

# Economie d'énergie sur la Production de la Vapeur

## Plan de la formation

---

- INTRODUCTION
- NOTIONS DE BASE
- OPTIMISATION DES INSTALLATIONS
  1. Optimisation de la production
  2. Optimisation de la distribution
  3. Optimisation de la consommation
  4. Optimisation du retour des condensats

## INTRODUCTION

*Production de la Vapeur*

## La vapeur, un fluide cher !

- Coût des installations (investissements de base)
  - Chaudière
  - Réseau de distribution
  - Vanne, armatures, purgeurs, etc.
- Coûts de fonctionnement
  - Maintenance
  - Traitement et coût de l'eau
  - Énergie pour produire la vapeur
- Exemple, pour une tonne de vapeur à 10 bars
  - Coût du gaz (combustible)
    - Env. 900 kWh / Tonne de vapeur
    - Env. 774 Th / Tonne de vapeur
    - Coût moyen du Gaz : 0,037 DT/Th
    - Soit de l'ordre de 29 DT/Tonne
  - Coût de l'eau
    - Env. 1 DT/m<sup>3</sup>
  - Autres:
    - Électricité
    - Amortissements
    - Etc.
- Coût moyen **30 à 35 DT/Tonne de vapeur**

## Production de vapeur = émissions de CO<sub>2</sub>

- Selon la nature du combustible
  - Gaz naturel : 55,8 kg CO<sub>2</sub>/GJ primaire (env. 200 g CO<sub>2</sub>/kWh)
  - Gasoil : 73,3 kg CO<sub>2</sub>/GJ primaire (env. 265 g CO<sub>2</sub>/kWh)
  - Fuel extra-lourd : 76,6 kg CO<sub>2</sub>/GJ primaire (env. 275 g CO<sub>2</sub>/kWh)
  - Charbon : 92,7 kg CO<sub>2</sub>/GJ primaire (env. 335 g CO<sub>2</sub>/kWh)
- Exemple pour une **Tonne de vapeur** à 10 bars, produite avec du gaz naturel
  - Énergie : 2,852 GJ
  - Émissions : 160 kg de CO<sub>2</sub>



## Le bilan de la vapeur pour une usine...

- Exemple :
  - Débit de vapeur : 25 Tonne/h
  - Durée de fonctionnement : 8 000 h/an
  - Soit une production de vapeur de : 200 000 Tonne/an
- Coût annuel environ : 6 000 000 DT
- Émissions de CO<sub>2</sub> environ : 32 000 Tonnes
- **Important d'optimiser sa production ET son utilisation**
- Économies réalisables entre **10 et 15%**, soit près de **600 000 DT/an !**

## Utilisation de la vapeur

---

### La vapeur est très utilisée

- Caloporteur
- Élément du procédé
- Caloporteur & élément du procédé

### Usages

Humidification  
Processus  
Stérilisation  
Cuisson  
Pasteurisation  
Séchage

....

## Pourquoi on utilise de la vapeur d'eau

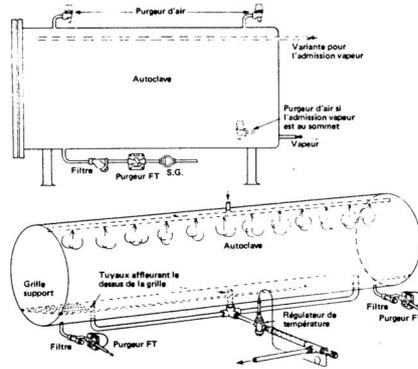
---

### Vapeurs d'eau : Avantages

- Contenu élevé d'énergie calorifique.
- A puissance égale les tuyauteries de vapeur sont de diamètres inférieures.
- La vapeur d'eau s'écoule en réponse à la perte de charge le long de la tuyauterie et ne nécessite pas de pompe de circulation.
- Les débits de vapeur d'eau peuvent varier à volonté, dans les limites de la production.
- Les coefficients de transfert de chaleur de la vapeur d'eau sont bien plus importants que ceux des autres fluides caloporteurs industriels existants.
- Le gradient de température est le même tout au long des surfaces d'échanges.
- Entretien de l'installation facile si elle est bien conçue.

