

# Calcul du rendement énergétique "R" des chaufferies CSR en co-incinération

NOTE D'AIDE





## Table des matières

1. Champ d'application du guide .....	3
2. Limites de la chaufferie CSR.....	4
3. Formule de calcul.....	5
4. Énergie thermique (Eth).....	5
5. Énergie électrique (Eelec).....	5
6. Énergie contenue dans les autres combustibles utilisés (Ecombustible(s)).....	6
7. Énergie contenue dans le combustible CSR (ECSR).....	6
8. Annexe (fichier de calcul du PCI et du rendement four-chaudière) .....	7



## 1. Champ d'application du guide

**Le rendement énergétique R d'une chaufferie CSR** (installation de co-incinération) est défini à l'article 4 de l'Arrêté du 23 mai 2016 relatif aux installations de production de chaleur et/ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans des installations prévues à cet effet associés ou non à un autre combustible et relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

Par extension, ce rendement peut également être défini pour des installations relevant de la rubrique 3520 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement (installation de co-incinération de déchets non dangereux).

Cette note ne remet pas en question les dispositions particulières pouvant être précisées dans les arrêtés d'exploitation des installations visées.

La présente note précise les données à intégrer dans le calcul de ce rendement énergétique.

La **FEDENE**, Fédération des services énergie et environnement, regroupe plus de 500 entreprises (PME, ETI, grands groupes), 60 000 salariés pour un chiffre d'affaires de 11 milliards d'euros, dont la moitié est réalisée en France. Elle rassemble six syndicats professionnels réunissant des entreprises d'exploitation et de maintenance d'équipements de chauffage et de climatisation, de gestion de réseaux de chaleur et de froid, de valorisation énergétique des déchets, de services d'efficacité énergétique, de facility management et d'ingénierie de projets.



## 2. Limites de la chaufferie CSR

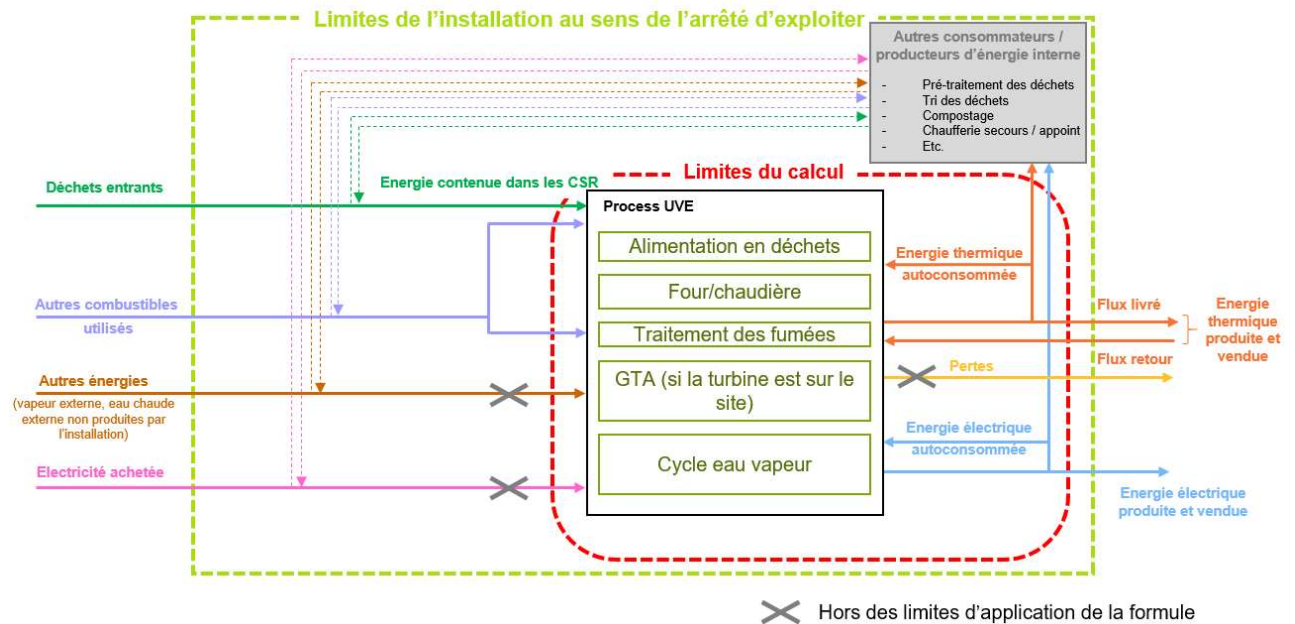
Le calcul du rendement énergétique R d'une chaufferie CSR inclut les sous-parties du process suivantes :

