des systèmes de combustion

3.4.1. Principes de base appliqués à la combustion des combustibles solides

L'objet de ce premier paragraphe n'est pas de fournir une description détaillée et académique de la combustion des combustibles solides, mais de rappeler sur quels principes fondamentaux elle repose, afin de pouvoir faire le lien entre les caractéristiques des CSR, aussi bien physiques que chimiques, d'une part, et les possibilités qu'il y a de les brûler dans un système de combustion donné, d'autre part. Lorsque des essais ont été réalisés avec des CSR, la connaissance de ces principes de base est également nécessaire pour interpréter les résultats et faire des bilans. Enfin, on rappelle que par « système de combustion », on entend un ensemble qui englobe a minima : la chambre de combustion, les alimentations en air et en combustible de cette chambre de combustion, le système d'extraction et d'évacuation des cendres, la chaudière proprement dit (c'est-à-dire le ou les échangeurs qui produisent le fluide chaud) et enfin le traitement des fumées avant leur rejet à l'atmosphère, ce dernier élément étant maintenant incontournable, compte tenu des exigences réglementaires sur les polluants atmosphériques appliquées aux installations industrielles.

3.4.1.1. Mécanismes de la combustion des combustibles solides

La combustion de tout combustible solide (biomasse, charbon, CSR, coke de pétrole, etc.) procède toujours en 4 étapes qui sont schématisées ci-dessous (Figure 12), quel que soit l'équipement de combustion :

- Etape 1. C'est une étape de chauffage qui doit amener le combustible à une température suffisamment élevée pour qu'il libère ses matières volatiles combustibles.
- Etape 2. C'est la phase au cours de laquelle le combustible libère ses matières volatiles combustibles (on parle de dévolatilisation). Lorsque le processus s'achève, il ne reste plus qu'une matrice carbonée qu'on appelle souvent « coke ».
- Etape 3. C'est la phase de combustion des matières volatiles. Elle se déroule au fur et à mesure que ces matières volatiles rencontrent l'oxygène de l'air et à la condition que la température soit suffisamment élevée.
- Etape 4. Elle correspond à la combustion de la matrice carbonée. Là également, elle suppose qu'il y ait un apport d'air et une température suffisants.

Ces 4 étapes se déroulent plus ou moins successivement dans le temps, sachant que les étapes 2, 3 et 4 se chevauchent en partie. L'étape 4 est de loin la plus longue.

En général, un combustible sera d'autant plus facile à brûler qu'il libère une quantité de matières importante et que cette libération se produit à basse température. Ainsi, le bois s'enflamme plus vite et brûle plus rapidement que la plupart des charbons (toutes autres conditions opératoires égales par ailleurs), car il a une teneur en matières volatiles élevée.

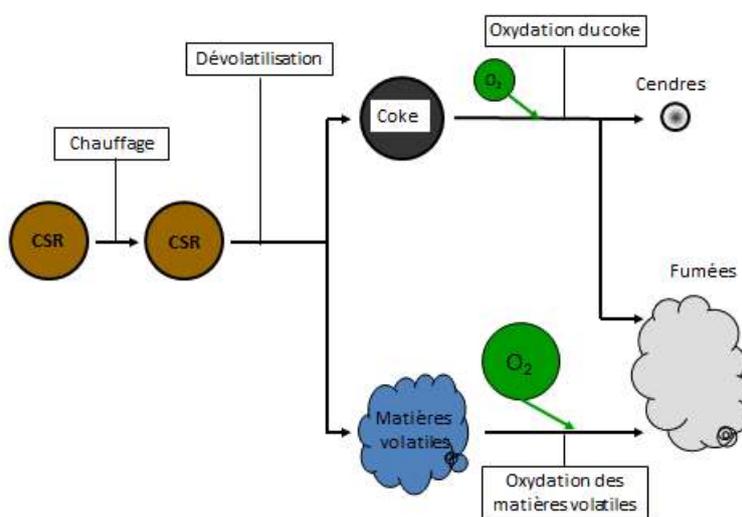


Figure 12 : Représentation schématique des mécanismes de la combustion de combustibles solides

3.4.1.2. Démarrage et stabilisation de la combustion

Pour démarrer la combustion, il faut un apport d'énergie. Cet apport est obligatoirement plus important avec les combustibles solides qu'avec les combustibles liquides ou gazeux, puisqu'il doit permettre de franchir les étapes 1 et 2 décrites précédemment, alors que dans le cas d'un combustible gazeux, ces étapes n'existent pas.

Une fois la combustion démarrée, il faut qu'elle puisse se poursuivre de façon stable. Il importe notamment d'éviter que la flamme soit soufflée ou que le feu s'éteigne. Pour cela, une partie de l'énergie libérée par la combustion est renvoyée vers les réactifs entrants, l'air et le combustible. Dans le cas d'un système à flamme, la circulation des gaz chauds à l'intérieur du foyer est organisée de telle façon qu'une partie revienne en pied de flamme (à l'endroit où la flamme naît) et réchauffe l'air et le combustible entrant (Figure 13). Avec les foyers à grille utilisés pour les combustibles solides, on s'arrange pour que le rayonnement de la flamme atteigne efficacement le combustible entrant.

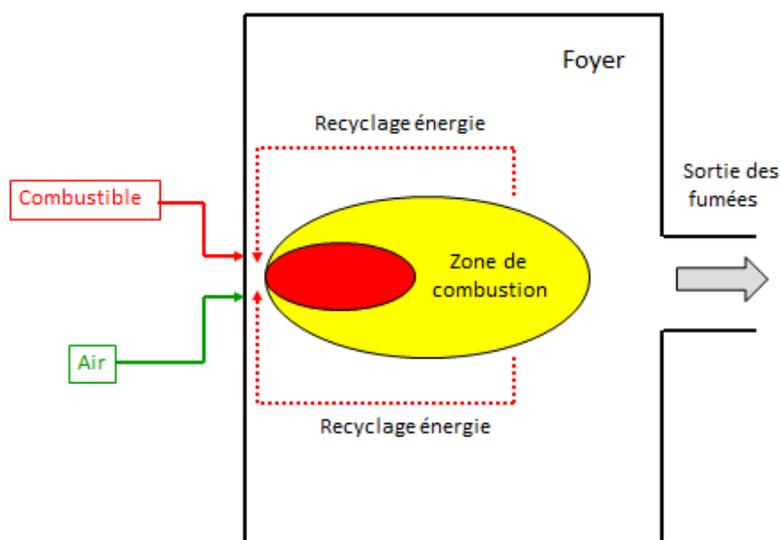


Figure 13 : Schéma de principe de la stabilisation d'une flamme

3.4.1.3. Excès d'air

Les trois éléments chimiques majoritaires dans les CSR sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. Si tout se passait idéalement, chaque atome de carbone C se combinerait à une molécule d'oxygène O₂ et quatre atomes d'hydrogène se combinerait eux-aussi à une molécule d'O₂, et en fin de combustion, tout l'oxygène apporté par l'air et le combustible serait consommé.



Ce besoin d'air minimal correspond à une stœchiométrie de 1 en langage de chimiste. En combustion, on parle aussi de facteur d'air (rapport quantité d'air/quantité de combustible) ou de richesse, qui est l'inverse du facteur d'air (le terme richesse est plutôt employé par les motoristes).

Dans la réalité, il n'est pas possible de brûler un combustible proprement, qu'il soit gazeux, liquide ou solide, sans qu'il y ait un excès d'air par rapport au combustible, sinon on forme des quantités d'imbrûlés très importantes. Pour un combustible et un système de combustion donnés, on a toujours une courbe de formation des imbrûlés qui a la forme de celle représentée à la figure ci-après (Figure 14).

Pour éviter d'avoir des imbrûlés dans les fumées au-delà de la valeur imposée par la réglementation (l'imbrûlé le plus important en quantité étant le monoxyde de carbone CO, qui est aussi un indicateur de la qualité de la combustion, car il est particulièrement difficile à oxyder), on doit opérer avec un excès d'air minimal. Cet excès d'air E minimal dépend entre autres de la nature du combustible :

$$E_{\text{gaz naturel}} < E_{\text{fuel}} < E_{\text{combustible solide}}$$

Au sein des combustibles solides, l'excès d'air dépend aussi de l'hétérogénéité desdits combustibles. Plus les combustibles sont hétérogènes et plus l'excès d'air devrait être important.

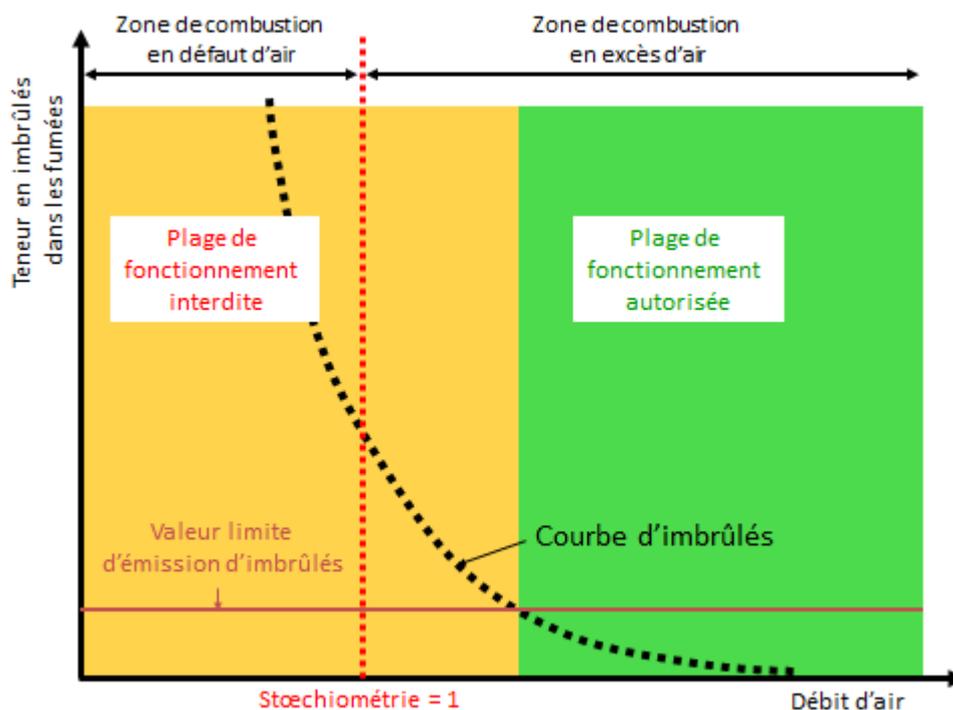


Figure 14 : Influence de la stœchiométrie de la combustion sur la formation d'imbrûlés

Remarque : La qualité de la combustion n'est pas toujours le seul facteur qui conditionne l'excès d'air, notamment avec les combustibles solides. Dans certains cas, l'excès d'air est fixé de telle façon à éviter des températures trop élevées dans le foyer par exemple.

Si l'excès d'air a un impact positif sur la combustion (sous réserve qu'il ne soit pas démesuré, auquel cas la combustion se dégrade à nouveau car les températures sont trop basses), il joue négativement sur le rendement énergétique de l'installation. En effet, les trois sources de perte dans un générateur thermique sont : les pertes par imbrûlés (imbrûlés solides surtout), les pertes aux parois et les pertes à la cheminée (ces dernières pertes étant dues au fait qu'on envoie à la cheminée des fumées à des températures typiquement comprises entre 110 et 180 °C selon le combustible brûlé – voir paragraphe suivant « température des fumées en sortie de chaudière »). Les pertes par imbrûlés et aux parois sont marginales la plupart du temps, inférieures à 1 % de la puissance entrant dans la chaudière. Par contre, les pertes à la cheminée avec les combustibles solides représentent généralement 10 à 15 % de la puissance entrante, voire plus. Elles augmentent avec l'excès d'air, puisqu'ainsi le débit de fumées croît pour une même puissance.

In fine, l'excès d'air est le résultat d'un compromis qui vise à minimiser la formation d'imbrûlés sans obérer la performance énergétique de la chaudière.

3.4.1.4. Combustion incomplète

Le monoxyde de carbone CO est un bon traceur de la qualité de la combustion et sa présence en quantité anormale dans les fumées est le signe d'un problème. Pour les combustibles gazeux et les combustibles liquides légers (comme le fuel domestique), sa teneur ne doit pas excéder 10 mg/Nm³. Pour les autres combustibles, la valeur maximale se situe aux alentours de 100 mg/Nm³.

Le dépassement de ces valeurs plafond peut avoir plusieurs origines :

- Défaut d'air.
- Mauvais mélange entre l'air et le combustible.
- Température de combustion insuffisante.
- Volume de la zone de combustion trop restreint.

3.4.1.5. Fusibilité des cendres / formation de mâchefers

La quasi-totalité des systèmes de combustion de combustibles solides fonctionnent en cendres sèches. Cela signifie qu'à aucun moment de la combustion, les matières minérales apportées par le combustible ne passent à l'état fondu, ni même à l'état ramolli ; ce qui risquerait d'amener la formation d'agglomérats ou de mâchefers bloquant le système d'évacuation des cendres (nota : quand on opère dans ces conditions, la formation des mâchefers n'est pas le seul problème et d'autres parties du foyer sont souvent dégradées, voire détruites).

Finalement, la plage de température dans laquelle un foyer brûlant un combustible solide peut travailler, est limitée par deux bornes :

- Une borne inférieure, qui est la température minimale garantissant l'absence d'imbrûlés dans les fumées. Sa valeur se situe généralement aux alentours de 850 °C.
- Une borne supérieure, qui est la température à partir de laquelle les cendres commencent à ramollir.

Plus la plage de température est large (300 – 400 °C typiquement), et plus l'installation sera facile à piloter. La situation commence à devenir critique quand les deux bornes de température sont proches ($\Delta T < 100$ °C). Dans ce cas, le risque de formation de mâchefers est sensiblement accru, et pour l'éviter, l'exploitant consent à travailler en dessous de la borne inférieure ; ce qui a pour effet d'accroître fortement la formation des imbrûlés (teneur en CO très au-delà des valeurs standards indiquées plus haut).

3.4.1.6. Formation des polluants atmosphériques

Les combustibles tels que les CSR génèrent des polluants atmosphériques lors de leur combustion, notamment à cause de la présence d'éléments chimiques autres que le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, qui constituent la base de tout combustible. On peut notamment y trouver du soufre, de l'azote, du chlore, du fluor, du brome, des métaux lourds, etc.

Le tableau ci-après résume les mécanismes de formation des polluants atmosphériques (cf. Figure 14).

| Polluant | Mode de formation | Facteurs favorables |
|------------------|--|---|
| SO ₂ | Oxydation intégrale du soufre apporté par le combustible | |
| SO ₃ | Oxydation partielle de SO ₂ (conversion limitée à 1 – 3 %) | Température de combustion élevée, vanadium dans les cendres, excès d'air important (50 %) |
| NO | <u>NO thermique</u> : Oxydation partielle de l'azote de l'air <u>NO combustible</u> : Oxydation partielle de l'azote du combustible | <u>NO thermique</u> : Température, excès d'air <u>NO combustible</u> : Teneur en azote du combustible élevée, excès d'air élevé |
| NO ₂ | Oxydation de NO dans les parties « froides » de la chaudière | Temps de séjour important dans la chaudière |
| N ₂ O | Oxydation de l'azote du combustible ou de certains réactifs azotés employés pour l'abattement des NOx (polluant absent de la plupart des systèmes de combustion) | Températures de combustion limitées à 850 – 900 °C (ex : chaudière LFC) Mise en œuvre de traitement DeNOx par SNCR à l'urée en dessous de 900 °C et/ou avec des temps de séjour trop courts dans la zone de réaction |
| HCl | Conversion partielle du chlore du combustible | |
| HF | Conversion partielle du fluor du combustible | |
| HBr | Conversion partielle du fluor du combustible | |
| Imbrûlés | Cf. paragraphe 5 plus haut | |
| HAP | Cf. paragraphe 5 plus haut | |

Tableau 14 : Mode de formation des polluants atmosphériques en combustion

On notera en particulier que :

- Tout le soufre apporté par le combustible se retrouve comme polluant à la cheminée, s'il n'y a pas de système d'épuration des fumées.
- Une petite partie du SO₂ formé est convertie en SO₃. On a intérêt à limiter la formation de SO₃, car il forme de l'acide sulfurique H₂SO₄ en présence d'eau, cet acide étant un agent de corrosion extrêmement puissant.

- Avec les combustibles sans azote, il faut éviter d'avoir des températures de combustion supérieures à 1 300 – 1 400 °C, si on veut limiter la formation d'oxydes d'azote.
- Quand les combustibles ont une teneur en azote supérieure à 0,5 %, la majorité des oxydes d'azote formés provient de l'oxydation de l'azote du combustible.
- Avec ces combustibles azotés, on réduit la formation des oxydes d'azote en évitant d'avoir localement dans la zone de combustion, des pressions partielles en oxygène élevées (nota : on obtient ce résultat en agissant sur les modalités d'introduction de l'air et du combustible, via l'équipement de combustion).
- Les halogènes présents dans les CSR (chlore, fluor et brome) se retrouvent pour partie dans les cendres, mais il est très difficile d'évaluer a priori le partage de ces éléments chimiques entre cendres et fumées.

3.4.1.7. Température des fumées en sortie de chaudière

La quasi-totalité des chaudières industrielles, qu'elles fonctionnent au gaz naturel, au fuel, au charbon ou encore à la biomasse, sont conçues pour éviter la condensation de la vapeur d'eau présente dans les fumées. En d'autres termes, les échangeurs de la chaudière sont calculés de façon à avoir des températures à la cheminée, qui soient sensiblement supérieures au point de condensation de la vapeur d'eau ; ce qui baisse évidemment le rendement de la chaudière, puisque ce rendement serait maximal si on abaissait la température des fumées jusqu'à la température ambiante (dans ce cas, on récupérerait l'intégralité de la chaleur véhiculée par les fumées).

La teneur en vapeur d'eau des fumées est généralement comprise entre 10 et 20 % en volume, selon la nature du combustible employé et l'excès d'air (elle est de l'ordre de 20 % avec le gaz naturel, mais elle baisse aux environs de 10 % avec le bois). S'il n'y avait que de la vapeur d'eau, du gaz carbonique, de l'azote et de l'oxygène dans les fumées, cette vapeur d'eau se condenserait typiquement entre 45 et 60 °C, et il n'y aurait pas de risque majeur de corrosion. Or, certaines substances présentes dans les fumées, notamment SO₃, peuvent accroître considérablement la température de condensation (que l'on appelle généralement « point de rosée »), même lorsque lesdites substances sont en très faibles concentrations. Ainsi, la présence de quelques dizaines de mg de SO₃ par Nm³ élève le point de rosée de 50 à 150 °C. Le problème n'est pas tant la condensation que la production d'acide concentré hautement corrosif. En effet, le paradoxe est qu'on forme un acide très concentré, à partir de SO₃ très dilué dans les fumées. Cela résulte du fait que la moindre condensation locale, sous forme d'une goutte accrochée à une paroi par exemple, va « pomper » le SO₃ des fumées jusqu'au stade de l'acide quasi pur, car le SO₃ a une très grande affinité pour l'eau.

En première approche, on considère que la température des fumées ne doit pas passer sous les planchers suivants (nota : ces valeurs sont données à titre indicatif et elles doivent être précisées pour chaque combustible) :

- 100 – 110 °C pour les chaudières à gaz naturel, dont la teneur en soufre n'est généralement que de quelques dizaines de mg/Nm³ (il s'agit de substances introduites dans le gaz pour le rendre odorant).
- 110 – 130 °C avec les chaudières à bois, quand ces derniers ont des teneurs en soufre de 0,1 – 0,2 %.
- 130 – 150 °C avec les charbons importés en France, dont la teneur en soufre est typiquement entre 0,3 et 1,0 %.
- 150 – 170 °C pour les fuels lourds dont la teneur en soufre va de 0,5 à 2,0 selon les catégories.

Dans le cas des CSR, on pourra appliquer cette même échelle de températures limites, en fonction de leur teneur en soufre.

On ne doit pas oublier non plus que la température des fumées à la cheminée, baisse avec l'allure de la chaudière, car l'intensité de l'échange de chaleur entre la flamme et/ou les fumées à l'intérieur de ladite chaudière n'évolue pas proportionnellement avec la puissance développée par la combustion. Ainsi, entre la marche nominale et la marche minimale, il peut y avoir une chute de quelques dizaines de degrés de la température à la cheminée. Pour un exploitant d'une chaudière à CSR, il sera très important de respecter la marche minimale préconisée par le constructeur, et de ne pas aller en-deçà, sous peine d'exposer l'équipement à de graves corrosions.

3.4.2. Equipements employés pour la combustion des combustibles solides

3.4.2.1. Panorama général

Dans la gamme de puissances de chaudière visée par FEDEREC pour la valorisation des CSR en production d'énergie, c'est-à-dire entre 1 et 20 MW, il existe plusieurs technologies de combustion, mais celle qui est de loin la plus largement utilisée est le foyer à grille. Dans cette catégorie, si l'on se réfère aux chaudières à bois ou aux

incinérateurs de déchets, deux charges qui sont assez proches des CSR en termes de Pci notamment, il existe plusieurs solutions qui se différencient par

- Le mode d'introduction du combustible : déposé sur la grille ou projeté.
- Le type de grille : grille à gradins, grille à barreaux, grille à rouleaux.
- Le type de barreau.
- L'inclinaison de la grille.
- Etc.

Les autres technologies de combustion possibles sont :

- Le foyer à lit fluidisé dense ou circulant.
- Le brûleur à combustible pulvérisé.
- Le réacteur cyclonique.
- Le four à sole unique ou multiples.
- Le four tournant.
- Le four oscillant.

Dans ce qui suit, on se focalisera surtout sur le foyer à grille et le foyer à lit fluidisé, qui sont a priori les deux solutions les mieux adaptées pour les CSR.

La fonction « combustion » n'est toutefois pas la seule dans une chaudière qui brûle des CSR. Il y a d'autres fonctions qui sont aussi très importantes, et qui peuvent impacter notamment sur le déroulement de la combustion (Figure 15). Ces fonctions seront vues plus loin.

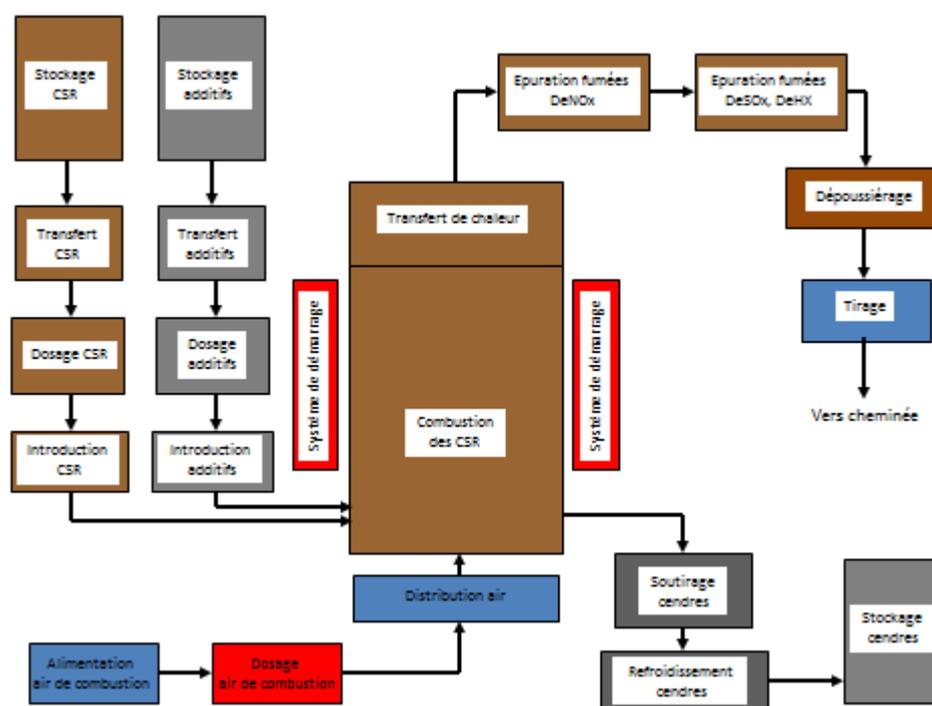


Figure 15 : Bloc-diagramme général d'une installation de valorisation de CSR en production de chaleur

3.4.2.2. Chaudières à grille

- **Description**

Une chaudière à grille, dans sa version compacte telle que représentée ci-après (cf. Figure 16), comprend 4 éléments principaux :

- Le foyer.
- La chaudière.
- Le dépolluissage.
- Le tirage.

