



Formation Efficacité énergétique dans l'industrie

du 21 au 25 Février 2017

Plan de la formation

1. La chaudière comme système énergétique.
2. La Combustion
3. Eau de chaudière.
4. Différents types de chaudière
5. Évaluations des performances des chaudières
6. Cas d'études

OBJECTIFS DE L'ATELIER

- Fournir les moyens pratiques pour améliorer les performances énergétiques des chaudières

c'est-à-dire

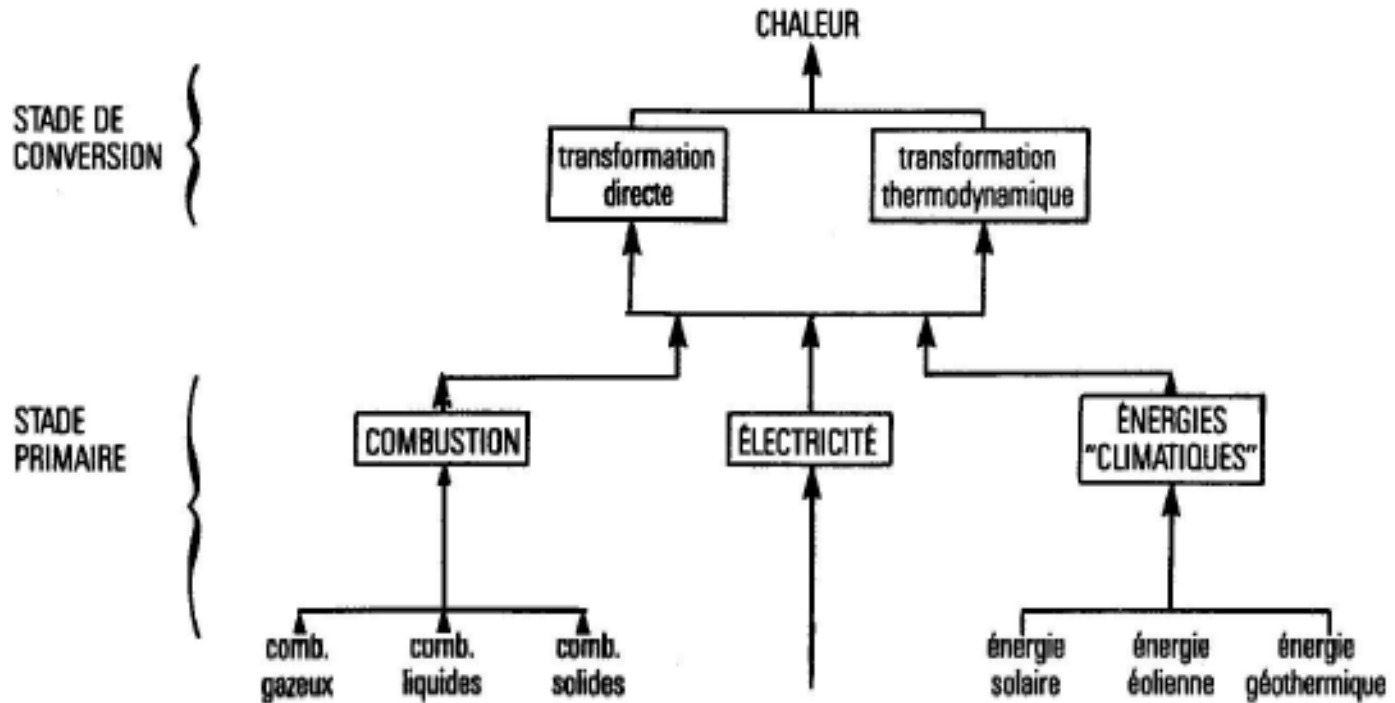
- Comment utiliser moins de combustible pour chaque tonne de vapeur

Atelier de Formation

1^{ère} partie :

La chaudière comme système énergétique

La chaudière comme système énergétique



- La chaudière utilise l'énergie chimique contenue à l'état latent dans les combustibles et l'air comburant, et le transmet à un support qui, dans le cas qui nous intéresse, est la vapeur d'eau.



La chaudière assure donc 2 fonctions principales :

- Une fonction combustion :
 - mélange combustible + comburant
 - combustion proprement dite.

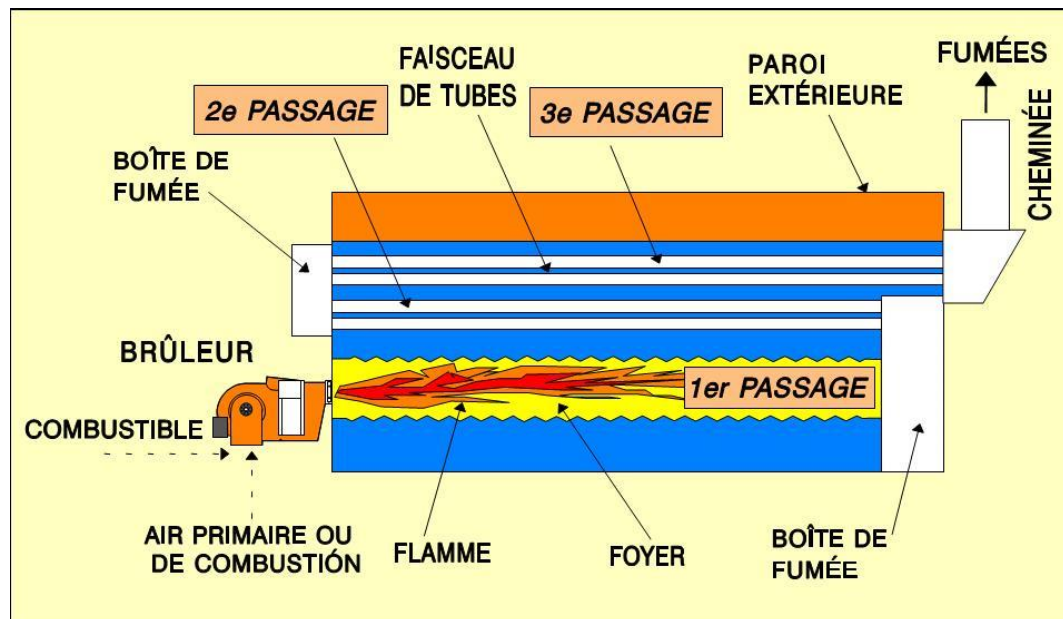
- Une fonction échange de chaleur :
 - transmission de la chaleur contenue dans les produits de la combustion à l'eau entrant dans la chaudière qui est destinée à la production de la vapeur ou de l'eau chaude.

Les sources de chaleur nécessaires à la production proviennent soit:

- De la combustion de produits fossiles
- De la combustion de sous-produits
- De de la combustion de déchets
- Soit encore des récupérations de chaleur pure en aval de process chimiques.

La chaudière classique à brûleur incorporé se décompose en deux parties:

- La zone de rayonnement dite aussi chambre de combustion.
- La zone de convection.



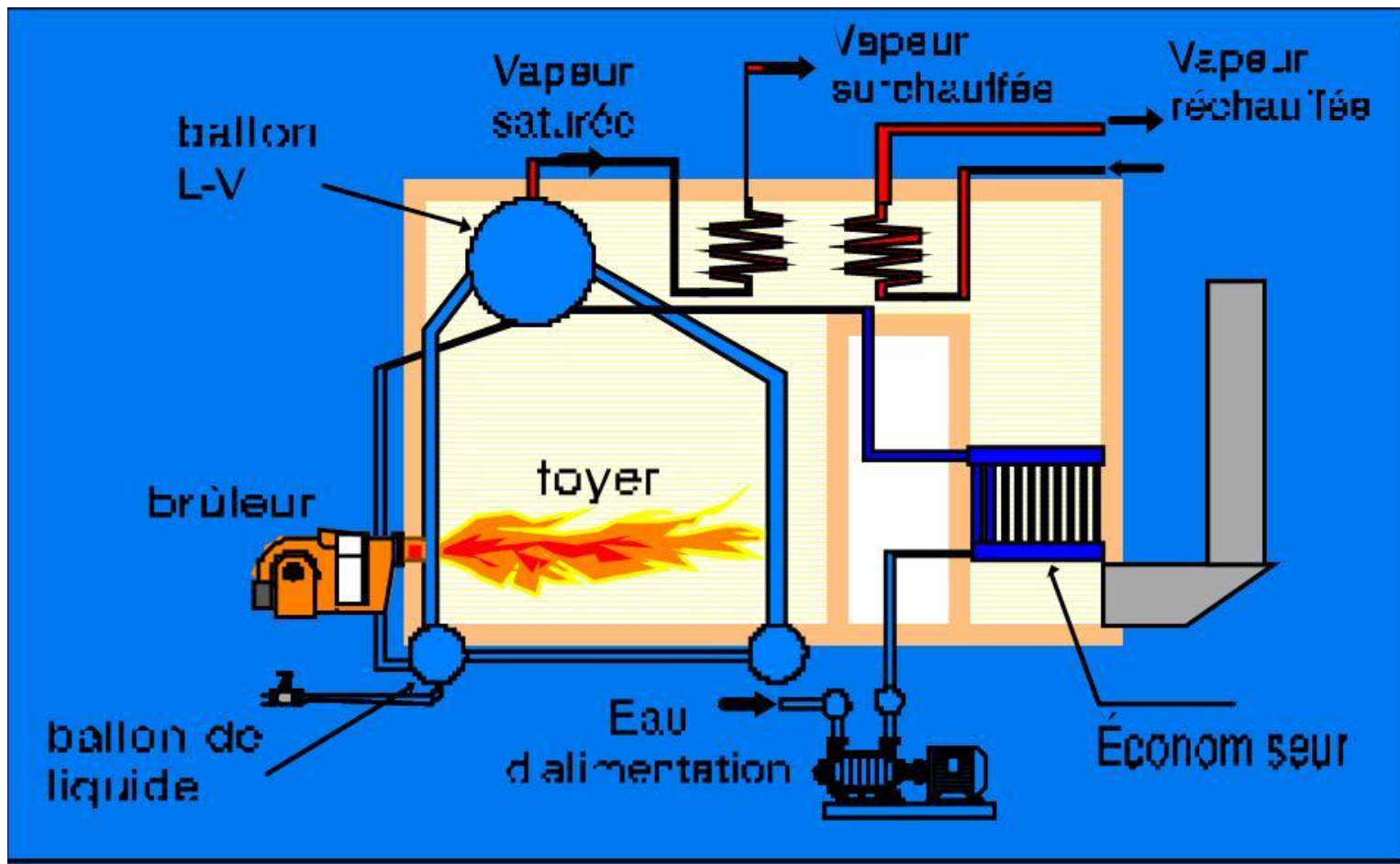
CHAUDIÈRE À 3 PASSAGES

- La chaudière est composée dans sa grande partie d'une batterie d'échangeurs de chaleur disposés en série ou en parallèle.
- Les chaudières à récupération ne comportent pas de zone de rayonnement. Leur technologie de l'échange et de construction est semblable aux autres.

D'autres genres de chaudières existent tel que:

- Les chaudières à lits fluidisés.
- Les chaudières utilisant les foyers sous pression de gaz.
- Les chaudières à contact direct.
- Les chaudières électriques.
- Les chaudières nucléaires.

SCHÉMA D'UNE CHAUDIÈRE







Caractéristiques

- Puissance thermique (MW) : chaleur reçue par le fluide thermique

- Timbre : pression maximale de fonctionnement

- Température et pression du fluide produit

- Surface de chauffe

- Allures :
 - Réduite
 - Normale
 - Poussée continue
 - De pointe

Typologie des chaudières

•

- ❑ **Petites** : 50 kW à 20 MW (100 kg/h à 40 t/h de vapeur), 4 à 20 bar, 450°C maxi monobloc transportable standardisée

- ❑ **Moyennes** : 10 à 100 MW (20 à 200 t/h de vapeur), 15 à 100 bar, 520°C maxi standardisée.

- ❑ **Grandes** : au delà de 100 MW, 135 à 365 bar, 540 à 650°C, souvent chaudières de centrales de production d'électricité, sur mesure

ÉQUIPEMENTS AUXILIAIRES ASSOCIÉS À LA CHAUDIÈRE

- Brûleurs
- Traitement de l'eau d'alimentation
- Système de contrôle (et de régulation)
- Système de préchauffage de l'air et/ou de l'eau
- Système de récupération des condensats

Atelier de Formation

2^{ème} partie:

La combustion

La combustion :

- ❑ la combustion recouvre l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent au cours de l'oxydation complète ou partielle du carbone et de l'hydrogène, des combustibles usuels.
- ❑ Pour que la combustion soit possible, il faut réunir en même temps une matière combustible, un corps comburant (oxygène, air...) qui, se combinant, produisent la combustion et une énergie pour le démarrage de la réaction chimique de combustion

La Combustion:

L'air est pris à l'extérieur, et pulsé vers le foyer par un ventilateur ou par tirage naturel.

La combustion se produit dans un foyer grâce à:

- Des brûleurs
- Des systèmes particuliers (grilles, lit fluidisé, etc.).

LES PRINCIPAUX COMBUSTIBLES INDUSTRIELS

- Gazeux : gaz naturel, propane, butane
- Liquides : fiouls
- Solides : charbon

COMPOSANTS DES COMBUSTIBLES

Les matières combustibles:

- Carbone (C)
- Hydrogène (H)
- Soufre (S) et oxygène (O) en faibles quantités

Les matières incombustibles

- Eau (H₂O) et azote (N)
- Cendres (combustibles solides)

LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Fiouls domestiques et fiouls lourds

- Provenance : distillation des produits pétroliers
- Composition chimique :
 - Mélange d'hydrocarbures (C_nH_m)
 - Divers: S, O_2 , N_2 , asphaltènes, sédiments et métaux
 - Composition moyenne:
 - ✓ C = 84 à 87 %
 - ✓ H_2 = 10 à 14 %
 - ✓ S = 0,2 à 4 %
 - ✓ Divers = 0 à 1 %

LES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Fiouls domestiques et fiouls lourds

Caractéristiques physiques :

- ◆ Viscosité
- ◆ Point d'éclair
- ◆ Point d'écoulement
- ◆ Masse volumique

Les compositions chimiques du Fioul N°2 et du charbon importé sont présentées

	<i>Fioul N°2</i>	<i>Charbon importé (matières sèches)</i>
<i>Carbone</i>	85.9 %	87.0 %
<i>Hydrogène</i>	10.5 %	5.2 %
<i>Soufre</i>	3.0 %	0.5 %
<i>Oxygène</i>	0.4 %	5.8 %
<i>Azote</i>	0.2 %	1.5 %

POUVOIR CALORIFIQUE DES COMBUSTIBLES

Quantité d'énergie contenue dans le
combustible

c'est-à-dire

Quantité de chaleur dégagée par la
combustion d'un kg de combustible

NOTIONS DE PCS ET PCI

Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS)

=

Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI)

+

Chaleur latente de condensation de la
vapeur d'eau produite par la
combustion

Combustible	R = PCI/PCS
Fiouls	0.94
Propane - Butane	0.93
Charbon	0.98

LE PCI DE QUELQUES COMBUSTIBLES

Combustible	PCI (kcal/kg)
<i>Fioul N°2</i>	<i>9600</i>
Fioul N°7	9800
Gasoil	10200
GPL	11000

Pouvoir calorifique

Combustibles solides

$$PCI_{BRUT} = [1 - (cen) - (H_2O)] PCI_{PUR \& SEC} - 2501 (H_2O)$$

CHARBON $PCI_{PUR \& SEC} = 35000 \dots 35500 \text{ kJ/kg}$

BOIS $PCI_{PUR \& SEC} \cong 18500 \text{ kJ/kg}$
si $(H_2O) = 0.20$
 $PCI_{BRUT} \cong 14300 \text{ kJ/kg}$

Combustibles liquides

$$PCI = 44000 \dots 42000 \text{ kJ/kg}$$



fractions → légères lourdes

Combustibles gazeux



$$\text{PCI} = 802\,400 \text{ kJ/kmole} = 50\,150 \text{ kJ/kg}$$

$$1 \text{ kmole CH}_4 \rightarrow 22.414 \text{ m}^3_{\text{N}}$$

$$\text{PCI} = 35\,800 \text{ kJ/m}^3_{\text{N}}$$

$$1 \text{ kmole CH}_4 \rightarrow 2 \text{ kmole H}_2\text{O} = 36 \text{ kg H}_2\text{O}$$

$$\text{PCS} - \text{PCI} = 36 \times 2501 = 90\,036 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{PCS} = 892\,436 \text{ kJ/kmole} = 39\,816 \text{ kJ/m}^3_{\text{N}}$$

$$\frac{\text{PCS}}{\text{PCI}} = 1.11$$

Gaz naturel:

$$[CH_4] = 0.820$$

$$[C_nH_m] = 0.030 \text{ (with } n = \dots 3 \dots \text{ and } m = \dots 8 \dots)$$

$$[N_2] = 0.140$$

$$[CO_2] = 0.010$$

Calcul de PCS et PCI

$$PCS = 39710 * 0.820 + 69210 * 0.030 = 34639 \text{ kJ} / m_N^3$$

$$PCI = 35790 * 0.820 + 63200 * 0.030 = 31244 \text{ kJ} / m_N^3$$

COMBUSTION COMPLÈTE

On appelle combustion complète une combustion où tout le combustible est oxydé. Les fumées ne contiennent aucun élément oxydable.