- Four(s), chambre(s) de combustion
- Chaudière(s)
- Traitement des fumées
- Les équipements de récupération et de valorisation de l'énergie (échangeurs alimentant un réseau de chaleur ou de froid, GTA, ...)

Les installations de pré-traitement des déchets (tri, broyage, criblage, ...), de post-traitement (plateforme mâchefers, ...) et les éventuelles chaudières d'appoint (gaz naturel, fioul, ...) servant de secours / appoint pour les clients chaleur, même si elles sont intégrées dans l'autorisation d'exploiter de la chaufferie CSR, ne sont pas à prendre en compte sauf si celles-ci sont classées sous la même rubrique ICPE (2971 ou 3520).

De même les GTA, réseaux de chaleur ou vapeur hors des limites de l'autorisation d'exploiter de la chaufferie CSR sont hors du scope du calcul.

Pour ce calcul il faut donc différencier le site (qui peut comporter d'autres installations connexes comme un centre de tri, une plateforme de traitement des mâchefers, une chaufferie de secours pour un réseau de chaleur...) et la chaufferie CSR qui seule est à considérer pour le calcul.





### 3. Formule de calcul

Le rendement d'une chaufferie CSR est calculé selon la formule suivante :

$$R = \frac{\text{Energie produite}}{\text{Energie primaire}} * 100 = \frac{\text{Eth} + \text{Eelec}}{\text{ECSR} + \text{Ecombustible(s)}} * 100$$

### 4. Énergie thermique (Eth)

Eth correspond à la somme de l'énergie thermique produite vendue et de l'énergie thermique autoconsommée.

L'énergie thermique vendue prend en compte la différence entre le flux de chaleur livré au client et le flux de chaleur éventuellement retourné par le client vers la chaufferie CSR (retour de condensats).

Les autoconsommations d'énergie thermique pouvant être prises en compte dans Eth sont indiquées dans l'annexe II de l'arrêté du 28 décembre 2017 pris pour l'application des articles 266 sexies et 266 nonies du code des douanes :

- Préchauffage de l'air de combustion ;
- Chauffage du cycle eau-vapeur (dégazage, réchauffage des condensats, surchauffe vapeur) ;
- Réchauffage de l'eau alimentaire ;
- Réchauffage des fumées ;
- Séchage des boues, uniquement si l'opération de séchage a vocation à destiner les boues à une valorisation organique ;
- Mise hors gel des aérocondenseurs ;
- Chaleur pour l'évaporation des effluents ;
- Chauffage des bâtiments, bureaux, locaux sociaux, silos, traçage ;
- Vapeur pour turbo pompes ou turbo compresseurs.

Pour éviter le double comptage, l'énergie vapeur servant à produire de l'électricité (aux bornes du GTA) ne doit pas être comptée également comme énergie chaleur (déjà comptée en énergie électrique). En exception, si le GTA est hors du périmètre de l'autorisation d'exploiter de la chaufferie CSR (GTA exploité par un autre opérateur) l'énergie allant vers le GTA est à compter en énergie chaleur et non en énergie électrique (l'électricité produite par le GTA ne sera alors pas prise en compte).

