



**We will be under the same roof**

*Ingénierie des Procédés- Etudes Générales  
Audits Energétiques- Cogénération*

# **GUIDE CHAUDIERES**

**Date :** 01/2008  
**Rév. :** 0  
**Par :** PARTNERS

18, rue Nelson Mandela 2045 L'Aouina-Tunis  
Tél. : (00 216) 71 724 032/760 110 – Fax : (00 216) 71948 402/71 760 110/724 032  
Mobile : (00 216) 98 270 992  
e-mail : [nejib.boujnah@partners-tun.com](mailto:nejib.boujnah@partners-tun.com)  
Site web : [partners-tun.com](http://partners-tun.com)

# SOMMAIRE

<b>1. LA COMBUSTION :</b> .....	4
<b>1.1. DEFINITION :</b> .....	4
<b>1.2. LES PARAMETRES DE LA COMBUSTION :</b> .....	4
<i>1.2.1. Teneur en CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> :</i> .....	4
<i>1.2.2. Excès d'air :</i> .....	4
<i>1.2.3. Les pertes de la combustion:</i> .....	5
<i>1.2.4. Les pertes par les fumées :</i> .....	5
<i>1.2.5. Le rendement:</i> .....	6
<b>2.1. POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR:</b> .....	7
<b>2.2 POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR :</b> .....	7
<b>2.3 TABLEAU COMPARATIF :</b> .....	7
<b>3. LES CHAUDIERES :</b> .....	8
<b>3.1. CLASSIFICATION :</b> .....	8
<i>3.1.1. Les chaudières à tubes de fumées :</i> .....	8
<i>3.1.2. Les chaudières à tubes d'eau :</i> .....	8
<i>3.1.3. Les chaudières à fluide thermique :</i> .....	9
<i>3.1.4. Les chaudières à condensation</i> .....	9
<i>3.1.5. Tableau comparatif :</i> .....	10
<b>3.2. BILAN ENERGETIQUE D'UNE CHAUDIERE :</b> .....	10
<b>3.3. LES PERTES D'UNE CHAUDIERE :</b> .....	11
<i>3.3.1. Pertes chaufferie :</i> .....	11
<i>3.3.2. Pertes à l'arrêt :</i> .....	11
<i>3.3.3. Pertes par rayonnement :</i> .....	11
<b>4.1. QUALITE D'EAU :</b> .....	12
<i>4.1.1. Les sels :</i> .....	12
<i>4.1.2 Oxygène et dioxyde de carbone :</i> .....	12
<i>4.1.3. Les sulfates et les carbonates :</i> .....	12
<i>4.1.4. Tableau récapitulatif :</i> .....	14



We will be under the same roof

4.2.1. <i>En tout ou rien</i> :	15
4.2.2. <i>En 2 allures</i> :	15
4.2.4. <i>En tout ou peu progressivement</i> :	15
4.2.5. <i>En modulation</i> :	15
5. LA MAINTENANCE :	15
6. LE DIAGNOSTIC :	16

## 1. LA COMBUSTION :

### 1.1. DEFINITION :

La combustion résulte de l'action chimique de l'oxygène de l'air sur les éléments du combustible susceptibles de se combiner avec lui. Cette combustion s'accompagne d'un dégagement de chaleur.

### 1.2. LES PARAMETRES DE LA COMBUSTION :

#### 1.2.1. Teneur en $CO_2$ et $O_2$ :

La combustion peut être caractérisée par l'excès d'air ( $\lambda$ ) ou la teneur en  $O_2$  ou encore la teneur en  $CO_2$  des fumées. A l'aide du taux de  $CO_2_{max}$ , propre à chaque carburant et la mesure d'oxygène utilisé ; la concentration volumique en dioxyde de carbone peut être calculée par la formule suivante :

$$CO_2 = CO_{2\ max} \cdot [1 - (O_2 / 21)]$$

La teneur maximale en  $CO_2$  que l'on peut atteindre dans les gaz de combustion est de **15,2 %** pour le fioul et **de 11,9 %** pour le gaz naturel. Pratiquement, il est impossible de régler le brûleur à ces valeurs sans produire d'imbrûlés (suie, CO).

