

Formation de Technicien de Maintenance en Equipements Thermiques

Tome 5

- Propriétés du Gaz Naturel et du Fioul
- Calcul de la Puissance d'un Brûleur Gaz
- Calcul du Calibre d'un Gicleur Fioul
- Les Chaudières: Types, Pertes, Rendements
- Choisir un Brûleur
- La Combustion



Sept. 2010 - Sept. 2011

PROPRIETES DU GAZ NATUREL ET DU FIOUL

Les Combustibles Gazeux

1) Les Gaz Naturels:

Les gaz naturels sont essentiellement composés de **Méthane (CH₄)**. Ils proviennent de gisements naturels souterrains ou sous-marins et sont transportés jusqu'aux régions utilisatrices par oléoducs ou par navire (méthaniers).

Les gaz naturels ne contiennent pas de monoxyde de carbone (**CO**) et ne sont donc pas toxiques. Ils sont **inodores**. Les réglementations de sécurité imposent leur odorisation afin de détecter les fuites.

Deux types de gaz naturels sont distribués:

- ceux de type **H** (Haut pouvoir calorifique) (*PCS compris entre 10,7 et 12,8 kWh / m³*)
- ceux de type **L** (Low) ou **B** (Bas) (*PCS compris entre 9,5 et 10,5 kWh / m³*)

En France, l'ensemble des régions sont alimentées en gaz de type **H** (gisements en Algérie, Russie, Mer du Nord, Lacq) **sauf le Nord- Pas de Calais** qui est alimenté en gaz de type **B** (ou **L**) en provenance de Groningue (ville hollandaise).

Remarque: Le gisement de Groningue est épuisé. Afin de continuer à desservir la région Nord avec ce gaz (afin que les utilisateurs n'aient pas à modifier le réglage de tous les brûleurs), GDF utilise un gaz de type H et rajoute de l'azote (gaz inerte) afin de ramener le PCS à une valeur égale à celle du Groningue.

Les pressions de distribution:

- 20 mbar ([chez les particuliers dans les régions avec un gaz H](#))
- 25 mbar ([chez les particuliers dans les régions avec un gaz B](#))
- 300 mbar ([dans les chaufferies pour limiter le diamètre des tuyauteries](#))

2) Les Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL):

Désignés par le terme gaz de pétrole liquéfié (GPL), le **Butane (C₄H₁₀)** et le **Propane (C₃H₈)** proviennent du raffinage du pétrole. Ils sont vendus liquéfiés en récipients. Les GPL sont des mélanges dits "commerciaux".

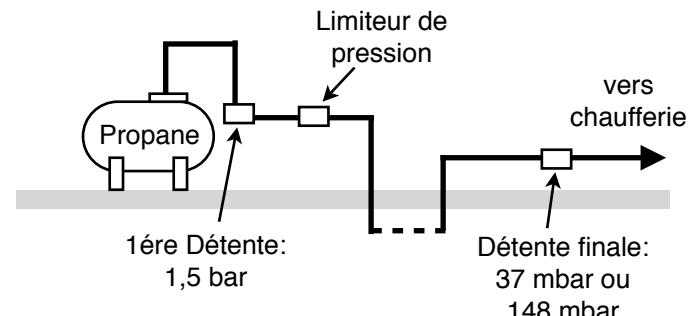
Comme les gaz naturels, ils ne contiennent pas de monoxyde de carbone.

Par canalisation, on distribue des mélanges de ces gaz avec l'air, mélanges substituables aux gaz naturels (air propané 15,6) ou aux gaz manufacturés (air propané 7,5 et air butané 7,3)

PROPRIETES DU GAZ NATUREL ET DU FIOUL

Les pressions de distribution:

- Propane: 37 mbar
148 mbar
- Butane: 28 mbar
112 mbar



3) Les Gaz Manufacturés:

Les gaz manufacturés sont de moins en moins utilisés. Ils furent fabriqués par distillation de la houille puis par reformage et craquage des produits pétroliers ou de gaz naturel.

En raison de leur teneur en monoxyde de carbone, les gaz manufacturés sont toxiques.

PCS et PCI des Combustibles Gazeux

PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur):

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète (stoechiométrique) de 1 m³ (n) de gaz, l'eau dégagé par la combustion de l'hydrogène restant à l'état de vapeur.

PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur):

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète (stoechiométrique) de 1 m³ (n) de gaz, l'eau dégagé par la combustion de l'hydrogène étant supposée condensée et ramenée à 0°C.

La chaleur latente récupérée vient donc s'ajouter au PCI.

La chaleur latente de condensation de l'eau (environ **700 W.h/kg**) est la quantité de chaleur que cède 1kg de vapeur pour se transformer en 1kg d'eau.

Pour le **Gaz Naturel**, la combustion stoechiométrique de 1 m³ (n) de gaz dégage 1,6 kg de vapeur d'eau. La chaleur latente récupérable est donc de:

$$(700 \text{ W.h/kg}) \times (1,6 \text{ kg}) = 1100 \text{ W.h par norme mètre cube}$$

Comme le PCI des gaz naturels est en moyenne de 10 kWh/m³(n), le PCS est environ de **11%** supérieur au PCI (*voir tableau ci-après*).

PROPRIETES DU GAZ NATUREL ET DU FIOUL

Nature du gaz	PCI	PCS
Lacq	10,2 kWh/m ³ (n)	11,3 kWh/m ³ (n)
Algérie (Fos)	10,6 kWh/m ³ (n)	11,8 kWh/m ³ (n)
Algérie (Montoir)	11,1 kWh/m ³ (n)	12,3 kWh/m ³ (n)
Mer du Nord	10,1 kWh/m ³ (n)	11,2 kWh/m ³ (n)
Russie	10,1 kWh/m ³ (n)	11,2 kWh/m ³ (n)
Groningue	9,1 kWh/m ³ (n)	10,1 kWh/m ³ (n)
Butane commercial	32,9 kWh/m ³ (n)	35,6 kWh/m ³ (n)
	12,7 kWh/kg	13,7 kWh/kg
Propane commercial	25,4 kWh/m ³ (n)	27,5 kWh/m ³ (n)
	12,8 kWh/kg	13,9 kWh/kg

Autres Caractéristiques du Gaz Naturel (type H)

Température théorique en combustion neutre	1950°C dans l'air 2750°C dans l'oxygène
Point de rosée eau Température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans les fumées se condense au contact des parois froides de la chaudière ou de la cheminée.	59°C pour 0% d'excès d'air 55°C pour 20% d'excès d'air 52°C pour 40% d'excès d'air
Température d'inflammation Température minimale à laquelle il faut porter le mélange air/gaz pour que la combustion s'amorce.	632°C
Limites d'inflammabilité	<p>0% air 100% gaz</p> <p>100% air 0% gaz</p> <p>Trop d'air</p> <p>Combustion</p> <p>Manque d'air</p> <p>5 % → 16 % Gaz Naturel H</p> <p>1,9 % → 8,5 % Butane</p> <p>2,4 % → 9,3 % Propane</p>

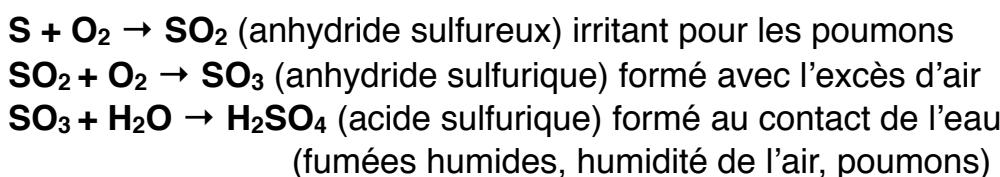
PROPRIETES DU GAZ NATUREL ET DU FIOUL

Le Fioul

Le fioul est un combustible liquide, d'aspect clair et limpide (si il est de bonne qualité).

Sa combustion dégage peu d'eau comparativement au gaz naturel. La différence est donc faible entre le PCI et le PCS du fioul. On ne trouve donc pas de chaudière à condensation avec le fioul (pas d'intérêt car peu de chaleur latente à récupérer).

Par contre, il y a du soufre dans le fioul ce qui va dégager des produits de combustion particuliers:



Caractéristiques du Fioul

Combustible	PCI	PCS
Fioul domestique	11,9 kWh/kg	12,7 kWh/kg
Fioul lourd (S = 2 %)	11,4 kWh/kg	12 kWh/kg
Fioul lourd (S = 1 %)	11,8 kWh/kg	12,5 kWh/kg

PCI et PCS du fioul domestique (FOD)	PCS = 12,7 kWh/kg PCI= 11,9 kWh/kg ou PCI= 10 kWh/litre
Point de rosée eau	50°C pour 0% d'excès d'air
Point de rosée acide (n'existe pas avec le gaz) T° mini à laquelle les vapeurs d'acide sulfurique se condensent (corrosion des métaux)	120 °C pour 0°C d'excès d'air
Point de trouble T° mini à laquelle se forme les premiers cristaux de paraffine visibles à l'oeil nu.	≤ +2°C (fuel qualité standard) ≤ -5°C (fuel qualité supérieure)
Température limite de filtrabilité T° mini à laquelle le fioul ne passe plus dans les filtre	≤ -4°C (fuel qualité standard) ≤ -20°C (fuel qualité supérieure)

PROPRIETES DU GAZ NATUREL ET DU FIOUL

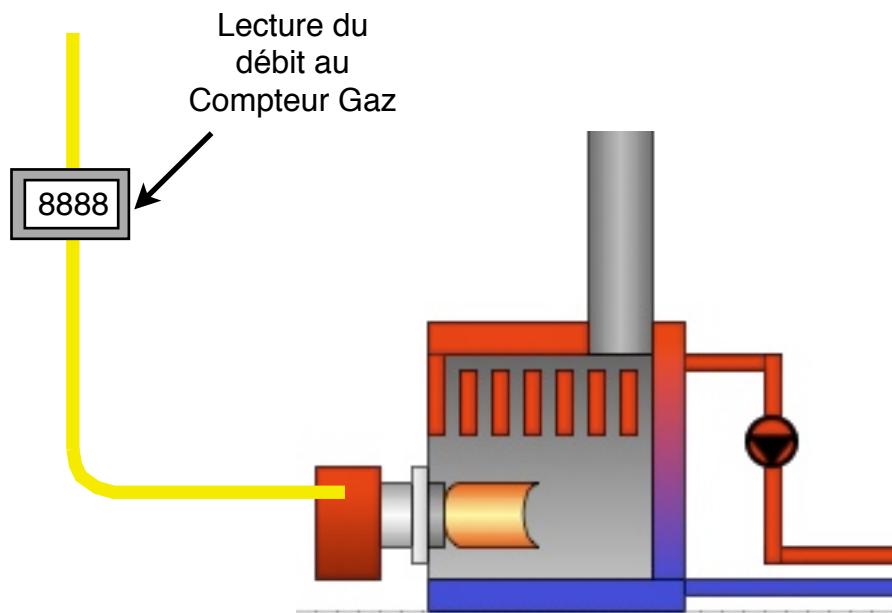
Point d'écoulement Température mini à partir de laquelle le fioul se fige. C'est la limite de pompabilité du fioul par le brûleur.	$\leq -9^{\circ}\text{C}$ (fuel qualité standard) $\leq -24^{\circ}\text{C}$ (fuel qualité supérieure)
Viscosité à 20°C C'est la résistance à l'écoulement du fioul. Elle diminue quand la température augmente. Plus la viscosité est faible, plus le produit est pulvérisé finement.	$\leq 9,5 \text{ cSt}$ (fuel qualité standard) $2 \leq \geq 7,5 \text{ cSt}$ (fuel qualité supérieure)
Point de combustion T° mini à partir de laquelle la combustion du fioul enflammé se poursuit d'elle-même	environ 75°C
Température d'inflammation T° mini à partir de laquelle il faut porter un point du mélange fioul / air pour que la combustion s'amorce	environ 360°C
Point éclair T° à laquelle les vapeurs de fioul peuvent s'enflammer en présence d'une flamme ou d'une étincelle. Cette valeur permet de contrôler les risques d'explosion dans les stockages.	compris entre 55°C et 120°C
Densité à 15°C	entre 0,82 et 0,88

CALCUL DE LA PUISSANCE D'UN BRÛLEUR GAZ

Principe de Calcul de la Puissance d'un Brûleur en Fonctionnement

- 1) La puissance consommée par un brûleur gaz en fonctionnement se mesure en relevant sur le compteur le volume de gaz consommé sur une période de temps puis en convertissant ce résultat en m^3/h .
C'est ce que l'on appelle faire un "**top gaz**".
- 2) Ce volume de gaz relevé au compteur doit être **corrigé** afin de se rapporter aux conditions "normales" de température et de pression.
On parle alors de "normo mètre cube" ($\text{m}^3/\text{h} (\text{n})$) ou "mètre cube normal".
- 3) Il faut également connaître le PCI du gaz utilisé.
- 4) La puissance consommée par le brûleur s'obtient alors avec la formule suivante:

$$\text{Puissance brûleur} = \text{Débit gaz en } \text{m}^3/\text{h} (\text{n}) \times \text{PCI}$$



CALCUL DE LA PUISSANCE D'UN BRÛLEUR GAZ

Faire un “Top Gaz”

Le “Top Gaz” est le débit à lire au compteur pendant **36 secondes**.

En multipliant ce débit (m^3) par **100**, on obtient le débit du gaz en m^3/h .



Pour plus de précision, on peut aussi lire le débit pendant **2 minutes** et multiplier le résultat par **30**.

Facteur de Correction du Gaz

Un débit de gaz directement relevé sur un compteur ne peut être utilisé directement. En effet, les gaz sont des fluides compressibles et se dilatent avec la température. Une même quantité de gaz peut se retrouver dans des volumes différents. Par exemple lorsqu'on bouche l'extrémité d'une pompe à vélo avec son doigt et que l'on appuie sur la pompe, on diminue le volume d'air. Pourtant, la quantité d'air ne change pas. Par contre la pression a augmenté ainsi que la température.

Les caractéristiques des gaz (PCI, densité, ...) sont données pour des conditions de pression et de température de référence, dites “**conditions normales**” notées (**n**).

Le mètre cube “normal” est noté **$\text{m}^3 (n)$** . Aussi, un mètre cube “normal” de gaz est un mètre cube de gaz pris à 0°C et 1013 mbar. Or, en fonction de la pression du gaz distribué, sa température et la situation géographique de l'installation (la pression diminue avec l'altitude), le **débit affiché au compteur** sera différent de celui **calculé aux conditions “normales”**.

CALCUL DE LA PUISSANCE D'UN BRÛLEUR GAZ

Pour que le technicien ne soit pas surpris par la différence constatée, il faut affecter au débit lu au compteur un **coefficent de correction** qui convertira le débit aux conditions "normales".

Ce coefficient est défini par la formule:

$$C = \frac{P_{\text{atmosphérique}} + P_{\text{gaz}}}{1013} \times \frac{273}{T_{\text{gaz}} + 273}$$

$P_{\text{atmosphérique}}$: Pression atmosphérique relative en mbar

P_{gaz} : Pression relative de distribution du gaz en mbar

T_{gaz} : Température du gaz en Celsius
(en général, 12°C à 15°C)

Remarque: La température du gaz est très stable (12°C à 15°C) quel que soit la saison. Les canalisations sont enterrées donc protégées. Cependant, la température peut être supérieure à 12-15°C dans certains sites industriels ayant des locaux très chauds (par ex: verrerie). Dans ce cas, si des canalisations de gaz passent dans ces locaux, le gaz est réchauffé.

Une fois le facteur de correction calculé, on peut convertir le débit lu au compteur en débit "normal" par la formule suivante:

$$\text{Débit "normal" (m}^3/\text{h (n)}) = \text{Coeff} \times \text{Débit lu au compteur (m}^3/\text{h)}$$

CALCUL DE LA PUISSANCE D'UN BRÛLEUR GAZ

Exemple de Calcul

Quel est le volume de gaz devant passer au compteur en une heure pour fournir 440 kW de puissance à une installation ?