COMBUSTION NEUTRE

Exemple: Fioul lourd n°2

- ✓ **Composition moyenne :**
 - carbone = 85,9 %
 - hydrogène = 10,5 %
 - soufre = 3,0 %
 - oxygène = 0,4 %
 - azote = 0,2 %

- ✓ **Volume d'air st.** = 10,5 Nm³/kg de fioul

- ✓ **Volume de fumées st.** = 11,1 Nm³/kg de fioul

- ✓ **Teneur maximale en CO₂** = 16 %

COMPOSITION DES FUMÉES

Donc la composition des fumées

- ✓ CO_2
- ✓ H_2O
- ✓ CO
- ✓ N_2
- ✓ O_2
- ✓ Autres imbrûlés

C'est la composition des fumées qui renseigne sur la qualité de combustion

THÉORIE ET RÉALITÉ

Dans la théorie, la quantité stœchiométrique d'air suffit à assurer une combustion complète [transformation de tout le carbone (C) en gaz carbonique (CO₂)]

mais

Dans la réalité, l'utilisation de la quantité stœchiométrique d'air conduit à une combustion incomplète:



CHALEUR DE COMBUSTION DU CARBONE



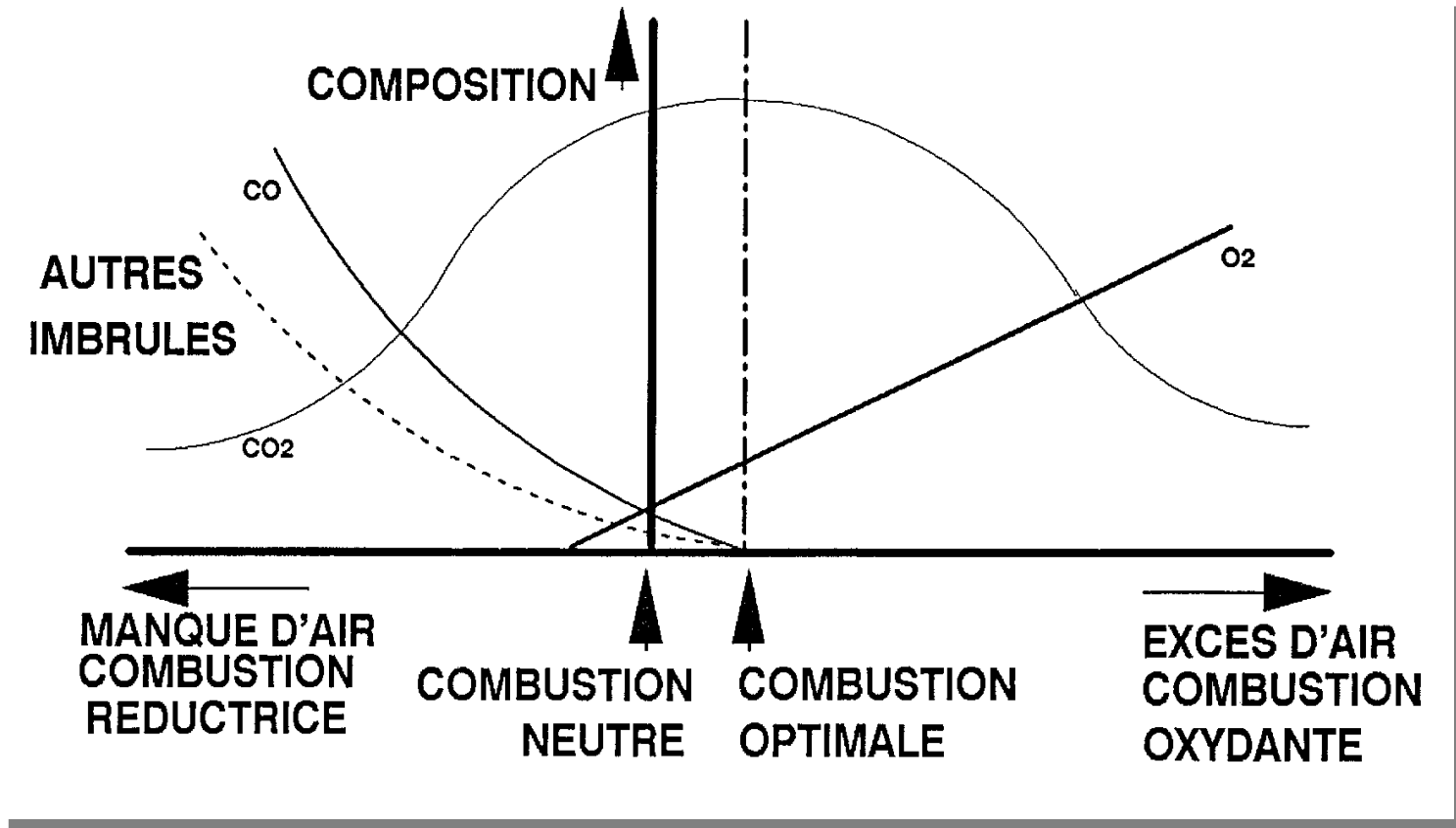
Si la combustion du carbone se transforme uniquement en monoxyde de carbone CO, on perd $\frac{3}{4}$ de la chaleur de combustion du carbone



NÉCESSITÉ D'UTILISER UN EXCÈS D'AIR

- La combustion complète utilisant la quantité stœchiométrique d'air exige un mélange parfait air/combustible au niveau du brûleur.
- Dans la pratique, ce mélange parfait n'est pas possible, d'où la nécessité d'utiliser un excès d'air pour assurer une combustion complète.

RELATIONS ENTRE LA COMPOSITION DES GAZ DE COMBUSTION ET L'EXCES D'AIR AU BRÛLEUR



DÉFINITION DE L'EXCÈS D'AIR

Excès d'air en % =

$$\frac{\text{Qté d'air utilisée} - \text{Qté stœchiométrique d'air}}{\text{Quantité stœchiométrique d'air}}$$

COMPROMIS

Une combustion incomplète provoque des pertes (suie, CO, fumée)

alors

on utilise un excès d'air

mais

Un excès d'air provoque également des pertes de chaleur, l'air en excès entre froid et se retrouve chaud dans les fumées.

EN PRATIQUE, L'EXCÈS D'AIR OPTIMAL DÉPEND PRINCIPALEMENT:

- Des caractéristiques du combustible utilisé
- Du type des brûleurs
- Des opérations de maintenance des brûleurs

EXEMPLE D'EXCÈS D'AIR NÉCESSAIRE POUR UN BON FONCTIONNEMENT DES CHAUDIÈRES

	<u>Excès d'air en %</u>	
chaudières des centrales électriques	gaz/fioul	< 5%
chaudières industrielles (30 à 50 t/h)	Fioul Gaz	10% 5%
chaudières industrielles (3 à 10 t/h)	Fioul Gaz	20-25% 10%

Excès d'air

1. C'est le constructeur qui donne le taux minimal d'excès d'air recommandé pour le brûleur et le combustible.
2. S'il est impossible d'obtenir ces données, on peut se servir des valeurs de masse types de la table 1 comme guide.
3. Pour obtenir les meilleurs résultats, il faut analyser les gaz de combustion et observer les conditions de combustion à la sortie de cheminée.

EXIGENCES EN COMBUSTION D'AIR

TABLE 1

Combustible	Masse d'air théorique kg/GJ tel que brûlé (air stoechiométrique)	Excès d'air type (Minimal)	Masse d'air total kg/GJ tel que brûlé
Gaz naturel	318	5% *	334
Mazout N° 2	323	10% *	355
Mazout N° 6	327	10% *	360
Charbon bitumineux (40% de produits volatils, basé sur l'absence d'humidité et de cendre)	327	20%	392
Biomasse (écorce de pin, basé sur l'absence d'humidité et de cendre)	315	50%	473

* Note: les brûleurs conçus pour un allumage avec un faible taux d'excès d'air peuvent fonctionner avec 1 à 2% d'excès d'air.

COMBUSTION OXYDANTE COMPLÈTE

$$e (\%) = \frac{O_2}{21 - O_2} \times 100$$

$$e (\%) = \frac{CO_2 \text{ st.} - CO_2 \text{ mes.}}{CO_2 \text{ mes.}} \times 100$$

$$\frac{CO_2 \text{ mes.}}{CO_2 \text{ st.}} + \frac{O_2 \text{ mes.}}{21} = 1$$

CONDITIONS NÉCESSAIRES À LA COMBUSTION

- Assurer une **TENEUR** optimale de l'air/ou combustible
- Maintenir la **TEMPERATURE** de combustion propre à chaque combustible
- Assurer un bon mélange air-combustible ce qui nécessite une **TURBULENCE** de l'air
- Assurer le **TEMPS** de combustion de façon à ce que celle-ci s'opère entièrement dans le foyer

Soit assurer la règle des « 4T »

RÔLE DES BRÛLEURS

- Provoquer le mélange parfait de l'air et du combustible
- Brûler ce mélange
- Maintenir et stabiliser la flamme

En résumé, assurer la règle des « **4T** »

DESCRIPTION DES BRÛLEURS

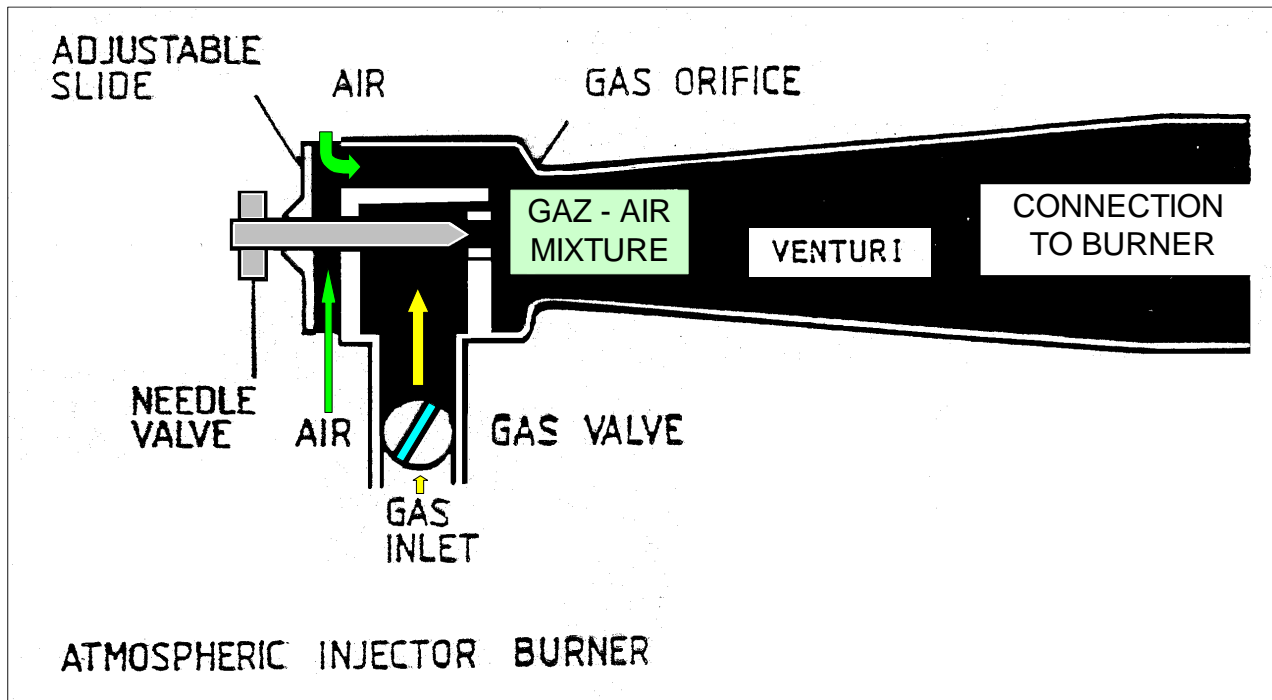
C'est un ensemble constitué de:

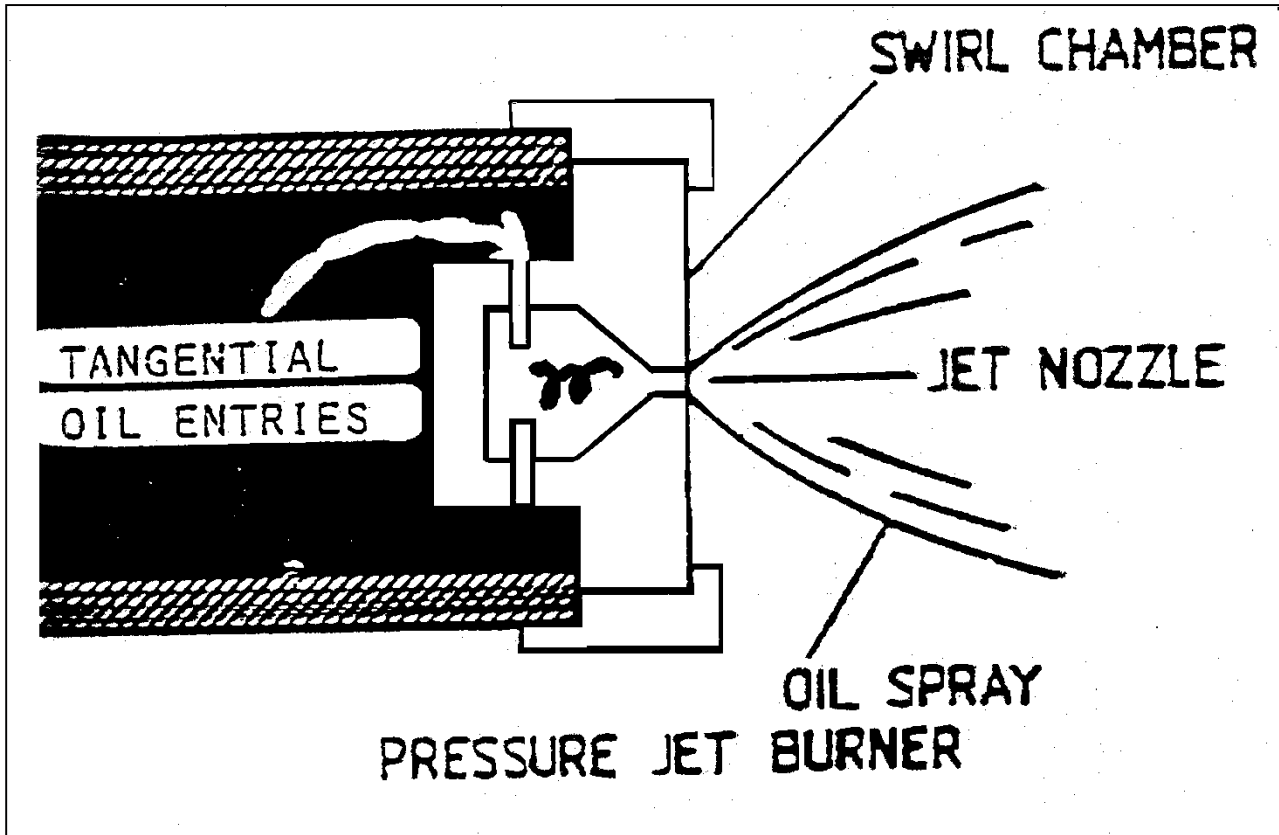
- ✓ Un injecteur amenant le combustible

- ✓ Une amenée d'air comburant

- ✓ Tête de brûleur ou gicleur

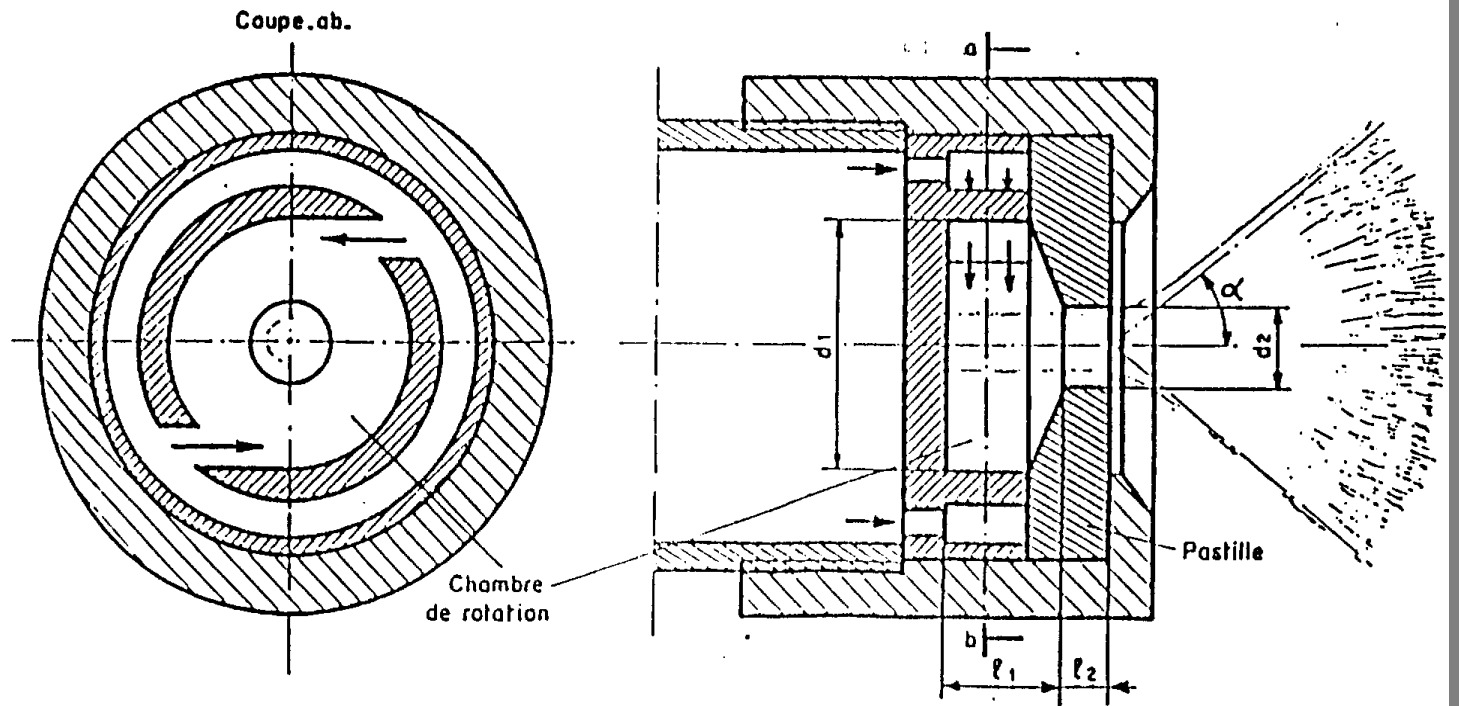
- ✓ Équipements auxiliaires
 - Système de réchauffage
 - Système de contrôle
 - Système de sécurité