Généralement les valeurs cibles sont de:

- **12,5 %** pour les chaudières fuel de moins de 400 kW.
- **13 %** pour les chaudières fuel de plus de 400 kW.
- **10 %** pour les chaudières gaz naturel

#### 1.2.2. Excès d'air :

L'excès d'air exprime la quantité d'air en excès par rapport à la quantité d'air minimum nécessaire à une combustion complète. Le calcul de lambda se fait à partir de la connaissance du  $CO_{2\ max}$  du carburant sélectionné et du  $CO_2$  calculé, en utilisant la formule suivante :

$$\lambda = CO_{2\ max} / CO_2 = 21 / (21 - O_2)$$

A titre indicatif, on peut retenir les valeurs suivantes:

Puissance de chaudière	Nature de combustible	Excès d'air exigé
< 30 MW	Gaz ou fioul	15%
> 30 MW	Gaz ou fioul	De 5 à 10%
-	Charbon	De 15 à 50 %

### 1.2.3. Les pertes de la combustion:

Les pertes de la combustion sont calculées selon la formule de *Siebert* :

$$\begin{aligned}
 P &= (T_{\text{gaz}} - T_{\text{amb}}) \times (A_1 / \text{CO}_2 + B) \\
 &= (T_{\text{gaz}} - T_{\text{amb}}) \times (A_1 / (21 - \text{O}_2) + B)
 \end{aligned}$$

Avec :

- $T_{\text{gaz}}$ : C'est la température des gaz de combustion.
- $T_{\text{amb}}$  : C'est la température ambiante qui entre dans le brûleur
- $\text{CO}_2$ : C'est le taux d'oxyde de carbone calculé à partir de la concentration d'oxygène et du  $\text{CO}_{2\text{max}}$ .
- $A_1, B$ : Ce sont les coefficients qui caractérisent chaque carburant.

### 1.2.4. Les pertes par les fumées :

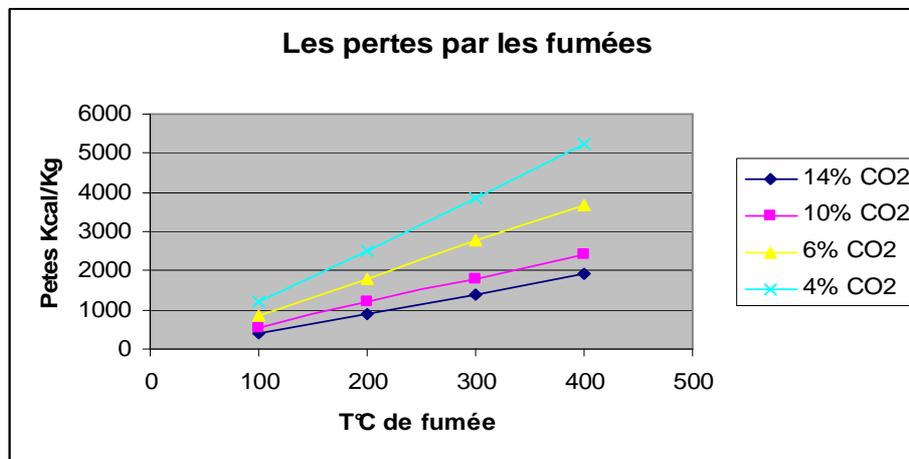
Une certaine quantité de chaleur est perdue dans les fumées. Les pertes dans les fumées peuvent être calculées par la formule suivante :

$$P_f = k \cdot (T_f - T_a) / \text{CO}_2\%$$

- $P_f$  : pertes par les fumées (en %) correspondant au pouvoir calorifique du combustible consommé ;
- $k$  : Ce coefficient dépend de la nature de combustible. (Voir tableau ci-dessous)

Combustible		Coefficient k
Gaz naturel	Brûleur à air soufflé	0,46
	Brûleur atmosphérique	0,42
Propane – Butane		0,5
Combustible liquide		0,59

- $T_f - T_a$  : écart de température entre les fumées ( $T_f$ ) et l'air comburant ( $T_a$ ) ;
- ( $CO_2$ ) % : teneur (%) en  $CO_2$  des fumées.



### 1.2.5. Le rendement:

Le rendement peut être défini comme suit :

$$\eta = 100\% - P_f$$

Cette formule ne tient pas compte des combustions incomplètes, des pertes par radiation, etc.

## 2. LES COMBUSTIBLES :

### 2.1. POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR:

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de un mètre cube normal de gaz (1 Nm<sup>3</sup>). L'eau formée pendant la combustion étant ramenée à l'état liquide et les autres produits étant à l'état gazeux.