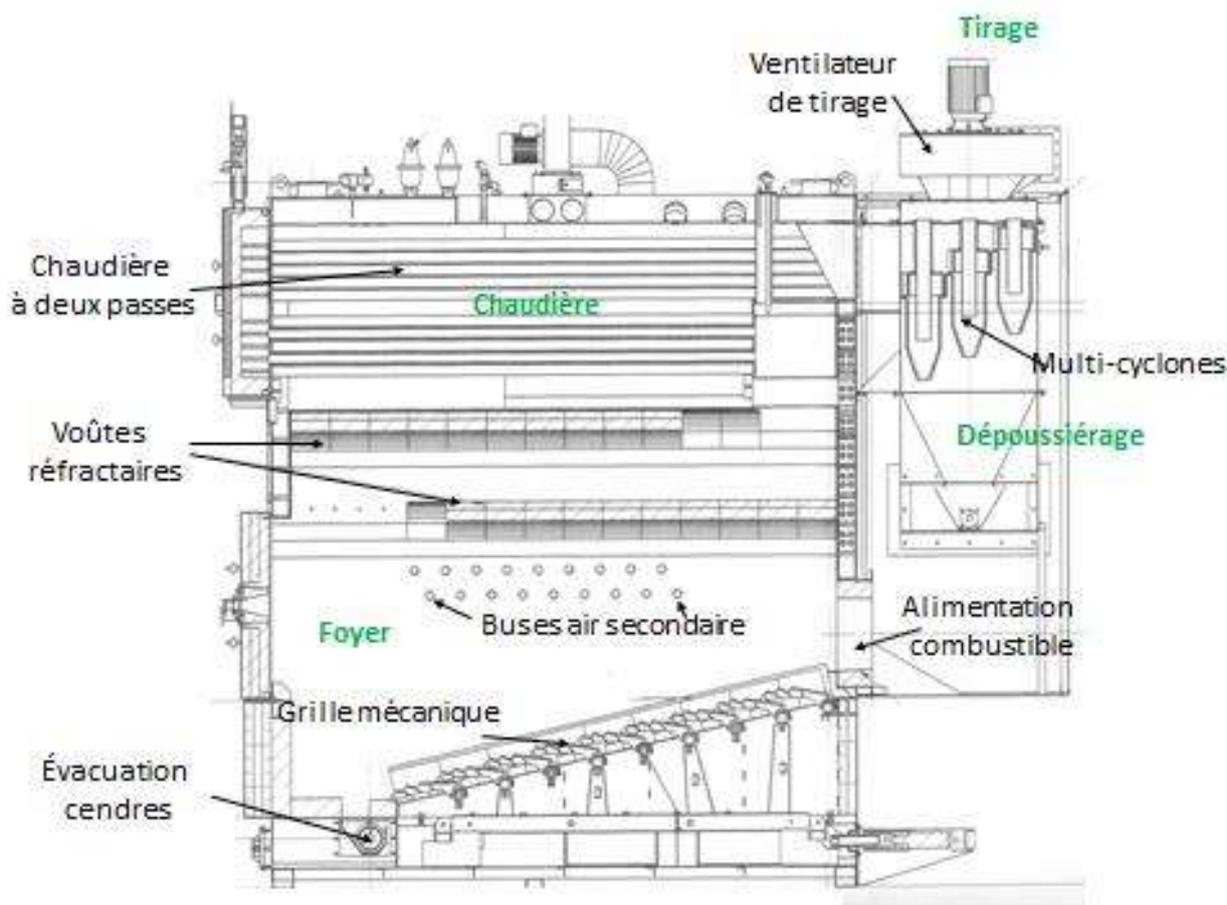


Figure 16 : Exemple de chaudière à grille (source : COMPTE-R)

Le foyer possède une grille mécanique équipée de barreaux (une rangée de barreaux mobiles alternant avec une rangée de barreaux fixes), une alimentation en combustible à l'amont de la grille, une alimentation en air primaire sous la grille, une alimentation en air secondaire au-dessus de la grille (en général et une évacuation des cendres). L'air primaire est apporté au travers de plusieurs caissons individuels, dont les débits sont réglés, en particulier en fonction de la teneur en humidité du combustible et de l'allure de la chaudière.

La chaudière est placée au-dessus du foyer. Dans la gamme de puissances entre 1 et 20 MW, cette chaudière est généralement à tubes de fumées ; ce qui signifie que les fumées circulent à l'intérieur des tubes. Ce type de chaudière présente l'avantage d'être moins chère que les chaudières dites à tubes d'eau (c.-à-d. celles où c'est l'eau qui circule dans les tubes).

Le système de dépolluissage, qui est devenu un équipement incontournable, compte tenu des réglementations en vigueur. Les multicyclones, tels que représentés sur la figure, ne sont généralement plus suffisants et les filtres à manches ont tendance à se généraliser.

L'extraction des fumées. Elle est assurée par un ventilateur, qui a aussi la fonction de maintenir l'ensemble de l'équipement en dépression. Ce dernier point est essentiel, car la combustion des combustibles solides peut générer des substances toxiques, en particulier le CO, et le maintien de l'installation en dépression évite des fuites de substances gravement nuisibles à la santé des opérateurs.

• **Principes généraux de fonctionnement**

La chaudière peut être simplement démarrée en mettant manuellement le feu à une masse de combustible préalablement déposée sur la grille. Dans une version plus automatisée, elle peut aussi être équipée d'un brûleur de démarrage.

Lorsque la chaudière arrive en régime, les principes de régulation appliqués en base sont les suivants (Figure 17) :

- Le débit de combustible est asservi à la température de l'eau en sortie de chaudière (dans le cas d'une chaudière à eau chaude par exemple) ou à la pression de la vapeur (dans le cas d'une chaudière à vapeur). Cette même boucle de régulation agit aussi sur le débit d'air primaire et sur la fréquence des mouvements des barreaux.
- Le débit d'air secondaire est asservi à la teneur en oxygène dans les fumées, mesurée avec la sonde à oxygène.
- Le ventilateur de tirage est asservi à la pression régnant dans le foyer.

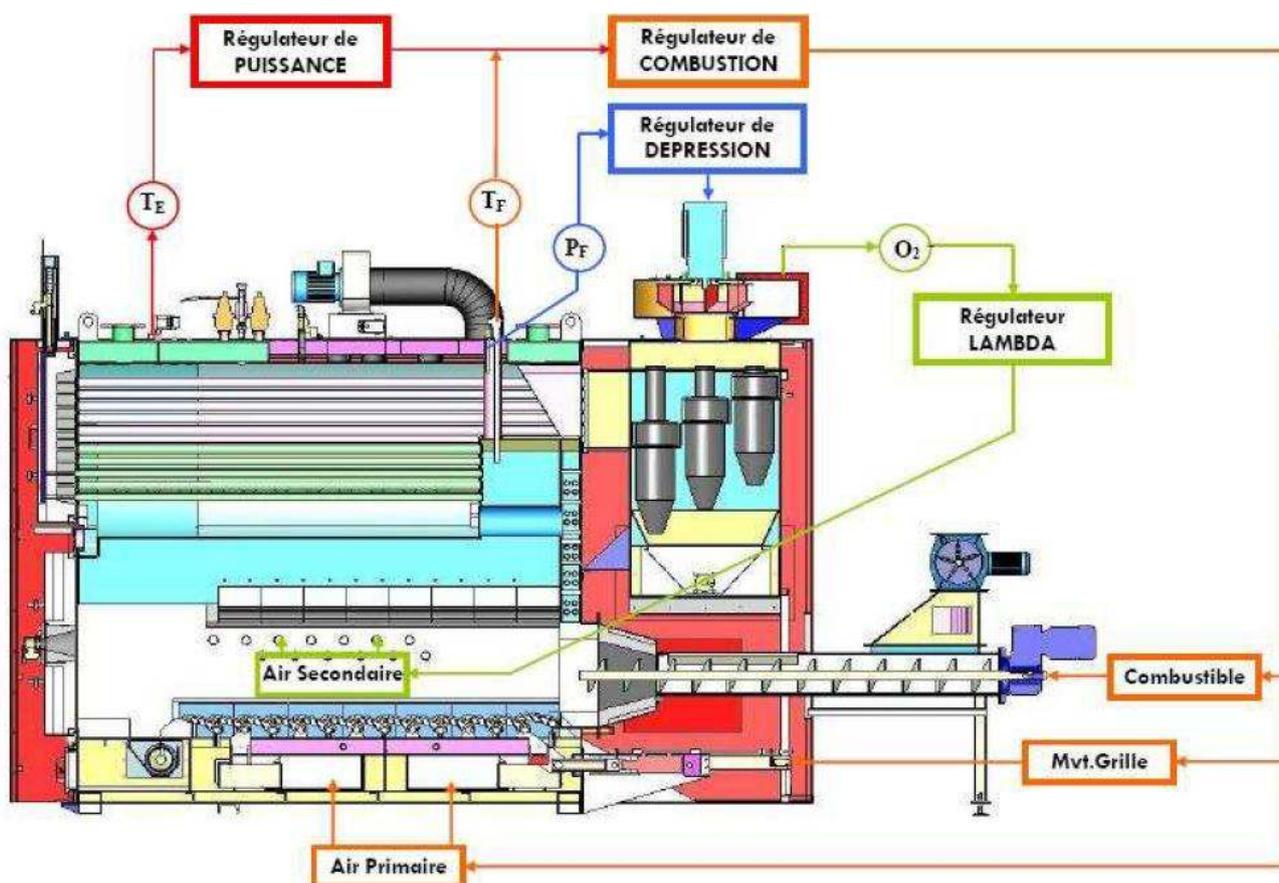


Figure 17 : Schéma de principe de la régulation d'une chaudière à bois (source : COMPTE-R)

L'existence d'automates programmables à des prix abordables donne aussi aux fabricants de chaudières la possibilité de proposer des outils de conduite plus fins que les boucles de régulation précitées. Ainsi, avec ces outils, l'opérateur peut par exemple sélectionner un combustible donné dans une liste et pour ce choix, les paramètres des boucles de régulation seront celles qui ont été optimisées au préalable. Dans ce cas, il y aura également des régulations plus précises comme une régulation des débits passant dans les caissons d'air primaire et non pas une régulation unique pour l'ensemble de l'air primaire, des variations possibles du point de consigne relatif à la teneur en oxygène dans les fumées en fonction de l'allure de la chaudière, etc.

• **Performance énergétique**

Le rendement d'une chaudière, c'est-à-dire la puissance utile que l'on produit rapportée à la puissance introduite sous forme de combustible, peut-être bien approchée avec la formule suivante :

$$\eta_g = \frac{P_{ent} - (P_{imb} + P_{fum} + P_{par})}{P_{ent}}$$

Où :

P_{ent} = Puissance entrante (kW ou MW exprimée sur base PCI)

P_{imb} = Puissance perdue par imbrûlés (kW ou MW)

P_{fum} = Puissance perdue par les fumées (kW ou MW)

P_{par} = Puissance perdue par les parois (kW ou MW)

Les pertes par imbrûlés (essentiellement imbrûlés présents dans les cendres) et les pertes aux parois sont limitées à 0,5, voire 1 % de la puissance entrante. La principale source de pertes réside dans le fait que les fumées sont rejetées à la cheminée à une température nettement supérieure à la température ambiante. Par ailleurs, cette perte à la cheminée augmente évidemment avec l'excès d'air, puisque pour une puissance donnée, elle est fonction à la fois du débit de fumées et de sa température à la cheminée.

Les chaudières à grille réalisées il y a 10 – 15 ans, dans la gamme de puissances visée par le projet FEDEREC (au moins pour les puissances comprises entre 1 et 5 MW environ), avait des rendements énergétiques relativement modestes, entre 80 et 85 %. Cette situation résultait :

- D'excès d'air très importants, parfois supérieurs à 100 %. Ces très larges excès d'air étaient imposés par la conception du foyer, entièrement réfractorisé, donc sans échange de chaleur. La seule façon de maintenir des températures de fumées en sortie de foyer ne dépassant pas les 1.000 °C (pour éviter l'usure prématurée de ces réfractaires) étaient d'avoir ces très forts excès d'air.
- De températures de fumées à la cheminée proches de ou supérieures à 200 °C. Dans ce cas, c'est la contrainte économique qui dicte ce choix, car on est obligé d'accroître fortement les surfaces d'échanges, si on veut récupérer la chaleur contenue dans les fumées, quand celles-ci sont à moins de 200 °C.

L'efficacité énergétique étant aujourd'hui une exigence de plus en plus forte des clients, les évolutions observées ou en cours au niveau des chaudières sont :

- Le foyer n'est plus entièrement réfractorisé. Ses parois participent à un premier échange de chaleur. Ainsi, on peut réduire l'excès d'air sans augmenter la température des fumées en sortie de foyer.
- Le refroidissement de la grille est une autre voie qui participe du même principe d'extraction de chaleur dans le foyer. Il peut s'avérer particulièrement utile si l'air est réchauffé ; ce qui évite des températures excessives au niveau de la grille (effet « chalumeau ») risquant de la détruire.
- L'utilisation d'économiseur. Ces appareils permettent une récupération additionnelle d'énergie, quand la température des fumées en sortie de chaudière est de 190 – 200 °C. Ils servent à préchauffer l'eau de la bêche alimentaire par exemple. Ils peuvent aussi être by-passés aux marches réduites, pour éviter les problèmes de corrosion.
- La mise en place d'échangeurs à condensation. Cette solution est encore peu développée à cause du caractère très corrosif des fumées, tel que rappelé plus haut, mais elle présente un réel intérêt dans le cas des combustibles à fort taux d'humidité ($H > 35 - 40 \%$), pour autant qu'une source froide soit disponible (source à moins de 50 °C). Le module de récupération d'énergie commercialisé par BEIRENS (dans le cadre d'un accord avec SAVE ENERGY) est un des exemples les plus aboutis (Figure 18). Les fumées issues de la chaudière à une température de l'ordre de 180 °C sont mises en contact avec un brouillard de gouttelettes d'eau, de façon à les refroidir. Ce brouillard une fois collecté, par sédimentation des gouttes mais aussi grâce à un électrofiltre humide, sert de fluide chaud à un échangeur de chaleur alimentant un réseau. Les condensats sont traités sur filtration, puis recyclés pour partie dans le condenseur. Dans le cas d'une biomasse à 52 % d'humidité, on peut ainsi pratiquement doubler la quantité d'énergie produite, par rapport à une installation qui ne serait pas dotée de ce système.

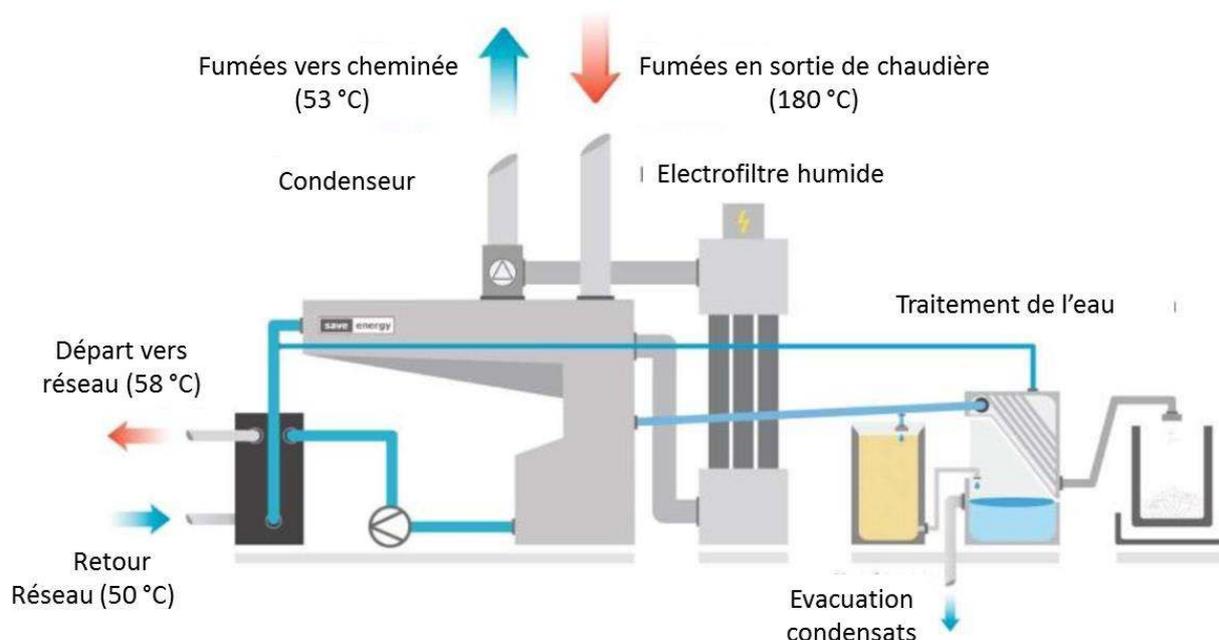


Figure 18 : Schéma d'un module à condensation (source : SAVE ENERGY)

• **Gestion des polluants**

Les polluants réglementés peuvent être gérés soit par des mesures primaires (on évite la formation du polluant), soit par des mesures secondaires (on capte ou on détruit le polluant déjà formé).

Dans le cas des chaudières à grille, les imbrûlés sont évités grâce aux mesures primaires (Tableau 15). Pour les imbrûlés reconnus particulièrement nocifs (HAP, PCB et PCDD/F), des mesures secondaires sont mises en place pour les fixer (des systèmes à adsorption par exemple), au cas où ils seraient présents dans les fumées, lors de dysfonctionnements du foyer par exemple.

| Polluant | Mesures primaires | Mesures secondaires |
|---|-------------------|---------------------|
| CO | X | |
| COVNM | X | |
| CH ₄ | X | |
| NO _x | X | x |
| Poussières | | X |
| SO ₂ | | X |
| HCl | | X |
| HF | | X |
| HAP | X | x |
| PCB | X | x |
| PCDD/F | X | x |
| Cd + Tl | | X |
| Hg | | X |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | | X |
| Légende | | |
| X = Solution à privilégier | | |
| x = Solution de complément | | |

Tableau 15 : Récapitulatif du mode de gestion des polluants atmosphériques dans le cas des chaudières à grille

Pour les polluants acides, il n'y a pas de moyens d'action au niveau de la combustion, et ils doivent être traités en aval.

S'agissant des NOx, on doit privilégier les mesures primaires, notamment via l'utilisation de foyers bas-NOx, dans lesquels la combustion est stratifiée (création de 2 ou 3 zones réactionnelles successives grâce à plusieurs niveaux d'injection de l'air de combustion), afin de limiter la formation des oxydes d'azote sans accroître la production de CO, car ce sont les moins chères.

Enfin, pour les poussières, c'est quasi exclusivement la performance du dépoussiérage final qui détermine la quantité de particules restant dans les fumées.

- **Combustibles admissibles**

La chaudière à grille n'est pas très exigeante sur les caractéristiques physiques des combustibles. Elle demande en premier lieu que les cendres aient des températures de fusion suffisamment élevées ($T_{\text{fusion}} > 1200 \text{ °C}$) pour éviter la formation de mâchefers. L'humidité peut être comprise entre 15 et 50 % sur brut, voire 60 % avec certains équipements spécialement conçus pour des charges très humides. Elle admet des combustibles aussi variées que des plaquettes, des granulés, de la paille, etc. Les exigences se situent plutôt au niveau de l'alimentation en combustible du foyer, car c'est souvent à cet endroit que sont localisés les problèmes rencontrés (blocage de convoyeur, de vis, etc.). Enfin, les taux de cendres ne doivent pas être trop importants (en général, ces taux sont limités à 5 – 10 %).

3.4.2.3. Chaudières à lit fluidisé

- **Rappel sur le principe de fluidisation**

On dit qu'un milieu granulaire est fluidisé lorsque les particules qui le constituent sont en mouvement les unes par rapport aux autres sous l'effet d'un courant de gaz injecté à sa base (*Figure 19*). Cet état confère au lit fluidisé des propriétés particulières, auxquelles on n'a pas accès dans le cas du lit fixe : des échanges très intenses entre gaz et solide ; ce qui permet d'avoir des réactions très rapides, des coefficients de transfert de chaleur également très élevés avec les surfaces d'échange et une grande homogénéité de température.

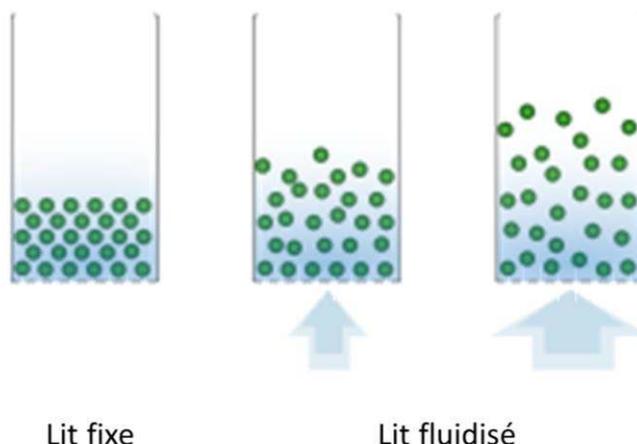


Figure 19 : Représentation schématique du phénomène de fluidisation

Les lits fluidisés sont utilisés en combustion depuis une petite centaine d'années. Au départ, le milieu est constitué par du sable, puis progressivement, tout ou partie de ce sable est remplacé par les cendres apportés par le combustible.

Quand le débit d'air injecté à la base du lit est suffisamment important pour entraîner une majeure partie des particules, on parle de « lit fluidisé circulant ». Quand lesdites particules sont simplement mises en mouvement sans entraînement significatif, on est dans le cas du « lit fluidisé dense ». Les lits fluidisés circulants sont plutôt réservés aux fortes puissances (30 MW et plus), tandis que les lits fluidisés denses sont plus limités en puissance. Ce sont donc ces derniers qui intéressent plus particulièrement la présente étude.

• **Description**

Une chaudière à lit fluidisé dense comprend sensiblement les mêmes éléments que la chaudière à grille (Figure 20) :

- Le foyer.
- La chaudière.
- Le dépoussiérage.
- Le tirage.