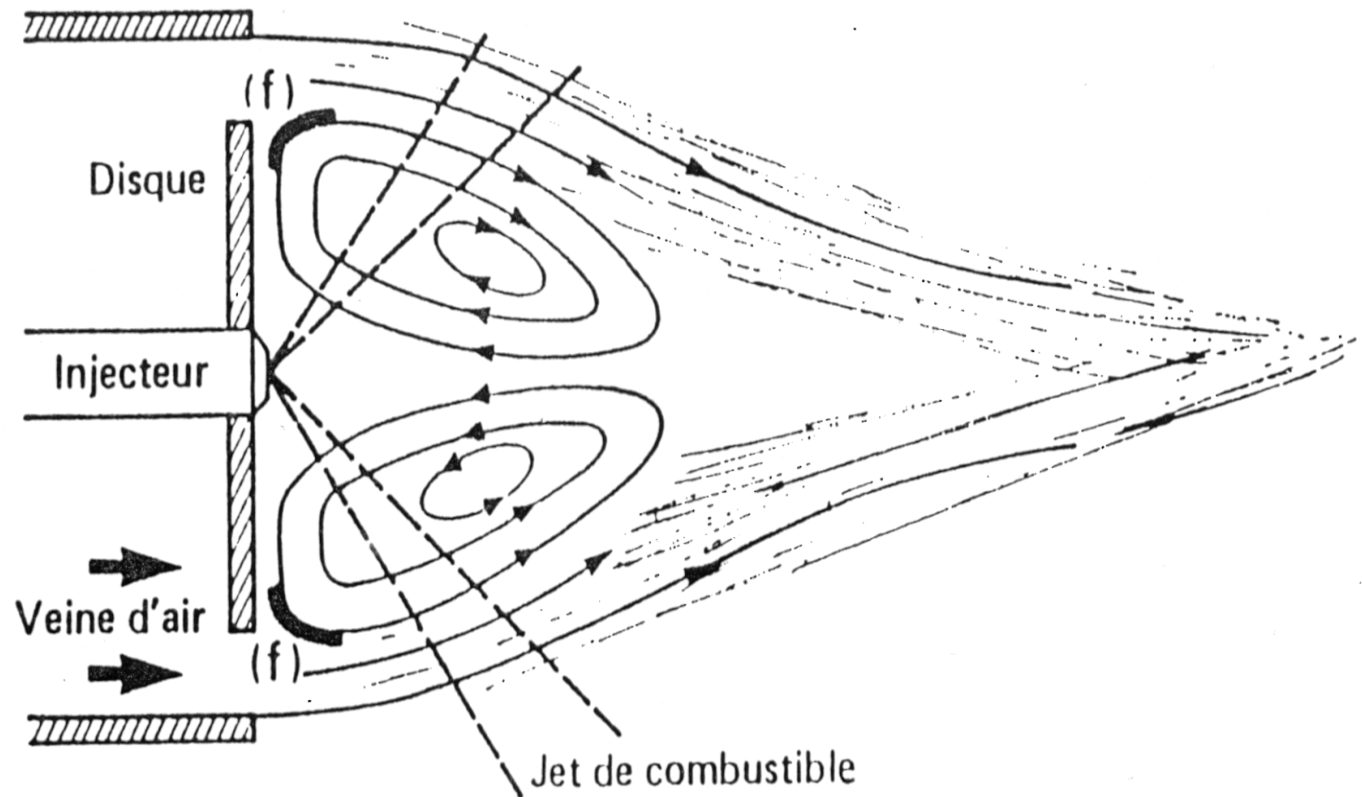


PULVERISATION PAR DÉTENTE

Schéma du brûleur



SCHÉMA



Les produits de la combustion :

La chaleur produite par la combustion est:

1. véhiculée par les produits de la combustion
2. utilisée pour produire de la vapeur d'eau ou de l'eau chaude

La quantité d'énergie produite et la qualité de la vapeur dépend:

1. De la technologie du brûleur.
2. Des caractéristiques du combustible utilisé, de son conditionnement et de la qualité de l'air nécessaire à la combustion.
3. Des caractéristiques de l'eau de chaudière

□ **Composition chimique :**

L'analyse élémentaire du combustible permet en se basant sur les réactions chimiques de combustion:

1. De calculer les volumes d'air nécessaires.
2. De calculer les volumes de fumées générés.
3. D'éviter la corrosion à haute température par connaissance des teneurs en éléments fortement corrosifs.
4. De prendre des précautions et limiter les conséquences de la corrosion sulfurique à basse température (Teneur en soufre).
5. Limiter la pollution (Teneur en azote).

Atelier de Formation

3^{ème} partie :

Eau de chaudière

Influence de la nature d'eau d'alimentation

L'eau présente des spécificités remarquables quant à son utilisation comme fluide caloporteur dans les chaudières.

- Pour une augmentation de température, l'eau absorbe plus de chaleur que tous les autres substances inorganiques.**
- En s'évaporant, elle augmente 1600 fois pour former de la vapeur à pression atmosphérique.**
- La vapeur est capable de transporter une grande quantité de chaleur.**

Ces propriétés uniques de l'eau la rendent idéale pour les procédés de chauffe et de génération de puissance.

Traitement de l'eau

- Malgré ces excellents atouts , la qualité de l'eau brute est généralement Insuffisante pour permettre son utilisation sans préparation.
- Le traitement devra permettre de respecter le cahier des charges de l'utilisateur et du producteur et d'éviter des conséquences fâcheuses pouvant se rabattre sur la chaudière.
- Le traitement approprié de l'eau d'alimentation de chaudière est une partie importante de l'opération et du maintien du système.

- ❑ Un traitement d'eau rigoureux est une exigence de base pour une exploitation sans risque.

Il faudra procéder aux différents traitements des eaux suivants :

- ✓ décarbonatation,
- ✓ adoucissement,
- ✓ dégazage.

- En plus des risques classiques d'entartrage et de corrosion, il faut limiter le primage (entraînement de fines particules d'eau dans la chaudière par la vapeur).

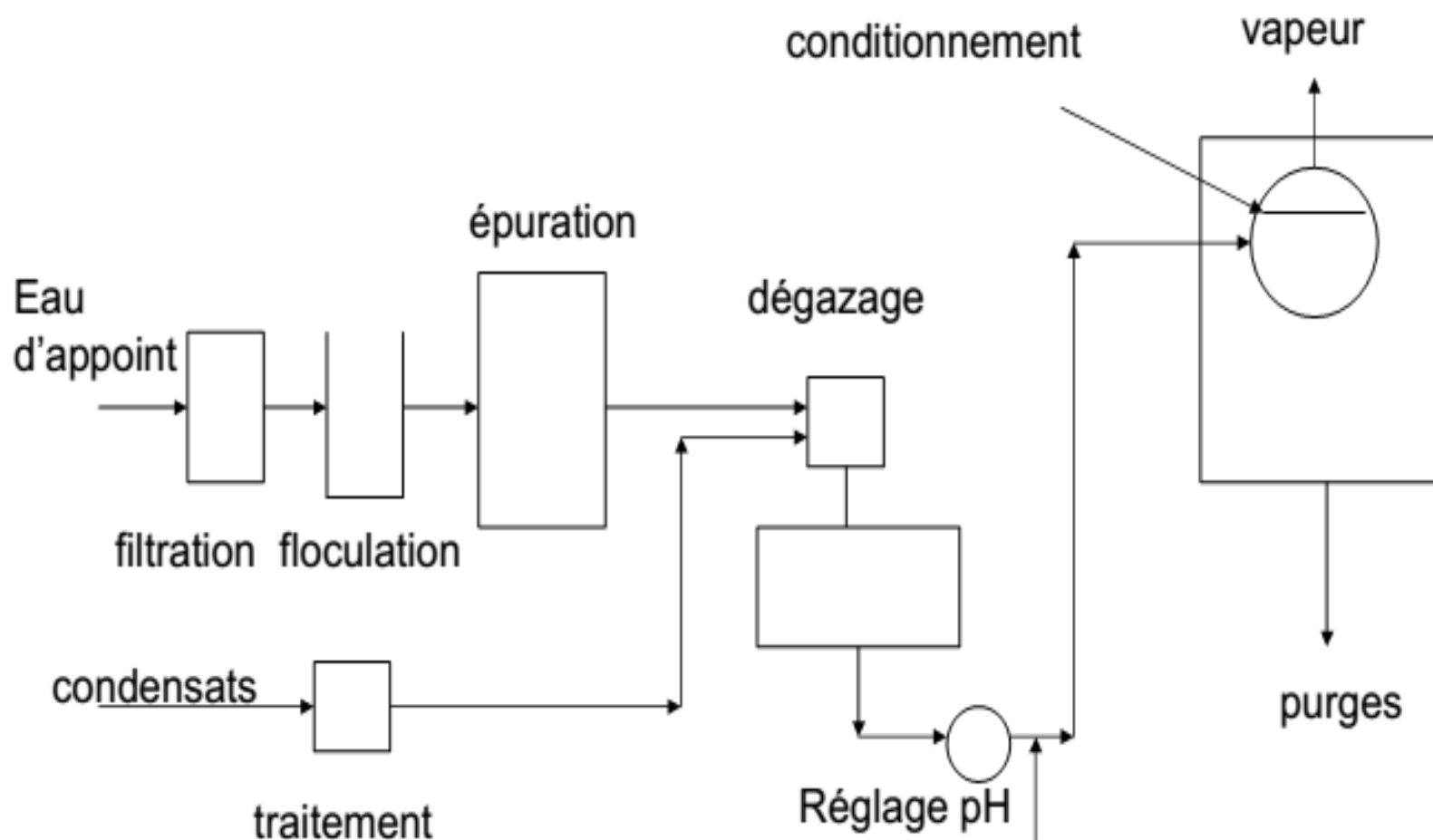
Il faut donc conditionner l'eau .

Grandeurs à mesurer

- ✓ Dureté, titre hydrotimétrique
- ✓ Alcalinité, titre alcalimétrique
- ✓ Salinité totale
- ✓ Titre en hydroxyde
- ✓ Teneur en silice
- ✓ Phosphate actif
- ✓ Oxygène dissous
- ✓ pH

Pression de service (bar)	≤ 15	15 à 25	25 à 35	35 à 45	≤ 45 à 60	60 à 75	75 à 100
Eau d'alimentation pH	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5	≥ 8,5
TH (° f)	< 0,5	< 0,2	< 0,2	< 0,1	< 0,05	< 0,05	< 0,5
Fe total maxi (mg/l)					< 0,05	< 0,05	< 0,03
Cu total maxi (mg/l)					< 0,03	< 0,03	< 0,01
O2	Elimination de l'oxygène dissous par dégazage thermique efficace (O2 < 0,02 mg/l) ou/et utilisation de réactifs réducteurs						
Eau de chaudière TAC (° f)	< 120 = 0,7	< 80 = 0,7	≤ 60 = 0,7	≤ 40 = 0,7	≤ 15 ≥ 0,5	≤ 10 ≥ 0,5	≤ 5 ≥ 0,5
TA (° f)	TAC	TAC	TAC	TAC	TAC	TAC	TAC
SiO2 (mg/l)	< 200	≤ 150	≤ 90	≤ 40	≤ 15	≤ 10	≤ 5
SiO2 TAC	≤ 2,5	≤ 2	≤ 1,5	< 1	< 1	≤ 1	≤ 1
Salinité totale (mg/l)	< 4000	< 3000	< 2000	< 1500	< 500	< 300	< 100
NaOH libre (mg/l)	≤ 800	≤ 600	≤ 400	≤ 300	< 20	≤ 10	≤ 5
Phosphate (mg/l)	30 à 100	30 à 100	20 à 80	20 à 80	10 à 60	10 à 40	5 à 20
pH	10,5 à 12	10,5 à 12	10,5 à 12	10,5 à 12	10 à 11	10 à 11	9,5 à 10,5

Différents stades de traitement



Types d'échanges d'ions

- Adoucissement simple
- Déalcalinisation
- Permutation mixte
- Décarbonatation carboxylique
- Déminéralisation totale

CALCUL DES PURGES

Le pourcentage des purges en chaudières est définie :

- par le taux de concentration admissible (voir fournisseur)
- par la minéralisation de l'eau d'alimentation.

Purges de déconcentration

- Concentrations limites dans le ballon imposées par les constructeurs de chaudières
- Purges usuellement de l'ordre de 5%
- Valeurs pouvant monter à 15% en cas de traitement d'eau inadapté

Produits utilisés

- Phosphates (réglage du pH et élimination de la dureté).
- Dispersants, type polymères naturels ou de synthèse, ou séquestrant permettant de maintenir les impuretés en suspension
- Réducteurs d'oxygène, selon type de dégazage (attention : hydrazine interdite dans certains procédés agroalimentaires ou pharmaceutiques)
- Antimousses (anti-primage)

L'eau traitée par ces techniques permet:

- ✓ d'améliorer la qualité de la vapeur,
- ✓ d'optimiser les échanges thermiques par l'absence totale de dépôt sur les surfaces d'échange,
- ✓ de réduire les pertes calorifiques par une réduction des purges de déconcentration,
- ✓ d'alléger les coûts en traitement chimique anticorrosion/antitartre.