### 2.2 POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR :

C'est l'énergie résultant de la combustion sans tenir compte de l'énergie consacrée à la vaporisation de l'eau.

### 2.3 TABLEAU COMPARATIF :

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques des différents combustibles fréquemment utilisés :

Carburant	Fuel N°2	Gas oil	GPL	Butane	Propane
Formule	-	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>18</sub>
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	950	845	2,35	2,703	2,008
PCI (Kcal/Kg)	9 615	10 270	2 627	10 890	11 058
Température d'auto inflammation (°C)	300	250	>400	510	490
A <sub>1</sub>	0,61	-	0,42	0,475	0,475
A <sub>2</sub>	0,81	-	0,63	0,71	0,73
B	0	-	0,008	0	0
CO <sub>2max</sub>	15,9	-	14	14,1	13,7

### 3. LES CHAUDIERES :

#### 3.1. CLASSIFICATION :

##### 3.1.1. Les chaudières à tubes de fumées :

Ce sont des chaudières :

- Parcourues intérieurement par les gaz de combustion.
- Fournissent un débit de vapeur saturée de **1 à 25 tonnes/heure**, en basse et moyenne pression.
- Le combustible utilisé est soit du gaz soit du fioul.

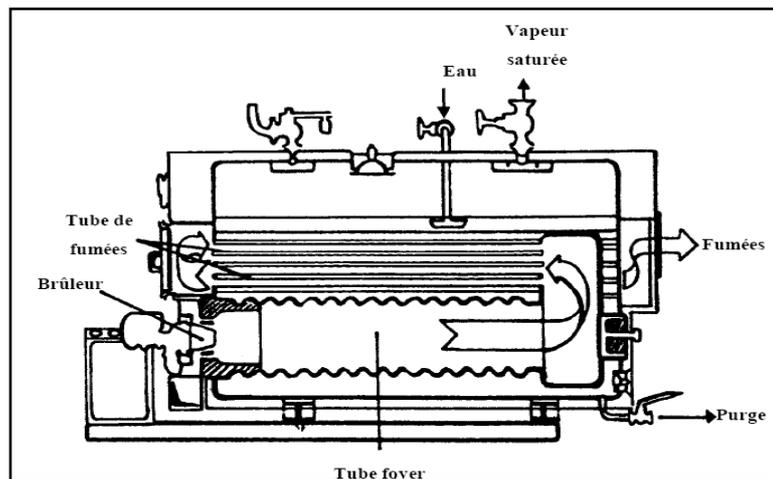
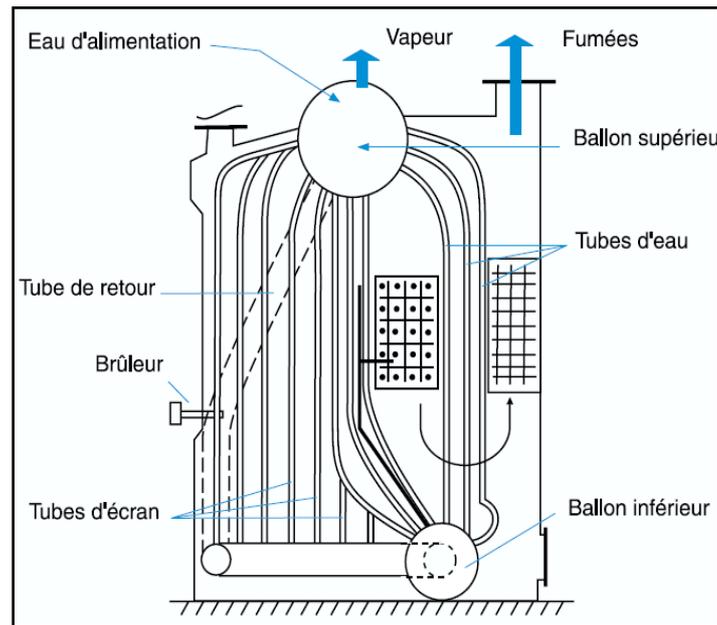


Schéma de principe d'une chaudière à tubes de fumées (Techniques de l'ingénieur)

##### 3.1.2. Les chaudières à tubes d'eau :

Ce sont des chaudières :

- Parcours intérieurement par l'eau et l'émulsion eau vapeur.
- Fournissent un débit de vapeur saturée supérieur à **20 tonnes/heure**, en moyenne et haute pression.
- Le combustible utilisé est soit du gaz, du fioul, du charbon
- Ils possèdent deux réservoirs appelés ballon distributeur (en partie inférieure) et ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs, dans cet ensemble circule l'eau qui se transforme en vapeur.