Le foyer comprend à sa base une grille de fluidisation constituée d'un caisson alimenté en air. Ce caisson possède en partie supérieure une multitude de buses (généralement plusieurs centaines) destinées à distribuer uniformément l'air de combustion sous le lit fluidisé. Ce lit a une hauteur au repos (c'est-à-dire en absence d'injection d'air) comprise entre 0,5 et 1 m. Le foyer est constitué de parois membranées (c'est-à-dire des tubes dans lesquels circule l'eau à vaporiser, ces tubes étant reliés entre eux par des « membranes » soudées de façon à assurer l'étanchéité du foyer vis-à-vis de l'extérieur). La partie basse du foyer est souvent recouverte de matériaux réfractaires pour protéger les tubes de l'érosion générée par le lit. La sortie des fumées s'effectue en partie supérieure, à une hauteur telle que le flux de particules entraînées soit minimal. Le foyer est aussi équipé d'une ou plusieurs alimentations en combustible, souvent localisées juste au-dessus du lit fluidisé.

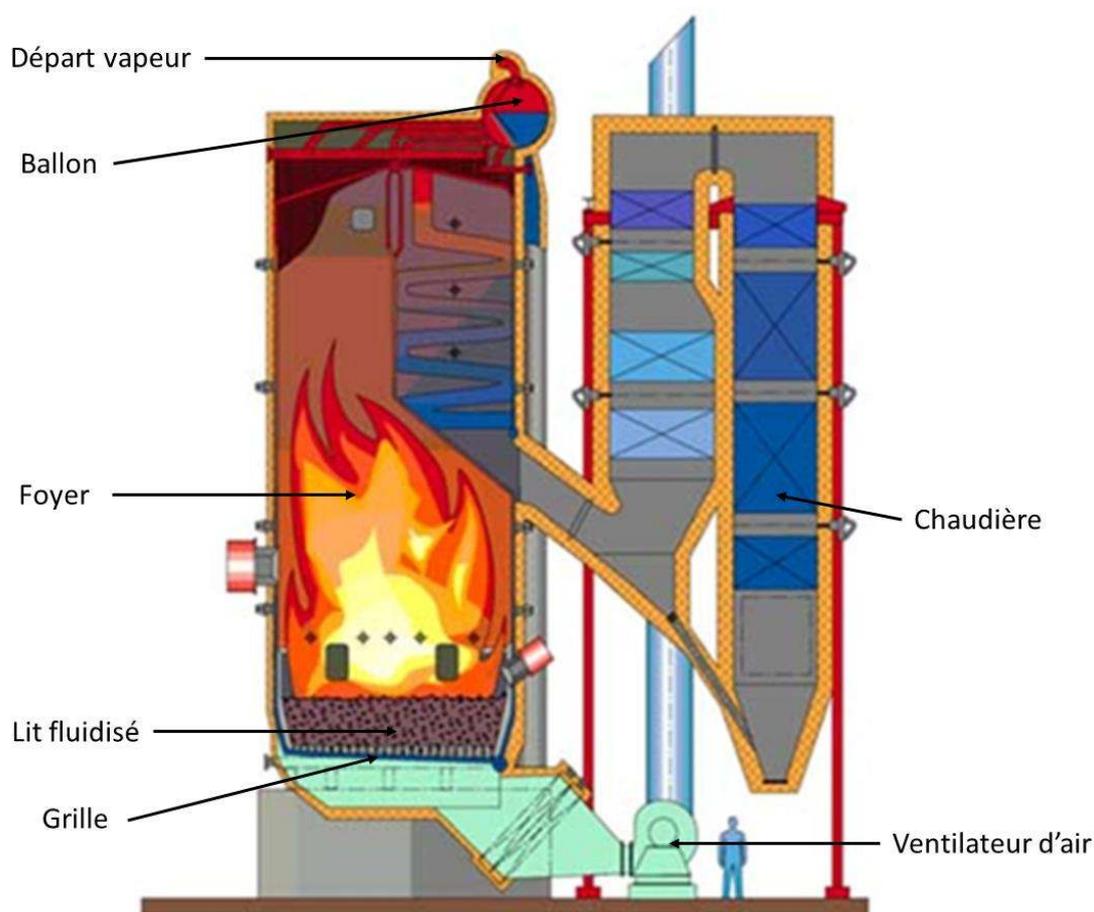


Figure 20 : Schéma d'une chaudière à lit fluidisé dense (source : RENEWA)

La chaudière est constituée par les tubes vaporisateurs du foyer et l'ensemble des échangeurs situés en aval dudit foyer (faisceaux vaporisateurs et économiseur notamment). On est dans une configuration « tubes d'eau » et non « tubes de fumées » comme pour la plupart des chaudières à grille.

• **Principes généraux de fonctionnement**

Les principes de régulation de ce type de chaudière sont sensiblement les mêmes que ceux de la chaudière à grille, avec une boucle qui asservit le débit de combustible à la pression de vapeur en sortie d'équipement, une boucle qui maintient la dépression dans le foyer et une boucle qui agit sur l'air primaire et l'air secondaire pour garantir la teneur en oxygène dans les fumées.

• **Gestion des polluants**

Comme pour les chaudières à grille, l'évitement des imbrûlés est toujours géré au niveau du foyer (). Par contre, les polluants acides peuvent être éliminés en tout ou partie directement dans la zone de combustion, notamment les oxydes de soufre. Pour cela, on injecte dans le foyer un absorbant qui est généralement du calcaire et qui va fixer le soufre sous la forme de sulfate de calcium.

Les substances basiques présentes dans le lit fluidisé captent également les gaz halogénés, même si c'est avec une moindre efficacité.

| Polluant | Mesures primaires | Mesures secondaires |
|---|-------------------|---------------------|
| CO | X | |
| COVNM | X | |
| CH4 | X | |
| NOx | X | x |
| Poussières | | X |
| SO2 | X | |
| HCl | x | X |
| HF | x | X |
| HAP | X | x |
| PCB | X | x |
| PCDD/F | X | x |
| Cd + Tl | | X |
| Hg | | X |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | | X |
| Légende | | |
| X = Solution à privilégier | | |
| x = Solution de complément | | |

Tableau 16 : Récapitulatif du mode de gestion des polluants atmosphériques dans le cas des chaudières à lit fluidisé dense

• **Combustibles admissibles**

Les systèmes à lit fluidisé sont à la fois moins exigeants sur la nature des combustibles admissibles et plus contraignants quant à leurs caractéristiques physiques. En d'autres termes, un foyer à lit fluidisé pourra utiliser une large palette de combustibles (biomasse, déchets, mais aussi charbons, cokes, etc.), y compris des combustibles qui ont des teneurs en cendres très élevées (jusqu'à 50 % voire plus dans certains cas). S'agissant des caractéristiques physiques, il faut que la granulométrie soit maîtrisée, plutôt inférieure à 50 mm et éviter d'avoir des objets non désirés tels que cailloux, pièces métalliques, etc., plus difficiles à extraire du foyer que dans le cas d'une chaudière à grille. Cette flexibilité du foyer à lit fluidisé dense vis-à-vis du combustible suppose toutefois que les dispositifs auxiliaires du foyer (alimentation en combustible, dosage en combustible, extraction des cendres, etc.) soient conçus pour l'emploi d'une grande variété de charges.

3.4.2.4. Principales différences entre chaudière à grille et chaudière à lit fluidisé

Le tableau ci-après (Tableau 17) compare qualitativement les deux solutions, sur la base des principales fonctionnalités ou critères de sélection. Il fait apparaître les avantages et les limitations de la solution « chaudière à lit fluidisé » par rapport à la solution « chaudière à grille ». La couleur verte correspond à des avantages, la couleur jaune à des avantages mais qui sont contrebalancés par des inconvénients et la couleur rouge à des inconvénients

Cette comparaison a été établie sur une base très générale en considérant des équipements standards.

Les conclusions que l'on peut tirer de cette première analyse sont :

- Sur de nombreux critères ou fonctionnalités, il est difficile de conclure, soit par manque de retour d'expérience, soit parce que les avantages sont contrebalancés par des inconvénients. Dans ce dernier cas, des études plus approfondies sont à prévoir pour conclure.
- Le principal avantage de la solution « lit fluidisé » et notamment dans sa version « lit fluidisé circulant », réside dans son caractère « polycombustibles » et sa capacité à brûler des combustibles difficiles, catégorie à laquelle appartiennent les CSR.
- La solution « foyer à lit fluidisé » sera certainement un peu plus chère que la solution « foyer à grille », tant au niveau des investissements que des coûts opératoires. Cette solution sera destinée à des exploitants qui visent l'emploi de CSR de moins bonne qualité que ceux requis par les foyers à grille. L'exploitant cherchera alors à compenser ses surcoûts par une marge plus grande sur le combustible.

| Item | Fonctionnalité ou critère de sélection | Position par rapport au système à grille | Commentaires |
|----------------------------|---|--|---|
| Combustible | Possibilité d'utiliser une large palette de combustibles, y compris très cendreaux | "+" | Le foyer à lit fluidisé permet d'utiliser une palette de combustibles beaucoup plus large que les foyers à grille, en termes de Pci, d'humidité et de taux de cendres notamment la solution du lit fluidisé circulant - Ce dernier peut par exemple brûler aussi bien des biomasses que des coques de pétrole ou des charbons de haut rang (combustibles qui ont des pouvoirs calorifiques au moins deux fois supérieurs à ceux des biomasses), s'il est équipé d'un échangeur externe permettant de moduler l'extraction de chaleur dans le foyer en fonction du Pci. |
| Préparation du combustible | Absence de préparation du combustible ou préparation sommaire du combustible | "+" et "-" | Les lits fluidisés sont en général connus pour être plus exigeants que les foyers à grille, surtout les systèmes à grille employés en incinération de déchets (c'est nettement moins vrai pour les grilles utilisées en combustion de biomasse) - Toutefois, cette limitation du lit fluidisé par rapport au système à grille est à pondérer avec les éléments suivants : les CSR sont des combustibles très réactifs qui génèrent de grandes quantités de matières volatiles et il n'y a pas lieu de procéder à une réduction granulométrique aussi importante qu'avec un coke de pétrole (qui lui est peu, voire très peu, réactif) par exemple - La granulométrie des CSR correspond déjà sensiblement à ce qui est demandé par les foyers à lit fluidisé - Les foyers à lit fluidisé, au moins ceux d'une certaine puissance, sont équipés d'un dispositif permettant d'extraire les objets hétérogènes (cailloux, pierres, ferrailles, etc.) |
| Air de combustion | Soufflante(s) pour l'alimentation en air de combustion n'exigeant pas des puissances électriques trop importantes | "=" | La perte de charge des foyers à lit fluidisé est sensiblement supérieure à celle des foyers à grille (il faut vaincre la perte de charge d'un lit de solides de l'ordre de 1 m de hauteur au repos dans le premier cas, alors que dans le second, la résistance du lit de combustible est beaucoup plus faible - nota : il ne faut pas oublier aussi de compter la perte de charge de la grille de distribution de l'air qui est importante avec les lits fluidisés). Cependant, les écarts de consommation électrique ne sont pas aussi importants qu'on pourrait l'imaginer, car les besoins en air d'un foyer à lit fluidisé sont significativement inférieurs à ceux d'un foyer à grille, puisque dans le premier cas, on travaille avec des excès d'air de l'ordre de 60 % (si l'on adopte les mêmes réglages qu'en incinération de déchets), alors que dans le second, l'excès d'air est de 20 % environ |

| Item | Fonctionnalité ou critère de sélection | Position par rapport au système à grille | Commentaires |
|-------------------------|--|--|--|
| Combustion | Capacité à brûler tous les combustibles, mêmes les plus difficiles | "+" | Dans le cas des fractions de CSR difficiles à brûler (pneumatiques, déchets caoutchoutés, etc.), la combustion en lit fluidisé bénéficie de plusieurs avantages : très bon contact entre combustible et comburant grâce à un brassage très intense du milieu réactionnel, contrôle précis de la température de combustion (pas de zones froides), temps de séjour très long du combustible (le combustible séjourne dans le foyer jusqu'à épuisement s'il n'est pas entraîné par les fumées - dans le cas où il aurait un entraînement important de matières carbonées, on procède à une réinjection d'une partie des cendres volantes collectées en aval du foyer) |
| Formation d'imbrûlés | Evitement de la formation d'imbrûlés | "+" et "-" | En principe, il doit y avoir moins d'imbrûlés avec les lits fluidisés, notamment du fait que la température y est bien contrôlée, comme indiqué précédemment à propos de l'item "combustion" - Par contre, les lits fluidisés sont des milieux où la dévolatilisation peut être très rapide, grâce aux échanges de chaleur très intenses qui y règnent - Si le système d'alimentation en combustible n'est pas régulier, il peut y avoir des "bouffées" de matières volatiles qui vont générer des quantités importantes d'imbrûlés à la cheminée |
| Formation des polluants | Abattement des polluants atmosphériques dès l'étape de combustion | "+" et "-" | En chaudière à grille, sauf exception, les fumées issues de la combustion de CSR doivent faire l'objet d'un traitement d'épuration qui s'applique à tous les polluants atmosphériques ciblés par la réglementation "déchets" - Avec les chaudières à lit fluidisé, certains polluants peuvent être abattus pendant l'étape de combustion (NOx grâce à un étagement très prononcé de la combustion, SOx si les cendres ont une composante basique importante ou via l'ajout d'un absorbant) - L'avantage du lit fluidisé reste toutefois relatif, pour les raisons suivantes : la quantité de poussières à éliminer est très importante, puisqu'elles quittent la chaudière sous forme de cendres volantes pour la quasi-totalité, les taux de désulfuration de 85 - 90 % que l'on peut atteindre avec les LF ne sont pas toujours suffisants, compte tenu des très basses concentrations finales dans les fumées exigées par la réglementation - Il en est de même avec les NOx, dans le cas de CSR fortement chargés en azote - De plus, les exigences réglementaires sur la fiabilité de l'épuration sont telles, qu'un traitement de fumées complet paraît inévitable pour les LF |
| Cendres | Extraction facile du foyer | 0 | La distribution des points de sortie des cendres dans une installation à lit fluidisé est très différente de celle d'une installation avec foyer à grille - Avec le foyer à grille, on a essentiellement des cendres sous foyer, tandis qu'avec le lit fluidisé, la quasi-totalité des cendres sont volantes et sont donc récupérées au dépoussiéreur final - La composition des différents flux de cendres (cendres sous foyer, cendres sous chaudière, cendres sous multicyclones et cendres sous dépoussiéreur final) ne sera pas non plus la même - L'extraction des cendres, notamment les objets hétérogènes, ne pose pas plus de difficulté dans le cas du lit fluidisé, comparé à celui du système à grille - En matière de valorisation, en l'état actuel des développements, on peut simplement affirmer que les différents flux de cendres devront faire l'objet de caractérisations et d'études pour leur trouver des voies de valorisation |

| Item | Fonctionnalité ou critère de sélection | Position par rapport au système à grille | Commentaires |
|---------------------------------------|---|--|--|
| Souplesse | Obtention d'une souplesse maximale, c'est-à-dire d'une plage de variation de la puissance produite la plus étendue possible | 0 | Les chaudières à lit fluidisé (notamment les chaudières à lit fluidisé dense) ont en principe des niveaux de souplesse plus réduits que les chaudières à grille - Cette limitation est cependant sans véritable importance, dans la mesure où les chaudières à CSR représenteront des investissements très importants, qui ne pourront être amortis qu'à condition de fonctionner à la marche nominale ou proche de la marche nominale, le plus longtemps possible dans l'année - Une chaudière brûlant des CSR ne sera jamais utilisée pour faire de la "dentelle" en matière de production d'énergie, mais sera employée en production de base |
| Chaudière | Evitement de l'encrassement, synonyme de perte de rendement énergétique global | 0 | La quantité de poussières entraînée par les fumées est plus importante avec les lits fluidisés qu'avec les systèmes à grille (surtout dans le cas des lits denses s'ils ne sont pas équipés de dépoussiéreur en sortie de chambre de combustion) - Dans le cas des LFC, la présence d'un ou plusieurs cyclones en sortie de chambre de combustion fait que la charge en poussières des fumées n'est pas fondamentalement supérieure à celle des fumées sortant d'un foyer à grille |
| Rendement énergétique de la chaudière | Rendement énergétique global le plus élevé possible | "+" | Le rendement énergétique global des chaudières à lit fluidisé, notamment circulant, est plus élevé que celui des chaudières à grille, grâce aux faibles excès d'air |
| Conduite de l'installation | Facilité de conduite de l'installation | 0 | La conduite des chaudières à lit fluidisé peut apparaître comme étant plus complexe que celle des chaudières à grille, en particulier à cause de la gestion du lit fluidisé ou d'une boucle de circulation de solides (dans le cas des systèmes LFC) - Une autre difficulté de conduite peut être liée à l'extrême réactivité des CSR dans les milieux fluidisés (voir plus haut item "formation d'imbrûlés") - En absence de retour d'expérience significatif, il est difficile de discriminer les deux solutions |
| Maintenance | Coût de maintenance minimal | 0 | Les coûts de maintenance sont difficiles à comparer pour les deux technologies de chaudière, en raison du manque de retour d'expérience (il faudrait analyser ces coûts sur plusieurs années et sur plusieurs unités des deux types pour pouvoir conclure) - Le risque d'érosion est plus élevé avec la chaudière à lit fluidisé, à cause des particules en circulation dans l'installation, et pourrait conduire à un remplacement plus fréquent de certaines pièces réfractaires ou métalliques |
| Investissement | Investissement minimal | "+" et "-" | Là aussi, la comparaison est difficile à établir - Dans le cas d'une installation à lit fluidisé circulant, le foyer, qui est constitué d'une grande chambre de combustion, d'un important cyclone de dépoussiérage et d'un circuit de recyclage de particules (en version de base, car il existe aussi des versions plus complexes), est sensiblement plus cher qu'un foyer à grille, même conçu avec un ou deux étages de combustion - Par contre, le système de traitement des fumées sera certainement plus onéreux dans le cas de la chaudière à grille |

| Item | Fonctionnalité ou critère de sélection | Position par rapport au système à grille | Commentaires |
|-------------------|--|--|--|
| Frais opératoires | Frais opératoires minimaux | "+" et "-" | La situation des chaudières à lit fluidisé devrait être plus défavorable que celle des chaudières à grille vis-à-vis de ce critère, notamment à cause des importantes consommations électriques des soufflantes (cf. item "Air de combustion" plus haut) - Dans cette analyse des coûts opératoires, il conviendra d'intégrer les consommations de réactifs pour l'épuration des fumées (agent DeNOx, agent DeSOx, agent DeHCl, agent DeDiox, etc.), qui peuvent être des postes de coût importants - Enfin, l'existence ou non de filière(s) de valorisation des cendres, peut être aussi un facteur discriminant pour les deux solutions |
| Offre commerciale | Etendue de l'offre commerciale | "+" et "-" | L'étendue de l'offre commerciale est importante en matière de chaudières à grille, si l'on se réfère au secteur de la biomasse - Il faut toutefois noter que les chaudières à grille pour biomasse ne sont pas directement applicables aux CSR - Aujourd'hui, on peut donc dire qu'il y a potentiellement une offre importante en matière de chaudière à grille, l'existence de cette offre étant conditionnée par la volonté ou non des fabricants d'adapter leur matériel - Dans le domaine des chaudières à lit fluidisé circulant, on a une offre internationale conséquente pour les installations d'une puissance supérieure à 20 MW - En dessous, elle est limitée, voire quasi inexistante en dessous de 10 MW - S'agissant des chaudières à lit fluidisé dense, qui sont plutôt destinées à des petites et moyennes puissances, l'offre est également limitée à ce jour |

Tableau 17 : Tableau comparatif des solutions « chaudière à grille » et « chaudière à lit fluidisé dense »

On retiendra de ce tableau que les deux principaux avantages de la solution « lit fluidisé » sont sa capacité à brûler à la fois une grande variété de substances combustibles et des combustibles réputés peu faciles (combustibles cendreux, combustibles réfractaires, etc.).

3.4.3. Autres équipements importants associés aux chaudières à grille ou à lit fluidisé

Dans une installation de production d'énergie à partir de CSR, outre la chaudière proprement dit, il y a deux types d'équipements associés qui conditionnent très fortement la performance de l'ensemble :

- La chaîne amont pour le stockage/déstockage, le convoyage et le dosage du combustible.
- La chaîne aval pour le traitement des fumées.
- **Chaîne amont**

La chaîne amont d'apport du combustible à la chaudière constitue un élément critique, dans la mesure où elle est souvent à l'origine des arrêts imprévus de l'installation. D'une manière générale, le stockage le transport et le dosage des combustibles solides sont plus difficiles à réaliser que ceux des combustibles liquides ou gazeux, et cela sera particulièrement vrai pour les CSR compte tenu de leur hétérogénéité.

Les problèmes typiquement rencontrés au niveau de la chaîne amont sont :

- Le voûtage dans les stockages.
- Le blocage des moyens de transport ou de dosage par des éléments hétérogènes présents dans le combustible (pièce de dimensions hors normes, ferraille, pierre, etc.).

On note aussi qu'il peut y avoir d'autres incidents comme les remontées de feu, des entrées d'air parasites perturbant la combustion, etc.

Pour le stockage des combustibles solides, plusieurs solutions sont possibles (cf. Figure 21) :

- Quand la chaudière est de petite puissance (< 1 MW), le combustible peut être stocké dans des silos aériens (avec reprise par système de désilage et vis sans fin) ou dans des containers (avec reprise par fond mouvant). Avec cette solution, on peut avoir des volumes de stockage jusqu'à 150 m³.
- Lorsque les puissances sont un peu plus élevées (jusqu'à 3 MW par exemple), on peut opter pour un stockage en fosse enterrée avec une reprise par échelles à racleurs ou par vis sans fin. Les volumes accessibles avec cette solution sont typiquement compris entre 200 et 600 m³.
- Pour des puissances supérieures (5, 10 MW ou plus), la solution retenue est généralement celle d'un stockage abrité, en fosse ou non, avec pont-roulant et grappin. Là, les stockages sont plus importants et vont au-delà de 1000 m³.

Il existe aussi le système plus récent dit « TOP LOADER », qui consiste à stocker le combustible solide entre deux parois verticales et à extraire ledit combustible à l'aide d'un râteau supporté par un portique circulant sur un chemin de roulement situé au-dessus des parois verticales (Figure 22). Ce système est particulièrement bien adapté pour les charges très peu denses, comme par exemple les CSR à forte teneur en matières plastiques. Les volumes de stockage possibles avec cette solution sont de l'ordre de 300 à 400 m³.

Les critères de sélection du système de stockage/déstockage du combustible sont : la puissance de la chaudière, l'exigence d'autonomie, le type de combustible, la place disponible, la chaîne d'approvisionnement retenue, le coût, etc.

Le transport des combustibles d'un point à un autre est généralement assuré par des convoyeurs à bande.