Atelier de Formation

4^{ème} partie :

Différents types de chaudières

Différents types de chaudières

La distinction la plus nette du point de vue conception est celle qui apparaît entre :

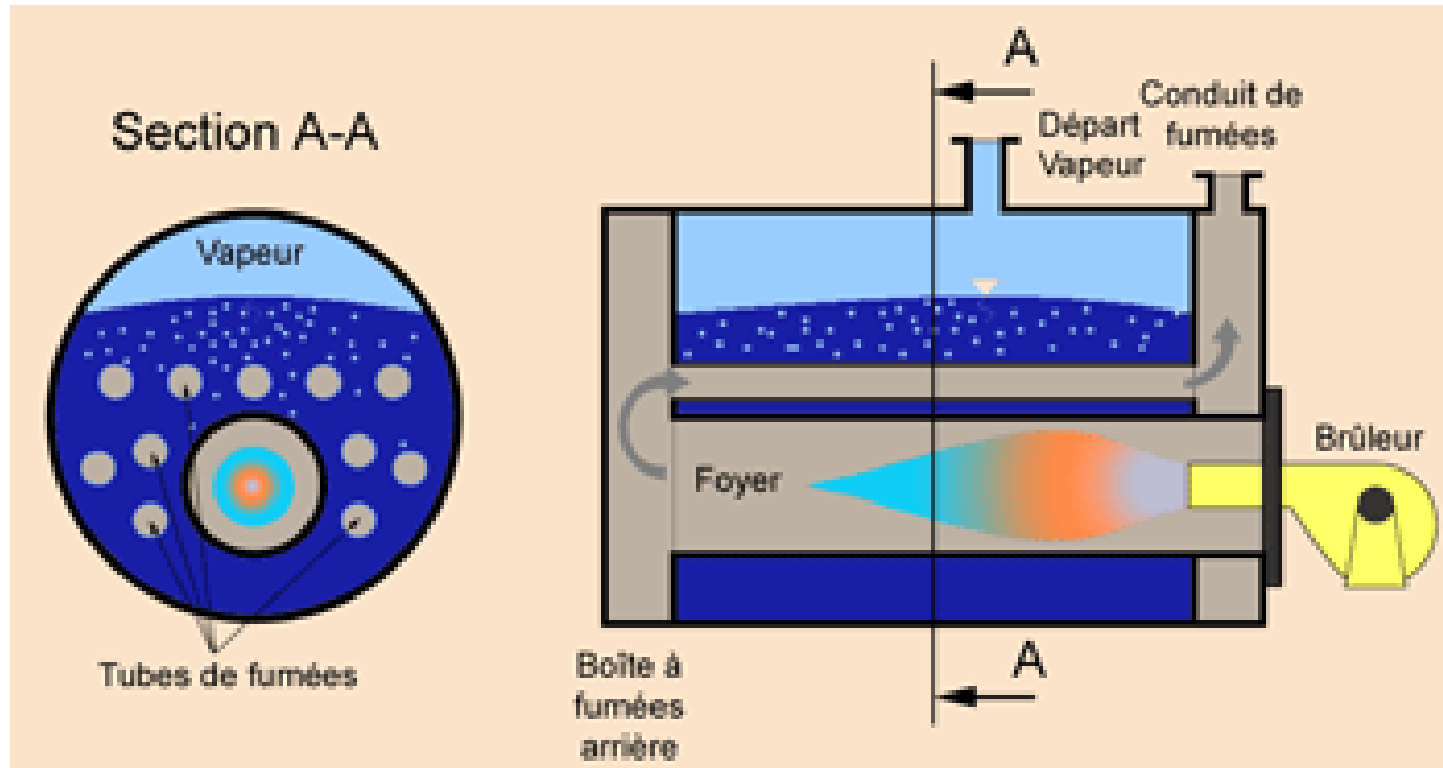
1. les chaudières à tubes de fumées parcourus intérieurement par les gaz
2. les chaudières à tubes d'eau parcourus intérieurement par l'eau et l'émulsion eau -vapeur.

Chaudière à tubes d'eau		Chaudière à tubes de fumée	
Avantage	inconvénient	avantage	inconvénient
-moins dangereuse, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. - une fiabilité et une durée de vie plus importante.	-son prix est très élevé, il peut aller jusqu'au double du prix de la chaudière à tube de fumée - traite un grand volume d'eau ; elle est classée en premier catégorie ; donc il doit avoir un local indépendant pour la chaufferie.	-prix faible par rapport à l'autre type. - peut souvent être classée en seconde catégorie, ce qui ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante.	- elle est soumise à des contraintes plus sévères que la chaudière à tubes d'eau - plus dangereuse qu'une chaudière à tubes d'eau, en cas d'incident sur le tube foyer en particulier. - une fiabilité et une durée de vie plus faible

3.3 Comparaison des performances

Propriétés	Chaudières à tubes de fumée	Chaudières à tubes d'eau
Mise en route (à puissance équivalente)	Lente (grand volume d'eau à chauffer)	rapide
Adaptation aux changements de régime	médiocre (inertie importante)	bonne
Surface de chauffe	moyenne	élevée
Sécurité	médiocres	bonne
Encombrement	faible	fort
Prix	limité	élevé
Applications usuelles <ul style="list-style-type: none">• Puissance• Débit• Timbre (pression max. d'utilisation)	<ul style="list-style-type: none">• moyennement élevée• 1,5 à 25 t/h• 10 à 20 bar	<ul style="list-style-type: none">• importante• 4 à 200 t/h• 90 à 100 bar (en circulation naturelle) et jusqu'à 225 bar (circulation forcée)

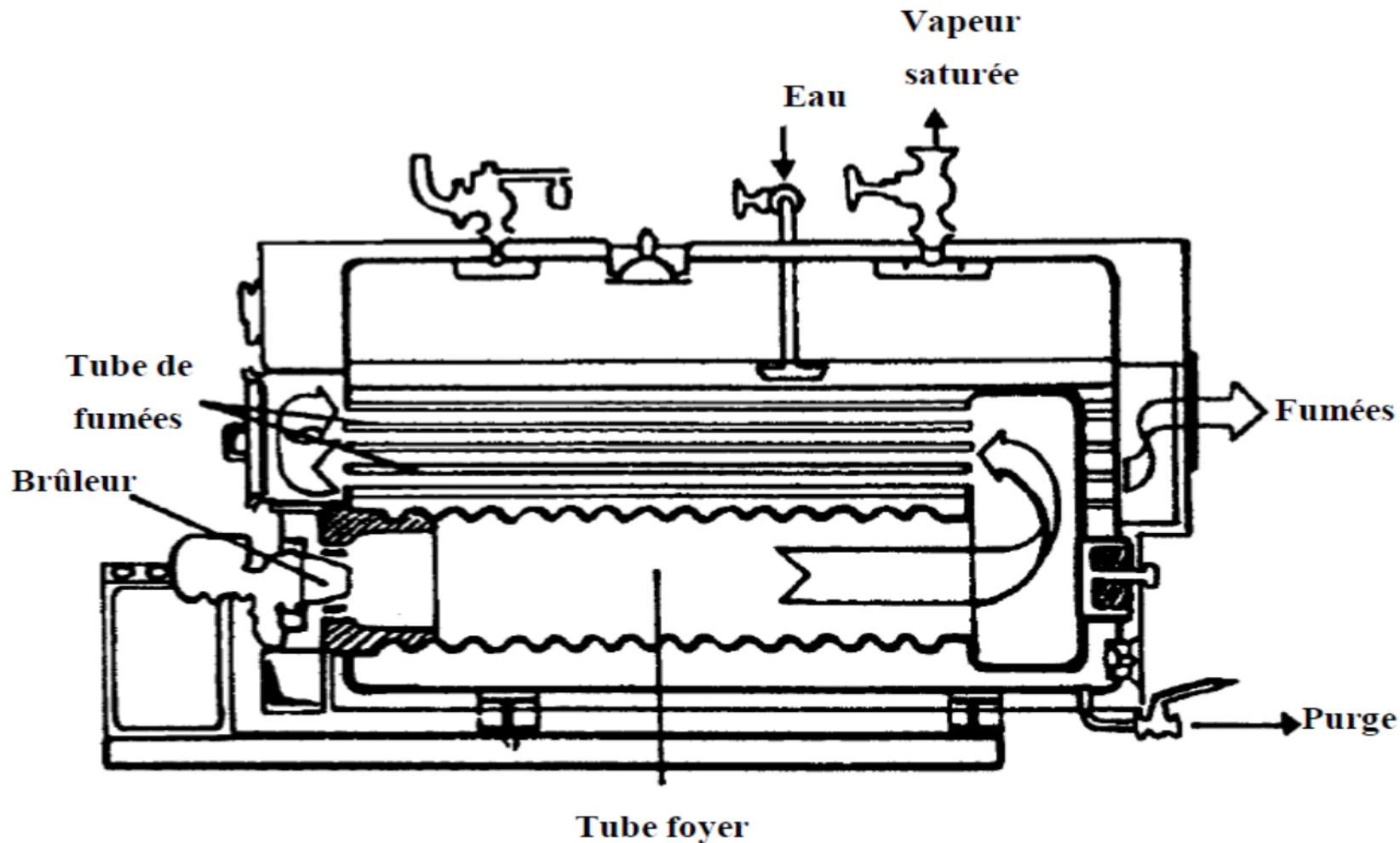
Chaudière à tubes de fumées



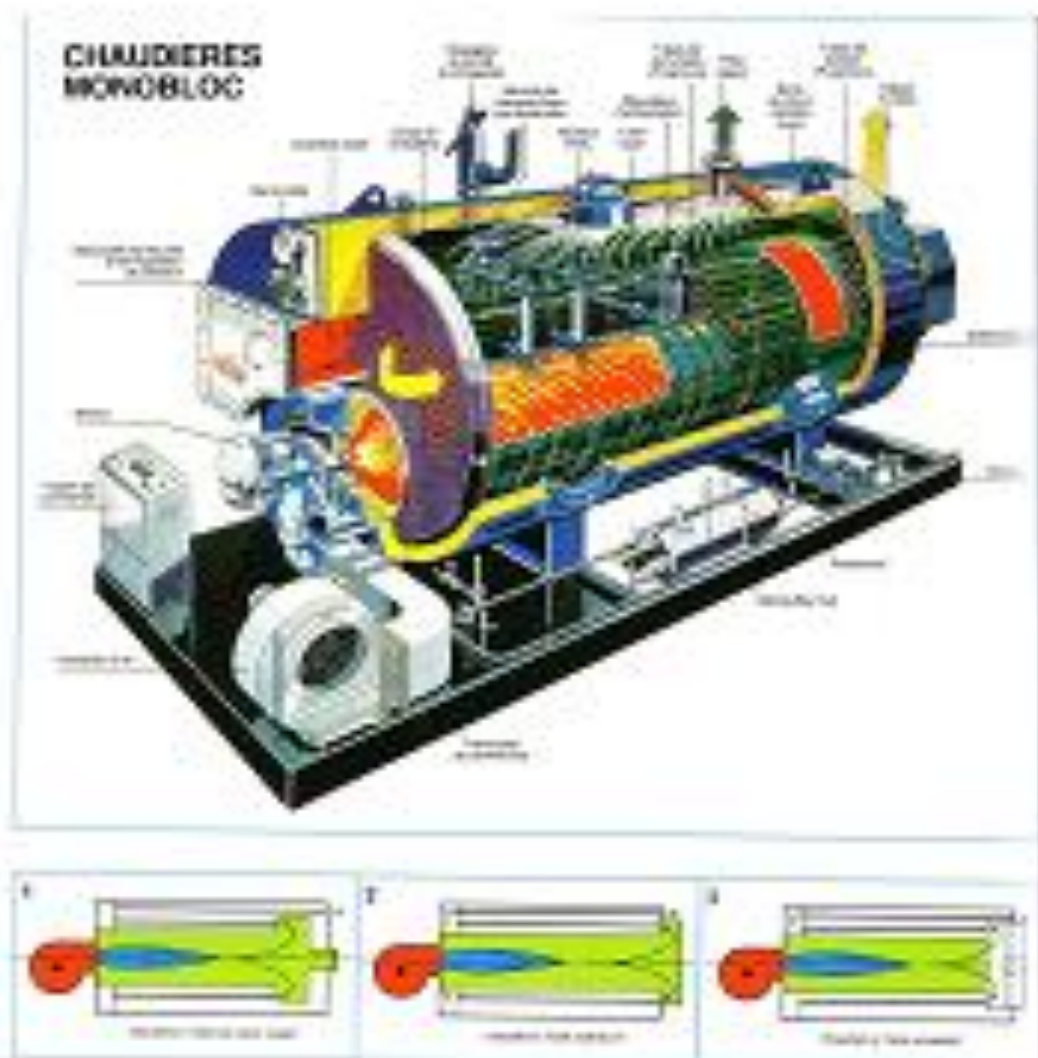
l'enveloppe de la chaudière est soumise à une pression égale à celle de la vapeur ; son épaisseur doit donc être conséquent. Quand la puissance de la chaudière augmente cela conduit à avoir une épaisseur de la tôle constitutive de l'enceinte (la virole) prohibitive.

Chaudières à tube de fumées

On trouve des chaudières à 2 passes, 2 passes avec plaque arrière immergée, 3 passes



Chaudière à tube de fumée



Les chaudières à tubes d'eau

l'eau circule à l'intérieur de faisceaux de tubes montés en général en parallèle.

La circulation peut être:

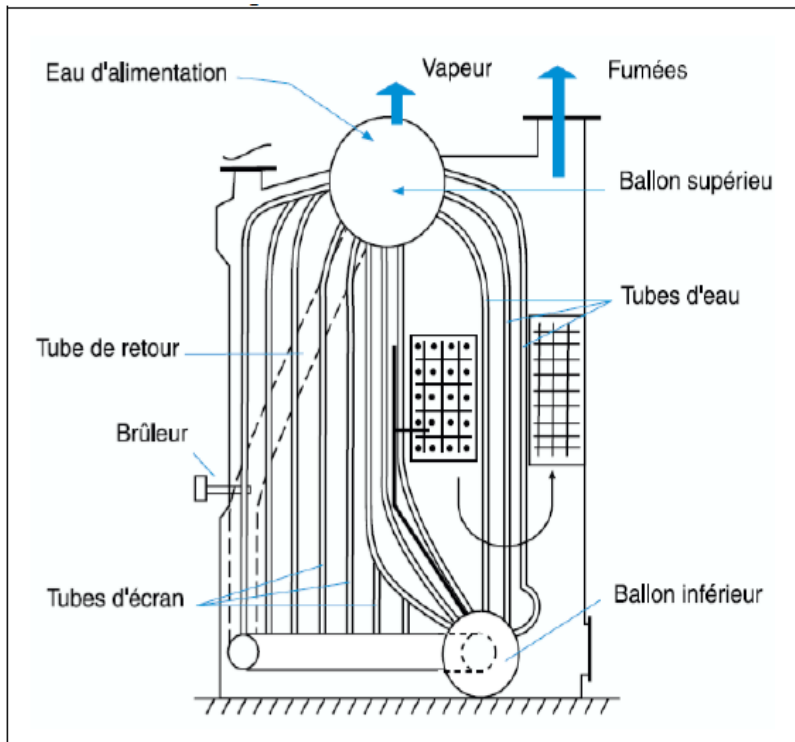
- Forcée (par pompes).
- Naturelles (par convection).

Les tubes peuvent être soit:

- Lisses.
- Ailettées.

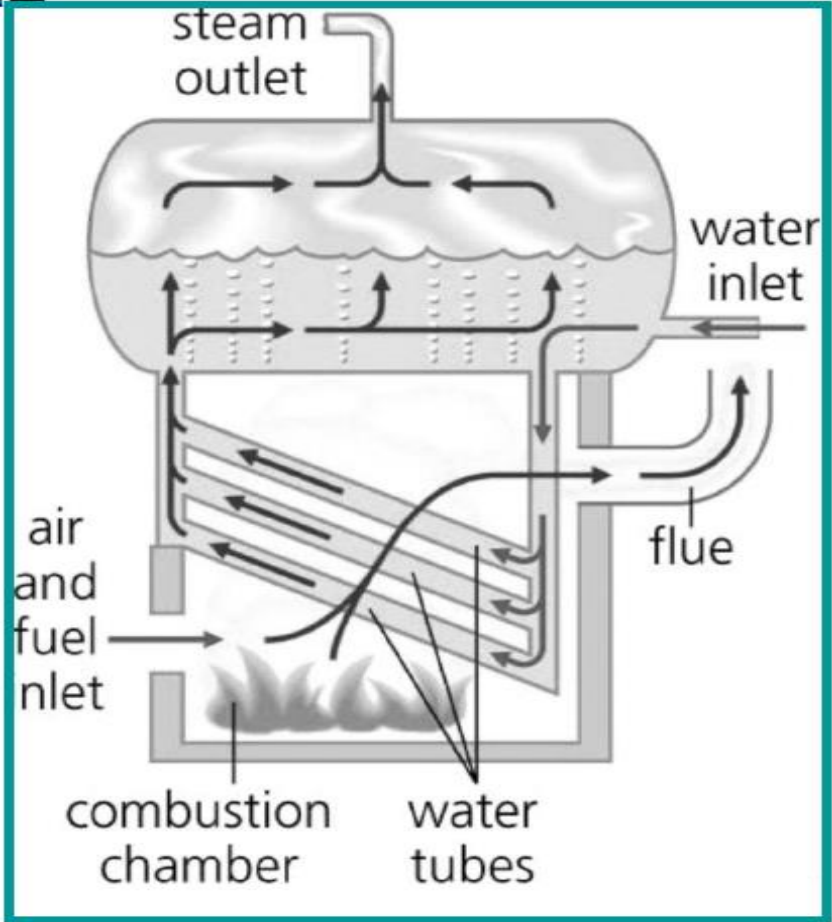
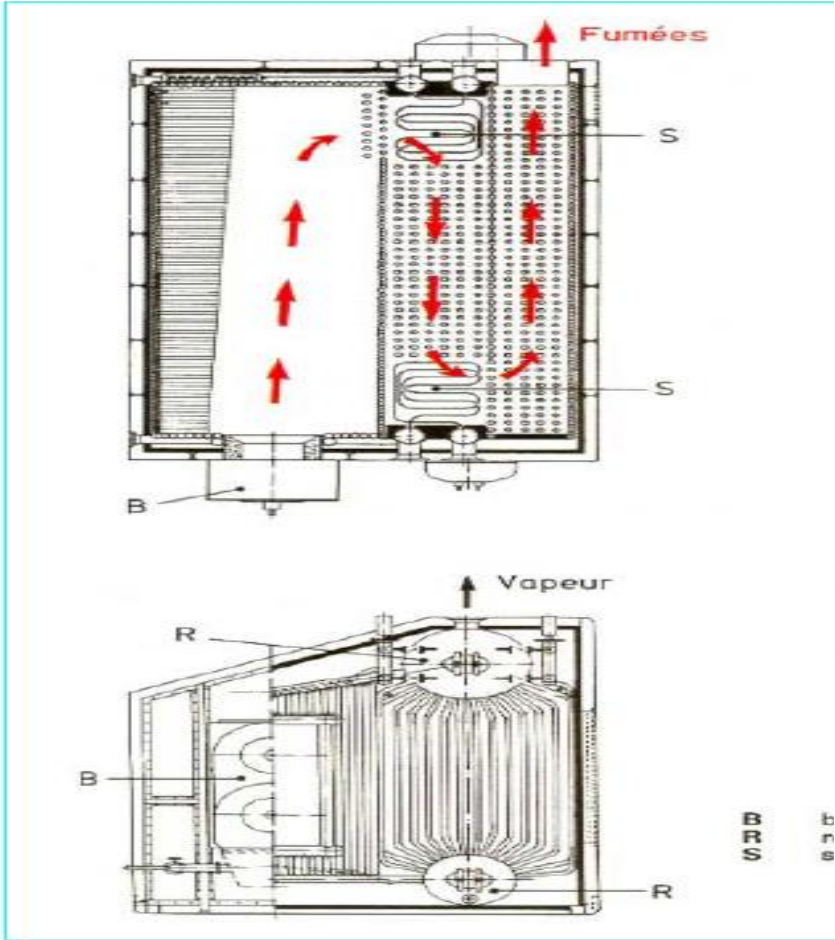
Chaudière à tubes d'eau