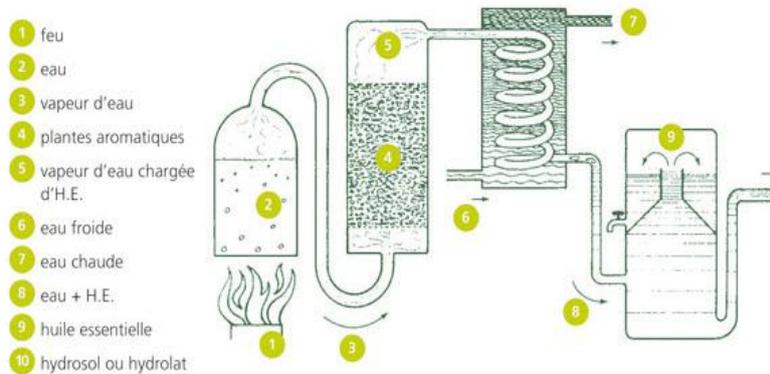
## Différents utilisateurs de chaleur (vapeur saturée)

- A) Chauffage direct
  - La vapeur est en contact direct avec la matière à chauffer
  - Pas de récupération de condensat
  - Exemple : autoclaves dans les salles d'opérations



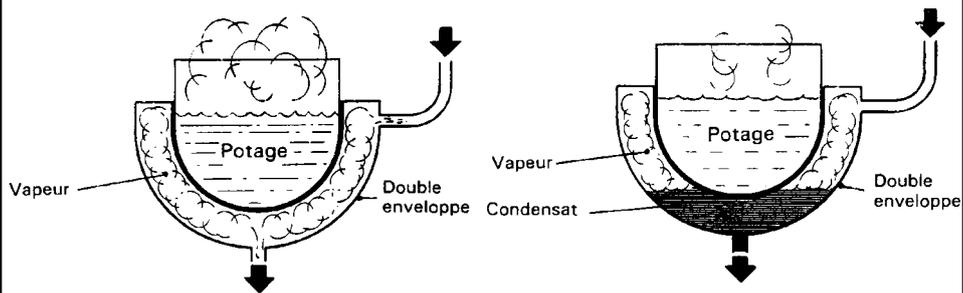
## Utilisation de la vapeur : Exemple

### Extraction des huiles essentielles



## Chauffage indirect

- B) Chauffage indirect
  - La vapeur n'est pas en contact avec le produit
  - La vapeur est dans un serpentin ou une double enveloppe
  - Le condensat de la vapeur est récupéré et retourne à la chaudière