Figure 21 : Exemples de moyen de stockage possibles pour les CSR

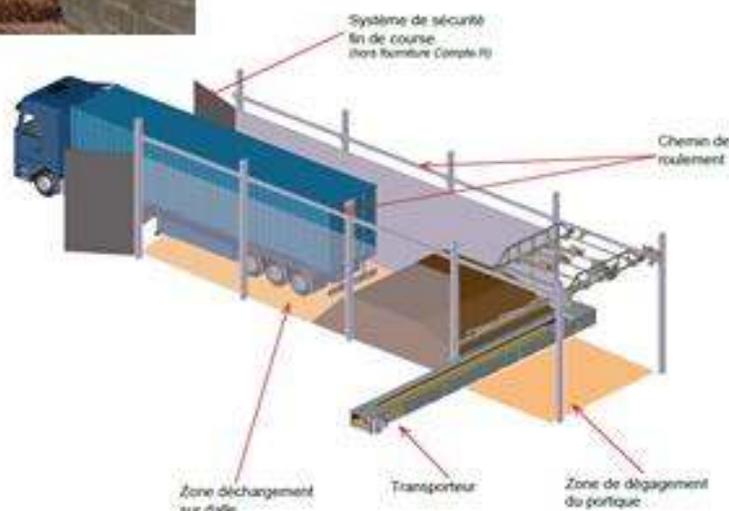


Figure 22 : Illustration d'un système de stockage / déstockage de combustibles solides de type «TOP LOADER»
(source : COMPTE-R)

Pour le dosage du combustible, on utilise dans la plupart des cas, soit des vis sans fin, soit des systèmes à pousoir (Figure 23).

Les vis employées peuvent avoir des diamètres importants, parfois jusqu'à 1 mètre, voire plus. Elles peuvent être uniques ou multiples (nota : certains constructeurs de chaudières mobilisent jusqu'à 4 vis en parallèle pour assurer une répartition homogène du combustible sur la grille). Il en existe de différents types, avec âme, sans âme, à pas fixe ou à pas variable, montée dans un tube, montée dans une auge, avec une motorisation au point d'alimentation, avec une motorisation en sortie, etc. Pour le choix de ce type de matériel, il est recommandé de s'adresser aux spécialistes du domaine (les producteurs des CSR en faisant évidemment partie, puisqu'ils convoient une grande variété de produits dans leurs installations).

Le système à pousoir convient en principe à des combustibles hétérogènes et présente théoriquement moins de risques de blocage que le système à vis (blocage de la matière dans les spires de la vis notamment). Il a toutefois plusieurs inconvénients potentiels :

- Défaut d'étanchéité qui peut entraîner des remontées de feu en amont du foyer (ce risque est plus élevé qu'avec un système à vis).
- Risque « d'explosion » du canal de sortie du pousoir. Ce risque existe quand il y a blocage de la matière dans ledit canal. Pour s'affranchir de ce risque, on bâtit en général un canal un peu évasé, mais cela diminue évidemment l'étanchéité du système.

Là encore, il est conseillé de s'adresser aux spécialistes pour faire son choix.

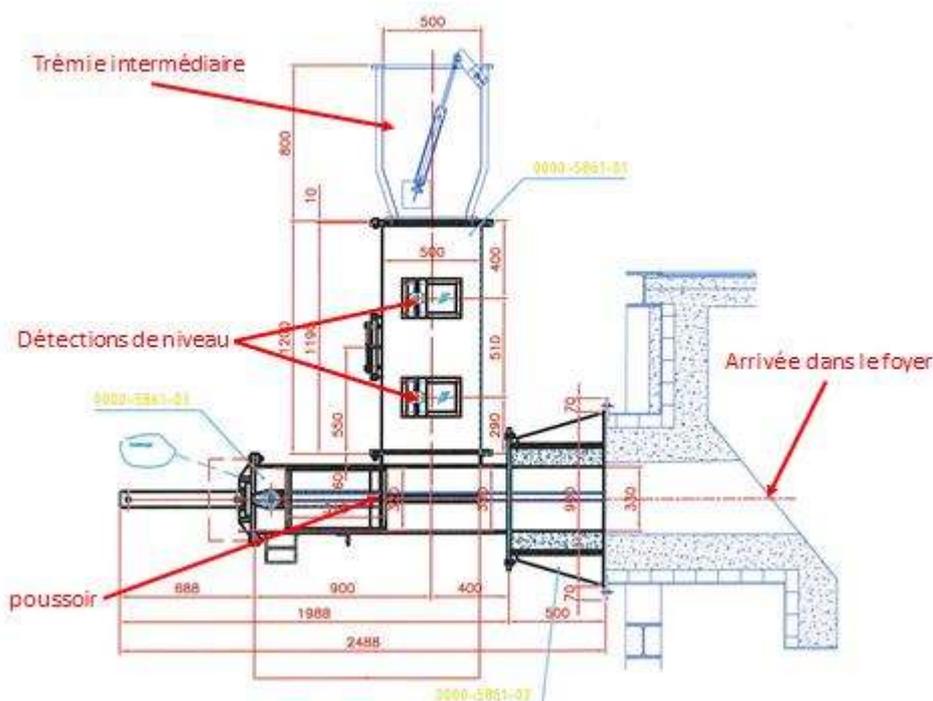


Figure 23 : Exemple de poussoir

Dans le choix de cet équipement, on doit également prendre en compte la vitesse de dévolatilisation du combustible dans le foyer, qui est beaucoup plus rapide dans un foyer à lit fluidisé que dans un foyer à grille (le combustible est dévolatilisé quasi instantanément, dès qu'il entre en contact avec le milieu fluidisé). Ainsi, il est possible que le système à poussoir, qui apporte une quantité importante de combustible sur une courte période de temps, soit finalement mal adapté au lit fluidisé, car il crée des « bouffées » de gaz combustibles considérables, générant des imbrûlés (momentanément, il n'y a plus assez d'oxygène dans le foyer pour brûler ces gaz combustibles) et des perturbations de pression, notamment des surpressions ponctuelles conduisant à des fuites de produits de combustion vers l'extérieur, liées à l'inflammation brutale de ces gaz combustibles.

D'une manière générale, la conception de la chaîne amont reste empirique, car il est difficile de prévoir le comportement de tout nouveau combustible solide, notamment quand il est hétérogène. Pour les CSR, il faudra donc des essais pour valider les choix technologiques qui auront été faits à ce niveau.

- **Chaîne aval**

Comme vu plus haut, des traitements d'épuration des fumées sont nécessaires, aussi bien pour la solution « chaudière à grille » (Tableau 15) que pour la solution « chaudière à lit fluidisé » (Tableau 16), afin que lesdites fumées soient rejetées à l'atmosphère en respectant les exigences de la réglementation (cf Tableau 18 correspondant à la Directive Européenne 2010/75/EU).

| Composés | VLE (mg/Nm ³ à 11 % d'O ₂) |
|---|---|
| CO | 50 |
| COT | 10 |
| NOx (exprimés en NO ₂) | 400 (si débit de déchets < 6 t/h) |
| Poussières | 10 |
| SO ₂ | 50 |
| HCl | 10 |
| HF | 1 |
| PCDD/F | 0,1.10 ⁻⁶ |
| Cd + Tl | 0,05 |
| Hg | 0,05 |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 |

Tableau 18 : Valeurs limites de rejets atmosphériques pour les installations d'incinération de déchets

Remarque : Le tableau donné ci-dessus correspond au statut actuel des CSR, c'est-à-dire un statut de déchets. Si pour certains CSR, ce statut venait à être modifié à l'avenir, notamment via la procédure de sortie du statut de déchets, il est néanmoins peu probable que les exigences réglementaires sur les rejets de polluants atmosphériques soient allégées.

Les polluants atmosphériques ciblés par la réglementation peuvent être classés en 5 catégories auxquelles correspondent diverses solutions de traitement :

- Les poussières.
- Les polluants acides : SO₂, HCl, HF, HBr, etc.
- Les oxydes d'azote.
- Les métaux lourds.
- Les imbrûlés.

Dans ce qui suit, l'objectif n'est pas de dresser une liste des solutions technologiques existant pour traiter les polluants atmosphériques, qui sont au nombre de plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, mais il est de se focaliser uniquement sur les solutions qui sont a priori les plus pertinentes pour des chaudières brûlant des CSR dans une gamme de puissances comprise entre 1 et 20 MW.

Traitement des poussières

Les deux seules technologies qui permettent d'atteindre les taux de dépolluement requis sont l'électrofiltre et le filtre à manches. Ce dernier est de plus en plus largement utilisé, malgré une perte de charge accrue, car il est celui qui a la performance la plus élevée a priori. Il a aussi gagné en fiabilité ces dernières années.

Traitement des polluants acides

L'élimination des polluants acides s'effectue en les faisant réagir avec un absorbant. Pour des raisons de coût, on utilise des absorbants bon marché, soit des produits calciques comme la chaux (Ca(OH)₂) ou le calcaire (CaCO₃), soit des produits sodiques comme le bicarbonate (NaHCO₃). Pour des puissances inférieures à 20 MW, on met ces absorbants en œuvre en voie sèche, c'est-à-dire en injectant l'absorbant sous forme de poudre dans les fumées et en récupérant le produit résultant au niveau du dépoussiéreur (Figure 24).

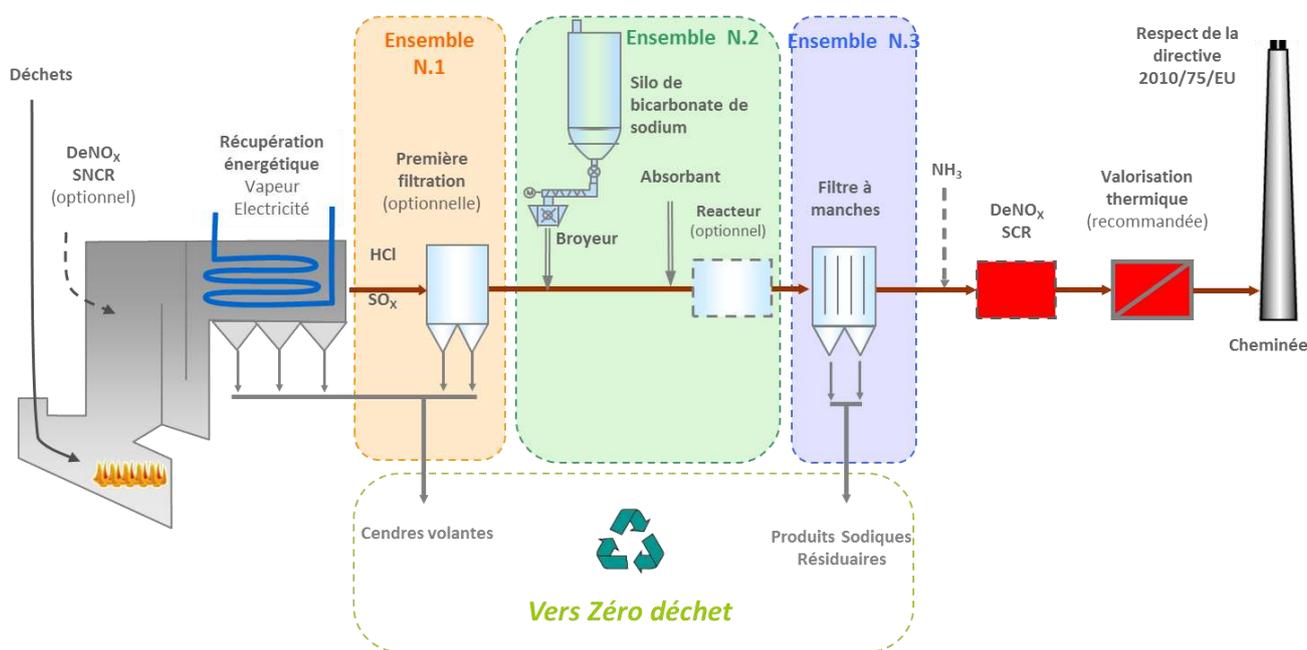


Figure 24 : Exemple de procédé de traitement des polluants acides (procédé SOLVAir de SOLVAY)

Le traitement des polluants acides s'effectue à des températures comprises entre 130 et 300 °C, selon la nature de l'absorbant utilisé et des polluants à capter. La chaudière doit donc être conçue pour atteindre les niveaux de température requis, à toutes les marches de fonctionnement.

Il est à noter que les cendres volantes peuvent aussi agir, dans certains cas, comme absorbant pour les polluants acides. Cela permet de réduire la quantité d'absorbant frais à apporter au procédé.

Dans le cas particulier des chaudières à lit fluidisé, une partie des polluants acides peut déjà être captée au sein même du foyer, notamment les oxydes de soufre, soit par adjonction de calcaire, soit grâce à la présence de carbonate de calcium dans les matériaux minéraux constitutifs du déchet, soit par combinaison des deux. De cette

façon, on peut éliminer ainsi jusqu'à 80 – 90 % des oxydes de soufre et plusieurs dizaines de % des acides halogénés (HCl, etc.).

Traitement des oxydes d'azote

La formation des oxydes d'azote doit être évitée au niveau de la combustion, car c'est à ce stade que le traitement de ces polluants est le moins cher. Toutefois, si la teneur en azote du déchet dépasse une valeur comprise typiquement entre 0,3 et 0,5 %, les rejets de NOx à la cheminée risquent d'être supérieurs à 400 mg/Nm³. Il faut alors prévoir un traitement qui peut être soit le procédé dit « SNCR » (Réduction sélective non catalytique des NOx), soit le procédé dit « SCR » (Réduction sélective catalytique des NOx).

Dans les deux procédés, on injecte de l'ammoniac (gazeux ou en solution) ou de l'urée (en solution ou parfois en grains) dans les fumées, afin de faire réagir l'un ou l'autre de ces deux réactifs avec les oxydes d'azote, pour aboutir à de l'azote moléculaire (celui que l'on respire).



Dans le cas du procédé SNCR (Figure 25), la réaction doit s'effectuer entre 900 et 1000 °C (nota : il est important de rester dans cette plage de températures à toutes les allures de la chaudière, sinon on risque d'augmenter la teneur en NOx des fumées au lieu de l'abaisser – à défaut, il faut prévoir plusieurs points d'injection qui sont activés en fonction de l'allure de la chaudière, afin de rester dans la plage de température optimale de traitement des NOx).

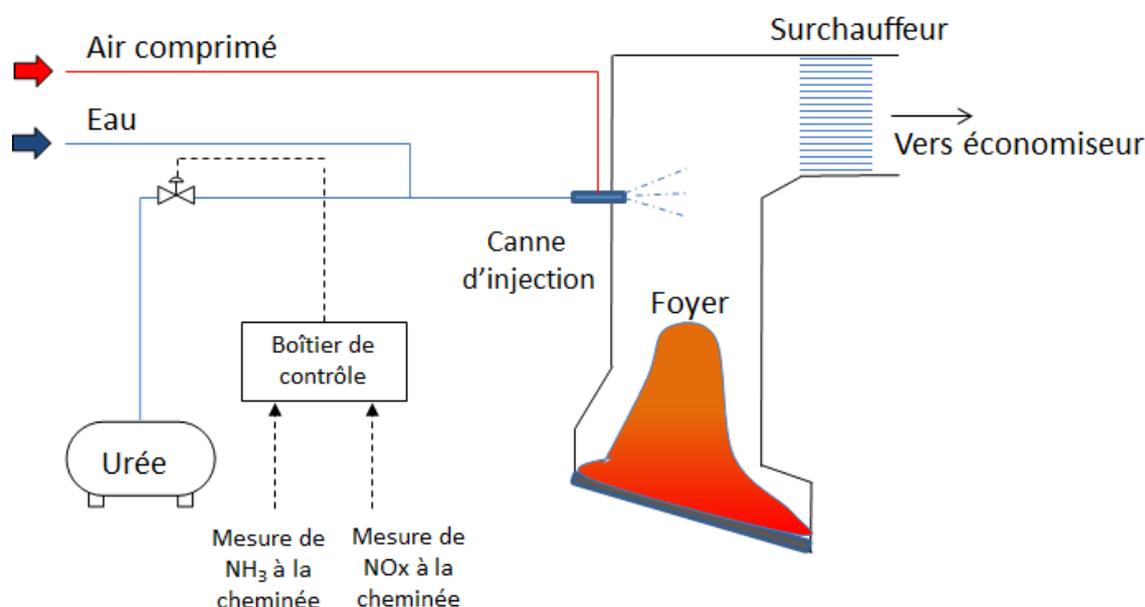


Figure 25 : Schéma d'une chaudière à grille équipée d'un traitement des NOx par SNCR

Si la même réaction chimique est mise en œuvre avec le concours d'un catalyseur, cela permet d'abaisser sensiblement la température, qui est généralement comprise entre 250 et 350 °C. Le procédé SNCR est donc mis en œuvre à l'intérieur de la chaudière, au niveau du foyer ou juste en aval du foyer, tandis que le procédé SCR est implanté en aval de la chaudière.

Les deux principaux éléments distinguant les deux procédés sont la performance et le coût d'investissement. Les taux d'abattement des NOx possibles avec le procédé SNCR dépasse rarement les 50 – 60 %, tandis qu'avec le procédé SCR, on peut aller jusqu'à des taux de réduction des NOx de 95 %, voire plus. Par contre, les frais d'investissement du procédé SCR sont nettement supérieurs à ceux du procédé SNCR (il y a généralement un facteur compris entre 5 et 10 entre les deux).

Traitement des métaux lourds

A l'exception du mercure (Hg), et dans une moindre mesure du cadmium (Cd) et du thallium (Tl), les métaux lourds présents dans les fumées sont sous forme solide et sont donc éliminés des dites fumées au niveau du dépolluissage. Les 3 métaux lourds précités sont plus volatils et pour les retirer, il faut déjà abaisser autant que possible la température des fumées (140 °C est une valeur qu'il est recommandé de ne pas dépasser), afin de maximiser leur récupération sous forme solide. Le mercure et ses composés pouvant avoir des tensions de vapeur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de Pa dans les conditions de fonctionnement des dépolluiseurs, il peut être nécessaire de compléter le simple dépolluissage par des traitements complémentaires, comme par exemple

l'injection de charbon actif ou de coke de lignite (ou par passage des fumées sur des lits de ces produits), qui vont agir comme adsorbant.

Traitement des imbrûlés

Comme cela a été indiqué plus haut, le lieu où les imbrûlés doivent être évités est avant tout le foyer. Cependant, s'il y a un risque de présence d'imbrûlés, notamment de dioxines et furanes à la cheminée, malgré les précautions prises dans le foyer, ces substances toxiques peuvent être traitées en aval, grâce par exemple à l'utilisation d'un adsorbant comme la chaux ou un charbon actif, ou encore par passage dans un équipement assurant la dénitrification des fumées par SCR, car le catalyseur DeNOx a également la capacité à détruire les dioxines et les furanes.

3.4.4. Adéquation entre CSR et équipements

Le but de cette analyse, qui repose sur des bases essentiellement qualitatives, est de définir les équipements d'une installation de combustion de CSR, qui seraient a priori les mieux adaptés. Les équipements pris en considération vont du stockage du combustible jusqu'à la cheminée. On a procédé à cette analyse pour une chaudière à grille et pour une chaudière à lit fluidisé.

Remarque : Pour limiter la subjectivité de l'approche, on a pris en considération les informations qui ont été fournies par les constructeurs de chaudières lors de l'enquête (cf. paragraphe V), Malgré cela, certains des résultats obtenus sont certainement contestables.

3.4.4.1. Adéquation CSR et chaudière à grille

Pour l'évaluation de l'adéquation entre les équipements d'une chaudière à grille et les CSR, nous avons établi le tableau qui suit (cf. Tableau 19), dans lequel ont été rappelés les résultats des analyses physique et chimique des CSR objets de l'étude, ainsi que les principaux équipements envisageables dans le cas d'une chaudière à grille, en les répartissant par section :

- Section « stockage des CSR ».
- Section « convoyage ».
- Section « dosage/introduction dans le foyer ».
- Section « foyer ».
- Section « chaudière » (ce qui correspond spécifiquement à la zone d'échange de chaleur où l'on produit le fluide chaud 'eau chaude, vapeur, etc.).
- Section « traitement » des fumées ».
- Section « extraction et convoyage des cendres vers le stockage ».

Pour chaque CSR, sont repérées en jaune dans le tableau les caractéristiques qui peuvent potentiellement présenter des difficultés pour la chaudière, compte tenu des valeurs constatées. Il s'agit en particulier de :

Pour l'analyse physique

- Des CSR avec de faibles masses volumiques apparentes, car le contrôle de la progression de telles charges sur la grille de combustion peut s'avérer difficile.
- Des CSR qui contiennent des films métallisés à plus de 1 % (valeur plafond fixée arbitrairement), car ces films sont source de mâchefers susceptibles de bloquer la ligne d'extraction et d'évacuation des cendres.
- Des CSR renfermant une proportion importante de mousses, lesquelles sont source d'ennuis dans le circuit de transport des CSR jusqu'au foyer et dans le système de dosage du combustible.
- Des CSR avec une quantité importante de pneumatiques et de déchets caoutchouteux, parce que ces fractions sont difficiles à brûler et peuvent générer d'importants volumes d'imbrûlés et de suies.

Remarque : D'une manière générale, on constate que, sur la base de la seule analyse physique, pratiquement tous les CSR ont au moins un paramètre qui peut présenter des difficultés en combustion dans une chaudière à grille.

Pour l'analyse chimique

- Des CSR qui ont une teneur en cendres élevée, typiquement supérieure à 20 %. Ces cendres vont former un lit de matières solides important sur la grille, qui peut potentiellement perturber la distribution de l'air de combustion ; ce qui peut conduire à des imbrûlés, aussi bien solides (présence de carbone en fortes teneurs dans les cendres) que gazeux, à cause d'un défaut de mélange entre combustible et comburant.
- Des CSR qui ont des Pci faibles, inférieurs à 12 MJ/kg, parce qu'ils sont souvent difficiles à brûler.
- Des CSR dont la teneur en azote est supérieure à 1,5 %, car ces combustibles vont exiger des moyens d'abattement des NOx conséquents.
- Des CSR ayant une teneur en chlore supérieure à 1 % (valeur typique rencontrée avec les ordures ménagères), car là aussi, les taux d'abattement requis vont être très importants, ainsi que les moyens requis.

L'adéquation entre les équipements et les CSR apparaît dans la dernière partie du tableau, avec le code de couleurs suivant :

- Couleur verte : L'équipement est adapté à l'usage des CSR.
- Couleur orange : L'emploi de l'équipement est envisageable avec les CSR, mais il est possible qu'il y ait des difficultés.
- Couleur rouge : L'équipement est a priori déconseillé avec les CSR.

Sur cette base d'analyse, on peut faire les remarques additionnelles suivantes :

Section « stockage des CSR »

- Le pont roulant avec un grappin et le système dit « top loader » sont a priori les deux solutions les mieux adaptées aux CSR, le pont avec grappin pour les capacités allant jusqu'à 1000 m³ et plus et le « top loader » pour des volumes stockés jusqu'à 300 – 400 m³.

Section « convoyage »

- Les trois principales solutions appliquées sont : la bande transporteuse, le convoyeur à chaîne et la vis sans fin. Il est difficile de prévoir a priori le comportement de ces 3 systèmes de transport (remarque : les producteurs de CSR ont probablement une expérience aussi importante dans le domaine que les constructeurs de chaudière et cette expérience pourrait être utilement mise au service desdits constructeurs). Les 3 dispositifs peuvent être envisagés, sous réserve qu'ils soient dimensionnés correctement (diamètre de vis suffisant, pentes ad hoc, etc.).
- Dans l'analyse qui a été faite, on a considéré que la masse volumique était le critère principal et qu'il sera probablement plus difficile de transporter des charges à moins de 100 kg/m³, que celles qui ont des densités apparentes de 0,2 – 0,3.