Pour être considérées comme valorisées, les énergies consommées doivent être mesurées au moyen de compteurs faisant l'objet d'un programme de maintenance et d'un contrôle annuel.

### 5. Énergie électrique (Eelec)

Eelec correspond à la somme de l'énergie électrique produite vendue et de l'énergie électrique autoconsommée.

Les deux termes de la somme peuvent être mesurés séparément ou au moyen d'un compteur mesurant la production électrique en sortie d'alternateur.

Pour être considérées comme valorisées, les énergies consommées doivent être mesurées au moyen de compteurs faisant l'objet d'un programme de maintenance et d'un contrôle annuel.



## 6. Énergie contenue dans les autres combustibles utilisés (Ecombustible(s))

L'énergie apportée par les autres combustibles comprend uniquement l'énergie apportée par les combustibles non déchets (gaz naturel, propane, FOD, etc.).

Cette énergie sera exprimée sur la base du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des combustibles.

Pour être considérées comme valorisées, les énergies consommées doivent être mesurées au moyen de compteurs faisant l'objet d'un programme de maintenance et d'un contrôle annuel.

Sous réserve que toutes les quantités utilisées soient facturées à l'installation, les données facturées pourront également être utilisées pour le calcul. Les facteurs de conversion en énergie PCI à utiliser pour le calcul seront repris de la base carbone de l'ADEME.

## 7. Énergie contenue dans le combustible CSR (ECSR)

L'énergie contenue dans les combustibles solides de récupération (ECSR) correspond à la somme de toutes les quantités de CSR utilisées multipliées par leur PCI.

**Pour le calcul, le tonnage à retenir est le tonnage effectivement traité** : il est mesuré au niveau des systèmes de pesées (grappin, convoyeurs-alimentateurs, etc.). Il intègre les réceptions de déchets, déduction faite des flux de déchets réévacués ou résultant de la préparation des CSR in-situ (exemple : valorisation matière, refus). Un récolement est possible avec les tonnages mesurés au niveau des ponts-basculés des installations. Les compteurs associés doivent faire l'objet d'un programme de maintenance et d'un contrôle annuel.

Ce tonnage correspond au tonnage entrant dans les trémies des fours d'incinération et non sur le site. En effet, dans le cas d'une préparation du CSR sur le site de la chaufferie ou d'activités connexes sur l'installation, une partie du tonnage de déchets entrant sur le site peut ne pas alimenter les fours ; de même en cas de réévacuation lors des arrêts techniques ou incidents (arrêts des fours, grèves, etc.).

**Le PCI** est précisé, par type de déchets, lors de l'acceptation préalable sur les fiches d'identification du préparateur des déchets (CSR / autres) sur la période considérée.

Un calcul mensuel du PCI sera aussi effectué par la méthode des pertes séparées en complément du calcul réalisé à partir des tonnages et des PCI par type d'apport

En cas d'écart de plus de 10 % entre la valeur du PCI moyen du CSR (égal à la moyenne pondérée des PCI indiqués sur les fiches d'identification des lots de CSR par les tonnes traitées) et la valeur calculée par la méthode des pertes séparées, la valeur déterminée par la méthode des pertes séparées pourra être retenue. Le PCI sera également recalculé annuellement selon la méthode par pertes séparées.

Le calcul du PCI, effectué selon la méthode des pertes séparées, est décrit dans le fascicule 82 et dans le guide allemand FDBR, *Acceptance testing of waste incineration plants with grate firing systems* (application aux chaufferies CSR de la norme NF EN 12952-15, Chaudières à tubes d'eau et installations auxiliaires Partie 15 : Essais de réception).

**L'annexe donne le tableau de calcul à utiliser.**



## 8. Annexe (fichier de calcul du PCI et du rendement four-chaudière)

Par souci de cohérence, la méthode appliquée sera celle des pertes séparées telle que décrite dans le fascicule 82 et dans le guide allemand FDBR, *Acceptance testing of waste incineration plants with grate firing systems* (application aux chaufferies CSR de la norme NF EN 12952-15, Chaudières à tubes d'eau et installations auxiliaires Partie 15 : essais de réception).