**Schéma de principe d'une chaudière à tubes d'eau (Techniques de l'ingénieur)**

### ***3.1.3. Les chaudières à fluide thermique :***

Pour ce type de chaudière ; un fluide caloporteur circule dans un serpentin chauffé par la flamme du brûleur et par les fumées. Il est ensuite distribué à faible pression (quelques bars) au travers d'un réseau fermé. Ce type de chaudières s'étend de **50 à 6000 th/h**.

### ***3.1.4. Les chaudières à condensation***

Le principe des chaudières à condensation est basé sur la récupération, à travers des parois refroidies d'un changeur, l'énergie latente contenue dans la vapeur d'eau.

Le gain énergétique réalisé grâce à une chaudière à condensation se situe à deux niveaux :

- Condensation de la vapeur d'eau des fumées (pour une chaudière gaz, gain maximum de 11 % du PCI). On parle de gain en chaleur latente.
- Diminution de la température des fumées grâce à l'augmentation de la surface d'échange (de 150°C à 45°C). On parle de gain en chaleur sensible.

Le rendement de ces chaudières peut donc atteindre des valeurs supérieures à 100%. Toutefois une attention particulière doit être accordée à la condensation du soufre et la formation de l'acide sulfurique très corrosif.

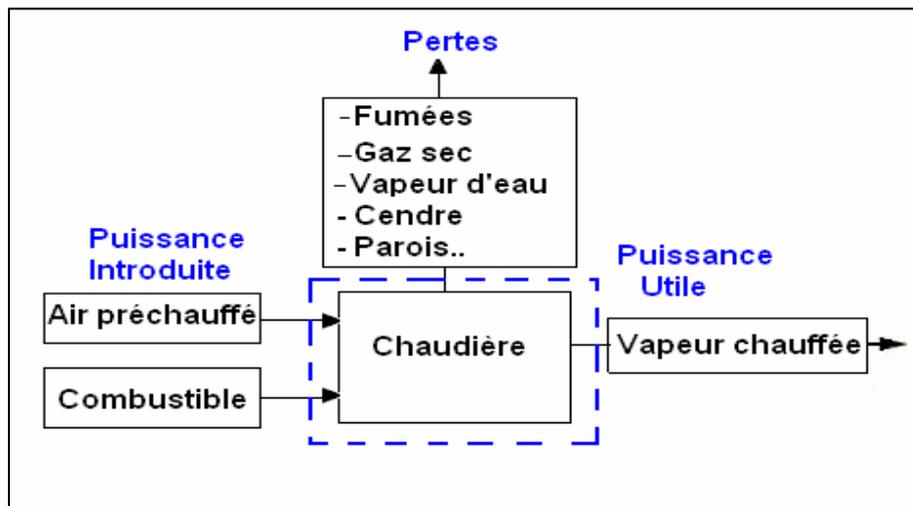
### 3.1.5. Tableau comparatif :

Le tableau ci-dessous compare les 2 types de chaudières fréquemment utilisées, les chaudières à tubes d'eau et les chaudières à tubes de fumées.

Propriété	Tubes de fumée	Tubes d'eau
Mise en route	Lente	Rapide
Adaptation au changement de régime	Médiocre	Bonne
Surchauffe	Moyenne	Rapide
Sécurité	Médiocre	Bonne
Encombrement	Faible	Fort
Prix	Limité	Elevé
Applications usuelles :		
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Puissance</li> <li>○ Débit</li> <li>○ Pression maximale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Elevé</li> <li>○ 1,5 à 25 t/h</li> <li>○ 10 à 20 Bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Importante</li> <li>○ 4 à 200 t/h</li> <li>○ 90 à 100 Bars</li> </ul>

### 3.2. BILAN ENERGETIQUE D'UNE CHAUDIERE :

Le bilan énergétique d'une chaudière peut être schématisé comme suit :



A partir du schéma ci-dessus on peut écrire :

$$P_u = \text{Puissance introduite} + \sum \text{Pertes} = Q_s \cdot h_s - Q_e \cdot h_e$$

Avec :

- $Q_e$  : Débit du fluide entrant et  $h_e$  : son enthalpie

- $Q_s$  : Débit du fluide sortant et  $h_s$  : son enthalpie

### 3.3. LES PERTES D'UNE CHAUDIERE :

#### 3.3.1. Pertes chaufferie :

Elles sont constituées principalement par les pertes au niveau de la porte foyère et dépendent de l'état et de l'âge de la chaudière

- 1 à 6% pour les anciennes chaudières

- 1 à 3% pour les nouvelles chaudières.