## Utilisation de la vapeur : Exemple

### Pasteurisation du lait

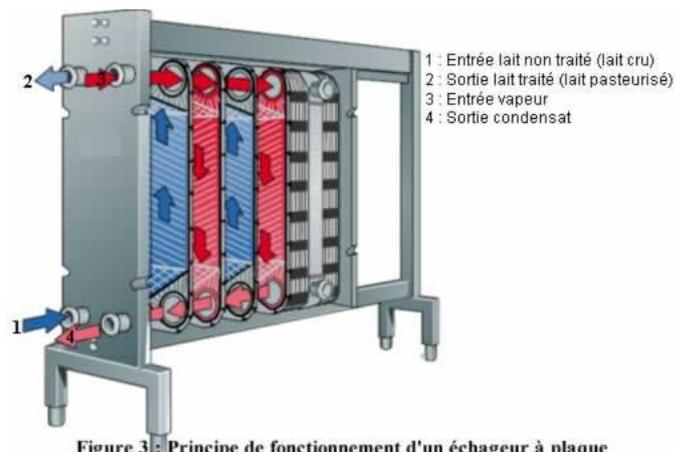


Figure 3: Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaque

## INTRODUCTION

### Tarification STEG du Gaz

## Tarification STEG du Gaz

### TARIFS DU GAZ NATUREL EN MOYENNE PRESSION à compter du 1<sup>er</sup> Mai 2014 (HORS TAXES)

| TARIF MOYENNE PRESSION     | DEBIT SOUSCRIT<br>(th/h) | REDEVANCE <sup>(*)</sup>     |                              | PRIX D'ENERGIE <sup>(*)</sup><br>(mill/th) |
|----------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|--|
|                            |                          | D'ABONNEMENT<br>(DT/ab-mois) | DE DEBIT<br>(mill/th-h-mois) |  |
| MP1                        | 1 000 à 4 000            | 20                           | 200                          | 37,6                                       |
| MP2                        | 6 000 à 30 000           | 20                           | 325                          | 37,1                                       |
| MP Cimentier (Ciment gris) | 1 000 à 30 000           | 20                           | 325                          | 58,0                                       |

(\*) La TVA est à appliquer au taux de 18% sur les redevances et les prix d'énergie hors taxes.

#### AUGMENTATION DU DEBIT SOUSCRIT :

En cas d'augmentation du débit souscrit (avec ou sans changement de tarif), le coût de renforcement est calculé sur le débit supplémentaire

#### ABREVIATIONS :

mill = millime tunisien , DT = Dinar tunisien , ab = abonnement , th = thermie , h = heure