Section « dosage/introduction dans le foyer »

- Rappel : Le système d'introduction du combustible dans le foyer a aussi comme autres fonctions, d'assurer l'étanchéité du foyer vis-à-vis de l'extérieur d'une part, et de répartir le combustible sur la grille de façon homogène d'autre part.
- Les constructeurs de chaudière sont plutôt enclins à utiliser la vis que le poussoir, pour doser les CSR et les introduire dans le foyer. La raison de ce choix est la difficulté à assurer l'étanchéité avec le poussoir. S'il y a des entrées d'air parasite à ce niveau, la combustion est moins bien contrôlée et il peut se former des imbrûlés.
- Si la vis est une solution plus appropriée, elle doit néanmoins être correctement conçue et dimensionnée. Par exemple, dans certains cas on privilégiera une vis en auge et dans d'autres une vis en tube. L'expérimentation préalable reste la meilleure solution pour sélectionner le type de vis.

Section « foyer »

- Il y a plusieurs CSR qui sont incompatibles avec le foyer à grille, à cause de leur teneur en cendres trop importante.
- Les chaudières à biomasse actuelles, dans la gamme de puissances visée par l'étude, sont à foyer pas ou peu refroidi. Dans ces conditions, les 3 CSR ayant le contenu énergétique le plus élevé ne peuvent pas être utilisés dans ce type d'équipement.
- Le CSR qui a le Pci le plus faible, inférieur à 8 MJ/kg, peut poser des difficultés pour avoir une température suffisante pour garantir une combustion complète.
- A l'exception du CSR « Ech002 », aucun des CSR ne peut être utilisé dans une chaudière, sans que celle-ci ne soit équipée d'un dispositif d'abattement des NOx.

- L'abattement des NOx par SNCR sera peut-être une solution pour traiter les NOx, mais elle devrait se limiter à quelques CSR, dont la teneur en azote est inférieure à 1 %. Pour tous les autres cas, il faudra passer à la solution de la SCR.

Remarque : Les foyers à « spreader stoker » (foyers dans lesquels le combustible est projeté en l'air avant de tomber sur la grille, contrairement au foyer à grille « classique », où le combustible est déposé sur la grille) ne sont pas adaptés à la combustion des CSR. Il y a souvent des problèmes de bourrage dans le circuit d'alimentation du combustible, notamment dans les lucarnes d'introduction dans le foyer. De plus, le combustible ne brûle pas pendant sa phase de suspension dans les gaz ; ce qui fait perdre l'intérêt de cette technique de combustion particulière.

Section « chaudière »

- Rappel : D'une manière générale, les chaudières sont soit à tubes d'eau, soit à tubes de fumées. Dans le premier cas, c'est l'eau et/ou la vapeur qui circule dans les tubes, tandis que dans le second, ce sont les fumées qui passent par les tubes, ceux-ci étant dans une calandre remplie d'eau. La solution « tubes de fumées » est généralement employée pour les petites et moyennes puissances (P allant jusqu'à 15 – 20 MW, voire parfois plus), car elle est moins chère que la solution « tubes d'eau ».
- Le choix de l'une ou l'autre solution dépend notamment de la charge en poussières des fumées. La solution « tubes de fumées » ne tolère pas de teneur en cendres dans le combustible supérieure à 15 – 20 %.
- Compte-tenu des teneurs en cendres élevées des CSR, comparé à la teneur en cendres du bois et autres biomasses, dans tous les cas, le dispositif de ramonage devra être renforcé (augmentation du nombre de ramoneurs en entrée de tubes par exemple).
- Il est possible que les CSR génèrent dans la chaudière des dépôts moins labiles que ceux des chaudières à bois, à cause de problèmes de collage. Si c'est le cas, les opérations de ramonage risquent d'être rendues plus difficiles et les solutions du type « air choc » peu ou pas opérantes.

Section « traitement » des fumées »

- Rappel : L'abattement des SOx intervient déjà au niveau du foyer, notamment quand des éléments alcalino-terreux (Ca, Mg) sont présents dans le combustible (nota : dans le cas des foyers à grille, il y a peu de rétention des oxydes de soufre par les matières basiques, car les températures sont généralement trop élevées et/ou l'atmosphère pas suffisamment oxydante), et en aval du foyer, par traitement des fumées avec un agent absorbant (calcaire, chaux ou bicarbonate de soude dans la plupart des cas). Ce traitement peut être en voie sèche à haute ou basse température, ou en voie humide. Le traitement en voie humide est plus cher que le traitement en voie sèche. Il est appliqué uniquement quand les rendements requis sont très élevés (> 90 % voire plus).
- Le traitement en voie sèche (traitement des fumées en aval de la chaudière) devrait pouvoir s'appliquer sans difficulté avec les CSR dont la teneur en soufre est inférieure à 0,25 %. Pour les CSR dont la teneur est comprise entre 0,25 et 0,50 %, cette solution paraît plus incertaine. Sa performance dépendra pour partie de la composition des cendres du combustible et des quantités de matières basiques présentes. Pour les CSR les plus soufrés, il est possible que la solution du traitement en voie humide soit inévitable (remarque : les producteurs d'absorbants à utiliser en voie sèche sont à contacter pour savoir quel taux d'abattement et quelle concentration finale en polluant ils peuvent garantir).
- Pour HCl, les points d'abattement sont sensiblement les mêmes que pour le soufre : dans le foyer avec les matières basiques contenues dans les cendres et en aval du foyer par traitement sec ou humide. La différence entre les deux polluants réside dans le fait que les niveaux admis pour HCl à la cheminée sont cinq fois inférieurs à ceux tolérés pour le soufre. Par ailleurs, le SO₂ est en principe un peu plus facile à capter qu'HCl, au moins sur les absorbants calciques.
- Dans le tableau, on a considéré que les CSR dont la teneur en chlore est inférieure à 1 % pourraient être traités en voie sèche sans difficulté particulière. Il y a une incertitude pour ceux dont la teneur est comprise entre 1,0 et 1,5 % et au-delà de 1,5 % il faudra probablement faire appel au traitement en voie humide.

Les autres commentaires que l'on peut faire relativement au traitement des fumées sont :

- Le dépoussiérage par filtre à manches ou par électrofiltre (filtre à manches de préférence compte tenu de son rendement de dépoussiérage et des possibilités qu'il offre en matière de traitement additionnel des polluants acides) est impératif dans tous les cas.
- Le traitement des dioxines et furanes, ainsi que celui des métaux lourds, notamment les métaux volatils sera également imposé.

| | | Ech001 | Ech002 | Ech005 | Ech006 | Ech007 | Ech008 | Ech009 | Ech010 | Ech012 | Ech013 | Ech014 | Ech015 | Ech016 | Ech017 | Ech018 | Ech019 |
|--|-------------|-----------|--------|-----------|--------|--------|------------------------|--------|-------------------|--------|--------|--------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------|
| Tests | Unités | RB légers | DIB | RB lourds | DIB | OM | DIB / OM / refus de CS | DIB | DIB / refus de CS | OM | OM | DIB/OM | RB légers | Encombrants | Encombrants | RB légers | DIB |
| Analyse physique | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bois | % massique | 8,4 | 21,4 | 13,9 | 22,7 | 24,4 | 2,6 | 18,0 | 7,5 | 2,2 | 0,0 | 6,9 | 14,2 | 23,2 | 32,4 | 3,2 | 2,4 |
| Plastiques souples | % massique | 7,4 | 29,5 | 22,1 | 8,6 | 24,4 | 18,8 | 7,9 | 16,7 | 9,1 | 0,0 | 26,8 | 5,0 | 5,3 | 10,4 | 3,2 | 26,7 |
| Plastiques durs | % massique | 23,4 | 10,9 | 40,4 | 3,4 | 0,5 | 15,6 | 21,3 | 13,8 | 12,9 | 0,0 | 22,9 | 52,9 | 8,4 | 15,4 | 3,2 | 34,8 |
| Films métallisés | % massique | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,6 | 0,0 | 3,9 | 1,1 | 1,3 | 1,1 | 0,0 | 1,1 | 0,2 | 1,1 | 1,8 | 0,0 | 3,2 |
| Textiles | % massique | 20,8 | 12,2 | 0,8 | 6,6 | 0,0 | 21,4 | 2,2 | 5,2 | 9,0 | 0,0 | 18,3 | 3,3 | 2,1 | 1,8 | 0,0 | 7,0 |
| Minéraux | % massique | 0,1 | <0,1 | 1,1 | 1,7 | 3,0 | 0,0 | 10,1 | 2,5 | 7,5 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 2,1 | 0,4 | 0,0 | 0,4 |
| Métaux | % massique | 4,4 | 5,0 | 0,7 | 0,6 | 0,0 | 1,3 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,4 | 0,0 | 0,4 |
| Mousses | % massique | 9,8 | 0,1 | 0,5 | 17,8 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,0 | <0,1 | 0,0 | 1,1 | 6,5 | 6,3 | 31,5 | 0,0 | 2,0 |
| Papier/carton | % massique | 7,9 | 17,6 | 0,1 | 20,7 | 24,4 | 22,1 | 6,7 | 35,8 | 19,4 | 0,0 | 21,5 | 3,5 | 17,9 | 0,0 | 3,2 | 23,0 |
| Pneumatiques | % massique | 5,1 | 0,0 | 20,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Broyat fin (< 5mm) | % massique | 10,4 | 0,7 | 0,1 | 17,4 | 23,3 | 10,4 | 27,0 | 13,2 | 37,6 | 0,0 | 0,0 | 2,9 | 31,4 | 5,8 | 87,3 | 0,0 |
| Polystyrène | % massique | 2,2 | <0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 1,1 | 3,9 | 1,1 | 0,0 | 1,1 | 5,1 | 1,1 | <0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Nylon, fibres plastiques | % massique | 0,0 | 2,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Compost | % massique | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Total | % massique | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| Masse volumique apparente | kg/m3 | 90,8 | 40,6 | 239,9 | 88,4 | 246,4 | 35,2 | 115,5 | 78,8 | 89,1 | 404,5 | 80,6 | 138,8 | 84,7 | 126,0 | 485,0 | 70,8 |
| Répartition massique de la granulométrie | > 30 mm | 0,0 | 98,0 | 39,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 |
| | 0,5 - 30 mm | 96,8 | 1,6 | 60,1 | 98,2 | 99,9 | 99,8 | 95,4 | 99,0 | 96,2 | 85,4 | 99,5 | 91,6 | 97,0 | 99,3 | 79,0 | 97,9 |
| | < 0,5 mm | 3,2 | 0,4 | 0,1 | 1,8 | 0,1 | 0,2 | 4,6 | 1,0 | 3,8 | 14,6 | 0,5 | 0,4 | 3,0 | 0,7 | 21,0 | 1,9 |
| Analyse chimique | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Humidité totale d'un CSR | % sur brut | 15,1 | 10,2 | 10,3 | 35,5 | 16,1 | 17,4 | 10,7 | 18,3 | 10,8 | 24,3 | 21,5 | 5,2 | 8,9 | 16,4 | 7,8 | 3,6 |
| Teneur en cendres à 550°C | % MS | 37,6 | 16,5 | 27,9 | 21,8 | 35 | 13,9 | 26,7 | 20 | 44,4 | 41,5 | 16,4 | 17,9 | 9,8 | 14,1 | 66,6 | 12,7 |
| Teneur en matières volatiles | % MS | 67,5 | 94 | 66,3 | 67,9 | 56,5 | 77 | 68,2 | 71,1 | 48,9 | 50,9 | 77,4 | 74,3 | 76,3 | 75,8 | 34,6 | 80,9 |
| Carbone (C) | % MS | 45,1 | 66,9 | 47,5 | 46,3 | 38,8 | 56,2 | 42,7 | 52,8 | 39,1 | 32,4 | 51,5 | 58,6 | 50,7 | 47,8 | 19,9 | 53,6 |
| Hydrogène (H) | % MS | 5,7 | 11 | 6 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 5,6 | 7,1 | 5 | 3,3 | 6,9 | 7,4 | 6 | 6,7 | 2,2 | 7,2 |
| Teneur en azote (N) | % MS | 1,8 | <0,50 | 1,17 | 2,07 | 1,74 | 1,5 | 1,11 | 0,8 | 1,48 | 1,89 | 1,27 | 1,37 | 1,57 | 1,8 | 0,81 | 0,9 |
| Teneur en soufre (S) | % MS | 0,24 | 0,24 | 0,45 | 0,48 | 0,55 | 0,19 | 0,86 | 0,4 | 0,2 | 0,55 | 0,54 | 0,33 | 0,25 | 0,91 | 0,32 | 0,38 |
| Teneur en chlore (Cl) | % MS | 1,1 | 0,48 | 3,3 | 0,69 | 0,66 | 1,3 | 1,1 | 0,88 | 0,78 | 0,59 | 1,4 | 1,7 | 1,2 | 1,1 | 0,59 | 1,1 |
| PdI (sec) | kJ/kg | 20225 | 27668 | 20274 | 16965 | 13289 | 23811 | 17196 | 19093 | 13717 | 11313 | 23946 | 22827 | 21210 | 18692 | 8007,2 | 25459 |
| PdI (brut) | kJ/kg | 16834 | 24605 | 17951 | 10128 | 10780 | 19275 | 15105 | 15171 | 11985 | 8002,1 | 18299 | 21530 | 19127 | 15246 | 7204,9 | 24460 |
| Brome | mg/kg | 941 | <50 | 236 | 68 | <50 | <50 | 301 | 110 | <50 | <50 | 106 | 359 | 112 | 231 | 373 | <50 |
| Fluor | mg/kg | 562 | 51 | 1010 | 103 | 161 | 145 | 261 | 81 | 102 | 202 | 65 | 728 | 95 | 157 | 399 | 65 |
| Solutions techniques | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stockage / déstockage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bennes à fond mouvant ou à racleurs | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fosse enterrée + Racleurs | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pont + Grappin | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Top Loader | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Convoyage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bande transporteuse | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Convoyeur à chaînes | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vis sans fin | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dosage / introduction dans le foyer | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Poussoir | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vis | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Foyer à grille | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Compatibilité avec les cendres | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Compatibilité avec un foyer non refroidi | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Capacité à avoir T combustion > 950 °C | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sans DeNOx primaire | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sans DeNOx par SNCR | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Chaudière | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Compatibilité avec les tubes de fumées | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Traitement de fumées | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DeSOx en voie sèche (η < 90 % - S < 0,25 %) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DeHCl en voie sèche (η < 95 - 98 % - Cl < 0,5) | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 19 : Analyse qualitative de l'adéquation des équipements d'une chaudière à grille avec les CSR

3.4.4.2. Adéquation CSR et chaudière à lit fluidisé

La démarche de travail a été sensiblement la même que celle suivie pour la chaudière à grille, avec une identification des caractéristiques des CSR importantes pour un usage dans des lits fluidisés, et une première analyse de l'adéquation des CSR étudiés avec les principaux équipements d'une chaudière équipée de ce type de foyer (cf. Tableau 19).

Le code des couleurs du Tableau 20 reste le même, à savoir :

- Pour les analyses physique et chimique, un repérage en jaune des caractéristiques des CSR qui posent potentiellement un problème.
- Pour les équipements :
 - Couleur verte : L'équipement est adapté à l'usage des CSR.
 - Couleur orange : L'emploi de l'équipement est envisageable avec les CSR, mais il est possible qu'il y ait des difficultés.
 - Couleur rouge : L'équipement est a priori déconseillé avec les CSR.

Les différences entre le Tableau 19 et le Tableau 20 portent sur les points suivants :

Analyse physique

- La teneur en broyats fins n'est plus vraiment un paramètre pertinent, car la technologie du lit fluidisé est une technologie particulièrement bien adaptée à la manipulation des solides divisés.
- La masse volumique des CSR n'est pas non plus véritablement un problème, quand celle-ci est faible, puisqu'on n'a plus le problème d'assurer la progression du combustible sur une grille.
- Les films métallisés restent une difficulté, car ils peuvent contribuer à former des agglomérats, difficiles voire impossibles à évacuer du milieu fluidisé, ou à une défluidisation et une prise en masse du lit dans le pire des cas.
- Les pneumatiques sont toujours considérés comme un problème potentiel, mais cela est à confirmer. En effet, le milieu fluidisé, bien qu'à une température modérée (850 à 950 °C typiquement, à comparer avec des températures qui peuvent être un peu plus élevées en foyer à grille, c'est-à-dire allant parfois jusqu'à 1 100 °C), peut faciliter la combustion de ces matières, car ce milieu, grâce à ses échanges de chaleur très intenses et son caractère « attritant », permet d'accélérer leur dévolatilisation. Par ailleurs, la matrice carbonée résiduelle séjourne dans le foyer jusqu'à épuisement.

Analyse chimique

- La teneur en cendres n'est plus une difficulté, parce que les lits fluidisés sont capables de brûler des combustibles avec de très fortes teneurs en cendres (par exemple, la combustion des schlamms, qui ont souvent des teneurs en cendres supérieures à 70 %). Le seul facteur limitant devient alors le pouvoir calorifique, évidemment inversement proportionnel à la teneur en cendres, car il faut que le combustible apporte toujours suffisamment d'énergie pour que le foyer puisse être maintenu à une température minimale de 850 °C, afin de garantir l'absence d'imbrûlés gazeux. Remarque : quand on a affaire à des combustibles avec des Pci très faibles, il y a toujours la possibilité de préchauffer l'air de combustion, jusqu'à 500 – 550 °C, pour maintenir la température du lit à 850 °C (cf. les incinérateurs de boues de station d'épuration à lit fluidisé dense type THERMYLIS ou PYROFLUID). Ainsi, il devrait être possible de valoriser des CSR qui ont des Pci aussi bas que 8 MJ/kg sur base humide.
- La combustion de matières fortement azotées pose également moins de problèmes en lit fluidisé qu'en foyer à grille, grâce à la possibilité de travailler avec des excès d'air réduits et d'étager fortement la combustion. C'est particulièrement vrai avec les foyers à lits fluidisés circulants. Par exemple, il est possible d'utiliser des tourbes jusqu'à 2,5 % d'azote dans des LFC, sans que les rejets de NOx ne dépassent 500 mg/Nm³.
- Seul le chlore pose problème. Bien qu'il soit capté pour partie dans le foyer, de façon plus efficace que dans une chaudière à grille, grâce aux matières calciques présentes dans le lit, les teneurs en HCl en sortie de chambre de combustion devraient rester élevées, en regard des exigences réglementaires.

Equipements

S'agissant des équipements, les commentaires sont les suivants :

- Pour les parties amont « stockage/déstockage » et « convoyage », il n'y a pas de différences entre la chaudière à grille et la chaudière à lit fluidisé.
- S'agissant de la partie « introduction dans le foyer », la solution du pousoir est inadaptée. En effet, dans un milieu fluidisé chaud, le combustible est très rapidement dévolatilisé. Si celui-ci arrive par à-coups, il va y avoir des bouffées très importantes d'imbrûlés à la cheminée et d'autres désordres dans l'installation (excursions de température dans le foyer, suppressions momentanées entraînant des fuites de produits de

combustion vers l'extérieur, encrassement accru des échangeurs, etc.). Le seul système d'introduction viable est la vis, à la condition qu'elle assure un débit le plus régulier possible.

- Au niveau du foyer, comme vu plus haut, il n'y a pas de difficulté particulière avec les cendres, quelle qu'en soit la teneur.
- L'obtention et le maintien d'une température de combustion comprise entre 850 et 950 °C ne pose pas de difficulté particulière, parce qu'il existe une gamme étendue de configurations permettant cela : lit fluidisé dense avec ou sans échangeur de chaleur interne, lit fluidisé circulant avec ou sans échangeur(s) externe(s), etc.
- En ce qui concerne la maîtrise des émissions de NOx, il a été considéré, de façon arbitraire (cela est à confirmer avec les fabricants), que la solution de la chaudière LFC pourrait permettre de s'affranchir d'un système DeNOx si les CSR ont des teneurs en azote inférieures à 1,5 %, dans le cas où la VLE applicable est de 400 mg/Nm³ à 11 % d'oxygène (cas des installations dont le débit de déchets entrant est inférieur à 6 t/h). Ainsi, plus de la moitié des CSR étudiés pourraient être employés dans une chaudière LFC sans autre disposition qu'un étagement significatif de la combustion (avec un air primaire qui ne dépasse pas 50 % de l'air total par exemple).
- La chaudière ne peut pas être à tubes de fumées, car la quasi-totalité des cendres quittent l'installation sous forme de cendres volantes. En conséquence, la teneur en poussières des fumées est élevée, et cela d'autant plus que dans un certain nombre de cas, une partie des cendres collectées au dépoussiéreur final peut-être recyclée au foyer, afin d'en réduire la teneur en carbone.
- Pour les rejets de SO₂, il a été considéré que ce polluant pourrait être capté au sein du lit fluidisé, soit parce que les CSR contiennent déjà une quantité importante de calcium, soit par ajout de calcaire (en des quantités « raisonnables », de façon à ne pas augmenter de façon significative le volume des sous-produits solides, dont il faudra bien assurer l'élimination), tant que la teneur en soufre desdits CSR ne dépasse pas 0,25 %. Au-delà, il faudra prévoir un traitement additionnel en aval, à la chaux ou au bicarbonate de soude.
- Enfin, pour HCl, ayant peu de données, une position conservatoire a été prise en considérant qu'il n'y aura peut-être pas de capture nettement plus importante de ce polluant au sein du lit fluidisé, par rapport au système à grille.