#### 3.3.2. Pertes à l'arrêt :

Elles sont fonction de l'état du calorifugeage

- 1 à 1,5 % pour les anciennes chaudières

- 0,4 à 1% pour les nouvelles chaudières.

#### 3.3.3. Pertes par rayonnement :

Elles correspondent aux échanges thermiques entre la surface extérieure et l'ambiance.

Elles peuvent être calculées par la formule suivante :

$$P_r [\%] = 1200 \cdot S \cdot (T_c - T_a) / P$$

Avec :

- S : surface extérieure [m<sup>2</sup>]

- $T_c - T_a$  : écart de température entre la face apparente ( $T_c$ ) et l'ambiance ( $T_a$ ), [°C]

- P : puissance de la chaudière en [W].

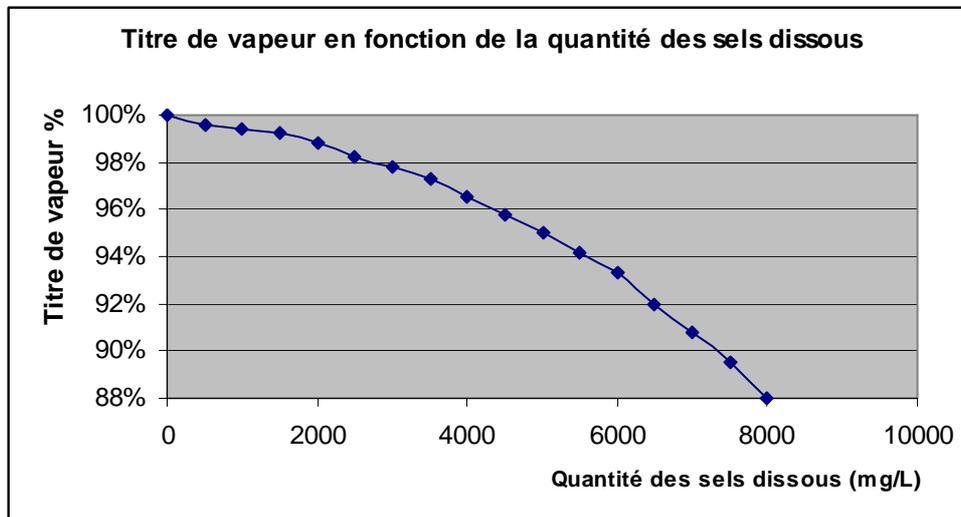
## 4. OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT D'UNE CHAUDIERE :

Plusieurs paramètres peuvent influencer sur le fonctionnement de la chaudière et perturber son rendement :

### 4.1. QUALITE D'EAU :

#### 4.1.1. Les sels :

Dans l'eau existe toujours une certaine quantité de sels dissous, en équilibre entre eux qui lorsque l'eau bout restent à l'intérieur du corps de chaudière. La courbe ci-dessous montre la diminution du titre de vapeur avec la quantité des sels dissous dans l'eau d'alimentation.