PCI = 11 kWh/m³(n), T° gaz = 15 °C, P_{gaz} = 300 mbar , P_{atm}= 1000 mbar

1) P= Débit “normal” (m³/h (n)) x PCI soit 440kW = Débit x 11 kWh/m³(n)

2) Débit “normal” = 440/11= **40 m³/h (n)**

3) Facteur de correction= ((1000 mbar + 300 mbar)/1013) x (273/(273 + 15)) = **1,22**

4) Débit “normal” = Débit au compteur x facteur
Débit au compteur = 40 m³/h / 1,22 = **32,88 m³/h**

Si on fait un “top gaz” sur 36 secondes, alors on doit voir passer au compteur le débit suivant:

32,88/100 = 0,3288 m³ soit **329 litres**

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Les Types de Brûleurs Fioul

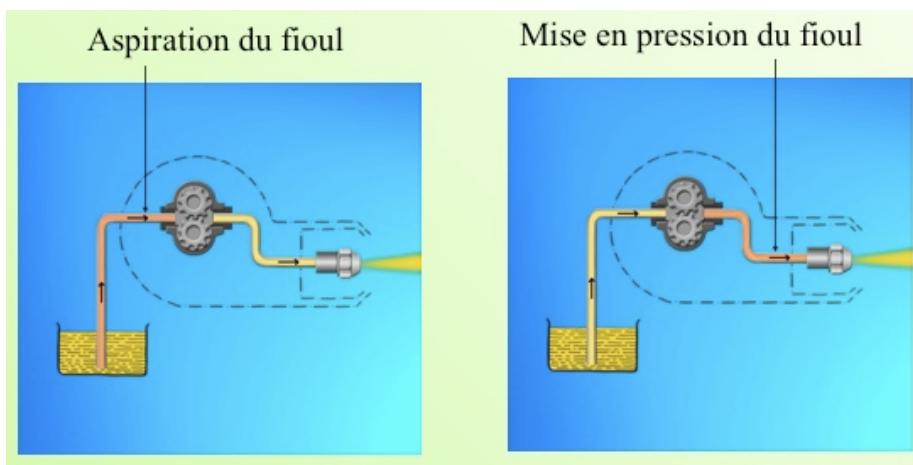
Il existe 2 grands types de brûleurs fioul:

- Les brûleurs à pulvérisation:
 - brûleur à coupelle rotative
 - brûleur à pulvérisation par pression d'huile
 - brûleur à fluide auxiliaire
- Les brûleurs à caléfaction (où le fioul est transformé en gaz)

Nous traiterons ici du brûleur à pulvérisation par pression d'huile (brûleur équipé d'une **pompe fioul** et d'un ou plusieurs **gicleurs**.)

Technologie des Gicleurs Fioul

Le fioul est amené jusqu'à la ligne de gicleur par une pompe. Le rôle de cette pompe est d'**aspirer** le fioul et de le **mettre en pression** dans la ligne de gicleur.



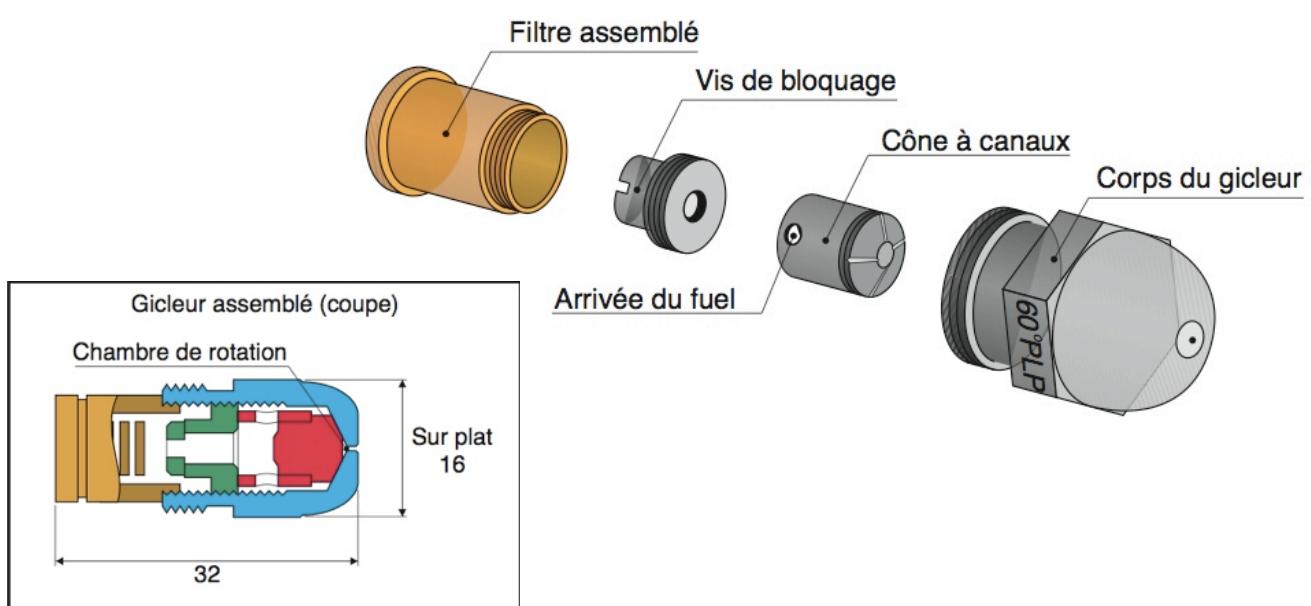
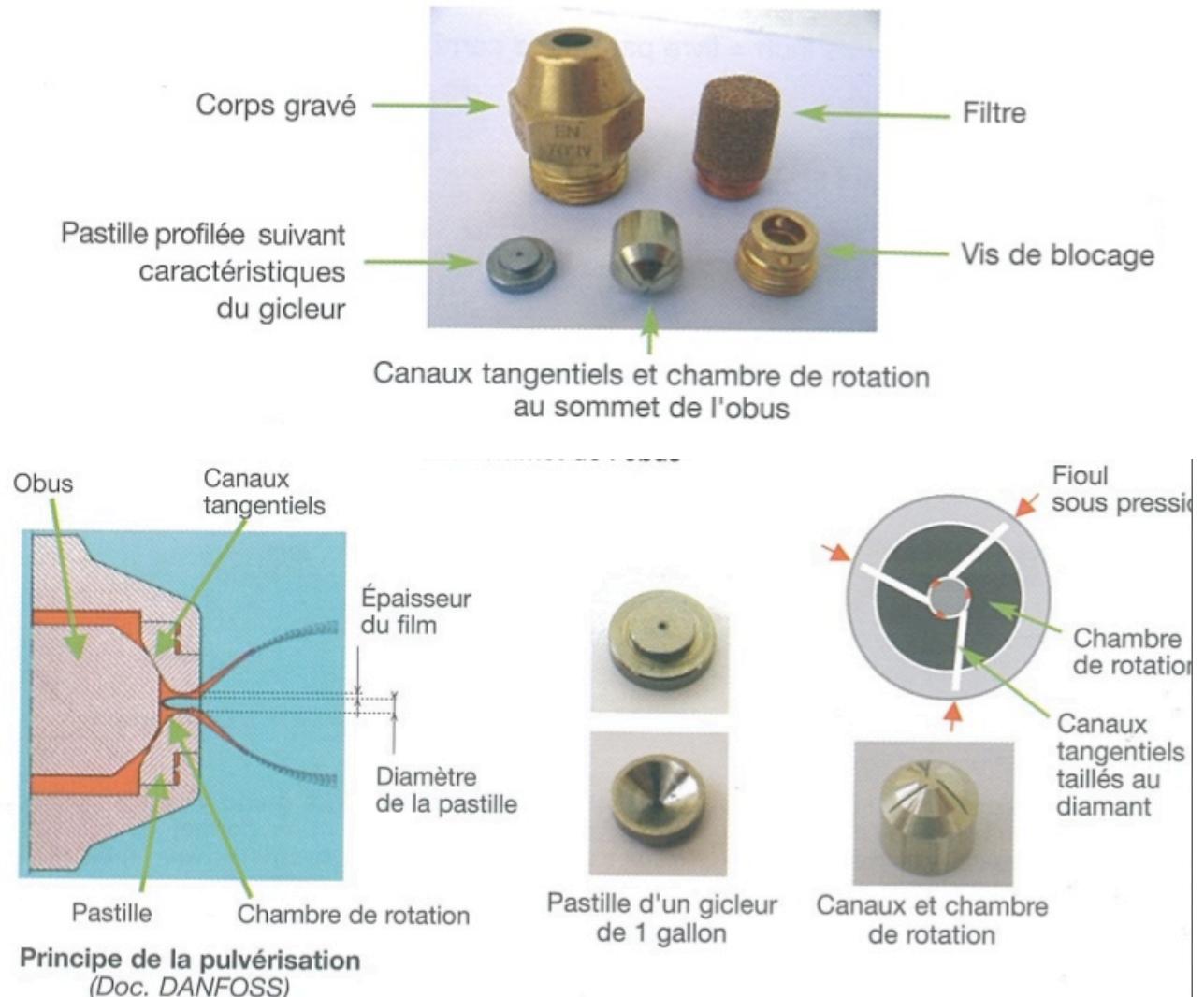
Le fioul traverse le **filtre** du gicleur, pénètre à l'intérieur de la **vis de blocage**, puis le long de l'**obus** et va emprunter obligatoirement les **canaux tangentiels** jusqu'à la chambre de rotation.

La faible section des canaux imprime au fioul une grande vitesse.

La **chambre de rotation** augmente et uniformise la vitesse.

La force centrifuge plaque le fioul contre la paroi de la chambre et il se crée un film en rotation qui avance vers la sortie.

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL



CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Le film de fioul en rotation “explose” dès sa sortie de la pastille en micro-gouttelettes de quelques microns qui forment un entonnoir:



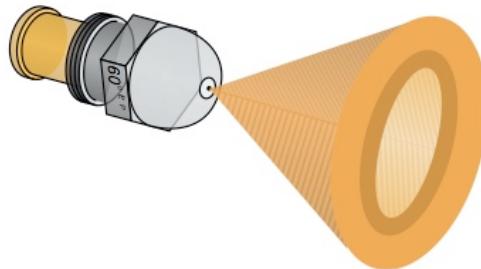
pulvérisation à 5 bar

pulvérisation à 10 bar

pulvérisation à 20 bar

Les milliards de micro-gouttelettes offrent ainsi une **très grande surface de contact** favorisant le mélange avec l'air. Le “brouillard” ainsi créé s'enflamme facilement au contact de la chaleur.

Spectres des Gicleurs Fioul



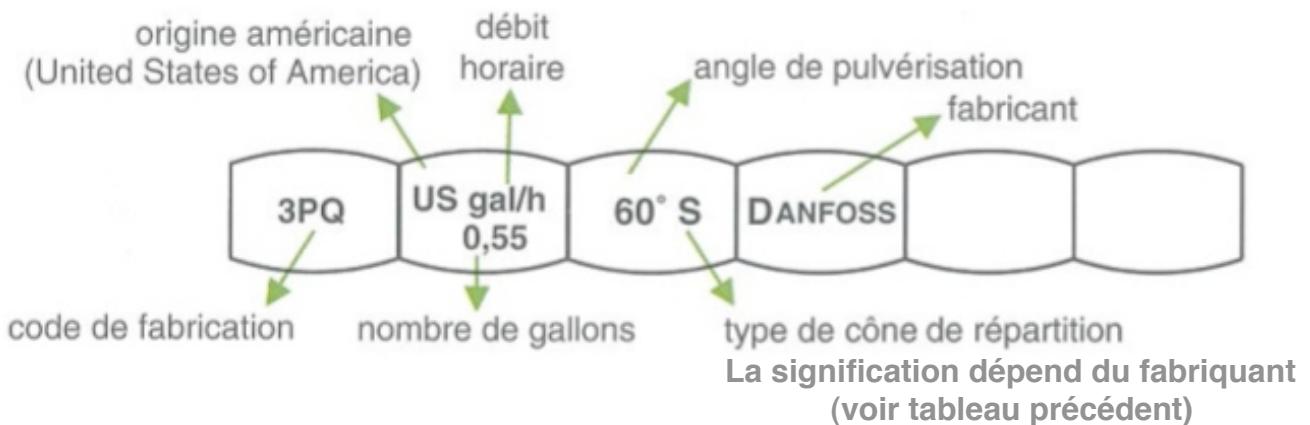
Marques de gicleurs	Répartition des gouttelettes dans le cône de pulvérisation				
	Concentration centrale	Plein I	Semi-plein II	Semi-creux III	Creux IV
Bergonzo Eurojauge	R	R	RCL	RCL	RC
Danfoss	S	S	B	H	H
Delavan	E ou W	W	B	A	A
Girs	A	B	O	C	
Hago	S	ES	P	SS	H
Harsch	S				
Internal	V		HV		
Monarch	R	AR	PLP	NS	PL
Reichstein					
Steinen	S	Q	SS	H	PH

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Marquage des Gicleurs Fioul

1) Le marquage “Historique”:

C'est une norme américaine de fait. Elle est non écrite mais utilisée depuis la création des gicleurs. On trouve les indications suivantes gravées sur le corps du gicleur:



Ces caractéristiques sont toujours données pour un fonctionnement du gicleur dans les conditions de **références** suivantes:

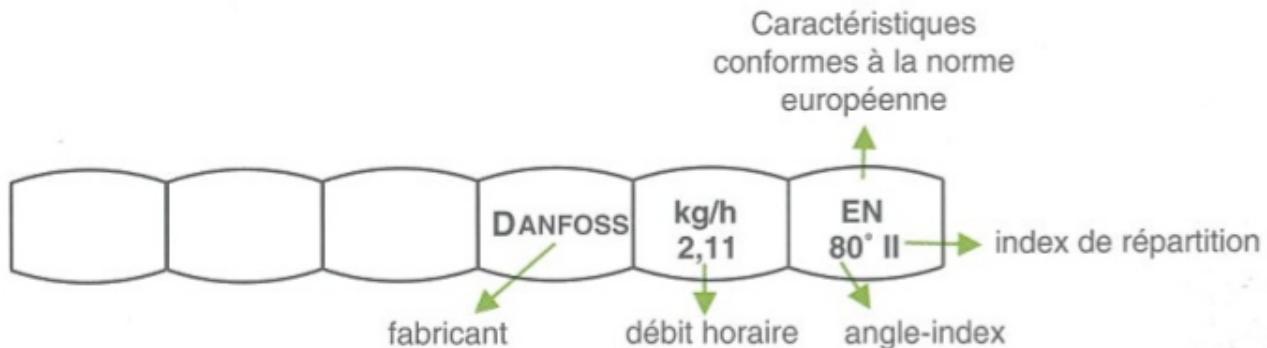
- Débit horaire: en **gallon / heure** (**1 gallon = 3,785 litres**)
- Densité du fioul: **0,82**
- Viscosité: 3,4 centistoke (ou mm²/s)
- Pression de pulvérisation: **7,03 bar**

Remarque importante: Dans la pratique, on ne fait pas travailler les gicleurs avec de faibles pressions de pulvérisation (< **12 bar**) car la pulvérisation n'est pas de bonne qualité. Dans ce type de situation, beaucoup de Smoke est dégagé.

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

2) Le marquage Normalisée Européen (EN):

Il s'applique aux **gicleurs sans retour** jusqu'à **6,30 kg/h** depuis 1993.
Dans les autres cas, il n'y a que le marquage "historique".



Ces caractéristiques sont toujours données pour un fonctionnement du gicleur dans les conditions de **références** suivantes:

- Débit horaire: en **kg/h**
- Densité du fioul: **0,82**
- Viscosité: 3,4 centistoke (ou mm²/s)
- Pression de pulvérisation: **10 bar**
- indices de répartition: **I** : cône plein, **II** : cône demi-plein
III : cône demi-creux, **IV** : cône creux

Correspondance entre marquage "historique" et marquage "normalisé"

Marquage "historique"	Débit (kg/h)	Marquage "historique"			Débit US gal/h
		45 ° S	60 ° S	80 ° S	
		Marquage normalisé			
	1,46		90 ° II	100 ° I	0,40
	1,66		80 ° II	100 ° II	0,45
	1,87	60 ° I	80 ° II	100 ° II	0,50
	2,11	60 ° I	80 ° II	100 ° III	0,55
	2,37	60 ° I	80 ° II	100 ° III	0,60
	2,67	60 ° II	70 ° III	80 ° IV	0,65
	2,94	60 ° II	70 ° IV	90 ° IV	0,75
	3,31	60 ° III	70 ° IV	80 ° IV	0,85
	3,72	60 ° III	70 ° IV	80 ° IV	1,00
	4,24	60 ° III	70 ° III	80 ° IV	1,10
	4,45	60 ° III	70 ° IV	90 ° IV	1,20
	4,71	60 ° IV	70 ° IV	80 ° IV	1,25
	5,17	60 ° IV	70 ° IV	80 ° IV	1,35
	5,84	60 ° IV	70 ° IV	80 ° IV	1,50
	6,08	60 ° IV	70 ° IV	90 ° IV	1,65
	6,55	60 ° IV	70 ° IV	80 ° IV	1,75

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Gicleur Spécial: Gicleur LE

C'est un gicleur spécial [associé](#) à une pompe fioul spéciale dotée de la fonction LE.

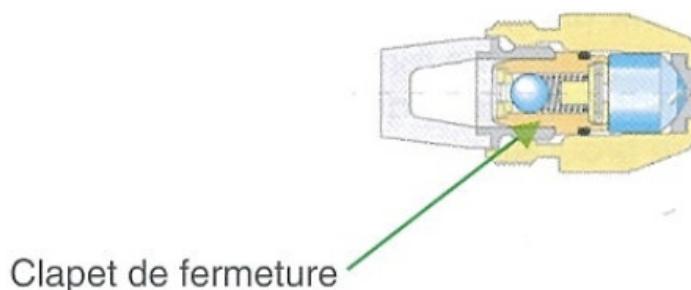
Principe: Quand le brûleur s'arrête (et donc la pompe fioul également), il reste un volume de fioul entre électrovanne et gicleur qui se dilate sous l'effet du rayonnement des parties chaudes ou du réchauffeur s'il y en a un, entraînant le phénomène de "**pissette**". On cherche à faire repartir la dilatation du fioul vers l'aspiration.

Le gicleur LE est un gicleur standard OD équipé d'un clapet de fermeture (de **ΔP = 1,6 bar**) qui évite le phénomène de "pissette": goutte de fioul qui tombent à l'intérieur du foyer lorsque le brûleur est à l'arrêt entraînant une formation d'imbrûlés à l'allumage.

Attention pour le gicleur LE seulement:

Le marquage "historique" est donné à 8,6 bar ($7 + 1,6$ bar) et le marquage normalisé à 11,6 bar ($10 + 1,1$ bar).

Par exemple, un gicleur de 1,87 kg/h à 10 bar (norme EN), s'il est de type LE, devra fonctionner à 11,6 bar ($10 + 1,6$ bar) pour obtenir le même débit car il faut compenser le **ΔP** provoqué par le clapet de fermeture.



Peut-on Nettoyer un Gicleur Fioul?

Non! Les gicleurs doivent toujours être remplacés. La surface de la pastille est usinée avec une très grande précision et ne doit pas être rayée. L'assemblage des éléments est ajusté et vérifié en usine ce qu'on ne peut faire en pratique.

De ce fait, les composants d'un gicleur ne peuvent être ni désassemblés ni nettoyés.

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Calcul du Calibre des Gicleurs

1) Détermination de la puissance Q_n Max

Calcul

$$Q_{n \text{ maxi}} [\text{kW}] = \frac{P_{n \text{ maxi chaudière}} [\text{kW}]}{\text{Rendement utile chaudière}}$$

Recherche

Lecture directe de $Q_{n \text{ maxi}}$ [kW] sur la plaque chaudière

2) Calcul de la puissance du brûleur Q_n

En l'absence d'indication particulière, on fixe la puissance du brûleur à 90% de la puissance maximale de la chaudière.

$$Q_n = Q_{n \text{ Max}} \times 0,9$$

3) Calcul du débit volumique du gicleur:

Débit volumique:

$$\text{Débit volumique de fioul [l/h]} = \frac{\text{Puissance brûleur } Q_n [\text{kW}]}{\text{PCI du fioul}}$$



4) Calcul du calibre du gicleur:

Le débit de fioul dans un gicleur varie comme la racine carrée de la pression fournie par la pompe. Si on veut doubler le débit, il faut quadrupler la pression.

$$\text{Calibre du gicleur [US gal/h]} = \frac{\text{Débit volumique du fioul [l/h]}}{3,785 \sqrt{\frac{\text{Débit de pulvérisation [bar]}}{\text{Préssion de référence}}}}$$

CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

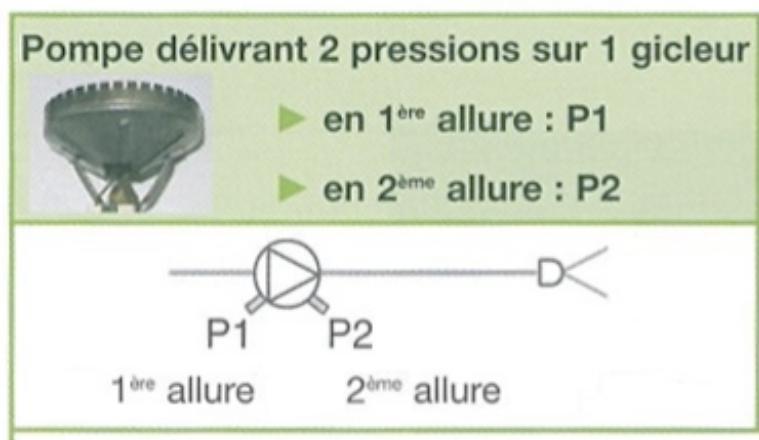
Brûleurs Fioul à 2 Allures

Pour les brûleurs gaz, on passe de la 1^{ère} à la 2^{ème} allure en ouvrant un peu plus la vanne gaz (électrovanne 2 allures).

Pour un brûleur fioul, il y a 2 façons de faire:

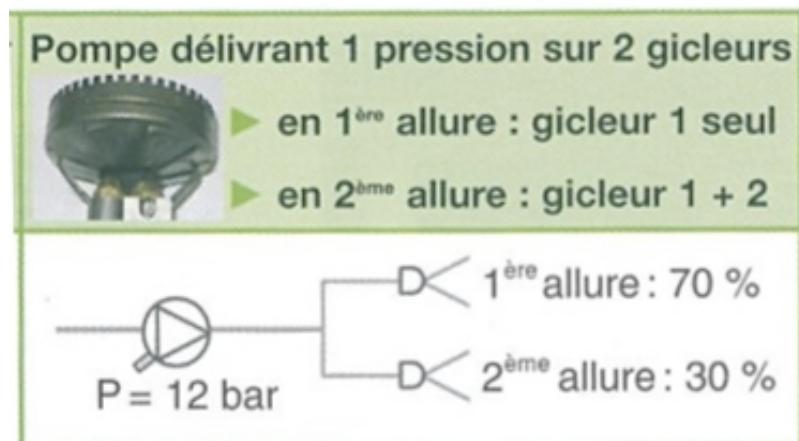
1) Un seul gicleur et pompe délivrant 2 pressions:

En augmentant la pression, on augmente le débit de fioul et donc la puissance. On peut facilement calculer le débit de fioul (et donc la pression P1) pour que par exemple en 1^{ère} allure, on est 70% de la puissance maximale, les 100% étant atteints avec la pression P2 de la 2^{ème} allure.



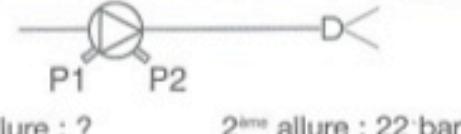
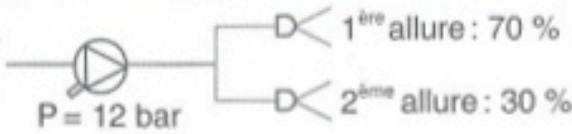
2) Pompe délivrant une seule pression sur plusieurs gicleurs (2 ou plus):

En mettant en service plusieurs gicleurs (par électrovannes), on augmente la puissance. Il est facile de calculer la puissance apportée par chaque gicleur. Par exemple, le 1^{er} gicleur (pour la 1^{ère} allure) apporte 70% de la puissance maximale et le 2^{ème} gicleur apporte les 30% restant (2^{ème} allure = Gicleurs 1+2)



CALCUL DU CALIBRE D'UN GICLEUR FIOUL

Exemples de Calculs

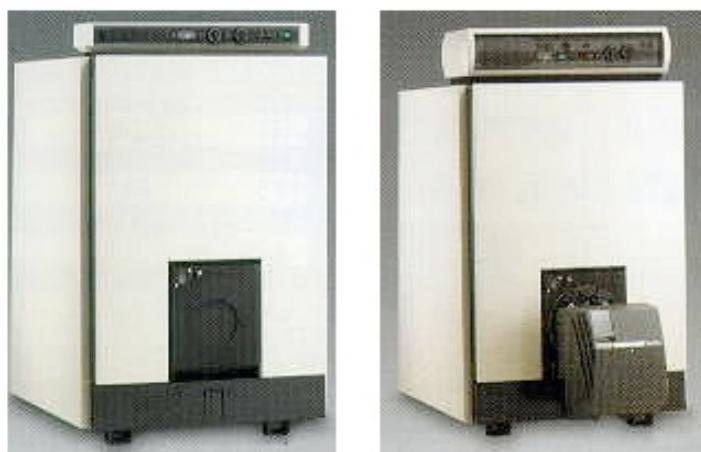
<p>Pompe délivrant 2 pressions sur 1 gicleur</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ en 1^{ère} allure : P1 ▶ en 2^{ème} allure : P2 	<p>Pompe délivrant 1 pression sur 2 gicleurs</p>  <ul style="list-style-type: none"> ▶ en 1^{ère} allure : gicleur 1 seul ▶ en 2^{ème} allure : gicleur 1 + 2
 <p>1^{ère} allure : ? 2^{ème} allure : 22 bar</p>	 <p>P = 12 bar</p> <p>1^{ère} allure : 70 % 2^{ème} allure : 30 %</p>
<p>▶ Régler la chaudière à 90 % de Pn maxi : $340 \text{ kW} \times 0,9 = 306 \text{ kW}$</p>	
<p>▶ Débit volumique de fioul : $\frac{306 \text{ kW}}{10 \times 0,91} = 33,6 \text{ l/h}$</p>	<p>10 = PCI du fioul en kW.h/litre 0,91 = rendement utile de chaudière</p>
<p>▶ Rapport des pressions (Pulvérisation/Référence)</p> $\sqrt{\frac{22}{7}} = 1,77$	<p>▶ Rapport des pressions (Pulvérisation/Référence)</p> $\sqrt{\frac{12}{7}} = 1,31$
<p>▶ Calibre du gicleur à installer</p> $\frac{33,6 \text{ l/h}}{3,785 \times 1,77} = 5 \text{ US gal/h}$	<p>▶ Nombre total de gallons par heure à installer</p> $\frac{33,6 \text{ l/h}}{3,785 \times 1,31} = 6,78, \text{ soit } 7 \text{ US gal/h}$
<p>▶ Calcul du débit de fioul en 1^{ère} allure (70 %) $33,6 \text{ l/h} \times 0,7 = 23,5 \text{ l/h}$</p>	
<p>▶ Pression de pompe P1 à régler</p> $P1 = 7 \times \left(\frac{23,5 \text{ l/h}}{3,785 \times 5} \right)^2 = 10,8 \approx 11 \text{ bar}$	<p>▶ Calibre des gicleurs à installer</p> <p>1^{ère} allure : 7 gallons $\times 0,7 \approx 5 \text{ US gal/h}$ 2^{ème} allure : $7 - 5 = 2 \text{ US gal/h}$</p>
<p>▶ Vérifier les températures de fumées lorsque la chaudière est en température vers 70 °C :</p> <ul style="list-style-type: none"> - en 1^{ère} allure : avec un minimum de 150°C, sinon • augmenter la pression P1 de la pompe fioul. • augmenter le calibre du gicleur. <p>▶ en 2^{ème} allure : ne pas dépasser la température maximale préconisée par le constructeur de la chaudière, sinon :</p> <ul style="list-style-type: none"> • diminuer la pression avec P2 ou bien le calibre du gicleur. • diminuer le calibre d'un gicleur. 	

LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Chaudières Gaz ou Fioul à Brûleur Pulsé

Les chaudières à brûleur pulsé sont des chaudières dont le brûleur est choisi **indépendamment** de la chaudière. Celui-ci peut fonctionner au gaz ou au fioul.

Les chaudières actuelles de ce type sont dites "**à foyer pressurisé**", c'est-à-dire que le trajet des fumées dans la chaudière est assuré grâce à la pression fournie par le **ventilateur du brûleur**.



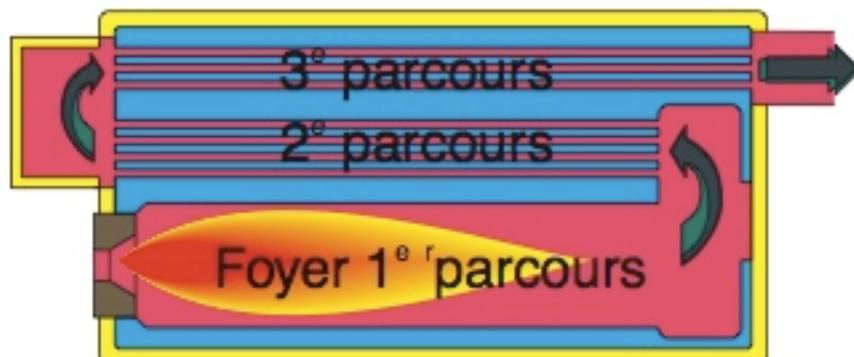
Chaudière à foyer pressurisé sans et avec son brûleur.

Types de Foyer

En gros, il existe actuellement deux types de chaudière (de puissance > 70 kW) :

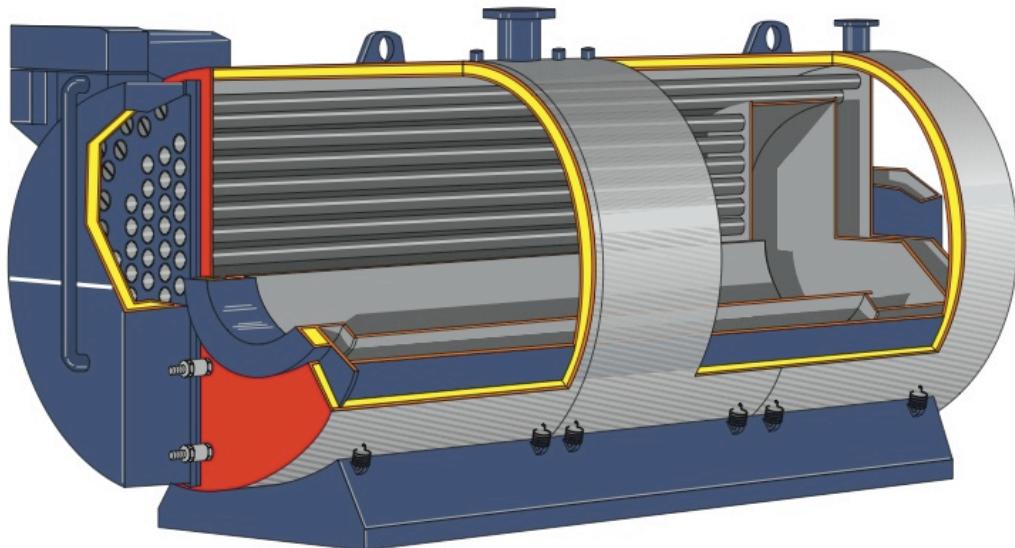
- les chaudières "à triple parcours",
- les chaudières "à inversion de flamme" ou "à foyer borgne".

1) Chaudière à "triple parcours":

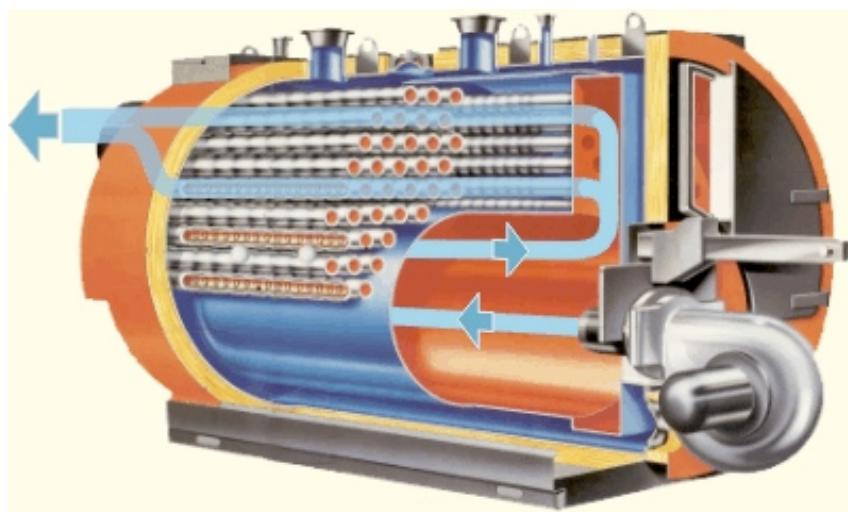
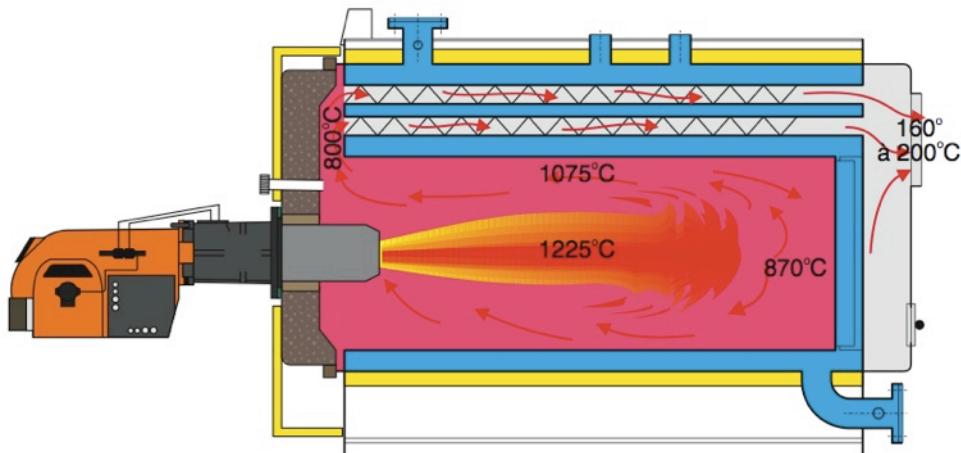


LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Coupe d'une chaudière en acier 3 parcours



2) Chaudière à “inversion de flamme” ou “à foyer borgne”:



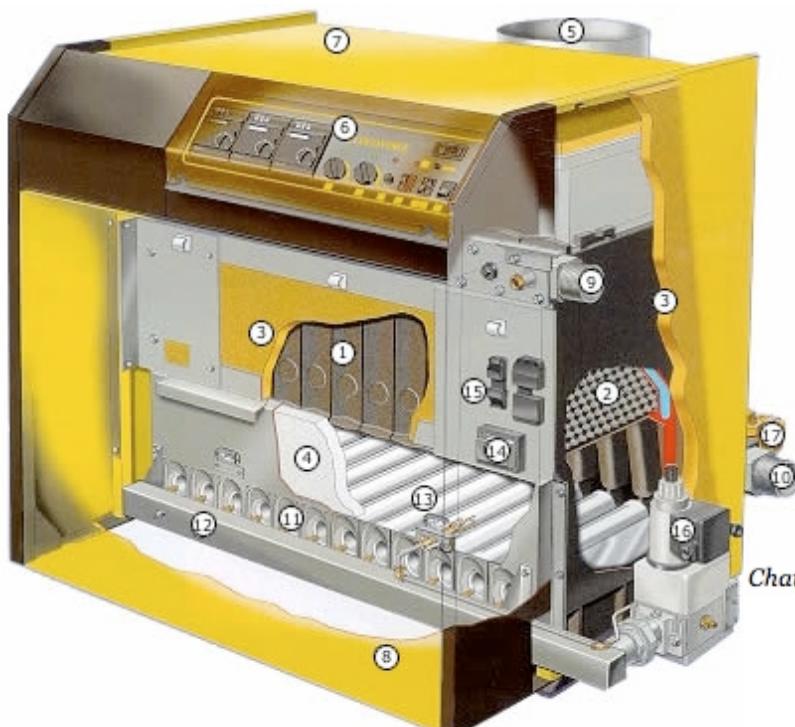
LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Chaudières Atmosphériques

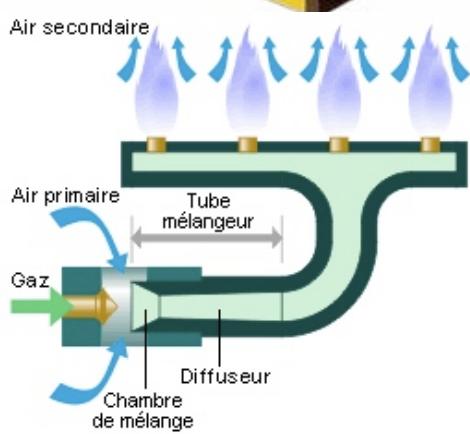
Les chaudières gaz atmosphériques sont des chaudières dont le brûleur ne possède **pas de ventilateur**.

Ces chaudières sont composées de rampes de brûleurs placés en dessous du foyer. L'aspiration d'air par le brûleur se fait naturellement par le gaz et les flammes (**effet venturi**). On parle de brûleur atmosphérique traditionnel quand une grande partie de l'air est aspirée au niveau de la flamme et on parle de **brûleur à pré-mélange** quand l'air est mélangé au gaz avant la flamme.

Un coupe tirage (ouverture de la buse d'évacuation vers la chaufferie), placé à l'arrière de la chaudière annule l'influence du **tirage** de la cheminée sur la combustion en maintenant une pression constante à la sortie de la chaudière.



Chaudière atmosphérique :



1. Corps de chauffe (en fonte)
2. Échangeur à ailettes profilées
3. Isolation
4. Bouclier thermique
5. Buse de fumée avec coupe-tirage intégré
6. Tableau de commande
7. Jaquette
8. Porte d'accès (pivotante)
9. Collecteur de départ
10. Collecteur de retour
11. Brûleur à pré-mélange (bas NOx)
12. Rampe gaz
13. Électrode d'allumage et sonde d'ionisation
14. Transfo d'allumage
15. Connecteurs électriques
16. Vanne gaz à 2 allures
17. Vanne de vidange

LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

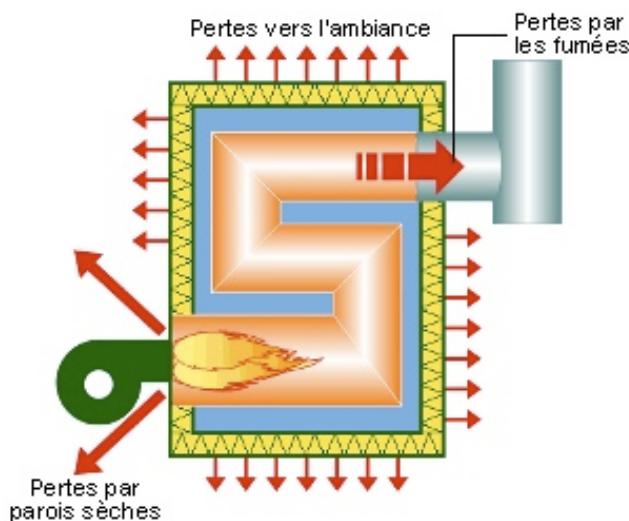
Les Pertes

Le rôle d'une chaudière est de transmettre à l'eau (P_u) l'énergie qui est fournie par le brûleur (Q_n).

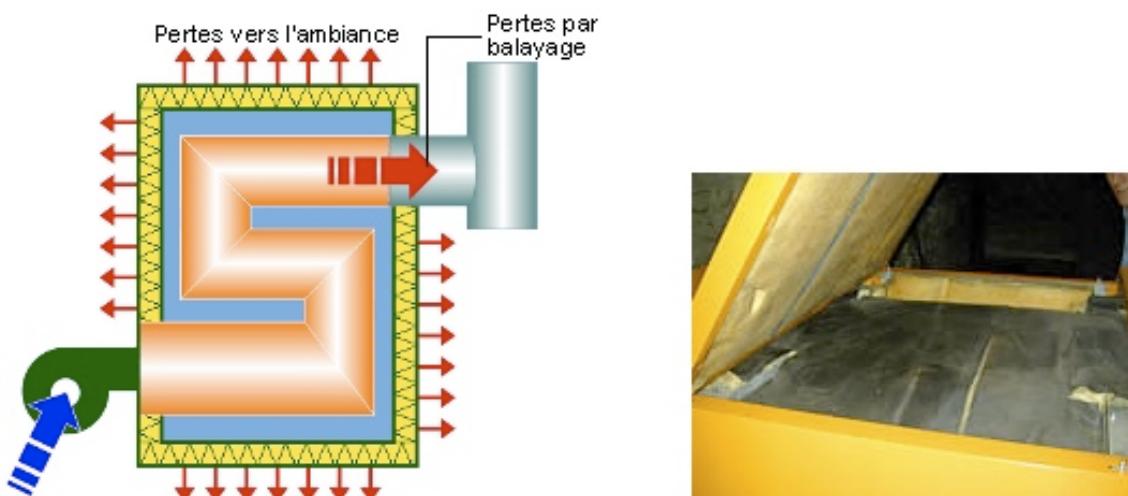
Cette transmission n'est jamais de 100% car un certain nombre de "pertes" interviennent lorsque le brûleur est en fonctionnement.

La différence entre la puissance utile fournie à l'eau (P_u) et la puissance contenue dans le combustible (Q_n) est constituée de pertes :

- **Vers la cheminée:** Les fumées de combustion sont évacuées encore chaudes. Cette chaleur est perdue.
- **Vers la chaufferie:** La chaudière est comme un gros radiateur qui émet de la chaleur vers l'ambiance de la chaufferie.



Pertes d'une chaudière lorsque son brûleur est en fonctionnement.



Pertes à l'arrêt d'une chaudière.

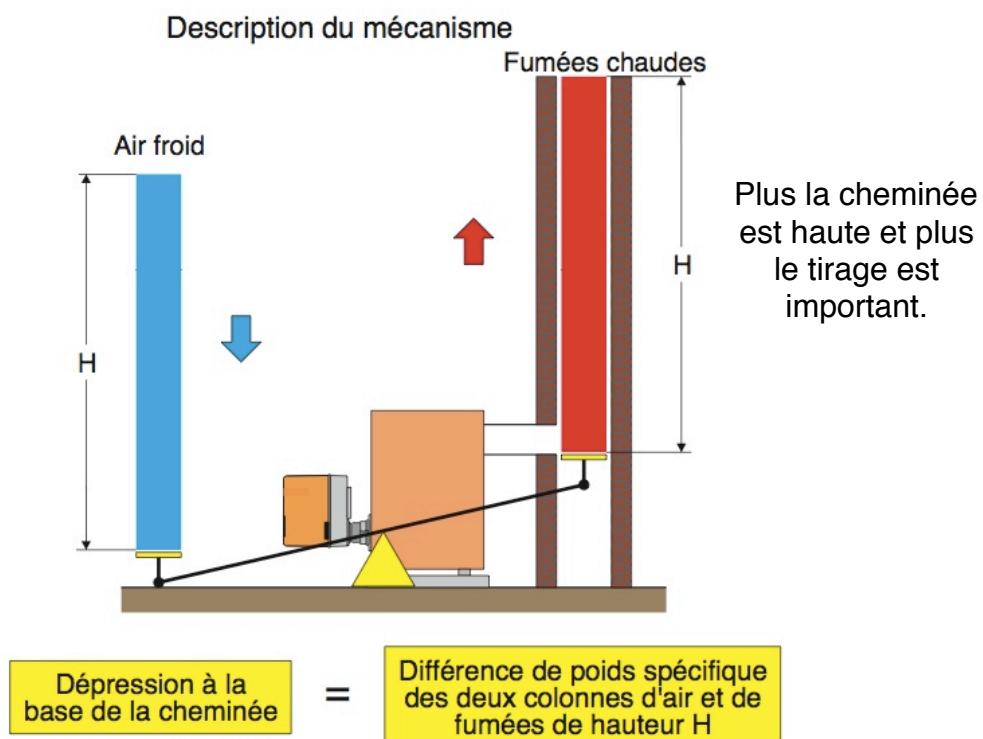
Isolation de la jaquette d'une chaudière à brûleur pulsé.

LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

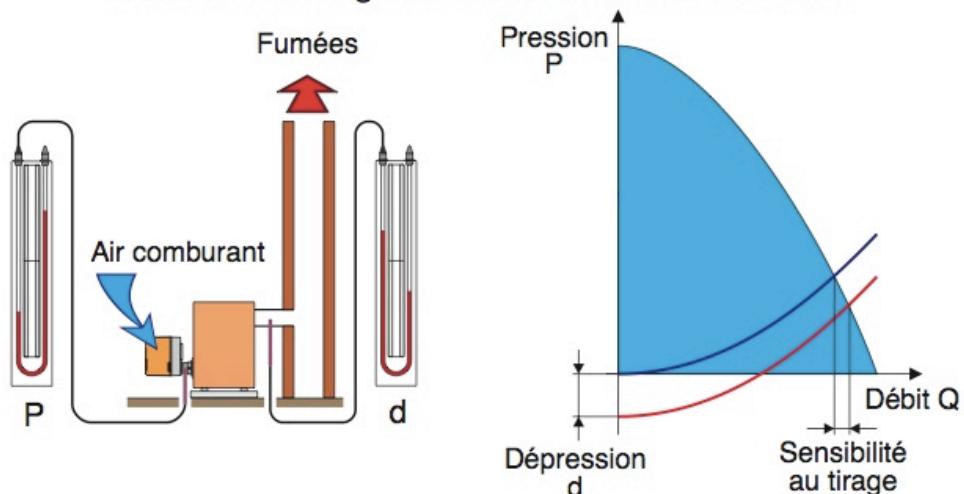
Tirage d'une Cheminée

L'air chaud étant plus léger que l'air froid, il existe une différence de "poids" entre l'air contenue dans la cheminée d'une chaudière et l'air ambiant.

Cela se traduit par une différence de pression entre l'air entrant dans le brûleur et l'air réchauffé et évacué dans la cheminée. Le tirage a une influence sur le fonctionnement des brûleurs à air pulsé (voir ci-dessous). Idéalement, les fumées de combustion doivent arriver en entrée de cheminée à 0 bar puis être extraits par tirage naturel. Il ne faut donc pas avoir un tirage trop important:



Influence du tirage sur le débit d'air du ventilateur



LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Chaudières à Condensation

Les produits normaux d'une bonne combustion sont essentiellement du CO₂ et de l'H₂O. Juste après la réaction de combustion, cette eau issue du combustible se trouve à l'état gazeux dans les fumées. Notons que l'eau à l'état gazeux n'est pas visible, elle est transparente.

Dans une chaudière traditionnelle, cette eau sous forme de vapeur chaude est simplement rejetée par la cheminée, donc perdue. **On utilise juste le PCI du combustible.**

Dans une chaudière à condensation, on cherche à récupérer la chaleur latente de la vapeur en la faisant condenser au contact de l'eau de retour de l'installation. Pour qu'il y ait condensation, il faut que la température de retour de l'eau de l'installation soit suffisamment basse (< au point de rosé (environ 55°C pour le gaz)). **On utilise donc le PCI + PCS du combustible.**

- **Pour le gaz naturel (type L):**
PCS = 9,79 kWh/m³_N et PCI = 8.83 kWh/m³_N, soit **PCS = PCI + 10.8%**
- **Pour le gaz naturel (type H):**
PCS = 10.94 kWh/m³_N et PCI = 9.88 kWh/m³_N, soit **PCS = PCI + 10.7%**
- **Pour le mazout (standard):**
PCS = 12.67 kWh/kg et PCI = 11.88 kWh/kg, soit **PCS = PCI + 6.6%**

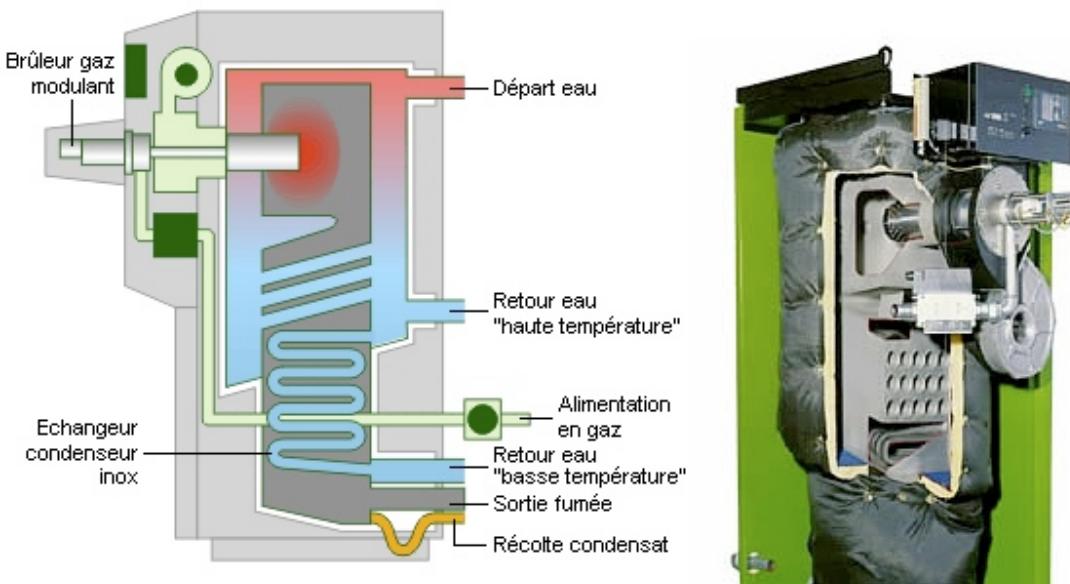
Dans le cas du fioul?

La technique de la condensation est principalement utilisée dans les chaudières gaz. Il existe également des chaudières fuel à condensation, mais leur utilisation est actuellement plus rare, pour trois raisons:

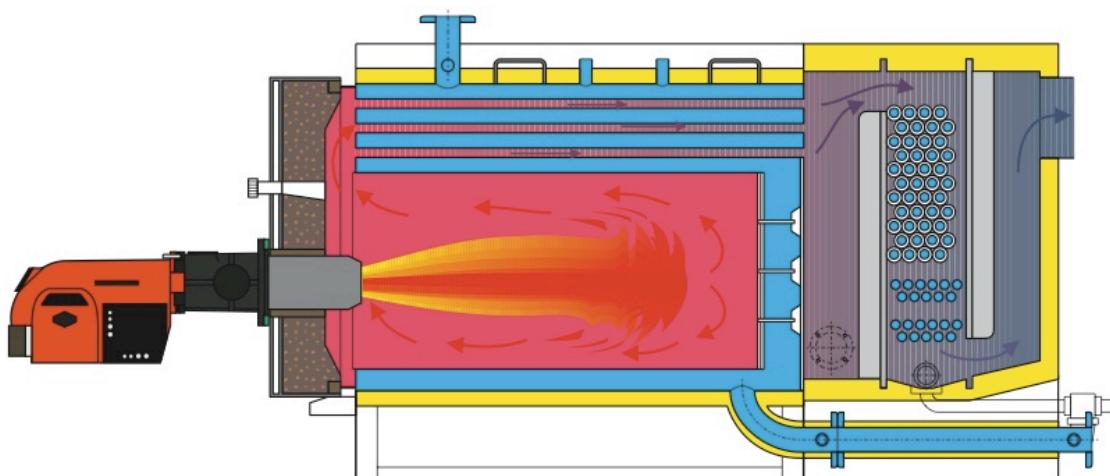
- **La faible teneur en eau:** on ne peut espérer récupérer que 6% du PCI, ce qui est peu rentable par rapport au surcoût de la chaudière.
- **Point de rosée plus bas** que pour le gaz: la condensation est donc moins facile à obtenir.
- **Présence de soufre:** Les condensats contiennent de l'acide sulfurique et sont très corrosifs pour l'échangeur.

LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Exemples de chaudières à condensation :



**Coupe d'une chaudière avec récupérateur à condensation
(et foyer borgne)**



LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Puissances d'une Chaudière et Rendement

Une chaudière absorbe plus d'énergie qu'elle n'en restitue. L'écart représente les pertes. On recueille généralement ces informations sur la plaque signalétique de la chaudière (lorsqu'il y en a une).

Plaque signalétique d'une chaudière:

On peut y lire généralement 2 types de puissance:

1) La puissance Absorbée (Qn):

(également appelée: "débit nominal" ou "puissance fournie" ou "débit calorifique") C'est la puissance à fournir par le **brûleur**. Il y a en général une valeur **minimale** et **maximale**. Pour protéger la chaudière, le technicien réglera en général la puissance du brûleur Qn de telle sorte que:

$$Qn = Qn \text{ Max} \times 0,9$$

2) La puissance Nominale (Pn):

C'est la puissance fournie à l'eau par la chaudière lorsqu'elle reçoit du brûleur la puissance Qn évoquée ci-dessus.

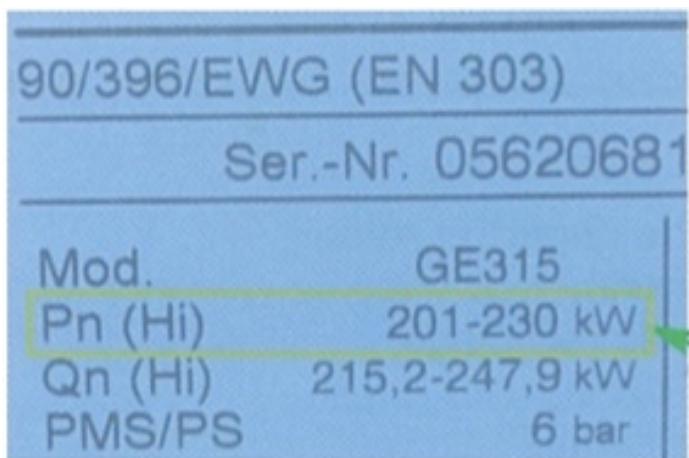
On a donc toujours $Qn > Pn$.

L'écart entre les 2 représente le "**rendement de la chaudière**".

$$\text{Rendement Chaud.} = Pn \text{ Max} / Qn \text{ Max}$$

$$\text{Rendement Chaud.} = Pn \text{ min} / Qn \text{ min}$$

Exemple de plaque:



$$\begin{aligned}\text{Rendement Chaudière} &= \frac{Pn \text{ Max}}{Qn \text{ Max}} \\ &= 230 / 247,9 \\ &= 92,7 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Rendement Chaudière} &= \frac{Pn \text{ min}}{Qn \text{ min}} \\ &= 201 / 215,2 \\ &= 93,4 \%\end{aligned}$$

LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

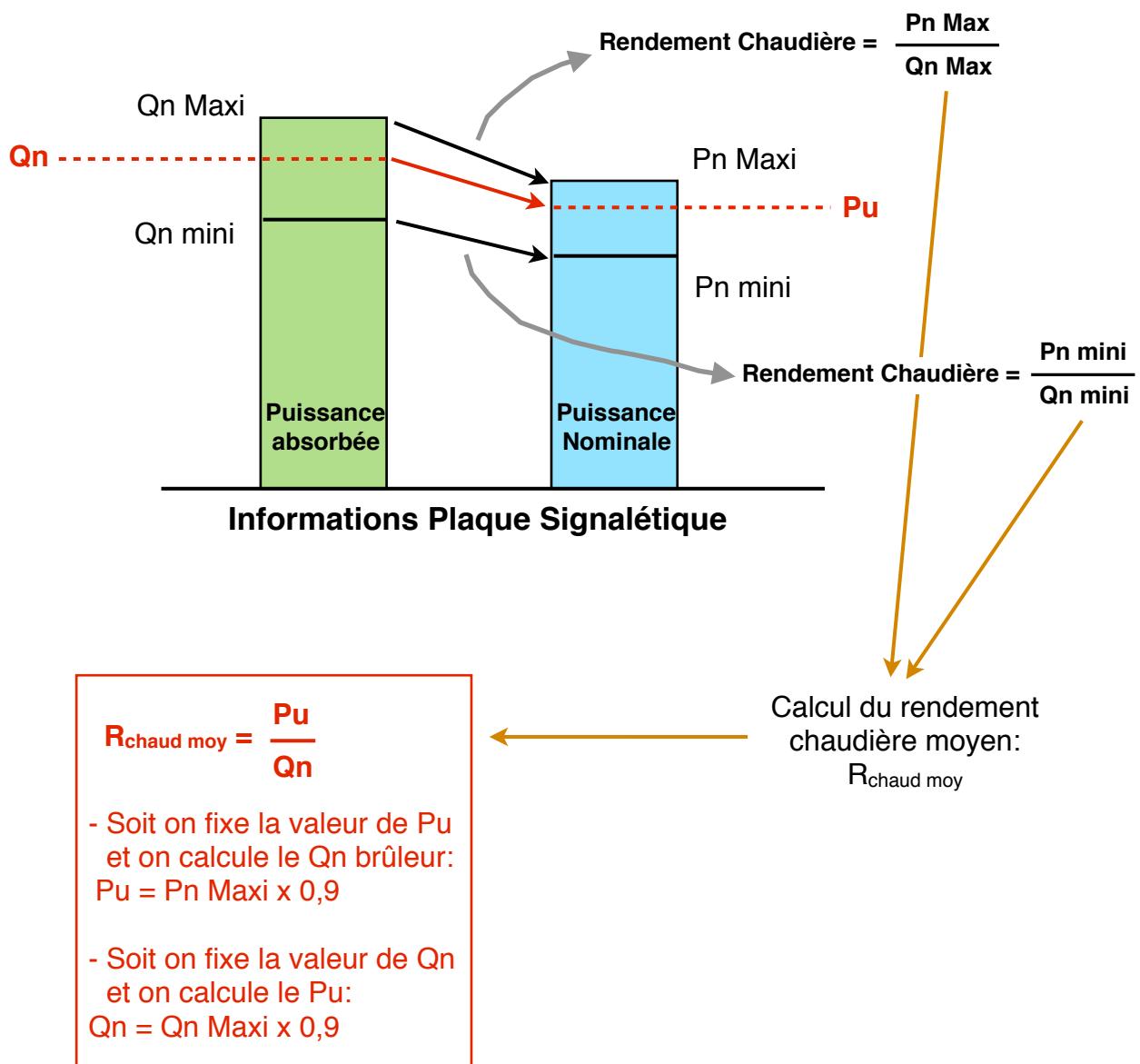
On s'aperçoit que le rendement de la chaudière est meilleur quand elle fonctionne dans sa plage de puissance basse.

Rendement utile d'une chaudière

La puissance utile est la puissance transmise à l'eau et **adaptée aux besoins de l'installation**.

Ne pas confondre avec la puissance nominale maximale ($P_{n \text{ Max}}$) car on ne fait jamais fonctionner une chaudière au maximum de sa puissance admissible pour raison de sécurité (voir réglage puissance brûleur ci-dessus).

La puissance utile est toujours inférieure à P_n .



LES CHAUDIERES: TYPES, PERTES, RENDEMENTS

Exemple: Calcul d'une puissance utile et d'une puissance brûleur

Calculer les puissances utile (P_u) et absorbée (Q_n) d'une chaudière ayant un $P_{n \text{ Max}} = 170 \text{ kW}$ et un $Q_{n \text{ Max}} = 183,6 \text{ kW}$.

1) Rendement chaudière = $P_{n \text{ Max}} / Q_{n \text{ Max}} = 170 / 183,6 = 92,6\%$

2) 1^{re} approche:

On fixe $P_u = P_{n \text{ Max}} \times 0,9 = 170 \text{ kW} \times 0,9 = 153 \text{ kW}$

D'où $Q_n = P_u / Rdt \text{ Chaud} = 153 \text{ kW} / 0,926 = 165 \text{ kW}$

2a) 2^{me} approche:

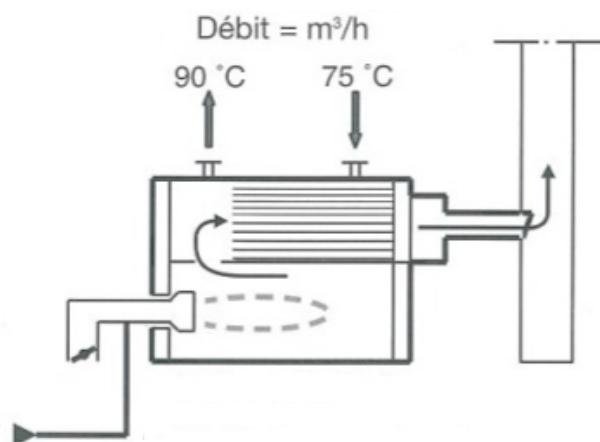
On fixe $Q_n = Q_{n \text{ Max}} \times 0,9 = 183,6 \text{ kW} \times 0,9 = 165,24 \text{ kW}$

D'où $P_u = Q_n \times Rdt \text{ Chaud} = 165,24 \text{ kW} \times 0,926 = 153 \text{ kW}$

Mesure Pratique du Rendement “Utile” d'une Chaudière

On mesure d'abord la puissance utile de la chaudière en fonctionnement en faisant une mesure de débit et de ΔT :

$$P_u = \text{Débit} \times 1,16 \times \Delta T$$



Ensuite, on mesure la puissance consommée par le brûleur en regardant le débit de gaz ou de fioul:

$$Q_n = \text{Débit de Gaz (m}^3/\text{h (n)} \times \text{PCI (kWh/m}^3\text{ (n))}$$

$$Q_n = \text{Débit de Fioul (l/h)} \times \text{PCI (kWh/l)}$$

On en déduit ensuite le rendement de la chaudière:

$$R_{\text{chaud}} = \frac{P_u}{\text{Débit de gaz} \times \text{PCI}}$$

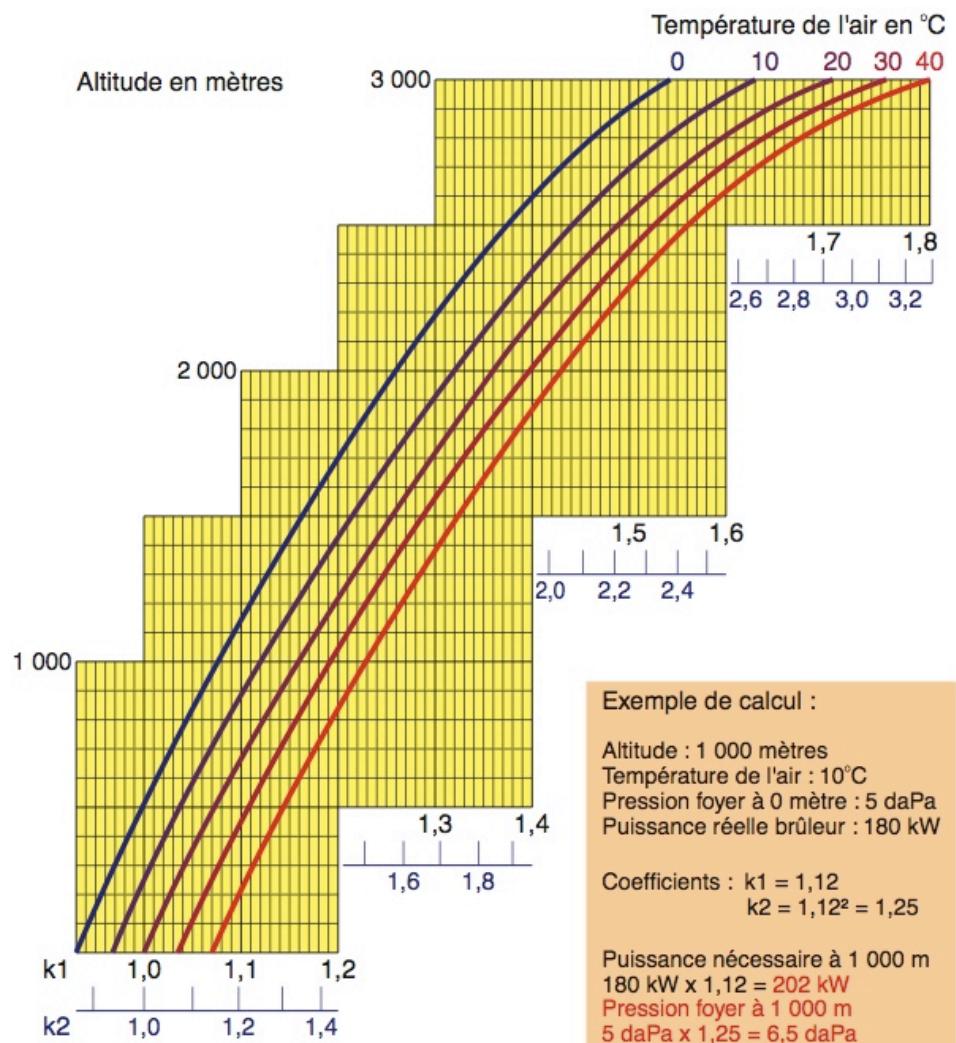
$$R_{\text{chaud}} = \frac{P_u}{\text{Débit de fioul} \times \text{PCI}}$$

CHOISIR UN BRÛLEUR

Les 5 Etapes

- 1) **Calcul ou lecture de la puissance maximale fournie par le brûleur à la chaudière** (lire **Qn Max** sur la plaque signalétique de la chaudière ou bien le calculer). *Le brûleur sera ensuite réglé à une puissance inférieure.*
- 2) **Recherche de la pression foyer** sur la documentation technique du constructeur de la chaudière. *C'est une donnée importante car il faudra choisir un brûleur ayant un ventilateur qui saura vaincre les pertes de charge de la chaudière.*

Eventuellement, appliquer un facteur de correction à la puissance du brûleur (**k1**) et à la pression foyer (**k2**) en fonction de l'altitude et de la température de l'air du lieu. *En effet, les courbes des brûleurs sont établies pour 0 mètres d'altitude et 20°C.*



k1 : coefficient de correction de puissance brûleur
k2 : coefficient de correction de pression foyer

CHOISIR UN BRÛLEUR

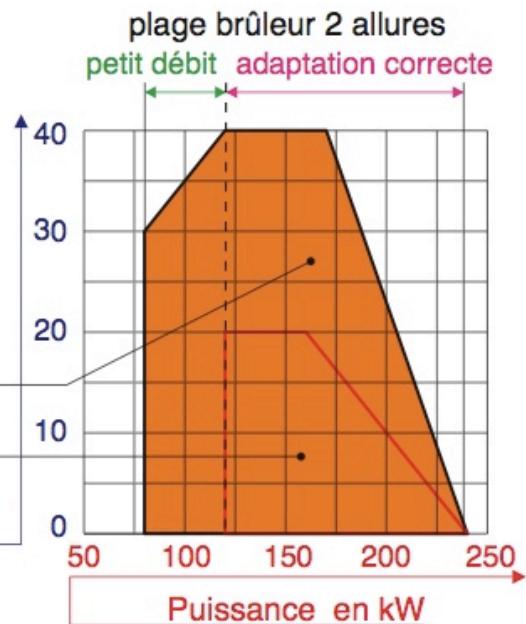
3) Sélection du brûleur d'après les courbes "débit / pression" du constructeur:

La courbe débit/pression

Généralement établie pour :

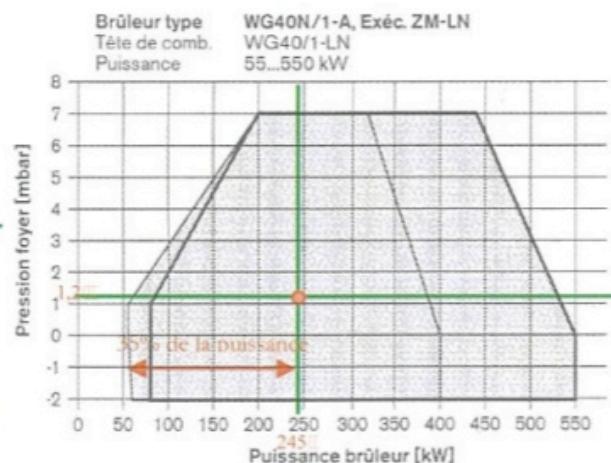
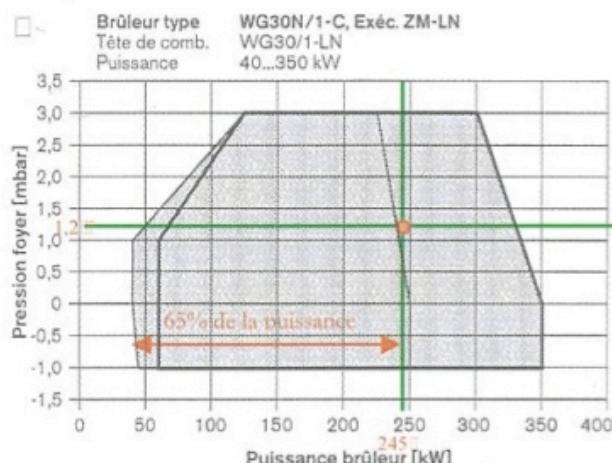
- 0 mètre d'altitude
- Température de l'air : 20°C
- brûleur fuel :
 - CO2 de 12%
 - Indice de noircissement nul
- brûleur gaz :
 - CO2 de 10,5 %
 - CO nul

Courbe brûleur 2 allures
Courbe brûleur 1 allure
Pression disponible en daPa



Entre plusieurs choix possibles, **toujours choisir le brûleur dans une plage de 60 à 75% de sa puissance maximale** pour une bonne autorité de la régulation de ses volets d'air et de gaz:

Exemple : Quel est le brûleur le mieux adapté pour la PAROMAT ?



Le WG 40 est trop puissant. Le WG 30 est mieux adapté : il couvre les 245 kW de Qn maxi en fonctionnant à 65 % environ de sa puissance maximale.

CHOISIR UN BRÛLEUR

4) Choix de la longueur de la tête de combustion. La détermination se fera en fonction de deux caractéristiques de la chaudière:

- le type de foyer (les têtes courtes s'adaptent mal aux foyers borgnes)
- l'épaisseur du réfractaire de la porte foyère



5) Prévision de la maintenance: connaître le sens d'ouverture de la porte chaudière pour raccorder la rampe gaz du bon côté.

LA COMBUSTION

Formule Générale de la Combustion

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison entre l'**oxygène** et une **matière combustible**. Cette réaction est globalement **exothermique**, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur (c'est le but recherché).

Les **combustibles** sont multiples (gaz, pétrole, bois, charbon, ...) mais ils ont un point commun : celui de contenir principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons multiples de **carbones** et d'**hydrogènes**.

La composition des combustibles peut être représentées par la formule générique:

Combustible: $C_x H_y$

L'oxygène nécessaire à la combustion est apporté par le **comburant**.

Dans le cas de nos brûleur, cet oxygène est apporté par l'air ambiant:

Air comburant: $O_2 : 20,9\%$ $N_2 : 78\%$ + gaz rares: 1%

(On considérera que l'air contient 1 volume d'oxygène (O_2) pour 4 volumes d'azote (N_2))

La formule chimique de la combustion peut s'écrire ainsi:



Une combustion parfaite dégage uniquement du **dioxyde de carbone** et de l'**eau** sous forme de vapeur.

Les combustibles contenant beaucoup de carbone (comme le charbon par exemple) dégagent beaucoup de CO_2 en se consumant.

LA COMBUSTION

Combustion Stoechiométrique

C'est la **combustion idéale** et complète (sans imbrûlés) qui se produit lorsqu'un nombre donné de molécules de combustible se combine **avec le nombre correspondant exact de molécules** d'oxygène.

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1 m³ (n) ou 1 litre de combustible dépendra des caractéristiques de celui-ci. Mais il est bon d'avoir en tête un ordre de grandeur.

"La combustion 1 m³ de gaz naturel ou d'1 litre de fuel requiert environ 10 m³ d'air à 15°C"

Voici les quantités d'air intervenant dans la combustion stoechiométrique de différents combustibles ainsi que les quantités de CO₂ et d'eau dégagés:

Résultats de combustion stoechiométrique à 0°C et 1013 mbar

Nature du combustible	Air théorique	Pouvoir fumigène		CO ₂ total	H ₂ O total		CO ₂ maxi	Composition volumétrique des produits de combustion humides			
		Humide	Sec		VH ₂ O	VH ₂ O		CO ₂	H ₂ O	N ₂	
		V _a m ³ /m ³ gaz	V' _{fo} m ³ /m ³ gaz	V _{fo} m ³ /m ³ gaz	m ³ /m ³ gaz	m ³ /m ³ gaz		% de V _{fo}	% de V' _{fo}	% de V' _{fo}	
Gaz naturels	Lacq	9,7	10,7	8,7	1,03	2,03	1,63	11,8	9,6	18,9	71,5
	Algérie - Le Havre	10,7	11,8	9,6	1,16	2,16	1,74	12,1	9,9	18,4	71,7
	Algérie - Fos	10,1	11,2	9,1	1,09	2,08	1,67	11,9	9,7	18,6	71,7
	Algérie - Montoir	10,6	11,7	9,6	1,16	2,15	1,73	12,1	9,9	18,4	71,7
	Mer du Nord	9,6	10,6	8,7	1,05	1,98	1,59	12,0	9,8	18,6	71,6
	U.R.S.S.	9,6	10,7	8,7	1,03	2,00	1,60	11,9	9,7	18,7	71,6
	Groningue	8,7	9,7	7,9	0,94	1,80	1,44	11,8	9,6	18,5	71,9
G.P.L.	Propane commercial	23,5	25,4	21,6	3,06	3,77	3,03	14,1	12,0	14,8	73,2
	Butane commercial	30,7	33,1	28,3	4,04	4,82	3,87	14,3	12,2	14,5	73,3
	Air propané (7,5 kWh)	5,7	6,9	5,9	0,83	1,03	0,82	14,1	12,0	14,8	73,2
	Air propané (15,6 kWh)	12,9	14,4	12,3	1,73	2,14	1,72	14,1	12,0	14,6	73,2
	Air butané (7,3 kWh)	5,5	6,8	5,8	0,83	0,99	0,79	14,3	12,2	14,6	73,2
Fuels	Fuel domestique	10,8	11,6	10,2				15,5			
	Fuel lourd n°2	10,7	11,3	10,0				16,0			
		m ³ /kg	m ³ /kg	m ³ /kg							

Remarque: Les m³ de gaz ou d'air sont des m³ (n)

Quantité maximale de CO₂ dégagée:

Cette quantité ne change pas avec l'excès d'air. Par contre, le % de CO₂ baissera par dilution si on ajoute de l'excès d'air.

Aussi appelé **L/Q max**:
Quantité maximale d'eau récupérable dans les fumées par condensation.

LA COMBUSTION

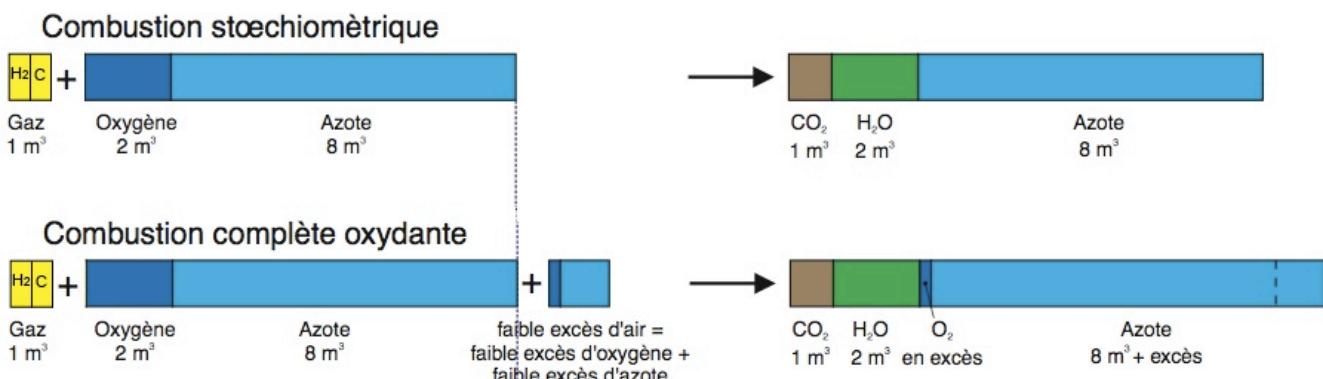
Combustion Réelle

Dans la réalité, on ne cherche **jamais** à se trouver en combustion stoechiométrique. Ceci pour des **raisons de sécurité**.

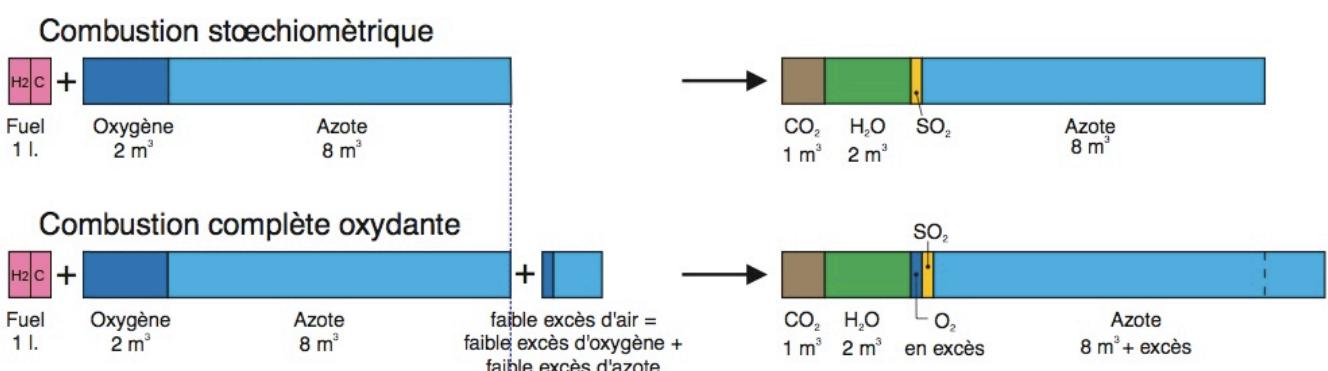
En effet, pour éviter la formation de **produits dangereux et toxiques** (*imbrûlés, monoxyde de carbone (CO)*), c'est à dire pour être sûr que, dans tous les cas, toutes les particules du combustible (carbone et hydrogène) soient oxydées, on introduit une **quantité d'air plus grande que nécessaire (= excès d'air)**.

La réaction de combustion se développe normalement et on retrouve, dans les fumées, une quantité d'oxygène et d'azote correspondant à l'air supplémentaire. Cette combustion s'appelle combustion complète en excès d'air (ou "**complète oxydante**"):

Combustion complète oxydante du Gaz:



Combustion complète oxydante du Fioul:



Le fioul contient toujours un peu de soufre (S) que l'on retrouve dans les produits de combustion. Combiné à l'oxygène et à l'eau, il forme de l'acide.

LA COMBUSTION

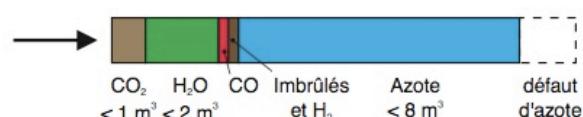
Les Combustions à Eviter

Il y a 2 problèmes pouvant affecter le bon fonctionnement d'un brûleur. Ils traduisent généralement un mauvais réglage du brûleur:

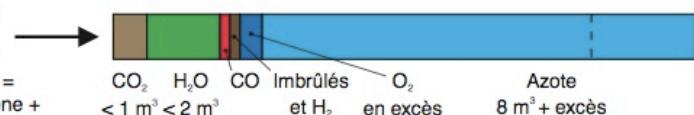
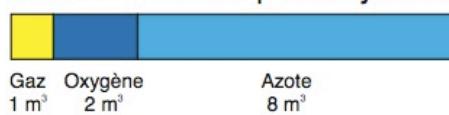
- Combustion en **défaut d'air** (= combustion **réductrice**): il n'y a pas suffisamment de molécules d'oxygène (O_2) pour oxyder tout le combustible. On retrouve alors des imbrûlés (carbone C sous forme de suie, de l'hydrogène et du CO (très toxique) qui n'a pas pu se transformer jusqu'au stade CO_2).
- Combustion **incomplète**: Le mélange air-combustible ne se fait pas correctement en sortie de la tête de combustion et des imbrûlés et du CO sont formés, même si la quantité d'air amenée est suffisante. On rencontre ce type de combustion sur des brûleurs déréglés dans lesquels une trop grande quantité d'air engendre des vitesses d'air importantes qui entraîne le mélange en dehors de la flamme.

Combustions problématiques du Gaz:

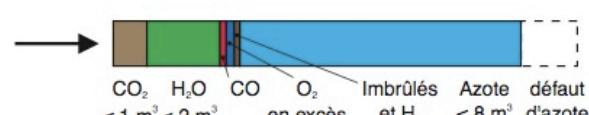
Combustion complète réductrice



Combustion incomplète oxydante



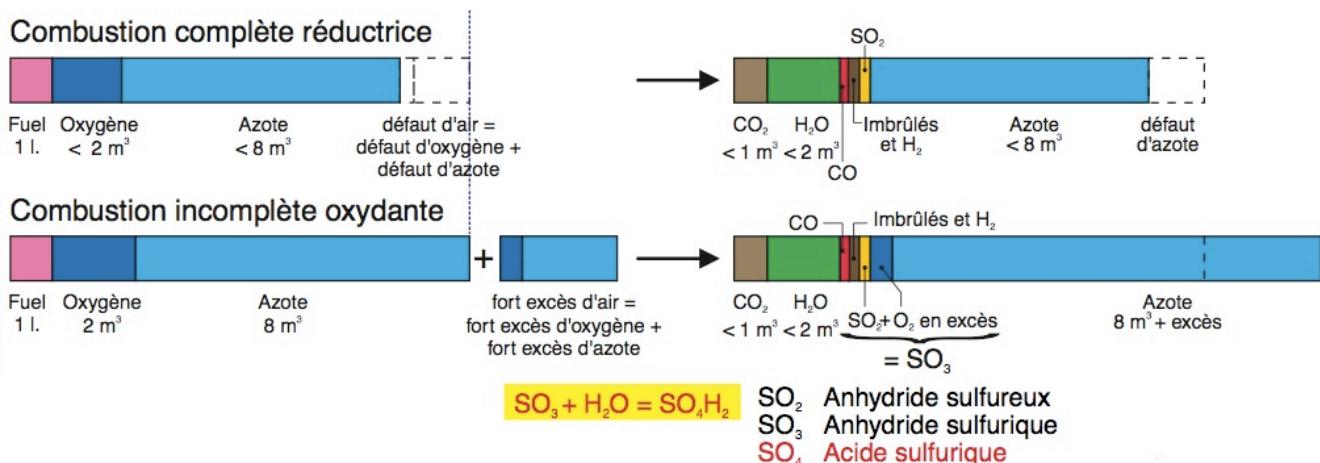
Combustion incomplète réductrice



Dans la pratique, lorsqu'on détecte du CO en quantité trop importante, il est difficile de savoir s'il manque de l'air ou si le mélange est incorrect car à l'analyse on retrouve les mêmes produits. **Il faut très rapidement regarder la teneur d' O_2 sur la valise de combustion avant de retirer la sonde de la cheminée pour savoir si on est en manque d'air ou en excès d'air.**

LA COMBUSTION

Combustions problématiques du Fioul:



Les Paramètres de la Combustion

Facteur d'Air: $\lambda = \frac{R}{V_a}$ Volume d'air réellement utilisé
Volume d'air théorique

Si $\lambda > 1$ on est en excès d'air Si $\lambda < 1$ on est en défaut d'air

Excès d'Air: $e = \frac{V_{ea}}{V_a}$ Volume d'excès d'air
Volume d'air théorique

$$\lambda = \frac{R}{V_a} = \frac{V_a + V_{ea}}{V_a} = 1 + \frac{V_{ea}}{V_a} = 1 + e$$

$$V_{ea} = (\lambda - 1) \times V_a$$

$$e \% = (\lambda - 1) \times 100 \quad \text{Excès d'air en \%}$$

$$\lambda = 1 + e \quad \text{Facteur d'air}$$

$$e = \lambda - 1 \quad \text{Excès d'air}$$

$$e \% = (\lambda - 1) \times 100 \quad \text{Excès d'air en \%}$$

LA COMBUSTION

Excès d'air en fonction du % de l'O₂ dans les fumées sèches:

$$\text{Volume d'air en excès} : (\lambda - 1) \times V_a$$

$$\text{Volume d'O}_2 \text{ contenu dans l'air en excès} : (\lambda - 1) \times V_a \times 21\%$$

$$\text{Volume de fumées sèches} : (\lambda - 1) \times V_a + V_{fo}$$

*V_{fo} = volume de fumées sèches
en combustion stoechiométrique*

$$\text{D'où: } e \% = \frac{\% \text{ O}_2 \text{ mesuré}}{21 - \% \text{ O}_2 \text{ mesuré}} \times \frac{V_{fo}}{V_a} \times 100$$

Comme V_{fo} / V_a = 0,90 pour le gaz naturel et 0,92 pour le fioul domestique, on en déduit:

$$\text{Pour le gaz} \Leftrightarrow e \% = \frac{\% \text{ O}_2 \text{ mesuré}}{21 - \% \text{ O}_2 \text{ mesuré}} \times 90$$

$$\text{Pour le fioul} \Leftrightarrow e \% = \frac{\% \text{ O}_2 \text{ mesuré}}{21 - \% \text{ O}_2 \text{ mesuré}} \times 92$$

Excès d'air en fonction du % du CO₂ dans les fumées sèches:

$$\% \text{ CO}_2 \text{ mesuré} = \frac{\text{Volume CO}_2 \text{ Max}}{\text{Volume de fumées sèches}} \times 100$$

$$\text{Pour le gaz} \Leftrightarrow e \% = \frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Max} - \% \text{ CO}_2 \text{ mesuré}}{\% \text{ CO}_2 \text{ mesuré}} \times 90$$

$$\text{Pour le fioul} \Leftrightarrow e \% = \frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Max} - \% \text{ CO}_2 \text{ mesuré}}{\% \text{ CO}_2 \text{ mesuré}} \times 92$$

LA COMBUSTION

Pertes de chaleur sensible par les fumées:

Les fumées emportent par la cheminée une quantité de chaleur perdue directement liée à la qualité de la combustion sous 3 formes:

- Imbrûlés (suie et CO): normalement faibles si le brûleur est bien réglé
- Chaleur latente (en partie récupérable par condensation de la vapeur d'eau)
- Chaleur sensible

La formule de **SER** (valable quand la quantité d'imbrûlés est faible, ce qui doit normalement être le cas) permet de calculer cette chaleur sensible perdue dans les fumées **à partir du CO₂ ou de l'O₂ mesurés**:

$$\text{Avec le CO}_2 \Leftrightarrow \text{Pertes fumées \%} = X_a \times \frac{T^\circ \text{ fumée} - T^\circ \text{ ambiante}}{\% \text{ CO}_2 \text{ mesuré}}$$

$$\text{Avec l'O}_2 \Leftrightarrow \text{Pertes fumées \%} = X'a \times \frac{T^\circ \text{ fumée} - T^\circ \text{ ambiante}}{21 - \% \text{ O}_2 \text{ mesuré}}$$

Valeurs usuelles pour Xa et X'a:

Combustible	Xa	X'a
Fioul lourd	0,59	0,80
Fioul domestique	0,57	0,78
Gaz naturel	0,47	0,84
Butane commercial	0,53	0,78
Propane commercial	0,51	0,76

Remarque: Le coefficient Xa dépend de l'excès d'air. Il peut se calculer précisément selon la formule suivante:

$$X_a = \frac{\% \text{ CO}_2 \text{ Max} \times 0,385 \text{ Wh/m}^3 \cdot ^\circ\text{C} \times V_{fo}}{\text{PCI}} \times \frac{V'_{fo} + e}{V_{fo} + e} \times 100$$

LA COMBUSTION

Rendement de Combustion

Le "rendement de combustion" est le rendement de la chaudière calculé par l'analyseur de combustion.

Le "rendement de combustion" est toujours **supérieur** au rendement utile de la chaudière (R_{chaud}) car l'analyseur ne prend en compte que les pertes de chaleur sensible par les fumées. Les pertes par les parois de la chaudière ne sont pas prises en compte par l'analyseur:

$$R_{chaud} (\%) = \text{rendement de combustion (} R_{comb} \text{)} - \text{pertes par rayonnement}$$

Les pertes par rayonnement sont généralement de l'ordre de 1% si la chaudière est bien isolée.

Le rendement de combustion est donné par la formule de **SIEGERT**:

$$\eta_{comb\ PCI} = 100 - X_a \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{\% CO_2}$$

$$\eta_{comb\ PCI} = 100 - X'a \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{21 - \% O_2}$$

LA COMBUSTION

Comprendre la Combustion

- L'excès d'air est indispensable:

L'excès d'air ($e\%$) ne participe pas à la combustion, il s'ajoute au volume des fumées. Les chaudières et brûleurs ne pouvant encore réaliser un mélange combustible/air parfait, il faut fournir plus d' O_2 que nécessaire afin d'être sûr de tout brûler. L'excès d'air est donc indispensable pour que chaque molécule de combustible rencontre l' O_2 nécessaire et produise une combustion avec le minimum d'imbrûlés (CO en gaz naturel et "smoke" en fioul).

- Si l'excès d'air (e) augmente, le % de CO_2 diminue:

La quantité de CO_2 dans les fumées de combustion atteint une valeur maximale en condition stoechiométrique. Si on rajoute de l'air, cette quantité de CO_2 reste identique mais le volume des fumées augmente. Par conséquent le % de CO_2 dans les fumées diminue par dilution.

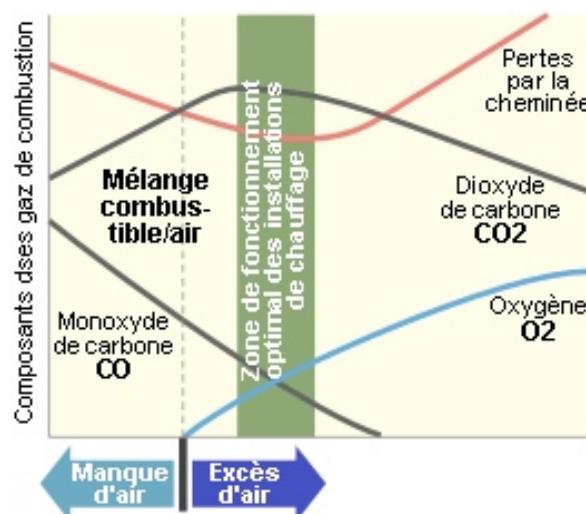
- Si l'excès d'air (e) augmente, la température des fumées augmente:

Sans modifier le débit de combustible, si on augmente l'excès d'air, par ouverture du volet d'air ou de la tête de combustion, le volume des fumées augmente puisque l'on ajoute de l'air. Cela entraîne une vitesse de passage supérieure dans le foyer ce qui diminue l'échange thermique et augmente la température des fumées.

- Si l'excès d'air (e) augmente, les pertes par les fumées augmentent et les rendements de combustion et de chaudière diminuent:

Le rendement de combustion est celui indiqué par l'analyseur. Pour l'améliorer, on peut augmenter le CO_2 , augmenter la température de l'air comburant ou diminuer la température des fumées.

Le rendement de chaudière est toujours inférieur au rendement de combustion de 0,25 à 5 % suivant l'âge et le type car la chaudière consomme de l'énergie en étant le "radiateur" de la chaufferie.



LA COMBUSTION

Les NOx

L'azote (N) contenu dans l'air comburant et dans l'air en excès se retrouve normalement dans les gaz de combustion car c'est un gaz relativement neutre. Cependant, en présence d'un **fort excès d'air**, lorsque la **température est élevée**, une faible partie de cet azote se combine avec l'oxygène pour donner du monoxyde d'azote (NO) qui par oxydation se transforme en dioxyde d'azote NO₂. Cette transformation débute dans la chaudière, se poursuit dans le conduit de fumée et continue à l'air libre.

Ces oxydes d'azote (NOx) contribue à la pollution atmosphérique et ont des effets sur la santé et l'environnement. Le NO₂ est à l'origine d'irritations des voies respiratoires. En présence d'eau, le NO₂ se transforme en acide nitrique HNO₃. Les pluies acides responsables du dépérissements des forêts seraient dues aux NOx et aux SOx.

Les constructeurs proposent des brûleurs dans lesquels température de flamme et excès d'air sont réduits de manière à limiter la production des NOx. Pour les petits brûleurs, un réglage satisfaisant du point de vue rendement de combustion limite la production des oxydes d'azote puisqu'il vise à limiter à la fois la température des fumées et l'excès d'air.

LA COMBUSTION

Calcul de Rendement d'une Chaudière à Condensation

Jusqu'ici, nous avons parlé de rendement par rapport au PCI du combustible. C'est à dire qu'on a considéré que la vapeur d'eau contenue dans les fumées de combustion étaient rejetées dans l'air, donc perdue.

Les chaudières à condensation sont conçues pour récupérer une partie de cette chaleur latente. Leur rendement est donc supérieur à celui des chaudières traditionnelles. De plus, comme nous l'avons déjà souligné, les chaudières à condensation sont généralement des chaudières au gaz.

Voici la méthode de calcul du rendement d'une chaudière à condensation à travers un exemple:

- Puissance chaudière: 560 kW
- $T_{gaz}^{\circ} = 10^{\circ}\text{C}$ $P_{gaz} = 300 \text{ mbar}$ $P_{atm} = 958 \text{ mbar}$
- O_2 : 2,5 %
- T° fumées: 45°C T° ambiante: 5°C
- Débit condensats: 0,74 l/min
- Gaz L (Groningue): $\text{PCI} = 9 \text{ kW / m}^3 \text{ (n)}$ $L/Q \text{ Max} = 1,4 \text{ kg / m}^3 \text{ (n)}$

1) Calcul du rendement de combustion PCI de la chaudière:

On utilise les résultats de l'analyseur de combustion et on applique la formule de SIEGERT:

$$\eta_{\text{PCI}} = 100 - \left[0,84 \times \left(\frac{45 - 5}{21 - 2,5} \right) \right]$$

$$\eta_{\text{PCI}} = 98,18 \%$$

2) Calcul du gain dû à la condensation:

Il s'agit de calculer quelle quantité d'eau la chaudière réussie à condenser et de comparer par rapport à la quantité théorique maximale d'eau récupérable.

Pour le gaz de Groningue, la quantité d'eau maximale récupérable est de **1,4 kg par $\text{m}^3 \text{ (n)}$ de gaz**.

LA COMBUSTION

La chaudière a une puissance de 560 kW.

Si on néglige le rendement de celle-ci, on considère alors que la puissance du brûleur est également de 560 kW.

- Débit gaz (m^3/h) \times PCI = Puissance brûleur (kW)
- Débit gaz (m^3/h) = $560 / 9 = 62,22 \text{ m}^3/\text{h}$ (n)

- Coef de correction du gaz = $((958 + 300) / 1013) \times (273 / (273 + 10)) = 1,20$
- Débit gaz au compteur = $62,22 / 1,20 = 51,85 \text{ m}^3/\text{h}$

En théorie, la chaudière pourrait condenser au maximum:

$$62,22 \text{ m}^3/\text{h} (\text{n}) \times 1,4 \text{ kg/m}^3 (\text{n}) = 87 \text{ kg/h} \text{ soit } 87 \text{ l/h}$$

En réalité, la chaudière condense $0,74 \text{ l/min} \times 60 = 44,4 \text{ l/h}$

44,4 l/h représente 51% de 87 l/h.

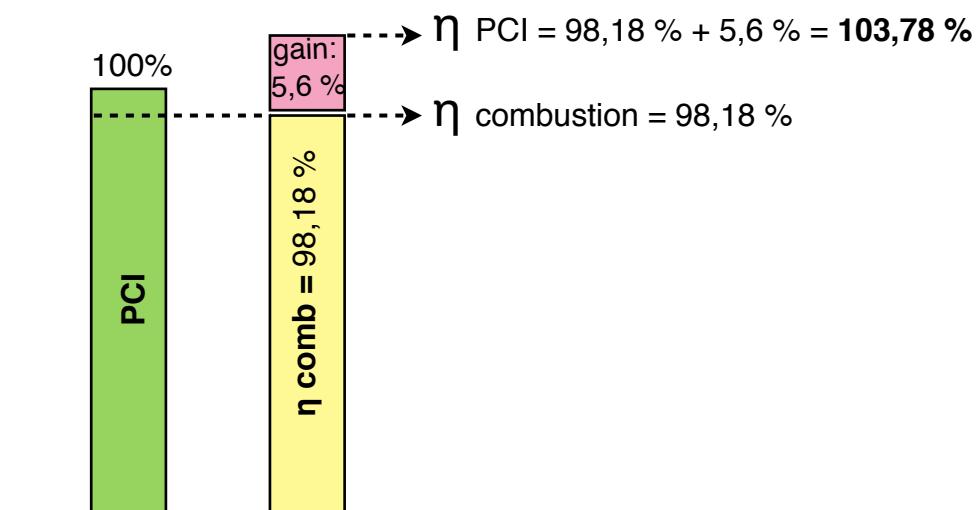
La chaudière ne récupère donc que 51% du gain PCS théorique maximum.

Le gain PCS théorique maximum est de 11% du PCI pour le gaz naturel.

La présente chaudière a donc un gain réel de 51% de 11% soit 5,6%.

3) Rendement PCI de la chaudière à condensation:

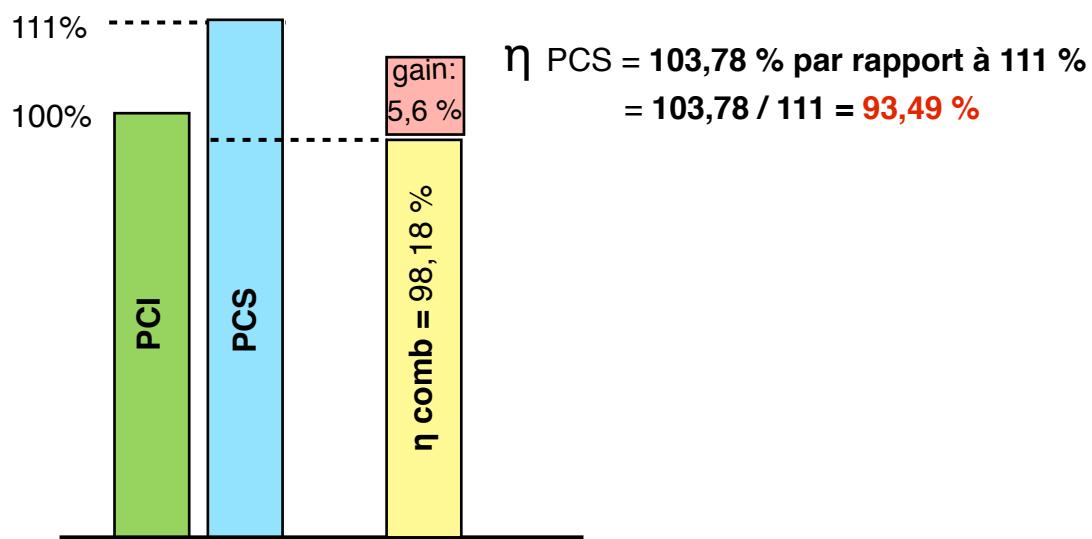
On prend la puissance PCI comme étant le maximum de puissance (*c'est ce que font les constructeurs de chaudières à condensation pour annoncer des rendements supérieurs à 100%*).



LA COMBUSTION

4) Rendement PCS de la chaudière à condensation:

Cette fois, on prend comme référence la puissance totale théoriquement récupérable (PCS) par la chaudière. Le rendement PCS redevient inférieur à 100%. C'est le vrai rendement de la chaudière.



LA COMBUSTION

Analyse de Combustion

Il existe 2 types d'analyseurs de combustion:

- Les **analyseurs chimiques** (ex: valise "Brigon"):

Pour l'analyse de chaque composant d'une combustion (O_2 , CO_2 , CO), on utilise un réactif chimique particulier. On ne peut donc faire qu'une analyse ponctuelle d'un seul paramètre à la fois.



- Les **analyseurs électroniques**:

L'ensemble des paramètres de combustion est analysé, et de plus **de façon continu**. Il est donc plus facile d'effectuer un réglage de combustion sur un brûleur puisqu'on peut lire rapidement l'effet d'une modification faite sur le brûleur. De plus, les analyseurs électroniques sont généralement équipés d'une imprimante ce qui permet de sortir un ticket de résultats qui peut être présenté au client et agrafé dans le cahier de chaufferie (obligation légale).



LA COMBUSTION

1) Les analyseurs électroniques:

- Ils font leurs mesures à partir des **fumées sèches** de combustion. C'est pour cela qu'il y a souvent un récipient de **condensation** à vider après chaque utilisation.
Travailler à partir des fumées sèches permet d'éviter les erreurs sur le pourcentage de CO₂ par exemple, dues aux variations de volume de la vapeur d'eau qui peut se condenser partiellement.
- Ils mesurent: le taux d'**O₂**, le **CO**, la **T° des fumées sèches** et la **T° ambiante**.
- A partir de ces éléments, l'analyseur calcule à l'aide des formules: le taux de **CO₂**, l'**excès d'air** et le **rendement de combustion**.
- Lors de la mise au point d'un brûleur (surtout au début quand on ne connaît pas la qualité de la combustion), **toujours** surveiller le taux de CO. **Si le taux monte vers des valeurs élevées (> 500 ppm), retirer IMMEDIATEMENT la sonde de mesure sous peine de saturer (ou de détruire) la cellule d'analyse de CO et de devoir attendre plusieurs heures avant de pouvoir réutiliser l'analyseur.**



LA COMBUSTION

Particularité de l'analyse de combustion fioul:

Le “**smoke**” également appelé “**indice de noircissement**” ou “**indice de bacharach**” permet de contrôler la propreté de la combustion, c'est à dire la quantité d'imbrûlés de très faible grosseur.

IMPORTANT: C'est la première analyse à faire avant d'utiliser l'analyseur électronique. Il faut rechercher un “**smoke**” inférieur à 1 pour ne pas encrasser l'appareil.

Réaliser un test opacimétrique (“Smoke Test”):

L'opacité se mesure en faisant passer **de la fumée prélevée avec une pompe** que l'on désigne souvent par le terme « **smoke-test** » **à travers un papier filtre** et en **comparant** la teinte obtenue à un échelle graduée de 0 (blanc) à 9 (noir) appelée échelle de Bacharach.

Pompe



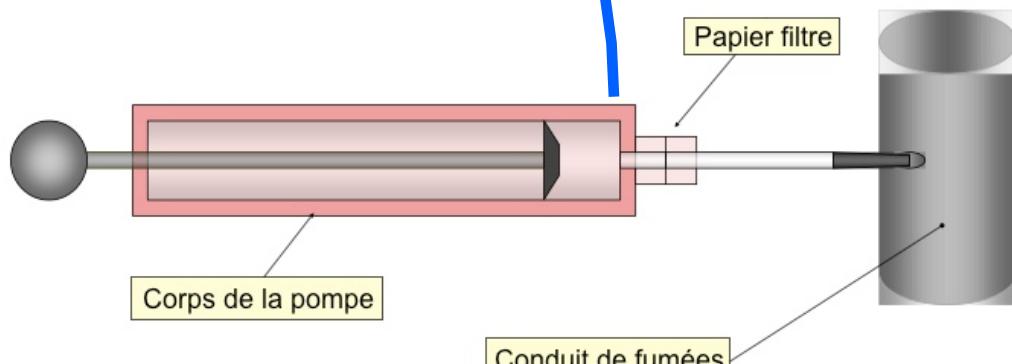
Papier filtre



échelle de Bacharach



Faire 10 aspirations puis comparer la couleur du papier filtre à l'échelle

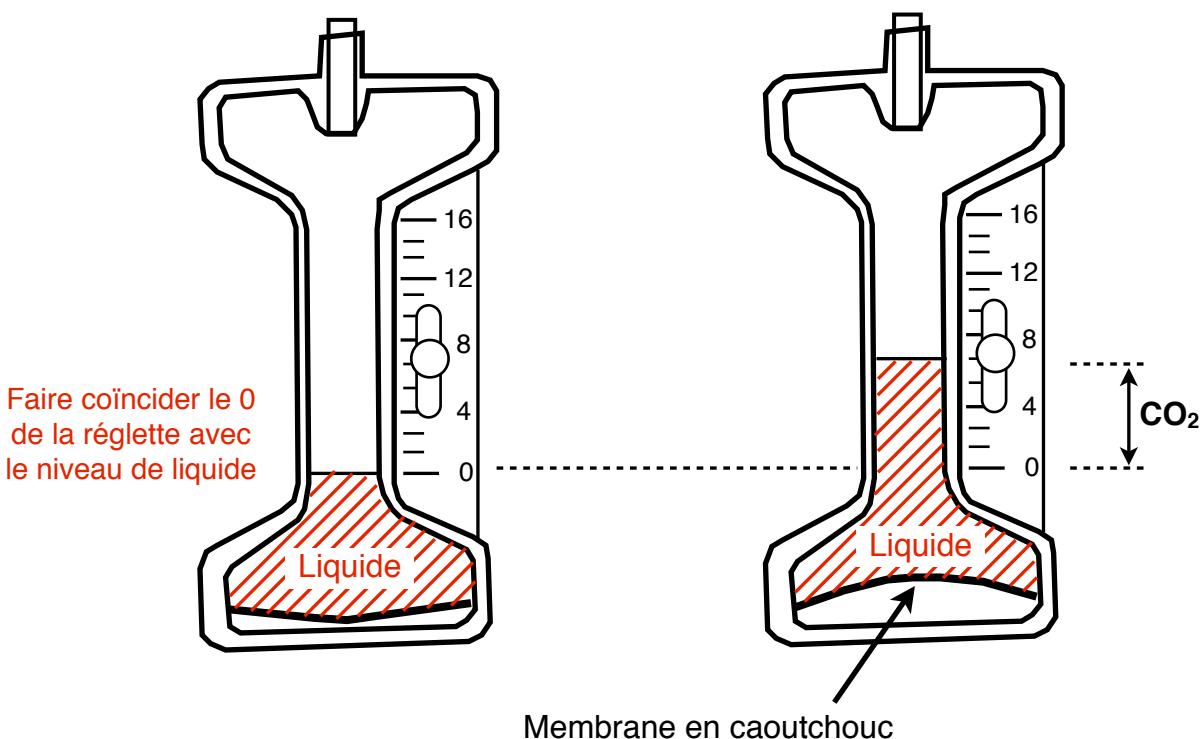


LA COMBUSTION

2) Les analyseurs chimiques:

- Mesure du % de CO₂ ou d'O₂:

La mesure consiste à prélever un volume précis de fumée à l'aide d'une poire et à le mélanger, après condensation et filtration, à la solution contenue dans l'analyseur. Selon l'analyseur utilisé, la solution absorbera le CO₂ ou l'O₂, le volume de solution va augmenter et c'est cette augmentation, lue sur une échelle graduée de 0 à 21 qui donnera directement le pourcentage de CO₂ ou d'O₂ dans les fumées sèches:



Les 2 Réactifs:



Réactif Rouge: Mesure du CO₂



Réactif Bleu: Mesure de l'O₂

(La mesure est identique à celle du CO₂ mais est plus délicate. Il est préférable de mesurer le CO₂)

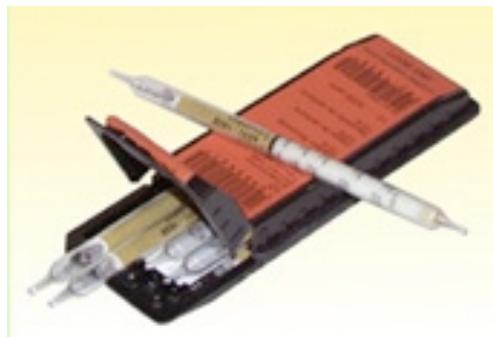
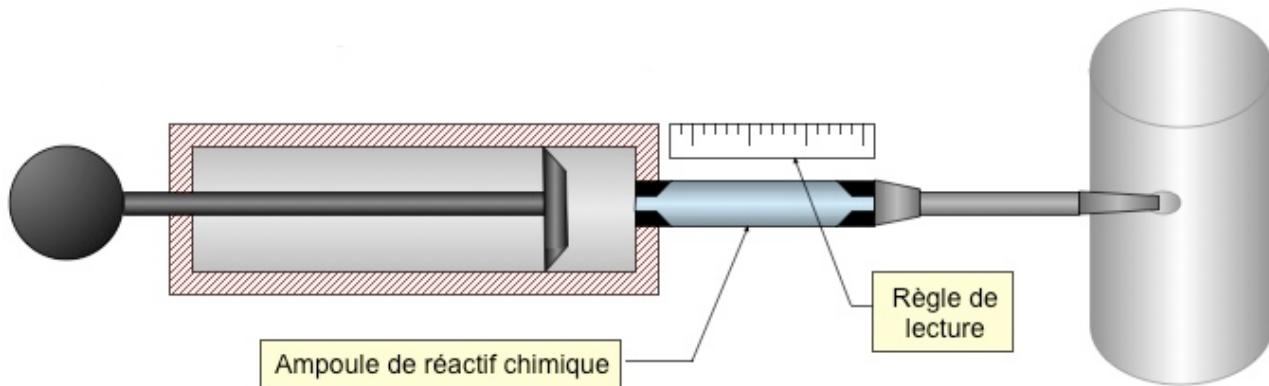
LA COMBUSTION

- Mesure de la teneur en CO:

La mesure s'effectue par lecture **de longueur de coloration** d'une ampoule éprouvette graduée à usage unique placée dans une pompe à main permettant le prélèvement d'un volume précis de fumée.

- Déposer la poignée de la pompe
 - Casser les deux embouts d'une ampoule
 - Introduire l'ampoule dans le manche creux de la pompe de façon à voir l'échelle dans la fenêtre
 - Effectuer un prélèvement en actionnant la pompe 1 fois
 - Lire le résultat sur l'échelle N=1
 - Si le résultat est faible, effectuer un nouveau prélèvement en actionnant la pompe 9 fois
 - Lire le résultat sur l'échelle N=10
- La quantité de gaz de combustion aspirée traverse une ampoule de produit réactif dont la couleur change sur une longueur proportionnelle au taux de CO. En présentant la règle de lecture sur l'ampoule, on peut déterminer la valeur.**

La réglementation européenne impose un taux de CO dans les fumées < 100 PPM



LA COMBUSTION

Les Ordres de Grandeur d'une Bonne Combustion

	Fioul domestique		Gaz naturel		Propane	Butane
	Petite puissance	Moyenne puissance	Petite puissance	Moyenne puissance		
O ₂	4.5 à 6 %	3.5 à 6 %	3 à 6.5 %	2.5 à 6 %	3 à 6 %	3 à 6 %
CO ₂	11 à 12 %	11 à 13 %	8 à 10 %	8.5 à 10.5 %	10 à 12 %	10 à 12 %
N ou λ	1.30 à 1.40	1,20 à 1.40	1.20 à 1.45	1.15 à 1.40	1.10 à 1.40	1.10 à 1.40
Opacité	0 à 1	0 à 1	-	-	-	-
CO	0 à 100 ppm					
NO	0 à 100 ppm					
Température fumées	Installation ancienne : 240 à 260 °C			Installation récente : 200 à 240 °C Installation « basse température » : 160 à 200 °C		
Tirage	De 0,10 à 0,20 mbar					

En bleu sont indiqués les valeurs optimales.

Pour la teneur en CO, la loi oblige à être inférieur à 100 ppm. Mais il faut toujours chercher à obtenir 0 ppm.