| Tests | Unités | Ech001 | Ech002 | Ech005 | Ech006 | Ech007 | Ech008 | Ech009 | Ech010 | Ech012 | Ech013 | Ech014 | Ech015 | Ech016 | Ech017 | Ech018 | Ech019 | |
|---|-------------|-----------|--------|-----------|--------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------|--------|-----------|-------------|-------------|-----------|--------|--|
| | | RB légers | DIB | RB lourds | DIB | OM | OM / refus c | DIB | B / refus de | OM | OM | DIB/OM | RB légers | Encombrants | Encombrants | RB légers | DIB | |
| Analyse physique | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bois | % massique | 8,4 | 21,4 | 13,9 | 22,7 | 24,4 | 2,6 | 18,0 | 7,5 | 2,2 | 0,0 | 6,9 | 14,2 | 23,2 | 32,4 | 3,2 | 2,4 | |
| Plastiques souples | % massique | 7,4 | 29,5 | 22,1 | 8,6 | 24,4 | 18,8 | 7,9 | 16,7 | 9,1 | 0,0 | 26,8 | 5,0 | 5,3 | 10,4 | 3,2 | 26,7 | |
| Plastiques durs | % massique | 23,4 | 10,9 | 40,4 | 3,4 | 0,5 | 15,6 | 21,3 | 13,8 | 12,9 | 0,0 | 22,9 | 52,9 | 8,4 | 15,4 | 3,2 | 34,8 | |
| Films métallisés | % massique | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,6 | 0,0 | 3,9 | 1,1 | 1,3 | 1,1 | 0,0 | 1,1 | 0,2 | 1,1 | 1,8 | 0,0 | 3,2 | |
| Textiles | % massique | 20,8 | 12,2 | 0,8 | 6,6 | 0,0 | 21,4 | 2,2 | 5,2 | 9,0 | 0,0 | 18,3 | 3,3 | 2,1 | 1,8 | 0,0 | 7,0 | |
| Minéraux | % massique | 0,1 | <0,1 | 1,1 | 1,7 | 3,0 | 0,0 | 10,1 | 2,5 | 7,5 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 2,1 | 0,4 | 0,0 | 0,4 | |
| Métaux | % massique | 4,4 | 5,0 | 0,7 | 0,6 | 0,0 | 1,3 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,4 | 0,0 | 0,4 | |
| Mousses | % massique | 9,8 | 0,1 | 0,5 | 17,8 | 0,0 | 2,6 | 1,1 | 0,0 | <0,1 | 0,0 | 1,1 | 6,5 | 6,3 | 31,5 | 0,0 | 2,0 | |
| Papier/carton | % massique | 7,9 | 17,6 | 0,1 | 20,7 | 24,4 | 22,1 | 6,7 | 35,8 | 19,4 | 0,0 | 21,5 | 3,5 | 17,9 | 0,0 | 3,2 | 23,0 | |
| Pneumatiques | % massique | 5,1 | 0,0 | 20,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Broyat fin (< 5mm) | % massique | 10,4 | 0,7 | 0,1 | 17,4 | 23,3 | 10,4 | 27,0 | 13,2 | 37,6 | 0,0 | 0,0 | 2,9 | 31,4 | 5,8 | 87,3 | 0,0 | |
| Polystyrène | % massique | 2,2 | <0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 1,1 | 3,9 | 1,1 | 0,0 | 1,1 | 5,1 | 1,1 | <0,1 | 0,0 | 0,0 | |
| Nylon, fibres plastiques | % massique | 0,0 | 2,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Compost | % massique | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | |
| Total | % massique | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | |
| Masse volumique apparente | kg/m3 | 90,8 | 40,6 | 239,9 | 88,4 | 246,4 | 35,2 | 115,5 | 78,8 | 89,1 | 404,5 | 80,6 | 138,8 | 84,7 | 126,0 | 485,0 | 70,8 | |
| Répartition massique de la granulométrie | > 30 mm | 0,0 | 98,0 | 39,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | |
| | 0,5 - 30 mm | 96,8 | 1,6 | 60,1 | 98,2 | 99,9 | 99,8 | 95,4 | 99,0 | 96,2 | 85,4 | 99,5 | 91,6 | 97,0 | 99,3 | 79,0 | 97,9 | |
| | < 0,5 mm | 3,2 | 0,4 | 0,1 | 1,8 | 0,1 | 0,2 | 4,6 | 1,0 | 3,8 | 14,6 | 0,5 | 0,4 | 3,0 | 0,7 | 21,0 | 1,9 | |
| Analyse chimique | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Humidité totale d'un CSR | % sur brut | 15,1 | 10,2 | 10,3 | 35,5 | 16,1 | 17,4 | 10,7 | 18,3 | 10,8 | 24,3 | 21,5 | 5,2 | 8,9 | 16,4 | 7,8 | 3,6 | |
| Teneur en cendres à 550°C | % MS | 37,6 | 16,5 | 27,9 | 21,8 | 35 | 13,9 | 26,7 | 20 | 44,4 | 41,5 | 16,4 | 17,9 | 9,8 | 14,1 | 66,6 | 12,7 | |
| Teneur en matières volatiles | % MS | 67,5 | 94 | 66,3 | 67,9 | 56,5 | 77 | 68,2 | 71,1 | 48,9 | 50,9 | 77,4 | 74,3 | 76,3 | 75,8 | 34,6 | 80,9 | |
| Carbone (C) | % MS | 45,1 | 66,9 | 47,5 | 46,3 | 38,8 | 56,2 | 42,7 | 52,8 | 39,1 | 32,4 | 51,5 | 58,6 | 50,7 | 47,8 | 19,9 | 53,6 | |
| Hydrogène (H) | % MS | 5,7 | 11 | 6 | 5,6 | 4,6 | 7,5 | 5,6 | 7,1 | 5 | 3,3 | 6,9 | 7,4 | 6 | 6,7 | 2,2 | 7,2 | |
| Teneur en azote (N) | % MS | 1,8 | <0,50 | 1,17 | 2,07 | 1,74 | 1,5 | 1,11 | 0,8 | 1,48 | 1,89 | 1,27 | 1,37 | 1,57 | 1,8 | 0,81 | 0,9 | |
| Teneur en soufre (S) | % MS | 0,24 | 0,24 | 0,45 | 0,48 | 0,55 | 0,19 | 0,86 | 0,4 | 0,2 | 0,55 | 0,54 | 0,33 | 0,25 | 0,91 | 0,32 | 0,38 | |
| Teneur en chlore (Cl) | % MS | 1,1 | 0,48 | 3,3 | 0,69 | 0,66 | 1,3 | 1,1 | 0,88 | 0,78 | 0,59 | 1,4 | 1,7 | 1,2 | 1,1 | 0,59 | 1,1 | |
| Pci (sec) | kJ/kg | 20225 | 27668 | 20274 | 16965 | 13289 | 23811 | 17196 | 19093 | 13717 | 11313 | 23946 | 22827 | 21210 | 18692 | 8007,2 | 25459 | |
| Pci (brut) | kJ/kg | 16834 | 24605 | 17951 | 10128 | 10780 | 19275 | 15105 | 15171 | 11985 | 8002,1 | 18299 | 21530 | 19127 | 15246 | 7204,9 | 24460 | |
| Brome | mg/kg | 941 | <50 | 236 | 68 | <50 | <50 | 301 | 110 | <50 | 106 | 359 | 112 | 231 | 373 | <50 | | |
| Fluor | mg/kg | 562 | 51 | 1010 | 103 | 161 | 145 | 261 | 81 | 102 | 202 | 65 | 728 | 95 | 157 | 399 | 65 | |
| Solutions techniques | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stockage / déstockage | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bennes à fond mouvant ou à racleurs | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fosse enterrée + Râcleurs | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pont + Grappin | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Top Loader | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Convoyage | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bande transporteuse | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Convoyeur à chaînes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vis sans fin | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dosage / introduction dans le foyer | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Poussoir | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Vis | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Foyer à grille | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Compatibilité avec les cendres | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Capacité à avoir T combustion > 850 °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sans DeNOx primaire | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Chaudière | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Compatibilité avec les tubes de fumées | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Traitement de fumées | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DeSOx directe en foyer ($\eta < 90\% - S < 0,25\%$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| DeHCl en voie sèche ($\eta < 95 - 98\% - Cl < 0,5$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 20 : Analyse qualitative de l'adéquation des équipements d'une chaudière à lit fluidisé avec les CSR

3.5. Enquête réalisée auprès des fabricants de chaudières et des utilisateurs potentiels de CSR

3.5.1. But de l'enquête et méthodologie

Le but de l'enquête était de :

- Evaluer l'intérêt des CSR pour les différents acteurs de la filière, hormis évidemment les producteurs, qui eux sont forcément motivés.
- Echanger sur un plan technique avec les fabricants de chaudières.
- Sonder les consommateurs potentiels de CSR sur leur volonté à utiliser ces nouveaux combustibles en chaufferie.

La méthode d'enquête est inspirée des études « marketing de l'innovation ». Elle comprend la constitution d'un outil de présentation de l'étude, la définition d'une segmentation opératoire, c'est-à-dire d'une liste des personnes qui vont être sollicitées pour un entretien, de préférence en face à face, l'établissement d'un guide d'entretien, la réalisation des entretiens, et enfin l'exploitation des résultats de ces entretiens.

Les personnes sollicitées pour les entretiens sont de préférence des personnes ayant un certain pouvoir de décision, de telle sorte que leurs avis reflètent a priori correctement la position de l'entreprise.

3.5.2. Outils utilisés pour l'enquête

Le support d'entretien est fourni en annexe B. Ce support a été bâti pour :

- Rappeler le contexte dans lequel se situe l'étude.
- Indiquer les acteurs de l'étude.
- Fournir à la personne interviewée des données de base sur les CSR, dans les cas où elle ne serait pas familière avec ces produits.
- Quelques éléments « guide » pour l'entretien.

3.5.3. Segmentation opératoire et déroulement de l'enquête

La segmentation opératoire est fournie ci-après (Tableau 21). Elle comprend majoritairement des constructeurs de chaudières et des utilisateurs potentiels de ces combustibles. Quelques autres acteurs ont aussi été interrogés.

Remarque : Le nombre d'acteurs listés est limité, compte tenu des moyens prévus pour ce travail.

S'agissant du déroulement de l'enquête, on peut dire que :

- Les constructeurs de chaudières sont très motivés par les CSR et ont accepté volontiers d'échanger avec ATANOR sur le sujet.
- Les consommateurs sont moins enthousiastes, au moins pour certains d'entre eux.

| Secteur économique | Société / organisme | Contact | Position | Réalisation | Motif | |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--|--|
| Constructeur de chaudières | BABCOCK WANSON | MORAWSKI Pascal | Directeur commercial | N | Pas de réponse malgré plusieurs sollicitations | |
| | COMPTE-R | CHIEZE Bruno | Directeur grands projets | O | | |
| | LLT | BLANC Patrick | Responsable pôle énergie | O | | |
| | WEISS | AUBRY Rémy | Responsable R&D | O | | |
| Consommateurs de combustibles | CCIAG | GIRAUD Nicolas | Adjoint directeur technique | N | Non contacté | |
| | CPCU | MOISAN Jean-Marc | Responsable chaufferie | N | N'a pas souhaité échanger sur le sujet | |
| | LAFARGE | GUITTON-FUMET Yves | Responsable process | N | Ne veut pas se prononcer sur le sujet | |
| | OSIRIS | CHORD Jean-Philippe | Responsable utilités | N | Infos collectées sur la plate-forme ROBIN | |
| | SOLVAY | DE LEIRIS Olivier | Responsable infrastructures | N | Inquiet à propos de la réglementation | |
| Autres acteurs | | | | | | |
| | Installateur de chaufferies | CORETEC | POULAT Julien | Directeur commercial | O | |
| | Conseil | RAEE | TRICOT Lionel | Chargé de développement | O | |
| | Syndicat énergies | SIEL 42 | KNECHT Jean-Yves | Ingénieur | O | |
| Ingénierie déchets | VINCI Environnement | THIBAUT Romain | Directeur R&D | N | Sujet CSR émergent dans l'entreprise | |

Tableau 21 : Segmentation opératoire

3.5.4. Résultats de l'enquête

Remarque préalable : Certaines des personnes interviewées considèrent que les informations qu'elles ont livrées ont un caractère confidentiel. C'est la raison pour laquelle les comptes rendus des entretiens ne sont pas annexés au présent document.

3.5.4.1. Résultats de l'enquête au plan technique

Les CSR sont clairement vus comme un nouveau marché potentiel par les constructeurs de chaudières, mais leur approche technique n'est pas la même. Certains excluent l'usage de systèmes à grille et privilégient la solution du foyer à lit fluidisé, tandis que d'autres travaillent à l'adaptation des systèmes à grille pour qu'ils soient capables de brûler ces nouveaux combustibles. Dans ce dernier cas, les constructeurs admettent qu'un nombre limité de CSR pourra être utilisé dans les foyers à grille, c'est-à-dire des CSR majoritairement composés de bois/papiers/cartons, avec relativement peu de plastiques et un taux de cendres réduit.

Dans tous les cas, le traitement des fumées devra être renforcé et les constructeurs de chaudières n'ont généralement pas aujourd'hui toutes les compétences dans le domaine pour proposer des solutions ad hoc. Soit ils développent ces compétences indispensables le plus vite possible, soit ils proposeront des ensembles en groupement ou partenariat avec des sociétés spécialisées dans l'épuration des fumées. Il faut aussi noter que les sociétés spécialisées dans l'épuration des fumées devront probablement s'adapter également, car leurs marchés correspondent souvent à des installations de taille plus importante que celles visées dans le cadre de la présente étude, i.e., des installations de 1 à 20 MW.

L'ensemble des constructeurs insistent sur la nécessité d'avoir des CSR de qualité constante, quelle que soit la technologie de combustion envisagée.

Tous les constructeurs confirment aussi des besoins de R&D pour adapter leurs équipements aux CSR ou pour développer de nouvelles solutions.

3.5.4.2. Résultats de l'enquête au plan commercial

Pour la quasi-totalité des personnes interrogées, les CSR ne constituent pas un marché de court terme, mais plutôt un marché à moyen et long terme. Cela résulte de :

- La nécessité de développer de nouveaux systèmes de combustion, ainsi que des systèmes d'épuration de fumées adaptés.
- La réglementation, qui aujourd'hui n'est pas fixée et qui n'introduit pas une différenciation suffisamment marquée avec les déchets (en l'état actuel des textes).
- Une demande des consommateurs potentiels encore timide à ce jour, compte-tenu des cours plutôt bas des énergies fossiles classiques et des contraintes d'exploitation induites par les CSR, en comparaison de solutions « gaz » par exemple.

Un autre point signalé est celui des probables résistances des populations à l'implantation d'unités brûlant des CSR. Cela signifie notamment que le marché des collectivités, outre le fait qu'il n'est pas toujours attractif au plan économique, compte tenu de la saisonnalité des besoins, risque d'être difficile d'accès.

3.6. Projet de nomenclature

3.6.1. Rappel réglementaire

La réglementation relative aux CSR et à leur combustion est en cours d'évolution. Jusqu'à présent, les CSR ayant un statut de déchets non dangereux, ils étaient soumis à l'arrêté du 20 septembre 2002.

Cet arrêté impose entre autres les exigences suivantes :

- Les installations d'incinération sont exploitées de manière à atteindre un niveau d'incinération tel que la teneur en carbone organique total (COT) des cendres et mâchefers soit inférieure à 3 % du poids sec de ces matériaux ou que leur perte au feu soit inférieure à 5 % de ce poids sec.
- Les fumées doivent respecter les VLE ci-dessous (Tableau 22). Elles sont fonction du contexte de combustion :
 - Incinération : combustion du déchet dans une installation spécifiquement dédiée au traitement thermique des déchets, avec ou sans valorisation de la chaleur produite.
 - Co-incinération : combustion du déchet dans une installation qui utilise des déchets seuls ou en association avec d'autres combustibles, avec production de chaleur.
 - Utilisation en cimenterie.

| Critères | Incinération (mg/Nm ³ sec à 11 % d'O ₂) | Co-incinération (mg/Nm ³ sec à 6 % d'O ₂) | Cimenterie (mg/Nm ³ sec à 10 % d'O ₂) |
|--|--|--|--|
| CO | 50 | 50 | 50 |
| COT | 10 | 10 | 10 |
| NOx (exprimés en NO ₂) | 200 | 200 | 500 |
| Poussières | 10 | 50 | 30 |
| SO ₂ | 50 | 50 | 50 |
| HCl | 10 | 10 | 10 |
| HF | 1 | 1 | 1 |
| PCDD/F | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ |
| Cd + Tl | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Hg | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Tableau 22 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2771)

Remarque : La situation de la co-incinération est celle qui correspond aux objectifs de valorisation des CSR ciblée dans la présente étude.

Les Pouvoirs publics sont actuellement en train d'établir une réglementation spécifique à la combustion des CSR (rubrique 2971). Comme l'arrêté d'incinération des déchets, elle impose un seuil maximal pour chaque polluant atmosphérique. Ils sont donnés dans le tableau ci-après.

| Critères | Incinération (mg/Nm ³ sec à 11% d'O ₂) | Co-incinération (mg/Nm ³ sec à 11% d'O ₂) | Cimenterie (mg/Nm ³ sec à 10 % d'O ₂) |
|--|---|--|--|
| CO | 50 | 50 | 50 |
| COT | 10 | 10 | 10 |
| NOx (exprimés en NO ₂) | 200 | 450 (à 6 % O ₂) | 500 |
| Poussières | 10 | 20 (à 6 % O ₂) | 30 |
| SO ₂ | 50 | 400 (à 6 % O ₂) | 50 |
| HCl | 10 | 10 | 10 |
| HF | 1 | 1 | 1 |
| PCDD/F | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ | 0,1.10 ⁻⁶ |
| Cd + Tl | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Hg | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Tableau 23 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2971)

On constate que les VLE « incinération » et « cimenterie » sont identiques à celles de l'arrêté du 20/09/2002. En revanche, elles sont un peu différentes pour dans le cas de la co-incinération. Le taux de NOx passe de 200 à 450 mg/Nm³, celui de SOx est multiplié par 8 (de 50 à 400 mg/Nm³). A l'inverse, le taux de poussières est abaissé de 50 à 20 mg/Nm³.

En parallèle, les Pouvoirs publics ont mis en place un arrêté qui encadre la préparation des CSR. Il impose un certain nombre d'exigences sur la qualité des CSR avant combustion.

Les principaux critères sont les suivants :

- Préparation des CSR à partir de déchets non dangereux.
- PCI brut > 12 000 kJ/kg. Le CSR a fait l'objet d'un tri permettant d'écartier les métaux et les inertes qui peuvent être extraits et valorisables dans les conditions technico-économiques du moment
- Taux de mercure < 3 mg/kg.
- Taux de chlore < 1,5 % MS
- Taux de brome < 1,5 % MS
- Somme des halogènes (brome, chlore, fluor et iode) < 2 % MS

3.6.2. Rappel des systèmes de classement existants

3.6.2.1. Europe

Au niveau européen, c'est le comité CEN/TC 343 qui s'occupe de la normalisation des CSR. Ses travaux regroupent un ensemble de normes dont la norme EN 15359 qui distingue 5 catégories de CSR (voir tableau ci-après). Elle correspond en France à la norme AFNOR EN 15359:2011 F.

| Critère | Unité | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 | Classe 4 | Classe 5 |
|-----------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pci minimal | MJ/kg brut | 25 | 20 | 15 | 10 | 3 |
| Chlore maximal | % (sec) | 0,2 | 0,6 | 1 | 1,5 | 2 |
| Mercuré maximal | mg/MJ brut | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 |

Tableau 24 : Classification des CSR selon la norme EN 15357:2011

Exemple de classification :

Le code de classe d'un CSR dont le pouvoir calorifique inférieur moyen est de 19 MJ/kg, la teneur moyenne en chlore est de 0,5 % (sec) et la teneur moyenne en mercure est de 0,016 mg/MJ avec un percentile 80 de 0,05 mg/MJ est désigné comme suit : Code de classe PCI 3, Cl 2, Hg 2.

3.6.2.2. Allemagne

L'Allemagne a développé un système de contrôle/qualité basé sur les standards du CEN/TC 343 (cf. Figure 26).

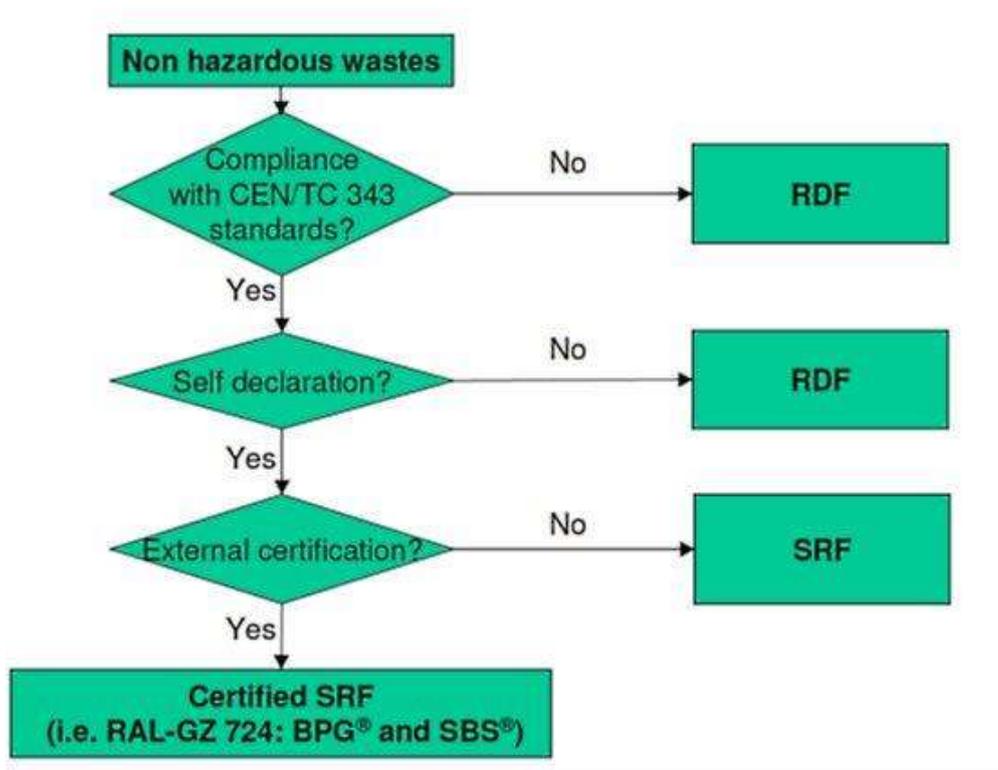


Figure 26 : Principe du contrôle qualité des CSR en Allemagne

Il en découle 5 qualités de sous-produits en fonction des applications auxquelles ils sont destinés :

- BPG 1 pour les centrales thermiques.
- BPG 2 pour les fours de cimenterie.
- BPG 3 pour les fours à chaux.
- SBS 1 pour les centrales thermiques alimentées en lignite.
- SBS 2 pour les fours de cimenterie déjà capables de consommer de l'antracite.

| BPG 1 power plants | BPG 2 cement kilns | BPG 3 lime kilns | SBS 1 power plants lignite | SBS 2 cement kilns hard coal |
|---|--|--|---|------------------------------------|
| residues from paper production rejects, punchings, photography paper, blocks, wet-strength paper, cellulose cloths etc. | paper wastes as BPG 1, plastics - resins - polyacrylic - polyester - polyolefine - PUR - etc. fibre fabrics carpets etc. | low ash plastics - resins - polyacrylic - polyester - polyolefine - PUR - etc. | different high-calorific fractions from -MSW -demolition wastes | see SBS 1 |

Figure 27 : Catégories de CSR selon les standards du RAL-GZ 724

| Parameter | Unit | BPG 1 power plants | BPG 2 cement kilns | BPG 3 lime kilns | SBS 1 power plants (BC) | SBS 2 cement kilns/ power plants (HC) |
|---|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------|--|
| NCV | MJ/kg | 16 - 20 | 20 - 24 | 23 - 27 | 13 - 18 | 18 - 23 |
| Cl | % | < 1,0 | < 1,0 | < 1,0 | < 0,7 | < 1,0 |
| F | % | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 |
| H ₂ O | % | < 35 | < 20 | < 12,5 | < 35 | < 20 |
| S | % | < 0,2 | < 0,3 | < 0,3 | < 0,5 | < 0,8 |
| Ash | % | < 20 | < 15 | < 9 | < 20 | < 15 |
| As | mg/kg ds | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 | < 10 |
| Be | mg/kg ds | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 |
| Cd | mg/kg ds | < 9 | < 9 | < 9 | < 9 | < 9 |
| Co | mg/kg ds | < 12 | < 12 | < 12 | < 12 | < 12 |
| Cr | mg/kg ds | < 120 | < 120 | < 120 | < 250 | < 250 |
| Cu | mg/kg ds | < 400 | < 400 | < 400 | < 1.000 | < 1.000 |
| Hg | mg/kg ds | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | < 1,0 | < 1,0 |
| Mn | mg/kg ds | < 100 | < 100 | < 100 | < 400 | < 400 |
| Ni | mg/kg ds | < 50 | < 50 | < 50 | < 160 | < 160 |
| Pb | mg/kg ds | < 100 | < 100 | < 100 | < 400 | < 400 |
| Sb | mg/kg ds | < 120 | < 120 | < 120 | < 120 | < 120 |
| Se | mg/kg ds | < 4 | < 4 | < 4 | < 5 | < 5 |
| Sn | mg/kg ds | < 70 | < 70 | < 70 | < 70 | < 70 |
| Te | mg/kg ds | < 4 | < 4 | < 4 | < 5 | < 5 |
| Tl | mg/kg ds | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 | < 1 |
| V | mg/kg ds | < 15 | < 15 | < 15 | < 25 | < 25 |
| (*) : values for digestion with aqua regia in a closed microwave system | | | | | | |
| REMONDIS GmbH | ThermWert | | | Dr. Glorius | Spezifikation.xls, Stand: 01.01.2007 | |

Tableau 25 : Caractéristiques exigées des CSR selon le RAL-GZ 724

3.6.2.3. Italie

En Italie, deux niveaux de qualité ont été définis dans la norme UNI 9903.

| Caractéristiques | | RDF high quality | RDF normal quality |
|------------------|------------|--------------------|--------------------|
| | | UNI 9903 (Table 2) | UNI 9903 (Table 1) |
| Pci sec | kJ/kg | > 20 000 | > 15 000 |
| Humidité | % brut | < 18 | < 25 |
| Chlore | % sec | < 0,7 | < 0,9 |
| Soufre | % sec | < 0,3 | < 0,6 |
| Cendres | %sec | < 15 | < 20 |
| Chrome | mg / kg dm | < 70 | < 100 |
| Cuivre | mg / kg dm | < 50 | < 300 |
| Manganèse | mg / kg dm | < 200 | < 400 |
| Nickel | mg / kg dm | < 30 | < 40 |
| Arsenic | mg / kg dm | < 5 | < 9 |
| Cadmium | mg / kg dm | < 3 | < 7 |
| Mercuré | mg / kg dm | < 1 | |
| Plomb | mg / kg dm | < 100 | < 200 |

Tableau 26 : Caractéristiques exigées des CSR selon la norme UNI 9903

3.6.2.4. Finlande

En Finlande, le système de contrôle qualité SFS 5875 a défini trois catégories.

| | | Catégories | | |
|--------------------|------------|-----------------------------|-------|-------|
| Caractéristiques | unité | I | II | III |
| Chlore | % massique | < 0,15 | < 0,5 | < 1,5 |
| Soufre | % massique | < 0,2 | < 0,3 | <0,5 |
| Azote | % massique | < 1,0 | < 1,5 | < 2,5 |
| Potassium + sodium | % massique | < 0,2 | < 0,4 | < 0,5 |
| Aluminium | % massique | dispositions au cas par cas | | |
| Mercure | mg/kg | < 0,1 | < 0,2 | < 0,5 |
| Cadmium | mg/kg | < 1,0 | < 0,4 | < 5,0 |

Tableau 27 : Caractéristiques exigées des CSR selon la norme SFS 5875

Remarque : Comparée aux réglementations allemande et italienne évoquées plus haut, la réglementation finlandaise semble être plus opérationnelle. Elle introduit des valeurs pour les alcalins (K et Na), des éléments susceptibles de générer des corrosions. Les métaux lourds volatils comme le mercure et le cadmium font l'objet de valeurs limites ; ce qui est normal puisque les coûts de traitement de fumées seront fonction des concentrations dans les combustibles. Enfin, les métaux lourds réfractaires ne sont pas assujettis à des plafonds ; ce qui là aussi est cohérent avec le fait que dans tous les cas, un système d'élimination de ces éléments doit être prévu.