Source : STANDARKESSELL

#### 4.1.2 Oxygène et dioxyde de carbone :

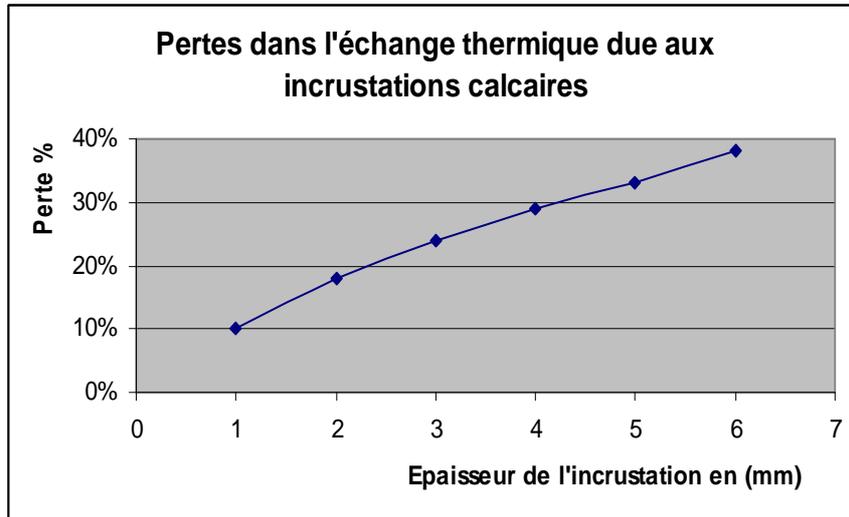
Ils peuvent arriver avec l'eau d'alimentation par dissociation des substances dans la chaudière. Avec l'utilisation d'un dégazeur, ces gaz se réduisent mais ne sont pas totalement éliminés. Les gaz dans l'eau à 20°C peuvent absorber 9 ppm pour l'oxygène et 0,6 ppm pour le CO<sub>2</sub>. Généralement les industriels fixent environ 80°C comme température de dégazage. Cependant, l'élimination totale de l'oxygène dissous dans l'eau, nécessite une température de dégazage de 105°C.

#### 4.1.3. Les sulfates et les carbonates :

Les sulfates et les carbonates, contenus dans l'eau, se fixent dans les zones chaudes à cause de la haute température en provoquant des incrustations. Dans les zones moins chaude, ils se

déposent et restent sous forme de boues en devant être purgés. D'où la nécessité de faire des purges fréquentes.

Pour le cas du calcaire ; les pertes d'échange thermique varient linéairement en fonction de l'épaisseur de l'incrustation :

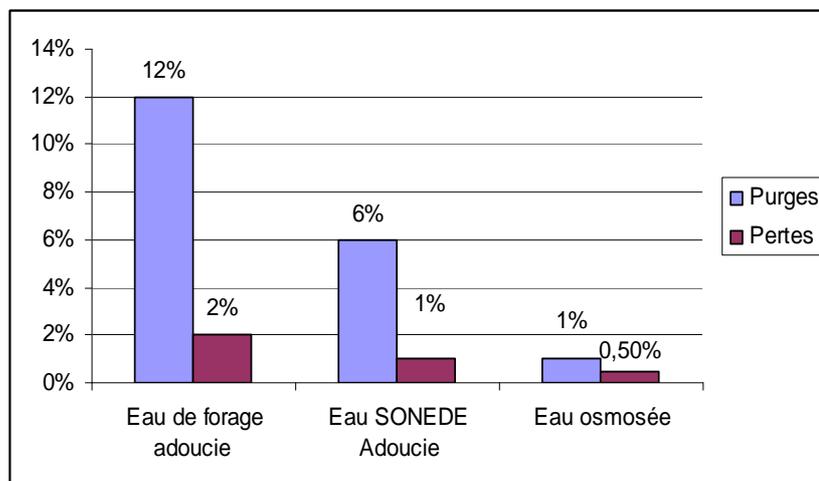


L'eau d'alimentation présente plusieurs substances qui peuvent perturber le fonctionnement d'une chaudière comme par exemple les incrustations, les corrosions, les mousses et les dépôts à base de carbone.

Donc un bon choix de l'eau d'alimentation permet de :

- Minimiser les purges.
- Réduire les pertes.

Le schéma ci-dessous compare 3 types d'eau utilisées pour la production de la vapeur :



#### 4.1.4. Tableau récapitulatif :

Le tableau ci-dessous résume les causes qui peuvent perturber les paramètres d'une chaudière et réduire donc son rendement.

<b>Paramètres</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>causes</b>
Dureté	Incrustations	Dysfonctionnement du traitement d'eau – contamination condensas
Alcalinité	Fragilité caustique	Dysfonctionnement du traitement d'eau – complément chimique – contamination condensas – purge
Chlorures, sulfates, Nitrates	Corrosion	Anomalie du traitement d'eau – contamination condensas – purge
Fer	Dépôt, corrosions	Dysfonctionnement du traitement d'eau – corrosion dans le cycle
Cuivre	Corrosions	Corrosions
Silice	Incrustations	Dysfonctionnement du traitement d'eau – pollution condensas - purge
Oxygène	Corrosions	Dysfonctionnement du dégazage et/ou compléments chimiques
Hydrogène	Fragilité de l'acier	Décomposition des compléments chimiques – fuite de résine
Dioxyde de carbone	Corrosions	Dysfonctionnement du dégazage et/ou compléments chimiques
Conductibilité	Corrosions, Incrustations	Dysfonctionnement du traitement d'eau - pollution des condensas – purge insuffisante
Huile	Corrosions, aspiration	Pollution condensas
PH	Corrosions, fragilité	Dysfonctionnement du traitement d'eau – pollution des condensas – purge – compléments chimiques

**Source : STANDARKESSELL**

## **4.2. REGULATION DES BRULEURS :**

On distingue 4 modes de fonctionnement des brûleurs:

### **4.2.1. En tout ou rien :**

Lors de la demande de chaleur, le brûleur démarre directement à pleine puissance.