Ces chaudières sont beaucoup plus onéreuses que les chaudières à tubes de fumées plus compactes

Chaudière à tubes d'eau



Dans ces chaudières:

- Les parcours des fumées peuvent être plus au moins complexes. La source de chaleur est à l'extérieur. Ceci implique des limites de pression beaucoup plus élevées .
- Ces chaudières sont utilisées lorsque l'on souhaite des productions vapeur à des pressions importantes ou de la vapeur surchauffée (la pression d'utilisation varie de 4,5 bar à 120 bar),
- qu'elles sont moins exigeantes quant à la qualité de l'eau d'alimentation comparativement à celles à tubes de fumées.

Echangeurs constitutifs

- Économiseur : réchauffage eau alimentaire
- Vaporiseur (en général au plus près de la flamme : tubes écrans)
- Surchauffeur
- Resurchauffeur
- Réchauffeur d'air
- Réchauffeur d'eau alimentaire par vapeur

Équipements auxiliaires associés à la chaudière

Les équipements auxiliaires associés à la chaudière sont:

- Brûleurs
- Traitement de l'eau d'alimentation
- Système de contrôle (et de régulation)
- Système de préchauffage de l'air et/ou de l'eau
- Système de récupération des condensâts

Atelier de Formation

5^{ème} partie :

Évaluation des performances des chaudières

Paramètres d'exploitation d'une chaudière

Les paramètres d'exploitation d'une chaudière sont:

- Pression et température du fluide caloporteur (eau, vapeur et huile)
- Pression et température du combustible
- Autres :
 - Débits
 - O_2
 - CO
 - CO_2
 - T^0 des fumées

Bilan énergétique et matière

Bilan matière

- Le bilan matière permet de déterminer et ou de vérifier les conditions de marche optimale d'une unité en :
 - Calculant certain grandeurs que l'on ne peut pas mesurer expérimentalement (composition et quantité des flux de matière)
 - Vérifiant la validité des déterminations expérimentales.

Dans le cas des chaudières le bilan matière permet entre autres:

- D'estimer l'excès d'air nécessaire à l'obtention d'une combustion correcte (fonction de la nature du combustible),
- De calculer le débit d'air nécessaire à la combustion,
- De calculer le débit (massique et volumique) des fumées engendrées par la combustion, et éventuellement de la quantité de cendres produites.

Air de combustion

L'air stœchiométrique: Quantité théorique d'air de combustion requise pour brûler complètement un combustible.

EXIGENCES EN COMBUSTION D'AIR			
TABLE 1			
Combustible	Masse d'air théorique kg/GJ tel que brûlé (air stœchiométrique)	Excès d'air type (Minimal)	Masse d'air total kg/GJ tel que brûlé
Gaz naturel	318	5% *	334
Mazout N° 2	323	10% *	355
Mazout N° 6	327	10% *	360
Charbon bitumineux (40% de produits volatils, basé sur l'absence d'humidité et de cendre)	327	20%	392
Biomasse (écorce de pin, basé sur l'absence d'humidité et de cendre)	315	50%	473

* Note: les brûleurs conçus pour un allumage avec un faible taux d'excès d'air peuvent fonctionner avec 1 à 2% d'excès d'air.

Cette quantité d'air stœchiométrique peut aussi être calculer si on dispose de des analyses en pourcentage de masse du combustible. Ces analyses concernent les pourcentages en masse de C, H₂, O₂, S, H₂O, et cendres.

Ces analyses doivent être fournies par le fournisseur du combustible, cependant on peut utiliser la formule suivante qui est approximative:

La quantité d'air stœchiométrique

$$= \left[(11.6 \times C) + \{34.8 \times (H_2 - O_2 / 8)\} + (4.35 \times S) \right] / 100 \text{ kg / kg de fuel}$$

Excès d'air

- Les taux réels d'excès d'air devraient être comparés aux taux recommandés.
- La méthode la plus précise pour déterminer le pourcentage réel d'excès d'air est l'analyse des gaz de combustion qui s'échappent de la chaudière.
- On utilise souvent un analyseur en continu d'O₂ ou de CO₂ pour identifier indirectement l'excès d'air,

L'appareil d'Orsat :

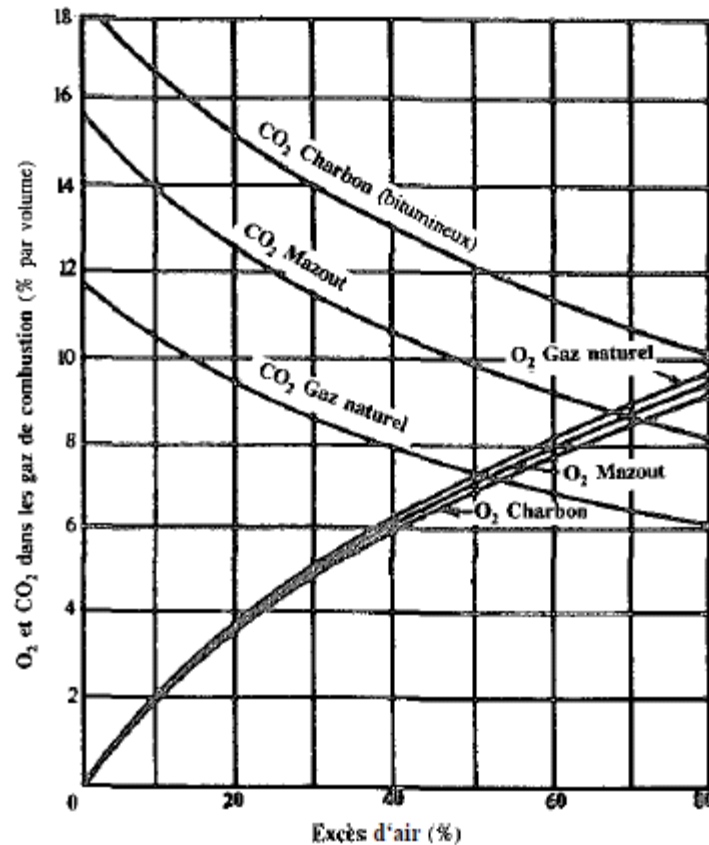
- ❑ Analyse les échantillons de gaz de combustion.
- ❑ Détermine le pourcentage (par volume) d'oxygène (O₂), d'anhydride carbonique (CO₂) et de monoxyde de carbone (CO). Le gaz restant est de l'azote (N₂).

L'échantillon doit être prélevé le plus près possible de la sortie de la chaudière pour minimiser les erreurs entraînées par les infiltrations d'air.

D'autres analyseurs manuels plus simples:

- ❖ Mesurent le CO₂ ou l'O₂ dans les gaz de combustion.
- ❖ Ils sont plus faciles d'utilisation
- ❖ Peuvent servir à contre vérifier l'appareil d'Orsat, pourvu qu'il n'y ait pas de CO.
- ❖ La présence de CO indique que la quantité d'air est insuffisante pour compléter le procédé de combustion.

Pour le gaz naturel, le mazout ou le charbon, on peut déterminer le pourcentage d'excès d'air à partir de la figure suivante, pourvu encore une fois, qu'il n'y ait pas de CO.



Pourcentage d'O₂ et de CO₂ en fonction de l'excès d'air

L'excès d'air peut aussi être calculé en utilisant les analyses des produits de combustion concernant le pourcentage de O₂ ou de CO₂. Il serait préférable d'avoir la mesure de O₂ et d'utiliser l'équation suivante;

$$\text{Excès d'air} = \frac{\text{O}_2(\text{mesuré})}{21 - \text{O}_2(\text{mesuré})}$$

Dans le cas où on dispose seulement de la mesure de CO, on peut utiliser la formule suivante:

$$\text{Excès d'air} = \frac{7900 \left[(\text{CO}_2(\text{stoechiométrique})) - (\text{CO}_2(\text{mesuré})) \right]}{(\text{CO}_2(\text{mesuré})) \left[100 - (\text{CO}_2(\text{stoechiométrique})) \right]}$$

Pour les autres combustibles, ou lorsqu'il y a présence de CO dans les gaz de combustion, on doit utiliser l'équation suivante:

$$\% \text{ d'excès d'air} = \frac{O_2 - 0,5 \text{ CO}}{0,2682 N_2 - (O_2 - 0,5 \text{ CO})} \times 100$$

où O_2 = oxygène par volume (%)

CO = monoxyde de carbone par volume (%)

N_2 = azote par volume (%)

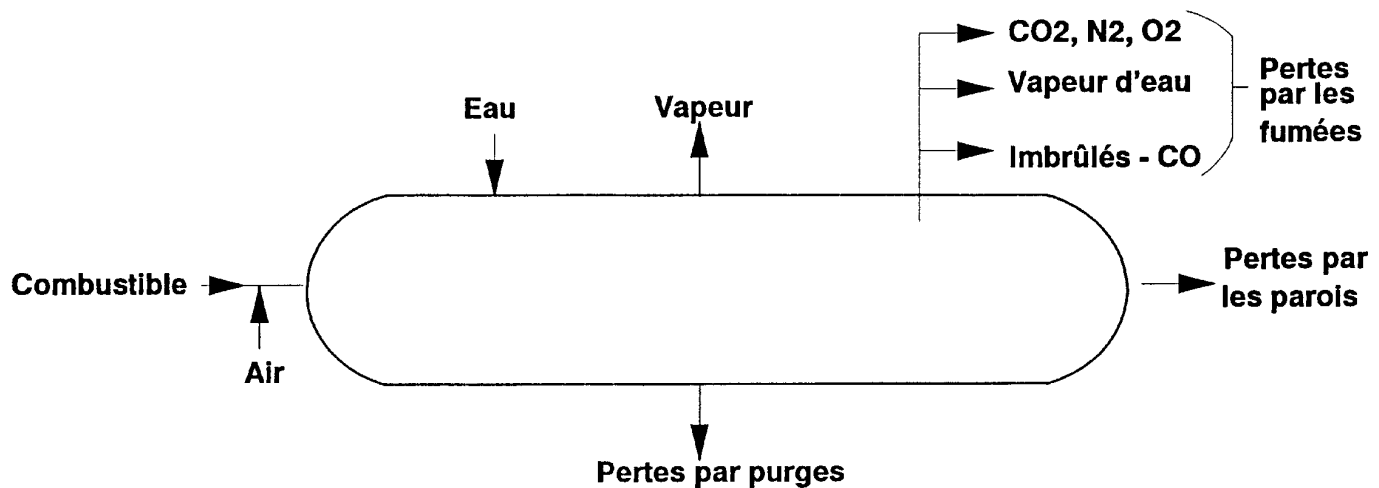
Bilan énergétique

Dans le cas des chaudières le bilan énergétique permet entre autres:

- Le calcul de la puissance à introduire dans la chaudière sous- forme de combustible,
- L'estimation du rendement attendu,

Le Bilan peut s'écrire généralement comme suit:

$$\left[\begin{array}{l} \textit{Le flux thermique} \\ \textit{accumulé par le système} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \textit{La somme des flux} \\ \textit{Entrants} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \textit{L'enthalpie} \\ \textit{de formation} \\ \textit{ou de réaction} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \textit{La somme des flux} \\ \textit{Sortants} \end{array} \right]$$



Energie entrante

Combustible
+
air préchauffée
+
eau préchauffée

==

Energie sortante

Vapeur
+
pertes par les fumées
+
pertes par purges
+
pertes par les parois

Dans notre cas le bilan se réduit à:

$$\text{puissance fournie} = \text{puissance utile} + \text{pertes}$$

La puissance fournie (ou introduite) englobe:

- Les flux thermiques entrants;
 - l'enthalpie sensible du combustible à l'entrée ainsi que celle de l'air.

 - L'enthalpie de formation du combustible brûlé n'est autre que son PCI. Notons que dans le cas du gaz naturel nous pouvons utiliser le PCS qui prend en compte en plus du PCI la chaleur de vaporisation de l'eau.

La puissance utile prend en compte:

- Les flux thermiques sortants destinés à être utilisés (flux thermique de la vapeur ou flux thermique de l'eau chaude).

Pertes

La différence entre la puissance utile fournie à l'eau (Pu) et la puissance contenue dans le combustible 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.
- Par les purges.

Pertes par les fumées

***LE RÔLE DE L'OPÉRATEUR DE LA CHAUDIÈRE
CONSISTE À FAIRE FONCTIONNER SON
INSTALLATION DE FAÇON À RÉDUIRE AU
MAXIMUM CES PERTES***

Les pertes par les fumées proviennent :

- De la chaleur sensible contenue dans les fumées qui sont nettement plus chaudes que l'air aspiré dans la chaufferie.

Pertes par les fumées

- De la chaleur latente causée par l'humidité provenant de la combustion d'hydrogène.
- Des imbrûlés issus d'un mauvais mélange entre l'air et le combustible, provoquant la production de CO au lieu de CO₂ (la chaleur dégagée est alors inférieure à celle fournie par une combustion complète).

La réduction de l'excès d'air au minimum permet de diminuer ces pertes.

Pertes de chaleur par rayonnement et convection

- Les pertes vers l'ambiance proviennent de l'échange thermique par rayonnement et convection entre la chaudière et son environnement.
- Les pertes par l'ambiance sont fonction notamment de la température moyenne de l'eau dans la chaudière, de la configuration de cette dernière et de son degré d'isolation. Elles sont donc en partie dépendantes de la vétusté de la chaudière et de sa régulation.
- Exprimées selon le pourcentage du rendement thermique d'une chaudière.

Les pertes par les fumées sont les plus importantes
Comparativement aux autres

Les pertes d'énergie pour les chaudières usuelles sont en générale de 8 à 15% pour Celles des fumées , 0,5% pour les pertes par les parois et de 2à 3% pour celles dues aux purges.

Notion de Rendement

Le rendement caractérise les performances de la chaudière : rapport entre l'énergie produite et l'énergie Introduite pendant l'unité de temps, cette **méthode qui est appelée la méthode directe** semble à première vue la plus simple et la plus rationnelle ;

$$\eta = \frac{\text{puissance produite (ou utile)}}{\text{puissances introduites}}$$

Méthode directe

Consiste à mesurer pendant un temps déterminé:

1. la quantité d'énergie introduite en chaudière
2. l'énergie apportée au fluide eau /vapeur.