3.6.3. Conclusions de la tâche de caractérisation des CSR

La tâche 1.2 de l'étude a montré une grande diversité des CSR produits sur le territoire français, avec des caractéristiques physiques et chimiques qui varient sur de très larges plages.

Pour favoriser la valorisation des CSR dans des chaudières de 1 à 20 MW, il est important qu'existe une méthode de classement qui permette à l'utilisateur de choisir le ou les combustibles adaptés aux solutions technologiques qu'il veut mettre en œuvre (type d'équipement de combustion, type de traitement de fumées, etc.).

En première approche, les critères qui ont été retenus sont listés ci-dessous. Ce sont des critères essentiellement liés aux technologies mises en œuvre pour la combustion de produits solides.

- Pouvoir calorifique : un seul et même système de combustion ne permettra pas d'utiliser des combustibles dont le Pci varie de 10 à 25 MJ/kg (ou qui même parfois se situe en dehors de cette plage).
- Taux de cendres : Ce critère est en grande partie lié au précédent (ou plutôt l'inverse). La gestion des cendres avec un combustible qui a 5 % de matières minérales n'est pas la même que celle d'un combustible qui en a 45 %. Les équipements sont dimensionnés différemment. Il est donc a priori nécessaire d'introduire une différenciation des CSR à ce niveau.
- Teneur en azote : D'une manière générale, le respect des VLE relatives aux oxydes d'azote (cf. Tableau 22 et Tableau 23) est géré de la façon suivante :
 - Cas 1 : L'équipement de combustion, notamment s'il est bas-NOx, permet de ne pas dépasser la VLE. C'est le cas avec les combustibles ayant une faible teneur en azote.
 - Cas 2 : Il n'est pas possible de garantir le respect de la VLE à toutes les allures de la chaudière, mais le taux d'abattement requis pour être conforme à la réglementation n'est pas très important et est typiquement inférieur à 50 %. On peut alors mettre en œuvre des solutions du type SNCR.
 - Cas 3 : La teneur en azote du CSR est très importante, supérieure à 1,5 % typiquement. Les solutions « foyer bas-NOx » et/ou « SNCR » ne sont plus suffisantes pour satisfaire la réglementation. Il faut passer à la solution SCR qui représente un coût nettement supérieur à ceux des deux solutions précédentes.
- Teneur en éléments acides, principalement soufre et chlore (le fluor et le brome sont aussi présents, mais à des teneurs un à deux ordres de grandeur inférieures à celles du soufre et du chlore). Même dans le cas de CSR à faibles teneurs en soufre et en chlore, les taux d'abattement requis sont très élevés (plus de 90 % pour le soufre et plus de 98 % pour le chlore. Dans tous les cas, il faudra des systèmes d'épuration de fumées, car le captage des polluants acides dans la chambre de combustion (notamment dans le cas des foyers à lit fluidisé) ne sera jamais suffisant pour satisfaire aux VLE. Par ailleurs, ces systèmes d'épuration de fumées devront être extrêmement performants. La différenciation pourra peut-être se faire sur la solution

technique mise en œuvre (épuration en voie sèche versus épuration en voie humide, sachant que cette dernière est en principe plus efficace, mais elle est aussi plus chère). Pour l'exploitant, il y aura aussi une différenciation au niveau des quantités d'absorbant utilisées et donc des coûts d'exploitation (nota : ce poste « absorbant » risque d'être non négligeable).

- Teneur en métaux lourds : Il pourrait y avoir aussi une différenciation à ce niveau, fonction notamment des possibilités d'élimination et de valorisation des cendres : valorisation « matière », décharge pour déchets inertes, décharge pour déchets dangereux, etc. Cette différenciation ne pourra se faire que sur la base de travaux menés sur les cendres : caractérisation chimique des différents flux de cendres (cendres sous foyer, cendres volantes), tests de lixiviation, etc. D'autre part, la teneur en métaux lourds volatils (Hg, Cd, etc.) peut également avoir un impact significatif sur les coûts de fonctionnement du système d'épuration de fumées.

A partir des analyses des teneurs en soufre, en chlore, en azote et en calcium effectuées sur l'ensemble des CSR étudiés en tâche 1, on peut faire une première estimation des concentrations en polluants dans les fumées après l'étape de combustion, et ainsi avoir une idée des taux d'abattement requis pour satisfaire aux exigences réglementaires.

Rappel : Les polluants acides comme le soufre et les halogènes (Cl, Br, etc.) sont susceptibles d'être en partie absorbés lors de la combustion par certains éléments chimiques présents dans les cendres, le calcium notamment. Avec cet élément, il se forme par exemple du sulfate de calcium CaSO_4 ou du chlorure de calcium CaCl_2 qu'on retrouve avec les cendres. Le processus d'absorption est optimal si la température dans la zone de combustion est comprise entre 850 et 950 °C et si le milieu est oxydant (excès d'air) ; ce qui évite la décomposition thermique des sulfates et/ou des chlorures formés (par exemple, le sulfate de calcium CaSO_4 est stable thermiquement jusqu'à 1400 °C en atmosphère oxydante, mais ce plafond de température peut être abaissé à 1000 °C, voire moins, en milieu réducteur, lorsque l'on a localement des teneurs en CO de quelques milliers de mg/Nm^3). Ainsi, ledit processus d'absorption se développe bien dans les foyers à lit fluidisé ou assimilés, car la température y est bien contrôlée et inférieure à 1000 °C. Par contre, il est nettement moins performant dans le cas des foyers à grille, compte tenu des importants gradients de température qui y règnent.

Le tableau qui suit (Tableau 28) fournit une estimation des concentrations en SO_2 , HCl et NO_x pour les teneurs minimales et maximales en soufre, chlore et azote observés dans les CSR, après s'être fixé une teneur en calcium donnée dans lesdits CSR (nota : il s'agit d'estimation car l'incertitude sur les valeurs fournies peut être de 10 %, voire même un peu plus dans certains cas. Pour être plus précis, il faudrait partir de la composition élémentaire de chaque CSR et être sûr que cette composition élémentaire est vraiment représentative).

| Teneur du CSR en hétéro-élément (% massique) | Emissions théoriques (sans captage) en mg/Nm^3 à 6 % d' O_2 | Ratio molaire moyen |
|--|---|---------------------|
| S = 0,25 | $\text{SO}_2 = 750$ | Ca/S = 6 |
| S = 1 | $\text{SO}_2 = 3\ 000$ | Ca/S = 1,5 |
| Cl = 0,5 | HCl = 800 | Ca/Cl = 7 |
| Cl = 3 | HCl = 4 800 | Ca/Cl = 1,1 |
| N = 0,5 | $\text{NO}_x = 350$ | |
| N = 2 | $\text{NO}_x = 850$ | |

Tableau 28 : Estimation des émissions polluantes théoriques lors de la combustion des CSR

Rappel : Le ratio molaire moyen est le rapport entre la quantité de calcium sur la quantité de soufre ou chlore présents dans le CSR, ces deux quantités étant exprimées en moles (et non en % massiques).

On constate tout d'abord que les concentrations en polluants à l'issue de l'étape de combustion sont plutôt élevées par rapport aux exigences réglementaires. Par exemple, dans le cas d'un CSR à faible teneur en soufre (0,25 %) qui serait utilisé dans un foyer à lit fluidisé, il devrait être possible de garantir la VLE de 400 mg/Nm^3 (cf. Tableau 3) ; ce qui exige un taux d'abattement de l'ordre de 50 %, alors qu'avec les rapports molaires Ca/S très élevés du milieu, on doit normalement pouvoir capter 90 % du SO_2 . Dans le cas du CSR à 1 % de soufre, la situation est plus critique. Le taux d'abattement nécessaire est de plus de 85 %, tandis que le rendement de captation du SO_2 sera inférieur à 75 – 80 %, avec la solution du lit fluidisé circulant, qui est a priori la plus performante à ce jour.

En restant sur cette même problématique du soufre, il est peu probable qu'on puisse atteindre des taux de rétention de 50 %, avec les chaudières à grille dans leur configuration actuelle ; ce qui signifie que quel que soit le CSR, un dispositif de traitement du SO_2 est impératif.

S'agissant du chlore, les taux d'abattement exigés sont beaucoup plus élevés, compte tenu de la valeur très basse de la VLE. Dans le cas le plus favorable (faible teneur en chlore du CSR), il est déjà de plus de 98 %, tandis que

dans celui du CSR très chloré, il culmine à 99,8 % ! Ce sont des taux qu'on est très loin d'atteindre avec les foyers à lit fluidisé, car la rétention des halogènes par les agents calciques est nettement moins efficace que celle du soufre, sans parler des foyers à grille qui ont des capacités de rétention encore plus faibles. Des traitements de fumées très efficaces sont nécessaires pour éliminer HCl.

Enfin, concernant les oxydes d'azote, il est possible que les CSR à faible teneur (0,5 %) n'exige pas de système d'épuration de fumées et qu'un foyer à grille bas-NOx ou un foyer à lit fluidisé puisse suffire (nota : cela reste toutefois à valider expérimentalement). Par contre, un système DeNOx du type SNCR ou SCR sera nécessaire avec les CSR fortement azotés.

3.6.4. Proposition de nomenclature française

Pour les différents critères listés plus haut, nous avons défini des valeurs seuil :

- Pouvoir calorifique sur brut. 4 plages ont été définies :
 - Pci < 12 MJ/kg. Il s'agit de CSR à faible pouvoir calorifique mis en œuvre dans des foyers adiabatiques, sans échange de chaleur, et éventuellement avec un préchauffage de l'air de combustion. C'est également la valeur limite préconisée par les Pouvoirs publics.
 - Pci compris entre 12 et 16 MJ/kg. Les CSR ont une valeur énergétique inférieure aux biomasses traditionnelles.
 - Pci compris entre 16 et 20 MJ/kg. Ce sont des CSR avec des Pci similaires à ceux des biomasses.
 - Pci > 20 MJ/kg. Ces CSR ont un pouvoir calorifique supérieur à ceux des biomasses. Ils doivent être brûlés dans des foyers refroidis.
- Teneur en cendres sur sec. Là également 4 catégories ont été définies :
 - Taux < 15 %. Cette plage correspond à des CSR qui ont des taux de cendres similaires à ceux des charbons ou des biomasses à taux élevé de matières minérales (exemples : pailles, écorces, etc.). Cela correspond également plus ou moins à la limite acceptable d'une chaudière à grille.
 - Taux de cendres compris entre 15 et 25 %. Ce sont des taux qui sont supérieurs à la plupart des combustibles solides traditionnels.
 - Taux de cendres compris entre 25 et 35 %. Ce sont des taux élevés qui nécessitent des technologies de combustion spécialement adaptées.
 - Taux > 35 %. Ce sont des CSR qui ont des taux de cendres exceptionnellement élevés, que l'on ne retrouve qu'avec des combustibles très particuliers (exemple : schlamms = sous-produit de l'industrie charbonnière issu des opérations de tri et de lavage).
- Teneur en azote sur sec. Les 4 catégories retenues sont :
 - Taux < 0,5 %. Avec les CSR de ce type, on devrait éviter l'utilisation de systèmes de traitement de fumées DeNOx, tel que vu plus haut.
 - Taux compris entre 0,5 et 1,5 %. Dans ce cas, il faudra implanter des systèmes DeNOx par SNCR.
 - Taux compris entre 1,5 % et 3 %. Le taux est supérieur à la moyenne des charbons. La solution DeNOx par SCR est quasiment inévitable.
 - Taux > 3 %. Les taux sont très élevés et imposent obligatoirement une DeNOx avec des consommations importantes de réactifs.
- Teneur en halogènes (chlore, fluor et brome) sur sec. Le brome et le fluor étant généralement présent dans des teneurs inférieures à 0,1 %, c'est surtout le taux de chlore qui définit la teneur totale en halogène. Les 4 plages retenues sont :
 - Taux < 0,5 %. Le CSR se rapproche d'une qualité « biomasse ».
 - Taux compris entre 0,5 et 1 %. Le taux est plus élevé que la plupart des biomasses et impose la mise en place de traitement de fumées adéquats.
 - Taux compris entre 1% et 2 %. Le taux est élevé et nécessite des traitements de fumées avec des rendements élevés.
 - Taux > 2 %. Le combustible n'est plus considéré comme un CSR par la réglementation française.
- Teneur en soufre sur sec. Pour ce critère, on a raisonné par analogie avec les combustibles classiques (fuels lourds et charbons principalement), en définissant des combustibles peu chargés en soufre (taux inférieur à 0,25 %), des combustibles moyennement chargés en soufre (entre 0,25 et 0,5 %), des combustibles assez chargés (entre 0,5 et 1 %) et des combustibles très souffrés (taux supérieur à 1 %).

Nous avons également choisi d'intégrer la notion de granulométrie et de masse volumique apparente :

- Masse volumique apparente. Les 4 catégories retenues sont :
 - $\rho < 100 \text{ kg/m}^3$. Le CSR est très léger et pose des difficultés de manutention (fort voûtage dans les trémies) et de déplacement sur des grilles de combustion (le combustible n'avance pas bien et/ou de manière erratique).
 - ρ compris entre 100 et 350 kg/m^3 . Le combustible pose surtout des problèmes de manutention et de convoyage.
 - ρ compris entre 350 et 500 kg/m^3 . Le CSR se rapproche des combustibles solides classiques et pose moins de difficultés à être stocké et convoyé.
 - $\rho > 500 \text{ kg/m}^3$. Le CSR présente une bonne masse volumique pour un combustible solide et permet de faire des économies de stockage et transport.
- Granulométrie. Les 4 catégories retenues sont :
 - Taille des objets inférieure à 30 mm. Le CSR peut aller dans tout type de foyer.
 - Taille des objets comprise entre 30 et 60 mm. Le CSR a une granulométrie proche du bois plaquette pour petite chaudière (< 1 MW).
 - Taille des objets comprise entre 60 et 100 mm. Le CSR a une granulométrie proche du bois plaquette pour chaudière industrielle (> 1 MW).
 - Taille des objets supérieure à 100 mm. Les équipements nécessitent des dispositions particulières pour acheminer et brûler les CSR.
 - En outre, tous les CSR doivent avoir un taux de fines (particules de moins de 100 μm) inférieur à 2 % en masse.

Sur la base de cette première nomenclature, on a positionné chacun des 17 échantillons de CSR étudiés (

| | | Moyenne CSR | ECH001 | ECH002 | ECH005 | ECH006 | ECH007 | ECH008 | ECH009 | ECH010 | ECH012 |
|------------------------|---|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pci (MJ/kg) | | | | | | | | | | | |
| < 12 | 5 | | | | | | | | | | |
| 12-16 | 3 | C | B | A | B | D | D | B | C | C | D |
| 16-20 | 5 | | | | | | | | | | |
| >20 | 3 | | | | | | | | | | |
| Cl + F + Br | | | | | | | | | | | |
| < 0,5 | 1 | | | | | | | | | | |
| 0,5-1 | 6 | C | C | A | D | B | B | C | C | B | B |
| 1-2 | 8 | | | | | | | | | | |
| > 2 | 1 | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | | |
| < 0,25 | 4 | | | | | | | | | | |
| 0,25-0,5 | 7 | B | A | A | B | B | C | A | C | B | A |
| 0,5-1 | 5 | | | | | | | | | | |
| > 1 | 0 | | | | | | | | | | |
| N | | | | | | | | | | | |
| < 0,5 | 1 | | | | | | | | | | |
| 0,5-1,5 | 8 | B | C | A | B | C | C | C | B | B | B |
| 1,5-3 | 7 | | | | | | | | | | |
| > 3 | 0 | | | | | | | | | | |
| Cendres | | | | | | | | | | | |
| < 15 | 4 | | | | | | | | | | |
| 15-25 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 |
| 25-35 | 2 | | | | | | | | | | |
| > 35 | 5 | | | | | | | | | | |
| Densité (kg/m3) | | | | | | | | | | | |
| < 100 | 9 | | | | | | | | | | |
| 100-350 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 |

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 350 -500 | 2 | | | | | | | | | | |
| > 350 | 0 | | | | | | | | | | |
| Granulométrie | | | | | | | | | | | |
| < 30 | 11 | | | | | | | | | | |
| 30-60 | 0 | / | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 60-100 | 0 | | | | | | | | | | |
| > 100 | 5 | | | | | | | | | | |

Tableau 30).

La symbolique des couleurs du tableau est la suivante :

- Couleur verte : Critère qui ne pose pas de problème vis-à-vis de la combustion.
- Couleur orange: Critère qui complique l’usage des CSR, notamment en regard des questions environnementales.
- Couleur rouge : Critère qui correspond à une situation de combustion complexe et qui peut imposer des systèmes de traitement de fumées importants.

Le PCI, la somme des halogènes, le soufre et l’azote sont représentés par une lettre majuscule: A, B, C ou D (A étant la meilleur note et D la moins bonne). Les deux derniers critères, la masse volumique, la granulométrie et le taux de cendres, sont représentés par des chiffres : 1, 2, 3 ou 4 (1 étant la meilleur note et 4 la moins bonne).

Les seuils sont récapitulés dans le tableau suivant :

| Critère | Catégorie A/1 | Catégorie B/2 | Catégorie C/3 | Catégorie D/4 |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PCI brut (MJ/kg) | > 20 | 16-20 | 12-16 | < 12 |
| Total halogènes (% sec) | < 0,5 | 0,5 - 1 | 1 - 2 | > 2 |
| Soufre (% sec) | <0,25 | 0,25 - 0,5 | 0,5 - 1 | > 1 |
| Azote (% sec) | < 0,5 | 0,5 -1,5 | 1,5 - 3 | > 3 |
| Cendres (% sec) | < 15 | 15 - 25 | 25 - 35 | > 35 |
| Masse volumique (kg/m3) | > 350 | 350 -500 | 100 - 350 | < 100 |
| Granulométrie (mm) | < 30 | 30 - 60 | 60 – 100 | > 100 |

Tableau 29 : Récapitulatif des seuils de la nomenclature

La figure ci-dessous donne un exemple de classement pour l'échantillon ECH 002.

| Critère | ECH002 |
|---------------------------------------|--------|
| PCI brut (MJ/kg) | 24,6 |
| Chlore + fluor + brome (% MS) | 0,49 |
| Soufre (% MS) | 0,24 |
| Azote (% MS) | 0,49 |
| Cendres (% MS) | 16,5 |
| Masse volumique (kg/Nm ³) | 88,4 |
| Granulométrie (mm) | > 100 |

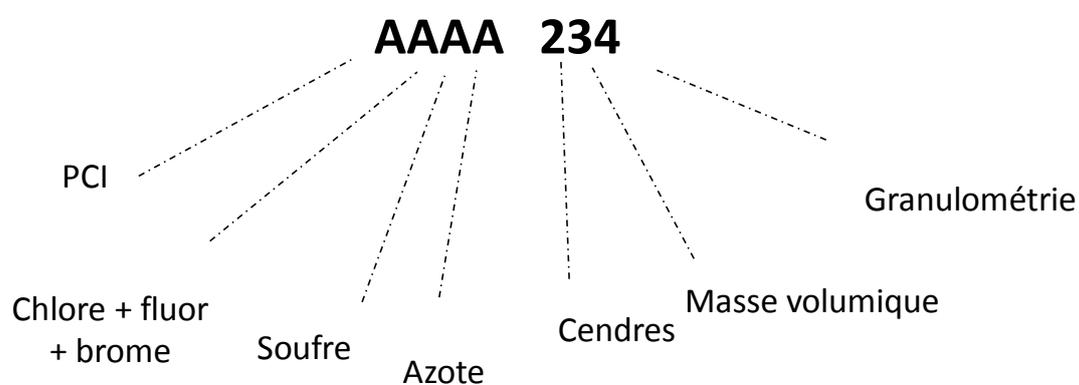


Figure 28 : Exemple de classement d'un échantillon suivant la nomenclature

| | | Moyenne CSR | ECH001 | ECH002 | ECH005 | ECH006 | ECH007 | ECH008 | ECH009 | ECH010 | ECH012 | ECH013 | ECH014 | ECH015 | ECH016 | ECH017 | ECH018 | ECH019 | Charbon | Paille (ADEME 2006) | Fioul lourd | Pet coke | Lignite allemand |
|------------------------|----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------------------|-------------|----------|------------------|
| Pci (MJ/kg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 12 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12-16 | 3 | C | B | A | B | D | D | B | C | C | D | D | B | A | B | C | D | A | A | A | A | A | B |
| 16-20 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| >20 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cl + F + Br | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5-1 | 6 | C | C | A | D | B | B | C | C | B | B | B | C | C | C | C | B | C | A | B | | | |
| 1-2 | 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| S | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 0,25 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,25-0,5 | 7 | B | A | A | B | B | C | A | C | B | A | C | C | B | B | C | B | B | C | C | A | C | C |
| 0,5-1 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,5-1,5 | 8 | B | C | A | B | C | C | C | B | B | B | C | B | B | C | C | B | B | B | C | A | B | A |
| 1,5-3 | 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 3 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cendres | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 15 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15-25 | 5 | 3 | 4 | 2 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 25-35 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 35 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Densité (kg/m3) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 100 | 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100-350 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3 | 2 | 4 | | 3 | 3 | | |
| 350-500 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 350 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Granulométrie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| < 30 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30-60 | 0 | / | 4 | 4 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 4 | | | | | |
| 60-100 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 100 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tableau 30 : Positionnement des CSR étudiés relativement à l'ébauche de nomenclature

Remarque : la deuxième colonne à côté des valeurs de chaque critère, donne le nombre d'échantillons compris dans la fourchette de valeurs indiquée.