### **4.2.2. En 2 allures :**

En cas de demande de chaleur, le brûleur est enclenché en première allure (qui représente entre 40 et 60 % de la puissance nominale). Après un délai déterminé (relais programmable), le brûleur passe à pleine puissance sauf si le régulateur signale que cette pleine puissance n'est pas nécessaire. Dans ce dernier cas, la première allure est maintenue.

### **4.2.4. En tout ou peu progressivement :**

Si la demande de chaleur est inférieure à la puissance en première allure, le brûleur se met à l'arrêt. Si elle y correspond, le brûleur maintient son fonctionnement en première allure. Si elle en est supérieure, le brûleur passe progressivement en deuxième allure.

### **4.2.5. En modulation :**

Avec un brûleur modulant, toutes les allures de fonctionnement sont possibles, au delà d'un minimum souvent de l'ordre de 30 %. Les débits d'air et de combustible sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise, ce qui permet un fonctionnement quasi continu.

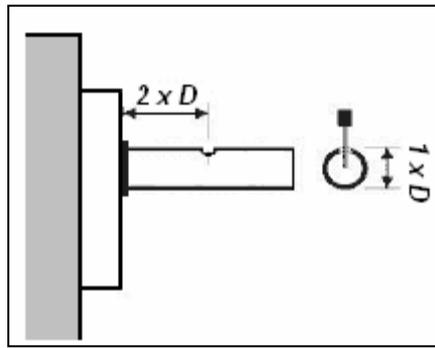
## **5. LA MAINTENANCE :**

- Il est très utile de faire analyser, une fois par an, la qualité de l'eau d'une installation de chauffage par un laboratoire spécialisé : contrôle de l'acidité, de la dureté, de la conductivité, teneur en sels, pourcentage de calcaire...
- Le nettoyage de la chaudière est nécessaire puisque la présence de suie dans la chaudière diminue l'échange entre les fumées et l'eau.
- Le réglage du brûleur permet de contrôler la combustion et d'optimiser l'excès d'air afin d'atteindre un bon rendement.

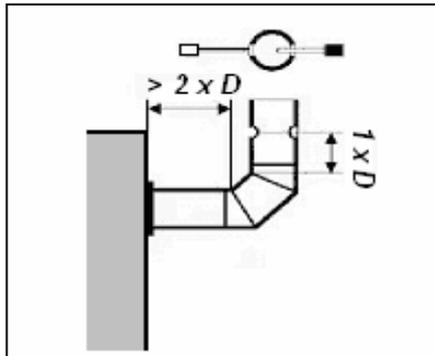
## 6. LE DIAGNOSTIC :

Le diagnostic des systèmes de production de chaleur doit comprendre au moins les éléments suivants :

- Le contrôle de la qualité d'eau.
- Le contrôle de l'état des tubes de chaudière si elle est à l'arrêt.
- Le contrôle du type de régulation des brûleurs.
- Pendant l'analyse de combustion il faut suivre les conditions de mesure suivantes (Les Normes NF X 50-010 et NF X 50-011 EN50291) :
  - Mesure sur un conduit de fumée rectiligne suffisamment long



- Mesure sur un conduit de fumée présentant un coude



- La quantification des besoins effectifs en vapeur ou en eau chaude
- La suivie de la consommation de la chaudière en combustible
- Le repérage des conditions de distribution de la chaleur (Calorifugeage des conduites de vapeur ou d'eau).

**Références:**

- Guide pratique de l'entreprise –ATEE
- North American Combustion handbook- Volume 1-3ème édition.
- Techniques de l'ingénieur.
- Documents STANDARKESELL

**Sites Internet:**

- [www.ecom.fr](http://www.ecom.fr)
- [www.energie.arch.ucl.ac.be](http://www.energie.arch.ucl.ac.be)
- [www.nano-sense.com](http://www.nano-sense.com)