Cette méthode implique de pouvoir connaître avec une bonne précision:

1. Le débit de combustible, le ou les débits de vapeur, le débit d'eau chaude.
2. Evaluer correctement les apports de chaleur extérieure:

Méthode Indirecte

Une autre façon de l'exprimer est de mettre en évidence les pertes, et comme :

puissances introduites = puissance produite + pertes

$$\eta = 1 - \frac{\text{pertes}}{\text{puissances introduites}}$$

Méthode indirecte

Cette méthode indirecte:

1. Plus complexe
2. Plus précise.

Car les erreurs, même si elles sont en valeur relative plus importantes, portent uniquement sur le montant des pertes, lesquelles ne sont qu'une fraction, 10 ou 15 %, de l'énergie introduite, de sorte qu'une erreur relative de 4 % dans le calcul de la perte n'induit qu'une erreur relative de $0,15 \times 0,04 = 0,006$ soit 0,6 % sur le rendement global déterminé de cette façon.

Méthode indirecte

La méthode indirecte :

1. Nécessite de connaître l'analyse élémentaire du combustible, la composition des fumées (CO_2 , éventuellement CO) et des cendres et en plus de sa précision.
2. l'avantage de permettre:
 - Mesure avec des instruments portables
 - Détermination de chaque source de perte

Rendement de combustion

$$\eta_{\text{comb}} = 100 - f \times (T_{\text{fumées}} - T_{\text{amb}}) / \%CO_2$$

Ce rendement reflète:

- La qualité de la combustion.
- La qualité de l'échange thermique entre les fumées et le fluide caloporteur.

où :

- $T_{\text{fumées}}$ = la température des fumées à la sortie de la chaudière [°C]
- T_{amb} = température ambiante de la chaufferie [°C]
- %CO₂ = la teneur en CO₂ des fumées [%]
- f = facteur dépendant principalement du type de combustible (mazout : f = .. 0,57 ..; gaz naturel : f = .. 0,47 .., Bois f=0,77)

Rendement de la combustion

On relève les deux éléments clés de cette formule :

1. La **température des fumées**. Plus celle-ci est élevée, plus il y a de perte de chaleur vers la cheminée, et moins bon est l'échange entre l'eau et les fumées.
2. Le **pourcentage de CO₂** contenu dans les fumées qui symbolise la transformation complète du combustible.

Ces éléments reflètent la qualité de la combustion et constituent un tableau de bord pour optimiser la combustion.

Critère de contrôle de la combustion

Constatations:

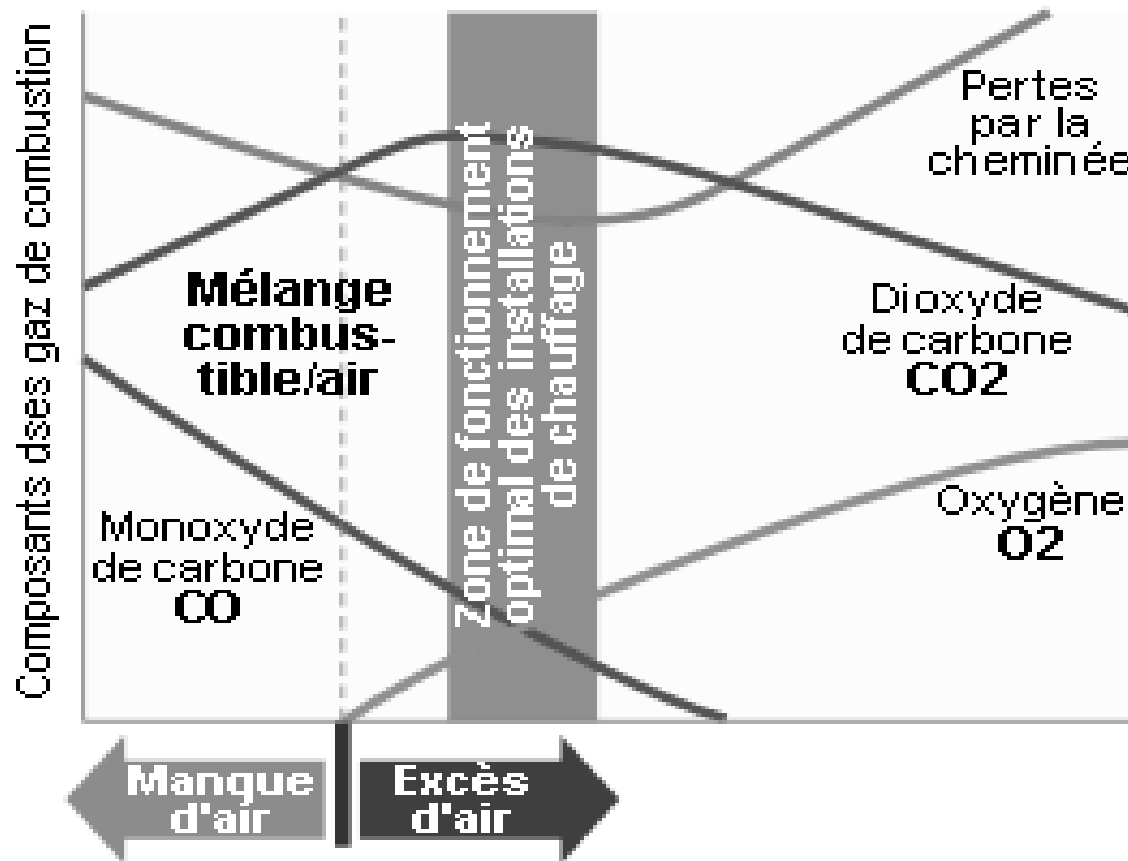
- 1er point : Les pertes dépendent des débits des fumées et de l'air de combustion qui sont fortement liés à l'excès d'air.
- 2ième point: Les pertes sont fortement conditionnées par la température de sortie des fumées.

Conclusions:

- *Pertes* ↓ *si excès d'air* ↓ *ou T_{fumées}* ↓
- *Pertes par imbrûlés* ↗ *si excès d'air* ↘

Donc il faut trouver une zone de réglage de la combustion permettant de travailler avec un excès d'air qui satisfait les deux conditions.

Le digramme suivant montre cette zone de réglage.



ORDRE DE GRANDEUR DES VALEURS DU RENDEMENT DES CHAUDIÈRES

À tubes d'eau (production de l'électricité)	93 %
À tubes d'eau (30 à 50 t/h)	90 %
À tubes de fumée (5 à 20 t/h)	87 %
Typiques dans l'industrie	60 - 85 %

PARAMÈTRES INFLUENÇANT LES PERTES PAR CHALEUR SENSIBLE DES FUMÉES

Une augmentation de ces pertes peut provenir de:

- ✓ Un excès d'air excessif
- ✓ Un accroissement de la température de sortie des fumées

L'EXCÈS D'AIR EXCESSIF PEUT ÊTRE DÙ À :

- ❑ Un mauvais réglage

- ❑ Un problème d'entretien :
 - Entrées d'air parasite
 - Mauvaise pulvérisation du combustible
 - Mauvaise distribution de l'air dans les brûleurs

L'ACCROISSEMENT DE LA TEMPÉRATURE DES FUMÉES PEUT ÊTRE DÙ À :

- Une diminution de l'excès d'air
- Une chaudière encrassée
- Une augmentation de la charge de la chaudière

Atelier de Formation

4^{ième} partie:

Appareils de contrôle de combustion

COMMENT MESURER LA QUALITÉ DE LA COMBUSTION ?

- Inspection visuelle de la flamme ?
- Inspection visuelle des fumées ?
- Analyse des fumées ?

OBSERVATIONS VISUELLES

- La flamme
 - couleur et opacité

- Les fumées
 - couleur et opacité

Résultat normal:
à peu près la combustion
optimale
2 à 4 % de différence de
rendement

ANALYSE DES FUMÉES

- Au minimum : CO_2 ou O_2 plus $T_{\text{fumées}}$
- De plus: CO , imbrûlés, indice de noircissement

***Cela représente la seule manière
de préciser et d'optimiser la
combustion***

MESURE DE LA TEMPÉRATURE DES FUMÉES

- Mesure de la température des fumées de combustion au point le plus proche de la sortie de la chaudière

- Mesure de la température de l'air de combustion à l'entrée de la chaudière
 - Thermocouple
 - Thermomètre à cadran

ANALYSEURS DES FUMÉES DE COMBUSTION

Mesure des teneurs des différents constituants CO_2 et O_2

- Analyseur chimique (tel que l'Orsat et le Fyrite)

ou

- Analyseur électronique mesure en plus la teneur en CO et les imbrûlés

ANALYSEURS DES FUMÉES DE COMBUSTION



ANALYSEURS DES FUMÉES DE COMBUSTION



Atelier de Formation

5^{ème} partie:

**Procédure de contrôle
de la combustion**

**en vue d'améliorer le rendement de
chaudière**

CONTRÔLE DE LA COMBUSTION

Les pertes par les fumées sont les plus importantes

Réduire ces pertes

c'est

Améliorer le rendement de combustion

donc

Minimiser la consommation du combustible

objet de cet atelier

RÉGLAGE DE LA CHAUDIÈRE

Recherche de la combustion optimale (excès d'air optimal):

- ◆ Par le biais d'observations visuelles
- ◆ Nécessite des mesures (analyses des fumées) pour donner de bons résultats

LA DÉMARCHE POUR AMÉLIORER LE RENDEMENT DE LA CHAUDIÈRE

- Définir et mesurer le rendement actuel
- Identifier les paramètres opératoires qui affectent le rendement
- Déterminer les actions appropriées de réglage
- Ajuster attentivement
- Remesurer le rendement

PROCÉDURE DE RÉGLAGE -- 1 (préparation)

- S'assurer que les conditions de fonctionnement sont normales
- Vérifier la demande actuelle de vapeur/eau chaude
- Préparer les instruments de mesure
- Préparer les tableaux de rendement, et les moyens pour noter les mesures

Rapport de réglage

Organisme chargé du suivi				Plan d'actions							
Client :		XYZ - Unité de teinture									
Date:		Test fait par :									
Combustible :		Fioul ()		Gaz ()		Charbon ()		Autre ()			
Type chaudière						Type de brûleur					
Timbre :				bars		Débit vapeur		Kg/hre			
Fluide :		Pression		bars		Temp. :		°C		Débit	Kg/hre
Combustible :		Pression		bars		Temp. :		°C		Débit	Kg/hre

DONNEES DE LA COMBUSTION

Charge %	% O ₂	% CO ₂	IND.NO Bachara	TEMP AMBIA	TEMP FUMEE	TEMP NETTE	Rendem Combust	% Temps Fonction
AV								
AP								
AV								
AP								
AV								
AP								
Pertes par imbrulees								
Pertes par parois								
Pertes par purges								
Rendement moyen avant			Rend.[AV] x % temps fonct.:					
Rendement moyen apres			Rend.[AP] x % temps fonct.:					
RATIO			Enthalpie fluide					
kg fioul / tonne vapeur =			-----					
			PCI x rendement					

VALEURS LIMITES DES PARAMÈTRES DE COMBUSTION

COMBUSTIBLE	% excès d'air	% CO₂	% O₂	Indice de noircissement	
Fioul	< 10 t/h	10 - 20	14.5 - 13	2.2 - 3.5	Fioul N°2 3 - 4
	> 10 t/h	5 - 10	15.5 - 14.5	0.9 - 2.2	Fioul N°7 2
Charbon	30 - 60	14.5 - 11.5	4.9 - 8	4	
Butane/Propane	5 - 12	13 - 12	1.2 - 2.8	2	

PROCÉDURE DE RÉGLAGE -- 2

(mesure)

- Choisir une allure ou un taux de charge
- Passer au contrôle manuel
- Attendre que le régime se stabilise
- Mesurer (T, O₂, CO₂, smoke)

PROCÉDURE DE RÉGLAGE -- 3 (analyse)

- Confirmer que les mesures sont bonnes
- Déterminer si la combustion est oxydante ou réductrice (valeur O_2)
- Comparer aux valeurs recommandées
 - CO_2 > 13%
 - O_2 < 3.5 %
 - Smoke < 3
- Déterminer l'ajustement qu'il faut

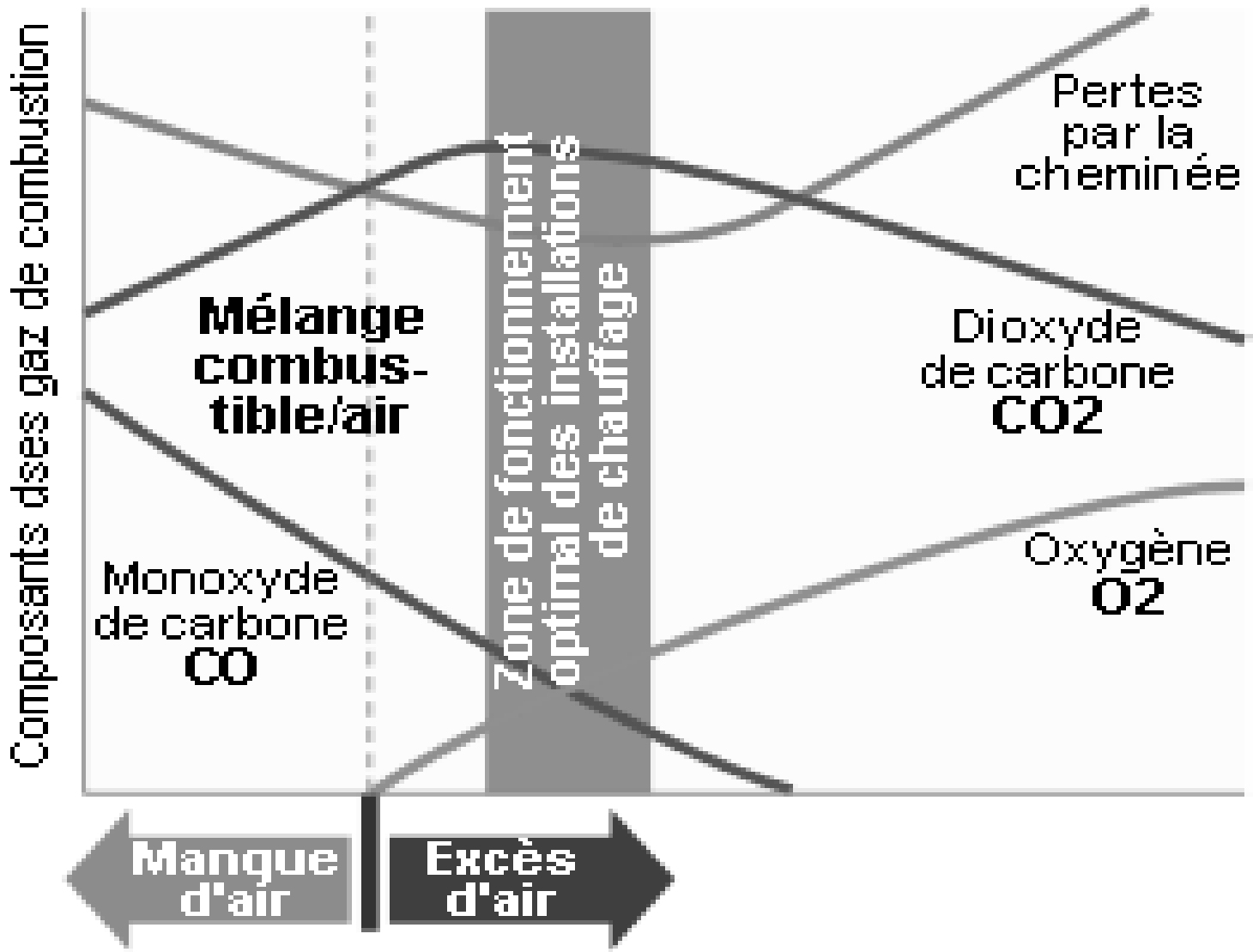
PROCÉDURE DE RÉGLAGE -- 4 (ajustement)

➤ Réduire légèrement le débit d'air

➤ **Mesurer de nouveau**

➤ **Comparer aux valeurs recommandées**

➤ **Réduire encore l'air s'il est nécessaire**



LES FACTEURS QUI AFFECTENT L'EXCÈS D'AIR

- Le type et les caractéristiques du combustible
- La pression et la température du combustible
- Le type de brûleur
- L'état du brûleur
- Le système de contrôle
- La charge de la chaudière
- L'expérience et l'habilité du conducteur

LES FACTEURS QUI AFFECTENT LA TEMPÉRATURE DES FUMÉES

- Le type de chaudière
- L'état de la chaudière
 - Encrassement du côté de l'eau
 - Accumulation de la suie
- La charge de la chaudière
- La quantité de l'excès d'air

SUIVI RÉGULIER D'UNE CHAUDIÈRE

CONDITIONS DE MARCHE OPTIMALES

- Réglage de l'excès d'air optimal pour toutes les allures
- Maintien de l'excès d'air à sa valeur optimale nécessite un suivi régulier

SUIVI DES PERFORMANCES DE LA CHAUDIÈRE

Du point de vue énergétique, l'objectif du suivi consiste à :

- ✓ Faire un contrôle régulier du rendement de la chaudière
- ✓ Déterminer le besoin et l'importance des réglages et de maintenance

DONNÉES NÉCESSAIRES AU SUIVI DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES

➤ Fumées:

- Température
- Oxygène en % (ou gaz carbonique CO₂)
- Teneur en monoxyde de carbone CO en ppm
- Indice de noircissement (combustible liquide uniquement)

➤ Eau alimentaire: TH, TDS

➤ Purges: TDS

➤ Chaudière: Charge en %

➤ Combustible: consommation journalière

➤ Vapeur: production journalière

**si
disponible**

EXEMPLE: Evaluation pertes par fumées

Cette méthode sera illustrée à travers l'exemple suivant.

Données:

- Combustible :fioul lourd n°2
- Température des fumées: 285°C.
- Température ambiante: 30°C
- Composition de O₂ dans les fumées : 4% sur la base du volume des fumées sèches.
- Pertes par rayonnement et purge: 6%

La procédure de calcul est montrée sur la Figure 6:

1. Choisir la figure correspondant au combustible étudié (Figure.3 pour le fioul lourd)
2. Corriger la température relative des fumées T_f pour tenir compte de la température ambiante de 30°C : $T_f \text{ corrigée} = T_f - (T_a - 20) = 275^\circ\text{C}$ (En terme des pertes, une température de fumées de 285°C avec température ambiante de 30°C , est équivalente a une température de 275°C dans un milieu ambiant a 20°C).
3. A partir de la composition volumique de l'oxygène 4% en ordonnée, lire l'excès d'air en abscisse (pour cet exemple 22% d'excès d'air correspondant à 13 % de dioxyde de carbone)

Exemple

3. Choisir la courbe adéquate de la température des fumées (275°C dans ce cas) et lire le pourcentage des pertes par les fumées sur l'axe des - ordonnées a droite (17% pour l'exemple).

4. Estimer le rendement :

	100 %
pertes fumées:	-17 %
rendement de combustion:	83%
autres pertes:	- 6 %
(rayonnement, convection et purge)	
rendement de chaudière:	77 %

Figure 3

EXEMPLE DE CALCUL DES PERTES: FIOUL LOURD

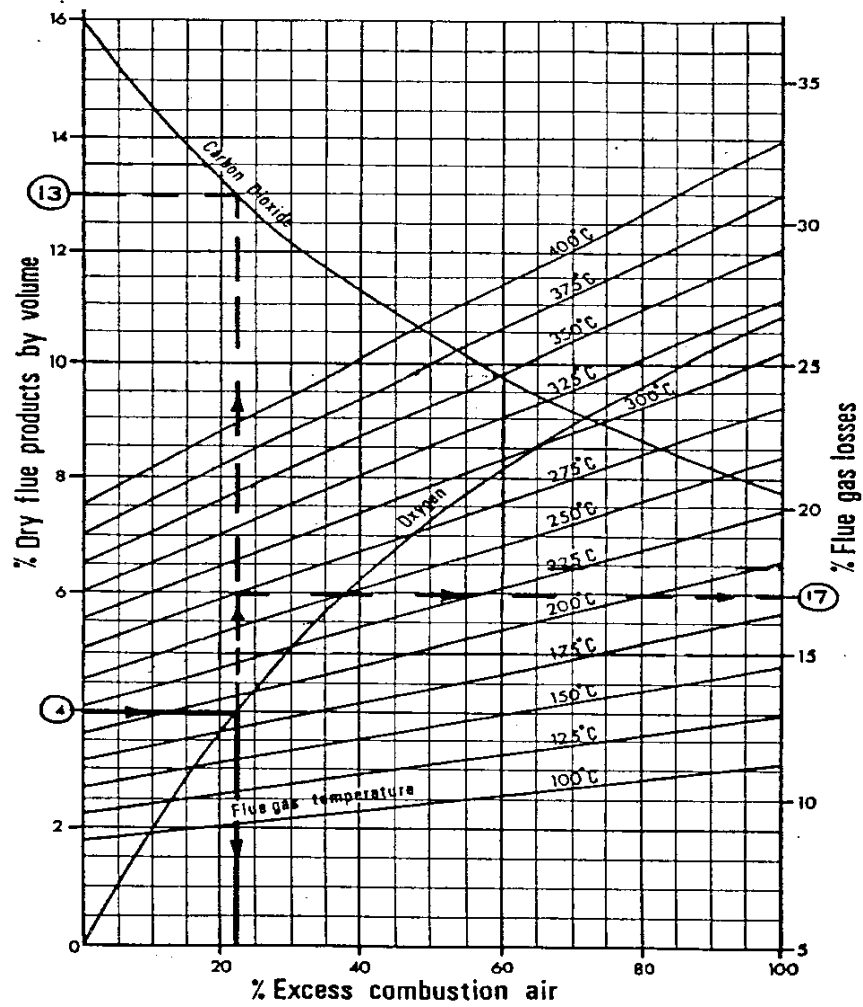


Figure 4

GAZ NATUREL: L'EXCES D'AIR ET LES PERTES PAR LES FUMÉES
(base: PCS du combustible; $T_a = 20^\circ\text{C}$)

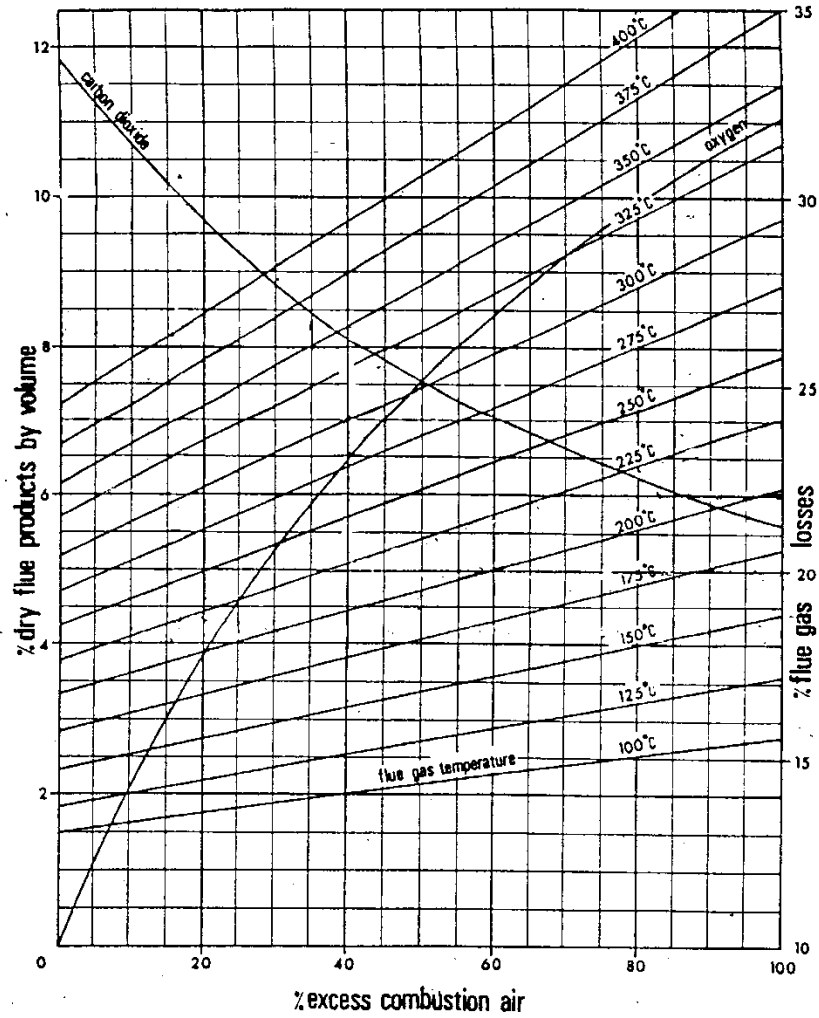


Figure 5

FIOUL LEGER OU MOYEN: L'EXCES D'AIR ET LES PERTES PAR LES FUMÉES
(base: PCS du combustible; $T_a = 20^\circ\text{C}$)

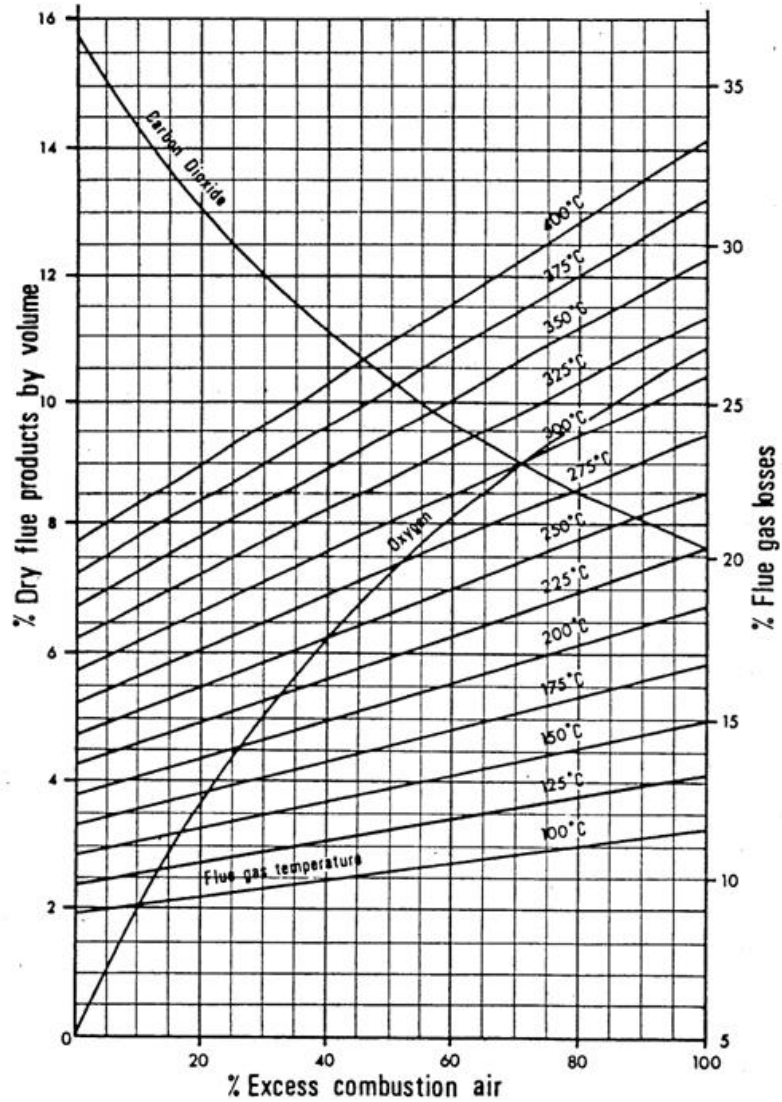
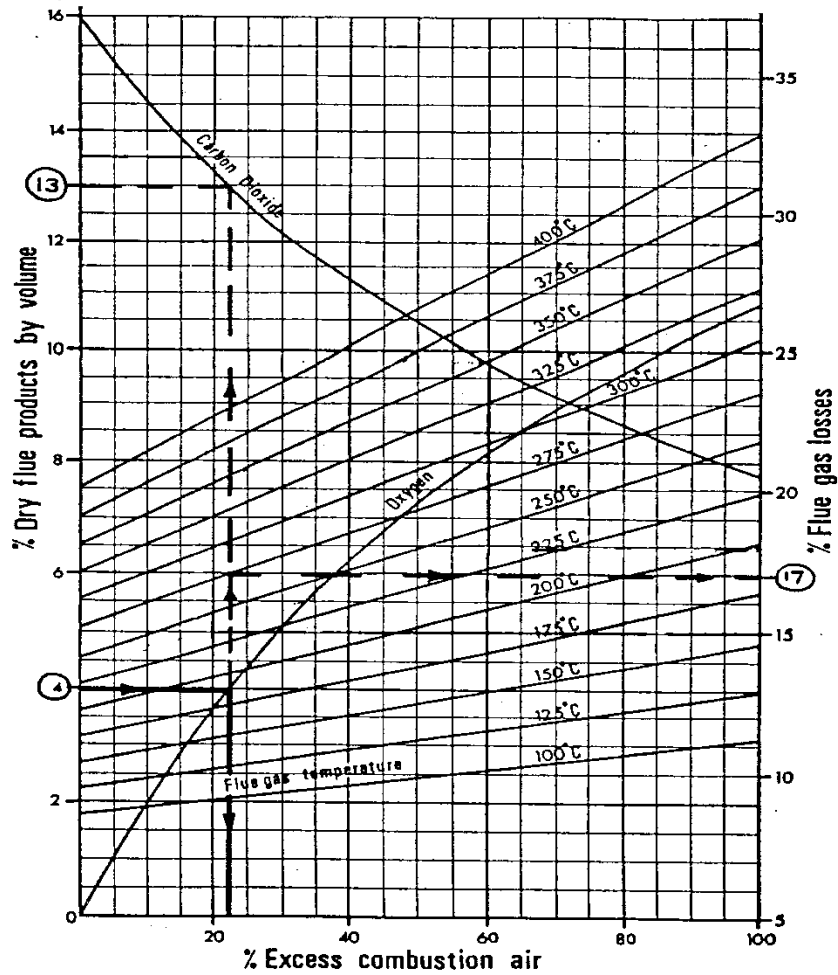


Figure 6

EXEMPLE DE CALCUL DES PERTES: FIOUL LOURD



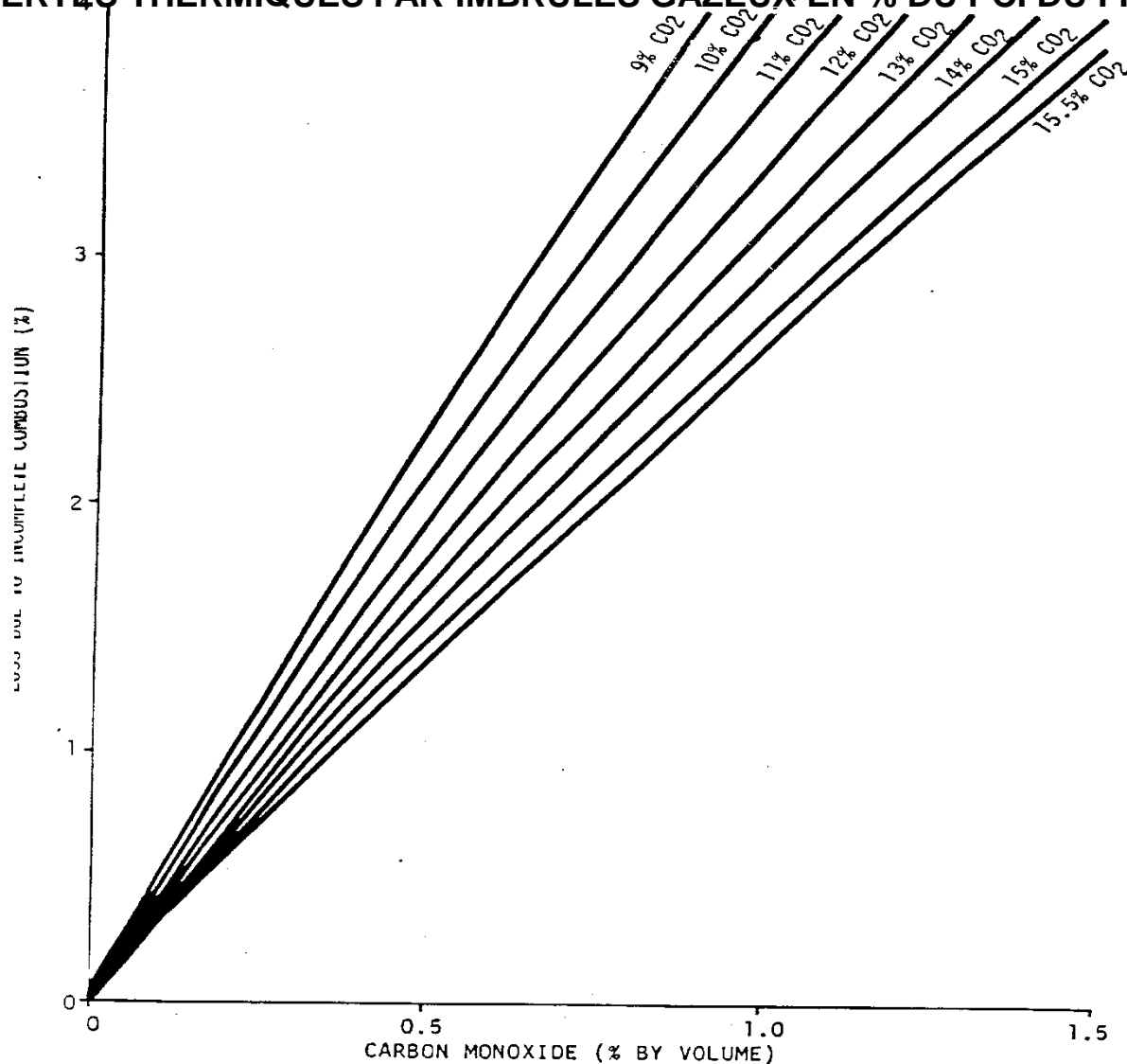
Remarques :

- l'amélioration de l'état de marche d'une chaudière nécessite seulement la connaissance des pertes par fumées et permet:
 1. A l'ingénieur. en charge des utilités d'améliorer la performance et d'approcher les conditions opératoires optimales de la chaudière à condition que les pertes excessives dues à la présence de monoxyde de carbone imbrûlé ne soit pas importantes.
 2. La référence à l'expression: 100 - pertes par fumées, comme "rendement de combustion."

Cette expression:

1. S'obtient à partir des mesures de la température et la composition des fumées,
2. Représente le paramètre caractéristique de la combustion.
3. Il est directement affecté par tout ajustement des paramètres de combustion,
4. Il est souvent utilisé comme valeur approximative du rendement global de la chaudière. Lorsque le CO est mesuré, les pertes dues aux imbrûlés peuvent être déterminées à partir de la Figure 7.

Figure 7
PERTES THERMIQUES PAR IMBRES GAZEUX EN % DU PCI DU FIOUL



Les pertes par rayonnement et convection

1. Peuvent être déterminées en fonction de la charge de la chaudière comme un % fixe de la charge nominale de combustible de la chaudière.
2. Varient à l'inverse de la charge.

Les pertes par rayonnement et convection, correspondantes aux chaudières avec calorifugeage en bon état sont les suivantes:

Capacité de la chaudière (tonne/hr)	Pertes par rayonnement et autres (%)
2	3.0
5	2.0
10	1.5
20	1.1
50	0.8
100	0.6

- Les pertes par rayonnement et convection peuvent être estimées par la formule suivante :

Pertes par rayonnement en W/m^2

$$= 0.548 \times [(T_s / 55.55)^4 - (T_a / 55.55)^4] + 1.957 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{[(196.85 V_m + 68.9) / 68.9]}$$

Avec:

V_m = Vitesse du vent en m/s

T_s = Température de surface ($^{\circ}K$)

T_a = Température ambiante ($^{\circ}K$)

Les pertes par purges

- Estimées à partir des caractéristiques de l'eau en utilisant la formule ci-dessous et la figure 9. La formule suppose qu'on a maintenu un niveau constant la salinité dans l'eau de la chaudière

$$\% \text{ de purge} = 100 \times \frac{B \times M}{A - M \times B} = \dots\dots\% \text{ du vapeur générée}$$

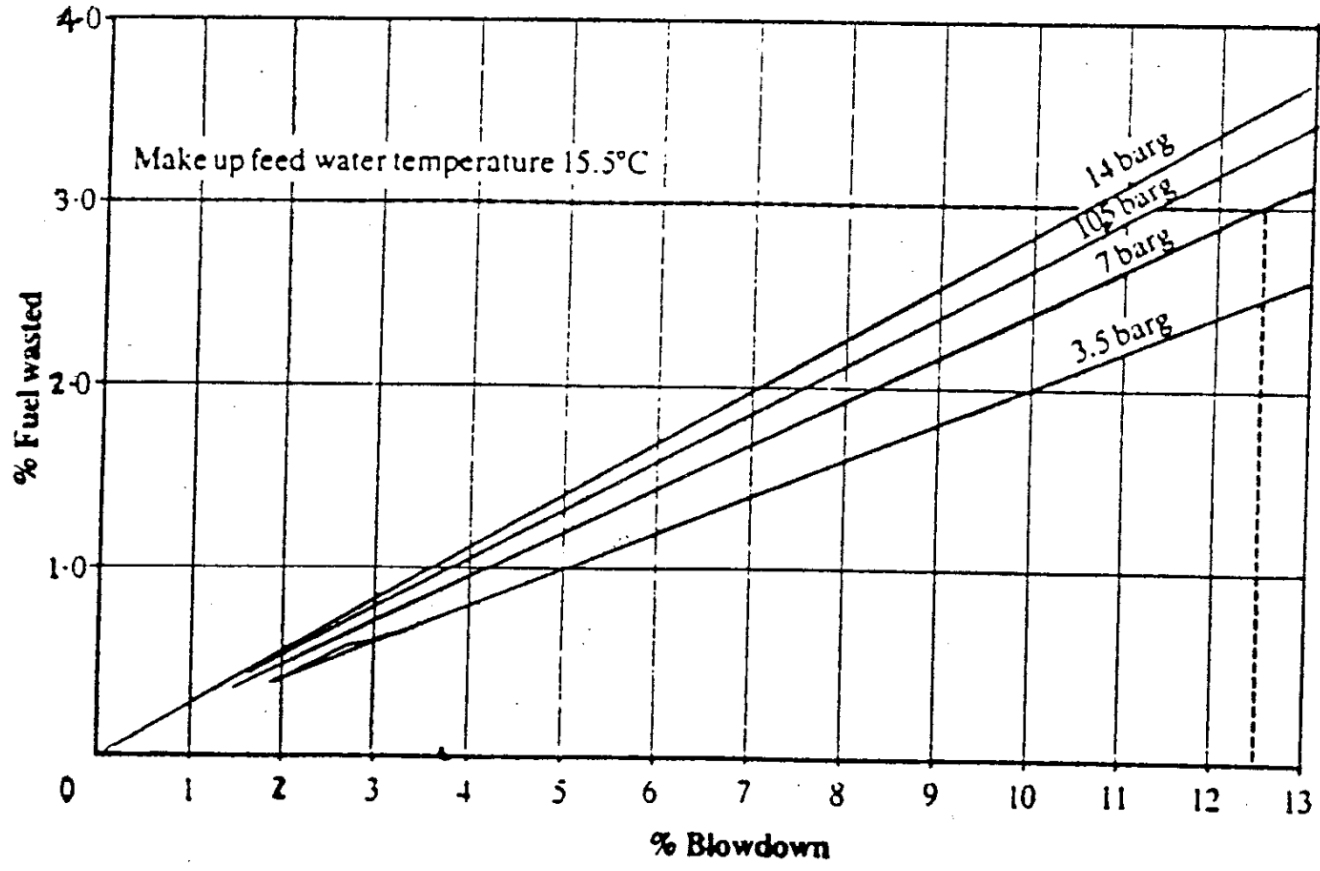
A = maximum de salinité, ppm

B = salinité de l'eau alimentaire, ppm

M = % d'eau d'appoint (c-a-d l'eau d'alimentation total - le retour des condensats) exprimé comme un % de la vapeur générée

Figure 9

PERTE DE RENDEMENT DE LA CHAUDIERE DUE A LA PURGE



Le rendement de la chaudière

Le rendement total:

1. Est égal à 100% - les pertes en %.
2. Peut être utilisé lors d'une estimation des possibilités d'économies.

Exemple: calcul de rendement

A l'essai, une chaudière aquatubulaire transformait 10 000 kg/h d'eau à 1720 kPa (eff) et 105°C en vapeur à 1 500 kPa (abs.) et 240°C. Le débit du fuel n° 2 était de 805 L/h. Selon les essais en laboratoire, on a déterminé un PCI de 38,68 MJ/l. On peut calculer le rendement de la chaudière à partir de ces données.

1 Méthode directe

Selon les tables de vapeur surchauffée:

Enthalpie de la vapeur à 1500 kPa (abs.) et 240°C = 2 899,2 kJ/kg

Enthalpie de l'eau à 105°C = 440,17 kJ/kg

$$\begin{aligned}\text{Rendement} &= \frac{10\,000 \times (2\,899,2 - 440,17)}{805 \times 38,68 \times 1\,000} \times 100 \\ &= 79,0\%\end{aligned}$$

2 Méthode indirecte

Selon cette méthode, on mesure le rendement de la chaudière en soustrayant les pertes de chaleur de la chaudière du débit calorifique du combustible, le tout divisé par le débit calorifique.

- Pression de vapeur à la sortie de la chaudière 1500
kPa(abs)
- Température de la vapeur à la sortie de la chaudière 240°C
- Température de l'eau à l'entrée de la chaudière 105°C
- Température de l'air autour de la chaudière 20°C
- Température des gaz de combustion qui s'échappent 260°C
de la chaudière
- Température du combustible 20°C
- Taux d'évaporation de l'eau 10000
kg/h
- Débit de combustible 805
l/h
- PCS du Fuel
38,68 MJ/l

Vérification de rendement d'une chaudière

Feuille de travail 6-1

Installation: EXEMPLE CONCRET

Date: _____

Endroit: _____

Far: MBE

N° de chaudière: 2

Combustible: MAZOUT No 2

Puissance nominale: 12 000 Kg/h

Essai n° 3 - PLEINE CHARGE

Pressions et températures

Pression de la vapeur à la sortie de la chaudière

... 1.500... kPa (1)

Température de la vapeur à la sortie de la chaudière

... 240... °C (2)

Température de l'eau à l'entrée de la chaudière

... 105... °C (3)

Température de l'air de combustion

... 20... °C (4)

Température du combustible

... 20... °C (5)

Température du gaz d'évacuation de la chaudière

... 260... °C (6)

Quantités unitaires

Enthalpie de la vapeur à la sortie de la chaudière

... 2.822,2... kJ/kg (7)

Enthalpie de l'eau d'alimentation à la chaudière

... 4.40,17... kJ/kg (8)

Chaleur absorbée par kg de vapeur [(7) - (8)]

... 2.459... kJ/kg (9)

Pouvoir calorifique supérieur du combustible (citer les unités)

... 38,68 MJ/L (10)

Quantités horaires

Eau évaporée	...10.000... kg/h	(11)
Débit de combustible (citer les unités)	.....805... L/h	(12)
Débit calorifique total à l'entrée	$[(12) \times (10)]^* = \frac{805 \times 38,68}{1000}$	...31.137... MJ/h (13)
Puissance calorifique totale à la sortie	$[(11) \times (9)] = \frac{10000 \times 2459}{1000}$	...24.590 MJ/h (14)
Rendement direct	$\frac{(14)}{(13)} \times 100 = \frac{24590}{31137} \times 100$	....79,0... % (15)

*Les unités de mesure de [(12) x (10)] doivent être converties en MJ/h

Analyse des gaz de combustion	% Volume	
CO ₂	...12,8...	(16)
O ₂	.....3,8...	(17)
CO	.....0...	(18)
N ₂ (par différence)	...83,4...	(19)
Excès d'air	.....20.....	(20)

Pertes de chaleur

Perte de chaleur par le gaz sec et l'H ₂ O (Figure 3	...17,2... (21)
Perte de chaleur par rayonnement (Figure 8	...1,2... (22)
Pertes non mesurées	.....0,8... (23)
Pertes totales [(21) + (22) + (23)]	...18,9... (24)
Rendement indirect [100 - (24)]	...81,1... (25)

Facteurs affectant le rendement

1. **La température des gaz de combustion**
2. **Excès d'air**
3. **Surfaces d'échange encrassés (50% pertes par gaz combustion et 2% en perte combustible)**
4. **Traitement inapproprié de l'eau**
5. **Température de l'eau d'alimentation**
6. **Pertes par rayonnement**
7. **Température de l'air de combustion**
8. **Nature du combustible**

La température des gaz de combustion

1. une mesure-clé (la plus importante source de perte énergétique).
2. Il importe de surveiller régulièrement cette température à différentes allures de chauffe pour que toute variation anormale soit décelée rapidement.

Ce paramètre est influencé par:

- Une augmentation de l'excès d'air entraîne une hausse de température des gaz de combustion.
- Lorsque des gaz passent directement du foyer à la sortie de la chaudière, il y a diminution de la surface de chauffe et augmentation de la température des gaz de combustion
- Les infiltrations d'air dans le foyer
 - ✓ abaissent T,
 - ✓ Augmentent le volume et la vitesse du gaz, ce qui diminue la transmission thermique.

- Les surfaces de chauffe ayant accumulé de la suie à l'extérieur ou du tartre à l'intérieur diminuent la transmission thermique et augmentent la température des gaz de combustion.
- Lorsqu'on augmente la pression de service de la chaudière, la température augmente sur la paroi intérieure des tubes. Lorsqu'on augmente la température de l'eau de la chaudière, le taux de transmission thermique diminue, ce qui augmente la température des gaz de combustion et les pertes

L'excès d'air

Le taux d'excès d'air minimal possible est fonction directe des caractéristiques de la chaudière et du brûleur à différentes allures de chauffe, ainsi que du système de régulation de la combustion.

L'excès d'air agit sur le rendement de la chaudière.

1. Une insuffisance d'excès d'air entraîne la présence de imbrûlés dans les gaz de combustion, ce qui augmente rapidement les pertes énergétiques du combustible.
2. Un trop grand volume d'excès d'air augmente l'écoulement massique des gaz de combustion, ce qui augmente les pertes par ceux-ci. La température des gaz de combustion augmente d' 1% pour chaque 4% d'excès d'air additionnel.

Surfaces de chauffe encrassées

L'encrassement par l'accumulation de suie à l'extérieur, ou de tartre à l'intérieur des tubes.

- Lorsqu'il y a combustion de fuel ou de combustible solide, les tubes doivent être nettoyés régulièrement à l'aide de souffleurs de suie. Une accumulation de suie peut augmenter de 50% les pertes par les gaz de combustion
- L'accumulation de tartre à l'intérieur des tubes d'eau retarde la transmission thermique et peut entraîner le surchauffe du métal et le rompre. Une accumulation de 1 mm de tartre peut augmenter la consommation de combustible de 2%.

Traitement inapproprié de l'eau d'alimentation

Le traitement inapproprié de l'eau alimentaire peut entraîner une accumulation de tartre ce qui pourra :

- Endommager les tubes.
- Empêcher le transfert thermique. ce qui augmente la température des gaz de sortie de la chaudière ainsi que les pertes de chaleur par les gaz de combustion. Une hausse modérée de 20°C dans les gaz de combustion entraîne un gaspillage additionnel de **1%** de la chaleur contenue dans le combustible.
- exiger des purges additionnelles pour empêcher cette accumulation. Si, pour une chaudière de 1 600 kpa (abs.) dont l'eau d'alimentation est à 105°C, on augmente la fréquence de purge de 4 à 8%. il y a perte de chaleur additionnelle de 0,5%.

Température de l'eau d'alimentation

- La chaudière n'est habituellement pas alimentée à l'eau froide.
- Pour maintenir la dimension des surfaces de chauffe de la chaudière dans des limites pratiques, le concepteur de chaudières choisit une température de sortie des gaz de combustion d'environ 60 à 90°C au-dessus de la température de la surface de chauffe la plus froide.
- Si l'eau d'alimentation est admise directement dans le ballon de la chaudière, elle se mélange immédiatement avec l'eau déjà chauffée. Par conséquent, les surfaces de chauffe les plus froides ne sont que quelques degrés inférieurs à la température de saturation correspondant à la pression de la chaudière.

Par exemple, la température de sortie des gaz de combustion d'une chaudière qui fonctionne à 1 500kPa(abs.) dont la température de saturation est de 198,29°C sera d'environ 260°C.

On peut augmenter le rendement de la chaudière :

- En utilisant les gaz de combustion pour chauffer l'eau d'alimentation. La transmission de la chaleur des gaz de combustion à l'eau d'alimentations s'effectue dans un échangeur de chaleur appelé économiseur. La température du métal de la section la plus froide de l'économiseur ne sera que de quelques degrés supérieurs à celle de l'eau d'alimentation admise dans celle-ci.
- Un abaissement de la température des gaz de sortie à environ 170°C, fait augmenter le rendement de la chaudière de 3 à 4%.
- L'intégration d'un économiseur dans une nouvelle chaudière ou l'ajout d'un économiseur à une chaudière déjà existante est un moyen efficace d'économiser de l'énergie.

Les pertes par rayonnement

- Ces pertes sont à peu près constante pour toutes les allures de chauffe. Par conséquent, le pourcentage de pertes par rayonnement augmente à mesure que diminue la charge de la chaudière. Quoique d'autres facteurs interagissent,
- l'efficacité d'une chaudière est fonction directe de la charge. Chaque chaudière devrait faire l'objet d'essais pour déterminer son niveau d'efficacité selon une charge donnée

La température de l'air de combustion

- Cette température agit sur le débit calorifique à l'entrée de la chaudière.
- Lorsqu'on installe un préchauffeur d'air qui utilise les gaz de combustion pour chauffer l'air de combustion, le débit calorifique à l'entrée en est augmenté
- alors qu'en même temps, la température des gaz de combustion ainsi que les pertes de chaleur diminuent

La nature du combustible

Le rendement de la chaudière est fonction du combustible surtout en raison de la perte de chaleur latente causée par l'eau contenue dans le combustible. En prenant le gaz naturel comme base, voici le pourcentage d'efficacité des combustibles courants:

- Le charbon est environ 6% plus efficace que le gaz naturel.
- Le mazout est environ 4% plus efficace que le gaz naturel.
- Le bois à 50% d'humidité est 12% moins efficace que le gaz naturel