Le tableau présenté à la page suivante permet d'effectuer le calcul du PCI et du rendement four-chaudière :

- Les données du cadre *Données mesurées* doivent être mesurées sur la même période de temps.
- Pour les sites avec plusieurs lignes, le calcul peut être fait par ligne (le PCI du site sera alors la moyenne pondérée par le tonnage incinéré par ligne du PCI calculé sur chaque ligne) ou directement pour l'ensemble des lignes. Dans ce dernier cas, entrer :
  - la somme des lignes pour les données Tonnages déchets incinéré, Débit d'air de combustion, Débit vapeur surchauffée, Débit vapeur saturée utilisée, Débit eau surchauffée, Débit eau alimentaire, Débit fumées sortie chaudière, Débit de fumées recyclées, Energie combustible d'appoint, Débit d'eau injectée dans le four.
  - la moyenne des lignes pour les données Heures dans la période, Température air de combustion, Pression vapeur surchauffée, Température vapeur surchauffée, Température vapeur saturée, Température eau surchauffée, Température eau alimentaire, Température fumées sortie chaudière, Température fumées recyclées.
- Les données sont mesurées avec les instruments du site (qui seront vérifiés et maintenus régulièrement).
- Le débit des fumées en sortie chaudière ne pouvant être mesuré (longueurs droites de gaines insuffisantes à cet endroit pour avoir une mesure fiable) il sera estimé à partir du débit mesuré en cheminé corrigé par les entrées d'air (correction via mesure d'O<sub>2</sub>) et l'injection éventuelle d'eau dans le traitement des fumées.
- Le % de mâchefers secs par rapport au tonnage déchets incinéré est à ajuster en fonction des valeurs relevées sur site ; les autres coefficients ne sont normalement pas à modifier sauf valeur justifiée.
- **Important :**  
il est à noter que vu l'imprécision sur les nombreuses mesures entrantes dans le calcul, en particulier l'estimation du débit fumées sortie chaudière, **l'incertitude sur ce calcul est d'au moins + ou - 5 %.**



L'ensemble des données doivent être mesurées sur la même période de temps				
	unité	notation	valeur	formule de calcul
<b>DONNEES MESUREES</b>				
Heures dans la période	h	h période	0	
Tonnage déchets incinéré	tonnes	Qdéchets	0	
Débit d'air de combustion	Nm <sup>3</sup>	Qair	0	
Température air de combustion	°C	Tair	0	
Débit vapeur surchauffée	tonnes	Qvap surch	0	
Pression vapeur surchauffée	bars abs	Pvap surch	0,0	
Température vapeur surchauffée	°C	Tvap surch	0	
Débit vapeur saturée utilisé (SCR,...)	tonnes	Qvap sat	0	
Température vapeur saturée	°C	Tvap sat	0	
Débit eau surchauffée	tonnes	Qeau surch	0	
Température eau surchauffée	°C	Teau surch	0	
Débit eau alimentaire	tonnes	Qeau alim	0	
Température eau alimentaire	°C	Teau alim	0	
Débit fumées sortie chaudière	Nm <sup>3</sup>	Qfumées rec	0	
Température fumées sortie chaudière	°C	Tfumées rec	0	
Débit de fumées recyclées	Nm <sup>3</sup>	Qfumées rec	0	
Température fumées recyclées	°C	Tfumées rec	0	
Energie combustible d'appoint ayant produit de la vapeur	MJ	Ecomb	0	
Débit d'eau injectée dans le four (SNCR,...)	kg	Qeau inj	0	
<b>COEFFICIENTS (FIXES OU SPECIFIQUES AUX SITES)</b>				
% de mâche-fers secs par rapport au tonnage déchets incinéré	%	% mâch	25,0	
Température moyenne des mâche-fers en sortie four	°C	Tmâch	400	
Cp mâche-fers	kJ/kg/°C	Cp mâch	0,84	
% d'imbrûlés dans les mâche-fers	%	% imb	2,0	
PCI des imbrûlés	kJ/kg	PCI imb	33000	
Cp des fumées	kJ/Nm <sup>3</sup> /°C	Cp fumées	1,39	
Cp eau alimentaire	kJ/kg/°C	Cp eau	4,186	
Enthalpie de vaporisation de l'eau	kJ/kg	Hvap eau	2257	
Cp air de combustion	kJ/kg/°C	Cp air	1,013	
Densité de l'air	kg/Nm <sup>3</sup>	Dair	1,293	
Taux de purges chaudière	%	% purges	1,0	
<b>CALCULS</b>				
Enthalpie vapeur surchauffée	kJ/kg	Hvap surch		Fonction de P <sub>vp surch</sub> et de T <sub>vp surch</sub>
Enthalpie vapeur saturée	kJ/kg	Hvap sat		Fonction de T <sub>vp sat</sub>
Enthalpie eau surchauffée	kJ/kg	Heau surch		Fonction de T <sub>eau surch</sub>
Energie vapeur surchauffée	MJ	Evap surch	0	Hvap surch x Qvap surch
Energie vapeur saturée	MJ	Evap sat	0	Hvap sat x Qvap sat
Energie eau surchauffée	MJ	Eeau surch	0	Heau surch x Qeau surch
Energie eau alimentaire	MJ	Eeau alim	0	Cp eau x Teau alim x Qeau alim
Energie air de combustion	MJ	Eair	0	Cp air x Tair x Qair x Dair / 1000
Energie des fumées sortie chaudière	MJ	Efumées	0	Cp fumées x Tfumées x Qfumées / 1000
Energie des fumées recyclées	MJ	Efumées rec	0	Cp fumées x Tfumées rec x Qfumées rec / 1000
Energie de vaporisation de l'eau injectée dans le four	MJ	Eeau inj	0	Hvap eau x Qeau inj / 1000
Energie des purges	MJ	Epurges	0	Cp eau x T <sub>vp sat</sub> x Qeau alim x %purges
Pertes chaleur sensible et imbrûlés mâche-fers	MJ	Pmâch	0	% mâch x Qdéchets x (Cp mâch x Tmâch + % imb x PCI imb)
Pertes convection - rayonnement four-chaudière	MJ	Pfc	#DIV/0!	0,022 x ((Evap surch + Evap sat + Eeau surch + Epurges - Eeau alim) / (3600 x h période)) <sup>0,7</sup> x 3600 x h période
<b>CALCUL DU PCI</b>	<b>GJ/t</b> <b>kcal/kg</b>	<b>PCI</b>	<b>#DIV/0!</b> <b>#DIV/0!</b>	(Evap surch + Evap sat + Eeau surch + Efumées + Eeau inj + Epurges + Pmâch + Pfc - Eeau alim - Eair - Efumées rec - Ecomb) / Qdéchets / 1000
<b>CALCUL DE Ew</b>	<b>MWh</b>	<b>Ew</b>	<b>#DIV/0!</b>	<b>PCI en GJ/t x Qdéchets / 3,6</b>
<b>CALCUL DU RENDEMENT FOURS/CHAUDIÈRES</b>	<b>%</b>	<b>Rend</b>	<b>#DIV/0!</b>	(Evap surch + Evap sat + Eeau surch + Epurges - Eeau alim) / (Qdéchets x PCI + Eair + Efumées rec - Eeau inj + Ecomb)



28, rue de la Pépinière - 75008 Paris  
01 44 70 63 90

[contact@fedene.fr](mailto:contact@fedene.fr)  
[www.fedene.fr](http://www.fedene.fr)