3.6.5. Conclusion

Une ébauche de nomenclature des CSR a été établie, principalement basée sur l'adéquation entre les CSR d'une part et les équipements de combustion associés à leur système de stockage/transport/dosage du combustible, ainsi qu'à leur dispositif d'épuration des fumées d'autre part. Les critères retenus pour cette nomenclature sont :

- Le Pci avec 4 plages :
 - $P_{ci} < 12 \text{ MJ/kg}$.
 - $12 \text{ MJ/kg} < P_{ci} < 16 \text{ MJ/kg}$.
 - $16 \text{ MJ/kg} < P_{ci} < 20 \text{ MJ/kg}$.
 - $P_{ci} > 20 \text{ MJ/kg}$.
- La somme des halogènes :
 - « Cl + F + Br » < 0,5 %.
 - $0,5 \% < \text{« Cl + F + Br »} < 1 \%$.
 - $1 \% < \text{« Cl + F + Br »} < 2 \%$.
 - « Cl + F + Br » > 2 %.
- La teneur en soufre :
 - $S < 0,25 \%$.
 - $0,25 \% < S < 0,5 \%$.
 - $0,5 \% < S < 1 \%$.
 - $S > 1 \%$.
- La teneur en azote :
 - $[N] < 0,5 \% \text{ masse}$.
 - $0,5 \% < [N] < 1,5 \%$.
 - $1,5 \% < [N] < 3 \%$.
 - $[N] > 3 \%$.
- Le taux de cendres Tx avec 4 catégories :
 - $T_x < 15 \%$.
 - $15 \% < T_x < 25 \%$.
 - $25 \% < T_x < 35 \%$.
 - $T_x > 35 \%$.
- La masse volumique :
 - $\rho < 100 \text{ kg/m}^3$.
 - $100 \text{ kg/m}^3 < \rho < 350 \text{ kg/m}^3$.
 - $350 \text{ kg/m}^3 < \rho < 500 \text{ kg/m}^3$.
 - $\rho > 500 \text{ kg/m}^3$.
- La granulométrie :
 - $D_{\text{moy}} < 30 \text{ mm}$
 - $30 \text{ mm} < D_{\text{moy}} < 60 \text{ mm}$
 - $60 \text{ mm} < D_{\text{moy}} < 100 \text{ mm}$
 - $D_{\text{moy}} > 100 \text{ mm}$

Comparativement aux nomenclatures d'autres pays européens citées plus haut, on peut faire les commentaires suivants :

- Pouvoir calorifique : 3 plages ont été définies, alors que la nomenclature allemande en prévoit 5, mais pour un champ d'application plus large que celui de la présente étude, et que la nomenclature italienne se limite à 2.
- Taux d'azote : L'ébauche de nomenclature prend en compte ce critère. Seule la nomenclature finlandaise considère aussi ce paramètre.
- Les polluants halogénés sont regroupés pour accorder le critère à la réglementation française en cours d'élaboration.
- Les métaux lourds ne sont pas pris en compte dans le projet de nomenclature, car on n'a pas d'élément de différenciation clair à ce jour. A priori, les métaux lourds imposent dans tous les cas un dispositif d'épuration, mais celui-ci peut travailler sur une gamme étendue de concentrations. Par ailleurs, s'agissant du mercure, il peut y avoir des coûts de fonctionnement élevés si les teneurs en ce polluant sont fortes et donc justifier l'introduction

d'un critère de différenciation. Or, les valeurs de concentration relevées pour l'ensemble des CSR étudiées montrent des chiffres plutôt faibles. A ce jour, l'introduction d'un critère ne semble donc pas pertinente.

- L'ébauche de nomenclature est la seule à introduire un critère relatif à la partie amont de la chambre de combustion, la masse volumique.

4. Conclusions / Perspectives

4.1. Tâche 1

De la mise à jour de l'Etat de l'art relative aux CSR, il ressort en premier lieu que la définition même des CSR manque de clarté, que ce soit au niveau national ou au niveau européen. Cela a pour conséquence un manque de lisibilité ; ce qui contribue à la méfiance des Pouvoirs publics et des citoyens vis-à-vis de la valorisation thermique des CSR. En outre, cela rend également difficile la collecte et l'interprétation des données, en particulier sur les volumes des gisements existants et sur les méthodes de valorisation.

Concernant la qualité des CSR, une norme a été mise en place mais reste moyennement appliquée et ne renseigne que partiellement l'utilisateur sur le contenu réel des CSR. En outre, elle est assez contraignante et par conséquent la plupart des CSR sont classés dans les catégories les plus défavorables ; ce qui n'est pas forcément représentatif des possibilités et des performances du produit en combustion.

En termes réglementaires, la valorisation des CSR reste assez difficile à mettre en oeuvre, que ce soit en France ou en Europe. Aujourd'hui, les principales voies restent la cimenterie et les incinérateurs d'OM. Les autres voies de valorisation sont très limitées et restent encore à développer.

Enfin, vis-à-vis du marché européen, la plupart des pays ont pris conscience de l'intérêt de la valorisation thermique des CSR dans un cadre respectueux de l'environnement. Les approches peuvent varier en fonction des pays. Quand certains y voient une occasion de substituer des combustibles traditionnels par des combustibles à bas coût, d'autres profitent de ce nouveau marché en développement pour diminuer les quantités enfouies chaque année, quitte à véhiculer les CSR sur plusieurs milliers de km avant d'être valorisés.

Comme il a été souligné dans l'état de l'art (Tâche 1.1), il n'y a pas un mais des CSR. Cela commence par des schémas de production différents d'un site à un autre. Certains producteurs de CSR ont un procédé d'élaboration totalement fatal. C'est-à-dire qu'ils trient leur flux entrant pour maximiser la valorisation matière puis obtiennent un produit en bout de ligne pour lequel ils recherchent une valorisation en combustion. Certains y ajoutent des étapes supplémentaires pour tenter d'y extraire les fractions indésirables comme les matières minérales par exemple. De l'autre côté des sites privilégient évidemment toujours la valorisation matière mais traitent d'avantage le CSR comme un combustible plutôt que comme un résidu. Il en résulte notamment une recherche d'optimisation de la formulation par ajout de matière combustible comme du bois broyé. Cependant en règle générale, la qualité dépend surtout des exigences des clients (principalement des cimentiers), qui déterminent eux-mêmes le cahier des charges (PCI, taux de chlore et de soufre, granulométrie, humidité, ...)

Au cours de l'étude, 16 échantillons ont été analysés et peuvent être regroupés en 4 catégories :

- Les DIB et encombrants.
- Les OM.
- Les résidus de broyage.
- Les mélanges OM/DIB.

L'analyse physique a montré que les CSR sont composés d'un mélange de différents matériaux avec en tête du bois (broyats de meubles et/ou de palettes), des plastiques souples (emballages, gaines) et durs (coques), des papiers/cartons et des textiles. Ils sont en général peu pollués par des gravats minéraux. Mais certains contiennent encore un peu trop de métaux (quelques pourcents en masse), notamment du cuivre ou de l'aluminium. La granulométrie est assez bien maîtrisée avec des tailles de particules qui sont la plupart du temps inférieure à 30 mm. La densité des produits est assez faible avec des valeurs comprises généralement entre 75 et 250 kg/m³.

Quant à l'analyse élémentaire, elle indique que les CSR sont des combustibles avec des PCI (bruts) compris entre 7 et 25 MJ/kg, dont une majorité entre 15 et 20, c'est-à-dire équivalents ou supérieurs à des bois à moins de 15 % d'humidité. Les teneurs en cendres sont assez importantes avec une moyenne (sur sec) de 17 % pour les DIB et mélanges à bases de DIB, 37,5 % pour les résidus de broyages et un peu plus de 40 % pour les OM. Ce sera un élément déterminant dans le choix des technologies de combustion (voir rapport tâche 2). Enfin, les teneurs en azote et soufre sont proches de celles des charbons et le chlore est compris entre 0,7 et 1,7 % avec une moyenne à 1,1 %. Cela conduira probablement

à la mise en place sur les installations de combustion, d'équipements de traitements de fumées, type DeNOX, filtre à manches, etc. Enfin, certains CSR ont été analysés 2 fois à 3 mois d'intervalle et les compositions sont très stables (moins de 10 % de variation sur les différents éléments).

Les analyses physiques couplées aux analyses élémentaires ont également permis de déterminer des corrélations entre certains éléments et les matériaux, comme par exemple les origines du chlore, du soufre et de l'azote. Ainsi cela permettra aux producteurs de CSR d'améliorer la qualité de leurs produits en essayant d'optimiser l'extraction de certains matériaux comme les mousses de polyuréthane ou encore les films métallisés.

4.2. Tâche 2

Sur la base des analyses physiques et chimiques réalisées sur les CSR objets de la présente étude, il a été entrepris une évaluation de la capacité de 2 systèmes de combustion à brûler lesdits CSR :

- La chaudière à grille, car c'est la technologie la plus répandue dans le parc français actuel des chaudières à combustibles solides pour des puissances allant de 1 à 20 MW (donc parc essentiellement « biomasse », puisque le charbon a quasiment disparu dans cette gamme de puissances).
- La chaudière à lit fluidisé, car c'est une des solutions alternatives qui semblent les mieux adaptées à l'usage des CSR, même si cette solution représente aujourd'hui moins de 1 % du parc des chaudières.

Cette analyse « papier », consolidée par des informations obtenues auprès d'acteurs du secteur ainsi que par les résultats des essais de combustion conduits sur la chaudière pilote de COMPTE-R, montre que :

- Un traitement complet des fumées est impératif dans tous les cas de figure. La configuration de ce traitement de fumées (choix du système DeNOx, choix du système d'élimination des polluants acides, etc.) sera fonction des teneurs en soufre et halogènes dans les CSR.
- La chaudière à grille n'est envisageable pour brûler des CSR que si ceux-ci ont des teneurs en cendres inférieures à 15 – 20 % et qu'ils ont un contenu en plastiques et pneumatiques faible. Les éléments métallisés sont aussi à proscrire. La configuration du foyer de ce type de chaudière est également à adapter (architecture de grille, localisation des surfaces d'échange de chaleur, distribution des airs de combustion, etc.), de même que la partie amont du foyer (stockage, convoyage et dosage), pour chaque type de CSR que l'on voudra utiliser dans ces chaudières. D'une manière générale, il n'existera pas de chaudière capable d'employer tous types de CSR.
- Les investissements à prévoir dans les installations capables de brûler des CSR sont nettement plus importants que ceux requis pour des équipements opérant avec de la biomasse (l'investissement risque d'être multiplié par un facteur 3 à minima).

S'agissant du marché des CSR en chaudière, il apparaît que :

- La plage de puissances à viser serait plutôt 5 – 25 MWth que 1 – 20 MWth, tel que défini au démarrage de la présente étude.
- Si les constructeurs de chaudières se montrent particulièrement actifs pour développer l'usage des CSR en chaudière, l'enthousiasme semble aujourd'hui un peu moins partagé du côté des utilisateurs potentiels de ces nouveaux combustibles, qui considèrent ceux-ci plutôt dans un horizon de moyen et long terme.
- Les freins sont en premier lieu réglementaire ; ce qui n'est pas contestable, puisque pour l'instant, les Pouvoirs publics n'ont édicté aucun texte qui permettrait de sortir les CSR de l'ensemble des contraintes appliquées aux déchets.
- Aujourd'hui, le retour d'expérience sur l'usage des CSR en chaudière est limité. Un important travail de développement et de démonstration reste à faire au niveau des chaudières, mais il y a aussi des attentes au niveau du combustible lui-même, et de la capacité des producteurs à fournir des produits de qualité constante et débarrassés des éléments gênants comme les films métallisés par exemple.

4.3. Tâche 3

Une ébauche de nomenclature des CSR a été établie, principalement basée sur l'adéquation entre les CSR d'une part et les équipements de combustion associés à leur système de stockage/transport/dosage du combustible, ainsi qu'à leur dispositif d'épuration des fumées d'autre part. Les critères retenus pour cette nomenclature sont le PCI, la somme des halogènes (chlore + fluor + brome), le taux de soufre, le taux de cendres, la teneur en azote, la masse volumique apparente et la granulométrie.

Pour consolider cette nomenclature, il sera judicieux de recueillir l'opinion des acteurs du domaine, en particulier :

- Les constructeurs de chaudières. Avec ces acteurs, il faudra notamment valider le critère « Pci », les valeurs limites qui ont été fixées, savoir si un découpage plus détaillé est nécessaire ou pas, ou encore s'il faut raisonner par type de technologie de combustion. Il en est de même pour le taux de cendres. Les échanges pourront également porter sur le critère « masse volumique », pour savoir si cet indicateur est pertinent pour la partie « stockage / transport / dosage » du combustible ou si d'autres caractéristiques sont à prendre en compte.
- Les fabricants de matériel d'épuration de fumées. Le nombre de combinaisons de technologies pour traiter les fumées est assez important à ce jour. Avec ces fabricants, un premier but pourrait être d'affiner les choix technologiques. La question des métaux lourds est aussi à traiter, pour valider ou non le fait que nous n'ayons pas retenu de critère de différenciation.
- Les exploitants. Ces acteurs peuvent avoir des avis utiles, en particulier sur la partie amont de la chaudière, qui est souvent critique et qui conditionne la disponibilité de l'installation.

En appliquant cette nomenclature aux CSR étudiés dans la présente étude (cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.), il est manifeste que l'usage de ces nouveaux combustibles n'est pas simple (beaucoup de couleur orange et rouge dans le tableau !) et exigera des équipements plus complexes que ceux usuellement employés pour les combustibles solides traditionnels.

Pour faciliter l'emploi des CSR en chaudières industrielles, il y aura un travail d'amélioration de la qualité des combustibles issus des installations de tri des déchets à réaliser mais également un développement nécessaire des schémas traditionnels d'épuration des fumées d'incinérateurs pour les appliquer au mieux sur des équipements moins puissants.

Sur un plan plus commercial, il pourrait aussi être intéressant d'introduire d'autres critères, comme par exemple les émissions de GES associées à l'usage des CSR, puisque celles-ci semblent en première approximation, très inférieures à celles des combustibles solides classiques et proches, voire meilleures que celles du fuel ou du gaz naturel.

Références bibliographiques

- [1] « État de l'art de la production et de l'utilisation de combustibles solides de récupération », BIO Intelligence Service et INDDIGO, ADEME, 2012
- [2] « Etat des lieux et perspectives de développement des combustibles solides de récupération », INDDIGO, COSEI, 2011
- [3] « Combustibles solides de récupération – Etat des lieux et perspectives », RECORD, 2008
- [4] « SRF : a practical example from the EU-project RECOMBIO », Th. Glorius, IEA-Workshop, 2011
- [5] « Fuels from waste- SRF development », ERFO, 6th CEWEP Congress, 2012
- [6] « Standardization as a help to facilitate SRF acceptance and use », ERFO, 2013
- [7] « Méthode de classification visant à déterminer la qualité des combustibles dérivés des déchets », WRAP, 2012
- [8] « Report on RDF/SRF utilization applications and technical specifications », project LIFE, 2011
- [9] « Research into SRF and RDF Exports to other EU Countries », CIWM, AMEC environment, 2013
- [10] « End of Waste in Italy – State of the art », S. Baroni, Workshop EoW – Criteria for SRF – Italy, 2015

Index des tableaux et figures

Tableaux ⁽ⁱ⁾

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Quantités de déchets produites en France par catégorie et par secteur (Mt)..... | 9 |
| Tableau 2 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2771)..... | 12 |
| Tableau 3 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2971)..... | 13 |
| Tableau 4 : Marché potentiel de CSR dans les Îles Britanniques | 20 |
| Tableau 5 : Liste des CSR étudiés | 21 |
| Tableau 6 : Comparatif entre les entrants et l'analyse physique des échantillons de CSR (% massique)..... | 28 |
| Tableau 7 : Analyses immédiate et élémentaire des échantillons de CSR | 31 |
| Tableau 8 : Influence des matériaux sur les teneurs en éléments chimiques des CSR | 32 |
| Tableau 9 : Paramètres de mesure des rejets gazeux..... | 35 |
| Tableau 10 : Analyse et évolution des CSR utilisés pour la deuxième campagne d'essais | 36 |
| Tableau 11 : Résultats de l'analyse des fumées de la deuxième campagne d'essais | 38 |
| Tableau 12 : Devenir des éléments polluants pendant la combustion de l'échantillon ECH021 | 39 |
| Tableau 13 : Devenir des éléments polluants pendant la combustion de l'échantillon ECH022 | 39 |
| Tableau 14 : Mode de formation des polluants atmosphériques en combustion | 43 |
| Tableau 15 : Récapitulatif du mode de gestion des polluants atmosphériques dans le cas des chaudières à grille | 49 |
| Tableau 16 : Récapitulatif du mode de gestion des polluants atmosphériques dans le cas des chaudières à lit fluidisé dense | 52 |
| Tableau 17 : Tableau comparatif des solutions « chaudière à grille » et « chaudière à lit fluidisé dense » | 56 |
| Tableau 18 : Valeurs limites de rejets atmosphériques pour les installations d'incinération de déchets..... | 59 |
| Tableau 19 : Analyse qualitative de l'adéquation des équipements d'une chaudière à grille avec les CSR | 65 |
| Tableau 20 : Analyse qualitative de l'adéquation des équipements d'une chaudière à lit fluidisé avec les CSR | 68 |
| Tableau 21 : Segmentation opératoire | 70 |
| Tableau 22 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2771)..... | 72 |
| Tableau 23 : Valeurs limites de rejets atmosphériques (rubrique 2971)..... | 73 |
| Tableau 24 : Classification des CSR selon la norme EN 15357:2011 | 73 |
| Tableau 25 : Caractéristiques exigées des CSR selon le RAL-GZ 724..... | 75 |
| Tableau 26 : Caractéristiques exigées des CSR selon la norme UNI 9903 | 75 |
| Tableau 27 : Caractéristiques exigées des CSR selon la norme SFS 5875..... | 76 |
| Tableau 28 : Estimation des émissions polluantes théoriques lors de la combustion des CSR..... | 77 |
| Tableau 29 : Récapitulatif des seuils de la nomenclature | 79 |
| Tableau 30 : Positionnement des CSR étudiés relativement à l'ébauche de nomenclature..... | 81 |

Figures ⁽ⁱ⁾

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Méthodologie de l'étude | 8 |
| Figure 2 : Répartition des filières de traitement des déchets en France..... | 10 |
| Figure 3 : Cadres réglementaires possibles pour la valorisation thermique des CSR..... | 12 |
| Figure 4 : Principaux flux de CSR entre pays en Europe..... | 17 |
| Figure 5 : Volumes de déchets produits en Europe par pays et taux de valorisation énergétique de ces gisements (données 2004) | 18 |
| Figure 6 : Voies de valorisation des CSR en Allemagne (t/an, données 2011) | 19 |
| Figure 7 : Schéma de prélèvement des échantillons de CSR sur les sites de production | 22 |
| Figure 8 : Illustrations des différents matériaux triés dans les échantillons | 24 |
| Figure 9 : Visualisation et principales caractéristiques des CSR étudiés | 26 |
| Figure 10 : Exemple de diagramme de combustion d'un foyer équipant une unité de valorisation énergétique de déchets ménagers | 30 |
| Figure 11 : Aperçu des échantillons sélectionnés pour la première campagne d'essais | 33 |
| Figure 12 : Représentation schématique des mécanismes de la combustion de combustibles solides | 40 |
| Figure 13 : Schéma de principe de la stabilisation d'une flamme | 41 |
| Figure 14 : Influence de la stœchiométrie de la combustion sur la formation d'imbrûlés | 42 |
| Figure 15 : Bloc-diagramme général d'une installation de valorisation de CSR en production de chaleur | 45 |

Figure 16 : Exemple de chaudière à grille (source : COMPTE-R) 46

Figure 17 : Schéma de principe de la régulation d'une chaudière à bois (source : COMPTE-R)..... 47

Figure 18 : Schéma d'un module à condensation (source : SAVE ENERGY) 49

Figure 19 : Représentation schématique du phénomène de fluidisation 50

Figure 20 : Schéma d'une chaudière à lit fluidisé dense (source : RENEWA) 51

Figure 21 : Exemples de moyen de stockage possibles pour les CSR 57

Figure 22 : Illustration d'un système de stockage / déstockage de combustibles solides de type «TOP LOADER»
(source : COMPTE-R) 58

Figure 23 : Exemple de poussoir..... 59

Figure 24 : Exemple de procédé de traitement des polluants acides (procédé SOLVAir de SOLVAY) 60

Figure 25 : Schéma d'une chaudière à grille équipée d'un traitement des NOx par SNCR 61

Figure 26 : Principe du contrôle qualité des CSR en Allemagne 74

Figure 27 : Catégories de CSR selon les standards du RAL-GZ 724..... 74

Figure 28 : Exemple de classement d'un échantillon suivant la nomenclature..... 80

Sigles et acronymes

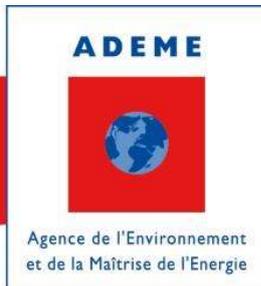
| | |
|--------------|--|
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie |
| AFPIA | Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement |
| CEN | Comité Européen de Normalisation |
| COVNM | Composés organiques volatils non méthaniques |
| CS | Collecte sélective |
| CSR | Combustible solide de récupération |
| DIB | Déchet industriel banal |
| HAP | Hydrocarbures aromatiques polycycliques |
| ICPE | Installation Classée pour la Protection de l'Environnement |
| OMR | Ordures ménagères résiduelles |
| OMA | Ordures ménagères et assimilés |
| PCB | Polychlorobiphényles |
| PCDD | Polychlorodibenzodioxines |
| PCDF | Polychlorodibenzofuranes |
| PCI | Pouvoir calorifique inférieur |
| PCP | Polychloroprène |
| PVC | Polychlorure de vinyle |
| RBA | Résidus de broyage d'automobiles |
| SCR | Réduction sélective catalytique (des NOx) |
| SNCR | Réduction sélective non catalytique (des NOx) |
| SRF | Solid Recovered Fuel |
| SSD | Sortie du statut de déchets |
| STEP | Station d'épuration des eaux |
| TM | Tri mécanique |
| TMB | Tri mécano-biologique |
| VLE | Valeur limite d'émission |

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr