

« Performance énergétique » des incinérateurs
(néologisme abscons qui ne relève pas de la science de la thermodynamique !)

L'arrêté du 3 août 2010, modifiant l'arrêté du 20 septembre 2002, comporte une formule surprenante dite de « performance énergétique » qui doit être de 65 % pour les incinérateurs mis en service après le 31 décembre 2008, et de 60 % pour les incinérateurs mis en service avant cette date, faute de quoi ils ne seraient plus justiciables du terme de « valorisation énergétique ».

Quelques rappels élémentaires :

Quand on veut produire de l'énergie électrique à partir d'énergie thermique résultant d'une combustion en passant par un cycle thermodynamique à vapeur, le rendement de la production d'énergie électrique, par rapport au PCI du combustible utilisé, est égal à la multiplication de trois rendements successifs :

1) **le rendement « R1 »** de la chaudière qui transforme l'énergie thermique, issue de la combustion, en vapeur ;

2) **le rendement « R2 »** propre au circuit thermodynamique qui transforme la vapeur en énergie mécanique ;

3) **le rendement « R3 »** de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le rendement global « RG » de cette production d'énergie électrique, par rapport à l'énergie potentielle thermique, contenu dans le combustible brûlé, s'exprime par la formule **RG = R1 × R2 × R3**.

En ce qui concerne R1, il convient de calculer le contenu énergétique thermique potentiel du combustible utilisé en multipliant la quantité de combustible brûlé par son PCI (*le PCI, ou pouvoir calorifique inférieur, s'exprime le plus souvent en MWh par tonne de combustible. Il s'agit de l'énergie thermique que l'on pourrait théoriquement obtenir, par une combustion parfaite dudit combustible, sans aucune perte. Il en résulterait, notamment, une teneur nulle en imbrûlés.*).

À défaut de connaître le PCI du combustible, on peut utiliser la méthode dite des pertes séparées, plus complexe, qui consiste à estimer la quantité d'énergie perdue par l'échappement des gaz de combustion encore chauds à l'atmosphère, par l'énergie thermique contenue dans les cendres et par le rayonnement émis par les parois extérieures de la chambre de combustion. Par ailleurs, il faut tenir compte des pertes inhérentes aux purges de déconcentration de l'eau de la chaudière et de l'excès d'air de combustion.

Dans les très grosses centrales thermiques classiques de l'EDF, les rendements des chaudières habituellement rencontrés sont de l'ordre de 94 % pour le gaz, de 89 % pour le fioul et de 85 % pour le charbon. Il faut noter que ces chaudières sont très sophistiquées.

Elles comportent des solutions techniques visant à avoir un minimum de pertes thermiques, solutions qui ne sont rentables que pour de grosses installations. En effet, le coût du combustible, prépondérant dans le coût de l'énergie électrique, incite à maximiser les performances de la chaudière. Notons que ces centrales utilisent généralement un « mono combustible » de composition bien connue, ce qui permet un réglage de combustion fin et sensiblement constant.

En ce qui concerne R2, il y a plus de deux siècles que le brillant physicien français Nicolas Léonard SADI CARNOT a énoncé les principes de base régissant la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique. Ces principes énoncent, en substance, que la limite supérieure du rendement de cette transformation s'exprime par la formule

$$R = (T - t) \div (T + 273,15)$$

où :

R est le rendement théorique maximal qui pourrait être atteint sans aucune perte ;

T = température maximale de la source chaude exprimée en degrés Celsius (température de la vapeur surchauffée à haute pression en sortie du surchauffeur de la chaudière) ;

t = température de la source froide exprimée en degrés Celsius (température de l'échappement de la vapeur en sortie de la turbine) ;

273,15 est, en degrés Celsius et en négatif, la valeur du zéro absolu de l'échelle de température de Lord Kelvin.

Exemple : un cycle thermodynamique à vapeur surchauffée aux caractéristiques de 625°C et de 165 bars (*ancien standard EDF des grosses centrales thermiques classiques*), ayant une température sous vide de la vapeur à l'échappement de la turbine se situant à 30°C, aurait un rendement théorique maximal, selon SADI CARNOT, de :

$$(625 - 30) \div (625 + 273) = 0,66 \text{ ou } 66 \%$$

Il ne s'agit, bien évidemment, que du rendement théorique maximum de la transformation de l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique. Nous verrons ci-après que la réalité technique est très sensiblement inférieure à cette valeur théorique.

En effet, les meilleurs cycles thermodynamiques des centrales thermiques classiques, à ces caractéristiques de températures, ne peuvent dépasser un rendement moyen annuel d'exploitation, de l'ordre de 40 %. Et ceci au prix d'une complexité extrême du circuit thermodynamique (double resurchauffe de la vapeur, lignes doubles de réchauffeurs HP et BP et turbopompe à vapeur BP pour la réinjection de l'eau en chaudière). Ce faible rendement par rapport au rendement théorique résulte de l'imperfection du cycle thermodynamique. De plus, il faut déduire l'autoconsommation d'énergie électrique des auxiliaires indispensables au fonctionnement de l'ensemble de la centrale thermique. Cette autoconsommation pour une centrale classique est de l'ordre de 4 à 5 % de l'énergie électrique produite.

Il convient également de déduire de l'énergie électrique produite, l'énergie électrique et thermique consommée durant les démarrages et les arrêts de la centrale. En effet, pour démarrer, à partir de l'état froid (température ambiante) une centrale de grosse puissance, il faut consommer du combustible pendant environ 48 heures pour réchauffer et purger tout le circuit thermodynamique, avant de pouvoir coupler l'alternateur au réseau électrique. De même, lors d'un arrêt on perd le contenu énergétique de toute l'installation.

C'est pourquoi nous parlons de rendement annuel d'exploitation, plus représentatif de la qualité de l'installation car plus une installation aura d'incidents dans une année, plus son rendement annuel sera bas par rapport au rendement ponctuel. Les grosses centrales thermiques françaises fonctionnent généralement durant de longues périodes, pouvant dépasser l'année, sans nécessiter d'arrêter la production électrique. Systématiquement, les auxiliaires indispensables à la marche de la centrale sont doublés, l'un étant en service et l'autre en secours.

Le rendement « R3 » de transformation de l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de la turbine à vapeur en énergie électrique est par contre excellent. Il dépasse souvent les 98 % sur les grosses centrales.

Le rendement global « RG » est le produit des trois rendements ci-dessus.

Pour une centrale à charbon, le RG sera égal à $0,85 \times 0,4 \times 0,98 = 0,33$.

Pour une centrale à fioul, le RG sera égal à $0,88 \times 0,4 \times 0,98 = 0,34$.

Pour une centrale à gaz, le RG sera égal à $0,94 \times 0,4 \times 0,98 = 36 \%$.

Si nous voulons appliquer ce qui précède aux centrales à vapeur incluses dans les incinérateurs qui ne valorisent l'énergie produite que sous la forme « électrique », nous aurons les rendements suivants :

R1 : il ne peut dépasser une valeur de 75 % sur le PCI du combustible hétérogène que sont les déchets pour les raisons suivantes :

Les déchets ont des constituants divers dont le PCI et la température de gazéification de chacun d'eux sont différents d'un constituant à l'autre. Il faut régler la combustion en regard du constituant aux caractéristiques les plus défavorables. Notamment, pour oxyder à peu près correctement la masse totale des déchets il convient d'avoir un excès d'air comburant allant jusqu'à 110 % d'excès d'air pour limiter les imbrûlés (*Notez en passant que les analyses des polluants contenus dans les gaz de combustion s'expriment en mg ou ng par Nm³ de gaz sec ramené par calcul à 11% d'O₂, soit précisément ces 110 % d'excès d'air !*). Néanmoins, il peut rester jusqu'à 5 % d'imbrûlés dans les mâchefers d'incinérateur en sortie du four. L'excédent d'air introduit dans la combustion doit se réchauffer en prélevant de l'énergie thermique sur la combustion.

Les déchets produisent des gaz de combustion, parfois acides qui, pour ne pas se condenser sur les parois froides de la chaudière et les corroder, doivent être évacués à une température supérieure à celle de leur point de rosée. Les gaz de combustion sortent généralement aux environs de 210°C. Bien entendu, l'énergie thermique encore contenue dans ces gaz est perdue.

R2 : le cycle thermodynamique des incinérateurs est des plus simplistes par rapport à celui des grosses centrales EDF : les conditions de vapeur sont moins favorables (400°C et 35 bars), l'échappement de la turbine est sensiblement à 50°C (*la source froide n'est qu'un échangeur refroidi à l'air atmosphérique, alors que dans les grosses centrales EDF il s'agit d'un condenseur sous vide refroidi à l'eau, celle-ci étant refroidie par les tours d'évaporation atmosphériques*), la turbine ne comporte qu'un seul corps (*alors que les grosses centrales EDF ont des turbines à trois corps : HP, MP et BP*), ce qui donne un rendement théorique de CARNOT de l'ordre de 0,56 pour un incinérateur. La consommation des auxiliaires d'un incinérateur se situe aux environs de 12% de la production d'énergie électrique, soit deux à trois fois plus que pour une centrale EDF. Il faut dire que le rapport de taille des installations est de l'ordre de 50 ! Il est évident que plus une installation industrielle est importante, plus on peut investir pour en améliorer les performances.

De plus, un incinérateur subit annuellement de nombreux arrêts sur incidents (extracteur de mâchefers bloqué, fuites de vapeurs, panne sur les traitements de fumées) qui obligent, après chaque arrêt, de redémarrer en partant de l'état froid. De plus, des périodes d'entretien annuel de l'ordre du mois sont obligatoires.

Il faut aussi tenir compte de la consommation de combustible imputable aux brûleurs de soutien de température, ainsi que des achats d'énergie électrique à EDF pour les démarrages d'installation.

Le rendement R2 du cycle thermodynamique des incinérateurs est, du propre aveu des exploitants (*dans les rapports annuels au public*), de l'ordre de 24 % en pointe.

R3 sur un incinérateur, eu égard à la taille modeste de l'alternateur, dépasse rarement 0,97.

Le rendement global annuel RG d'un incinérateur de l'ordre de 100 000 T/an de déchets incinérés ressort à environ $0,75 \times 0,24 \times 0,97 = 0,1746$.

Ce faible rendement global annuel est confirmé dans le document d'information au public, publié par les exploitants.

Exemple de l'incinérateur de Lunel-Viel (Hérault), qui aurait produit en 2009 quelque 68 500 MWh et qui en aurait vendu à EDF seulement 56000 MWh et qui aurait, durant cette même année incinéré 128 000 T de déchets dont le PCI moyen serait de 2,5 MWh/tonne.

Le potentiel d'énergie thermique représenté par les déchets serait donc de $2,5 \times 128\ 000 = 320\ 000$ MWh, pour seulement 56 000 MWh vendus à EDF, soit un rendement de 0,175.

Il est évident, en dépit des rappels et considérations complexes évoqués ci-dessus, que personne ne peut nier la simplicité du calcul de ce rendement. Car si on connaît la quantité d'énergie commercialisée et la quantité de déchets incinérés, ainsi que le PCI, il suffit de diviser l'énergie commercialisée par l'énergie totale des déchets. Alors pourquoi avoir conçu la formule ci-après dont la complexité est inexplicable, sauf à pouvoir aboutir à toutes les interprétations possibles ! De plus, tous les thermiciens savent comment se calcule un rendement annuel d'une installation de production d'énergie, alors que cette nouvelle notion de « *performance énergétique* » reste abstraite.

Curiosités de la formule alambiquée intégrée dans l'arrêté ministériel du 3 août 2010, qui s'intitule *Performance énergétique d'une installation d'incinération* :

Cette formule est la suivante : $P_e = (E_p - (E_f + E_i)) \div 0,97(E_w + E_f)$ où : P_e est la performance énergétique de l'installation ;

E_p représente la production annuelle d'énergie

sous forme de chaleur ou d'électricité. Elle est calculée en multipliant par 2,6 l'énergie produite sous forme d'électricité et par 1,1 l'énergie produite sous forme de chaleur pour une exploitation commerciale (GJ/an) ;

E_f représente l'apport énergétique annuel du système en combustibles servant à la production de vapeur (GJ/an) ;

E_w représente la quantité annuelle d'énergie contenue dans les déchets traités, calculée sur la base du pouvoir calorifique inférieur des déchets (GJ/an)

E_i représente la quantité annuelle d'énergie importée, hors E_w et E_f (GJ/an) ;

0,97 est un coefficient prenant en compte les déperditions d'énergie dues aux mâchefers d'incinération et au rayonnement.

Pour l'application de la formule de calcul de la performance énergétique, on considère que :

$E_p - (E_f + E_i) \div (0,97 (E_w + E_f)) = ((2,6 E_{e.p} + 1,1 E_{th.p}) - (2,6 E_{e.a} + 1,1 E_{th.a})) \div 2,3 T$

où :

$E_{e.p}$ représente l'électricité produite par l'installation (MWh/an) ;

$E_{th.p}$ représente la chaleur produite par l'installation (MWh/an) ;

$E_{e.a}$ représente l'énergie externe achetée par l'installation (MWh/an) ;

2,3 étant un facteur multiplicatif intégrant un PCI générique des déchets de 2044 th/t ;

T représente le tonnage de déchets réceptionnés dans l'année.

Vous remarquerez l'extrême complexité et l'ambiguïté de la formule exposée ci-avant, le principe, cher aux technocrates, du « Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué » y a manifestement prévalu !

Il faut noter l'erreur de conversion de la valeur dite « générique » du PCI des déchets exprimé, arbitrairement et illégalement, à 2044 th/tonne (*la thermie n'étant plus utilisée comme unité réglementaire pour l'énergie thermique, il faut employer le Joule et on autorise le Watt*). Comme les facteurs intervenant dans la formule sont exprimés en Giga-Joule (GJ), mais qu'on les exprime ensuite en MWh, on pourrait penser que ce facteur multiplicatif de 2,3 serait calculé pour ramener les 2044 th/h en MWh. Or la vraie conversion exigerait un facteur multiplicatif de $2376 \div 1000 = 2,376$. En minimisant ce facteur, on minimise le contenu énergétique des déchets, ce qui favorise une « performance énergétique » plus élevée de l'ordre de 5 % !

Néanmoins, si on veut s'atteler au calcul qui résulte de cette formule erronée, sur un cas concret comme l'incinérateur de Lunel-Viel, nous pouvons aboutir à ce qui suit (en calculant uniquement en MWh, le GJ étant peu usité et susceptible d'erreur d'équivalence) :

Ep, compte tenu que cet incinérateur ne commercialise pas de chaleur, mais seulement de l'énergie électrique, est égal à $56\ 000\ \text{MWh} \times 2,6 = 145\ 600\ \text{MWh}$.

Ef, est égal à l'apport énergétique annuel des brûleurs de démarrage et de maintien de température, non communiqué par l'exploitant, mais que nous estimons à environ $5\ 000\ \text{MWh/an}$.

Ew est égale à $128\ 000\ \text{T/an} \times$ par un PCI générique de $2044\ \text{th/t}$ ou $2,376\ \text{MWh/t}$, **soit 304 328 MWh/an**.

Ei, dans le cas de Lunel-Viel, est l'énergie électrique achetée à EDF pour les démarrages d'installation. L'exploitant n'indique pas en 2009 qu'il aurait acheté de l'énergie électrique à EDF !

Le choix d'un coefficient arbitraire de **0,97** pour tenir compte des pertes thermiques dues aux mâchefers, mériterait une clarification. Il peut y avoir **5%** d'imbrûlés dans les mâchefers et la chaleur sensible de ceux-ci, qui sortent du four à quelques 400°C , constitue une perte bien supérieure à 3%.

Appliquons donc cette formule au cas de Lunel-Viel en 2009 :

$$\mathbf{Pe = (145600 - (5000)) \div 0,97(304328 + 5000) = 0,45.}$$

Ainsi, avec une formule aussi alambiquée, on arrive tout de même à une « *performance énergétique* » de **0,45**, alors que le vrai calcul du rendement ne donnerait seulement que **0,175**.

Ne doutons pas que les exploitants soient capables de prouver que leurs installations seraient toujours justiciables de l'appellation pompeuse de « valorisation énergétique » alors qu'il n'en est rien !

Valorisation thermique des incinérateurs :

On comprend bien évidemment l'intérêt qu'il y aurait à valoriser en premier l'énergie thermique des incinérateurs compte tenu qu'elle est produite, comme exposé ci-avant, avec un rendement sur PCI de quelque 75 %, alors que l'énergie électrique ne l'est qu'avec un rendement de quelque 17,5 %.

Mais hélas, peu d'incinérateurs en France disposent dans leur voisinage d'acheteurs potentiels d'énergie thermique ayant un profil de consommation en adéquation avec le profil de production de chaleur de l'incinérateur. En effet, un incinérateur s'efforce de fonctionner à sa puissance nominale tout au long de l'année, alors que les besoins thermiques des utilisateurs sont rarement constants toute l'année. Donc, à l'exception des gros incinérateurs de la ceinture parisienne qui alimentent le réseau de

chaleur de Paris en énergie dite « de base » (eau chaude sanitaire et pertes du réseau), très peu d'autres incinérateurs sur le sol national bénéficient d'un tel environnement favorable. C'est la raison pour laquelle nous évoquons principalement le rendement de la seule production d'énergie électrique.

D'autre part, il faut signaler le prix de reprise exagéré imposé à EDF par l'État sans omettre le fait que des déchets incinérés, mais qui auraient pu également être recyclés (papiers-cartons et plastiques notamment) ont un contenu énergétique plus important que celui imputable au seul PCI, il s'agit de l'énergie dépensée dans les procédés de fabrication de ces produits et que l'incinération détruit irrémédiablement.

Maurice SARAZIN, président de l'APPEL,
25 mai 2011