TVA = taxe sur la valeur ajoutée

# NOTIONS DE BASE

## Production de la Vapeur

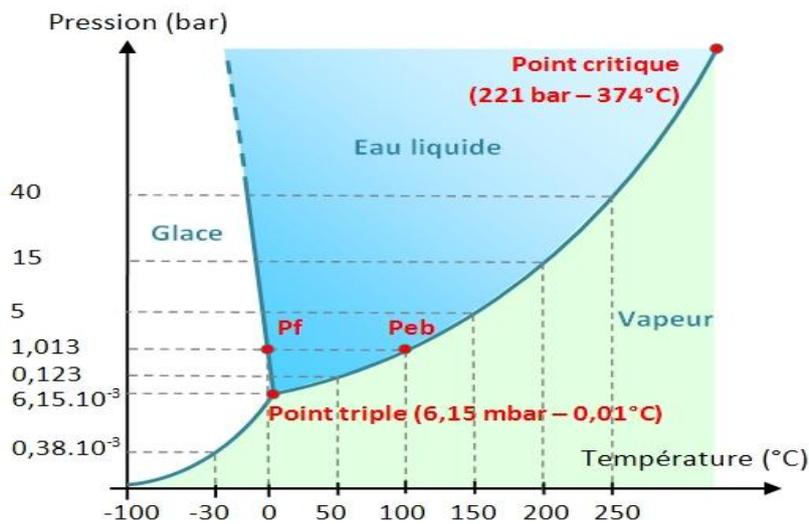
# NOTIONS DE BASE

## Les propriétés de la vapeur

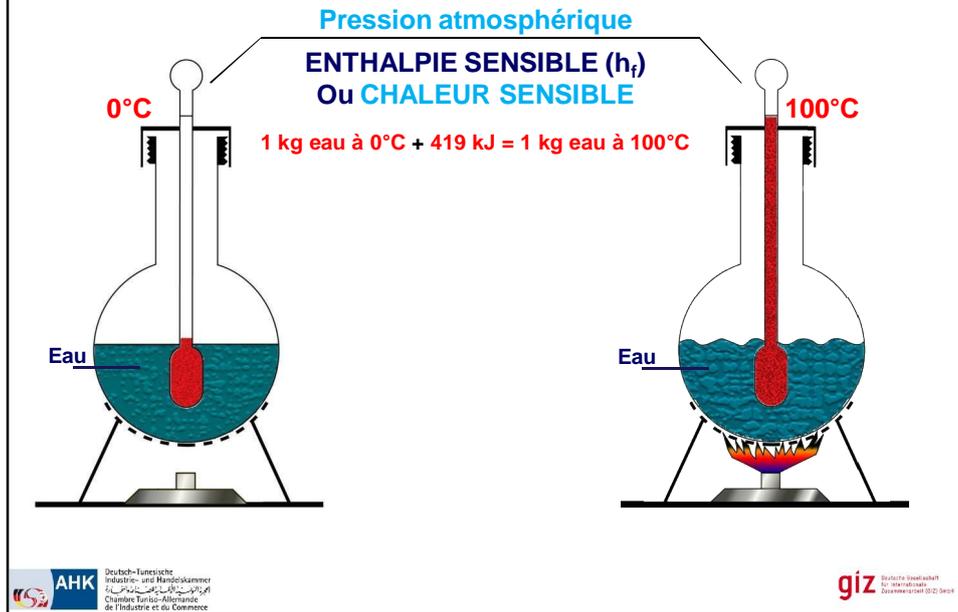
## Les propriétés de la vapeur

- La pression  $P$  (en bar ou en Pa).
- La température  $T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ).
- L'enthalpie  $h$  (en  $\text{kJ/kg}$ ).
- Le volume spécifique  $v$  (en  $\text{m}^3/\text{kg}$ ).
- Toutes ces propriétés dépendent les unes des autres et peuvent se trouver dans les «tables de la vapeur».

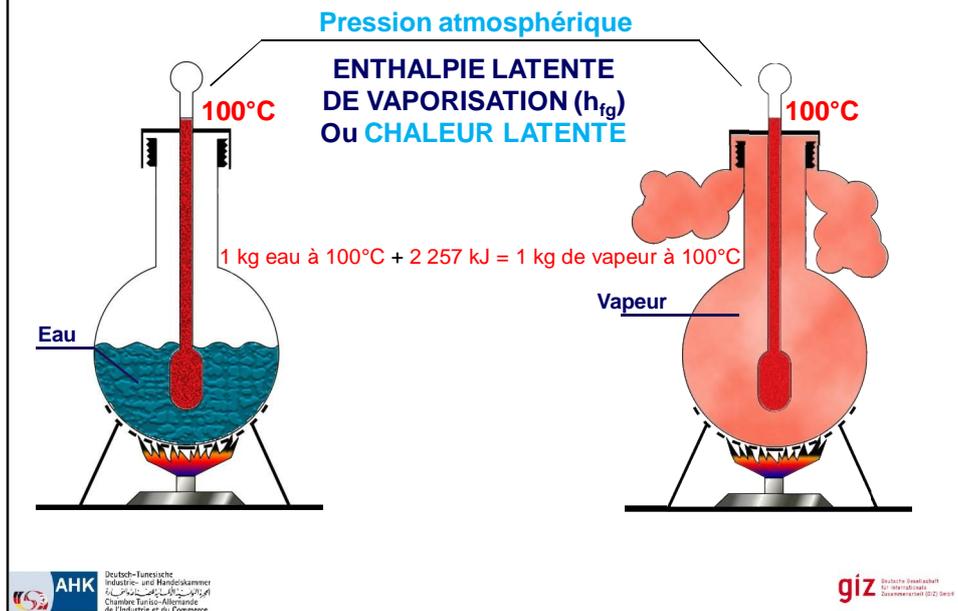
## Diagramme des phases



## Formation de la vapeur



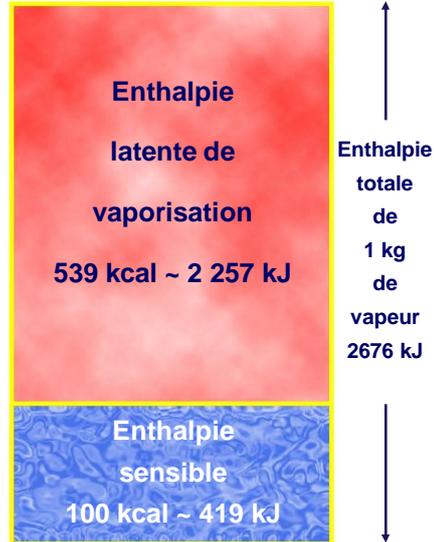
## Formation de la vapeur



## Formation de la vapeur

Pression atmosphérique

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

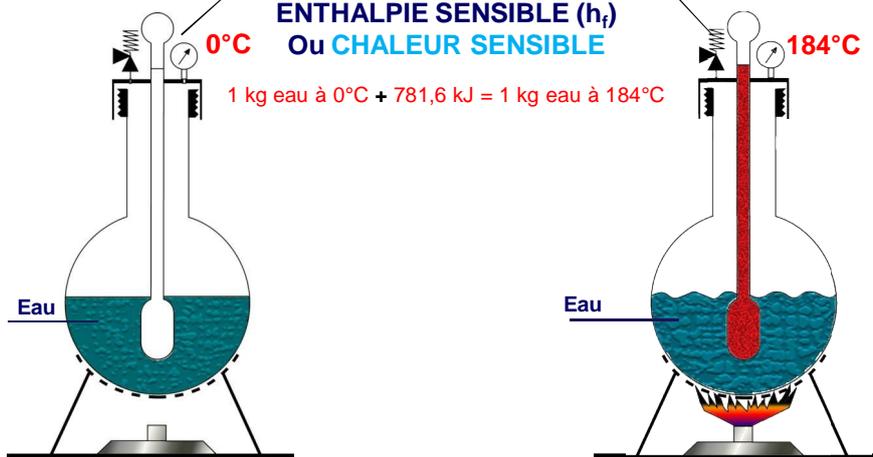


## Formation de la vapeur

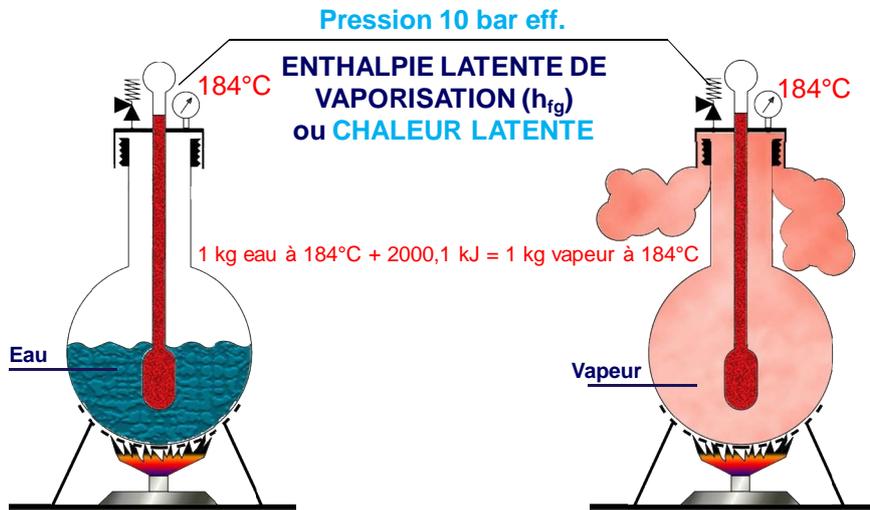
Pression 10 bar eff.

ENTHALPIE SENSIBLE ( $h_f$ )  
Ou CHALEUR SENSIBLE

$$1 \text{ kg eau à } 0^\circ\text{C} + 781,6 \text{ kJ} = 1 \text{ kg eau à } 184^\circ\text{C}$$



## Formation de la vapeur



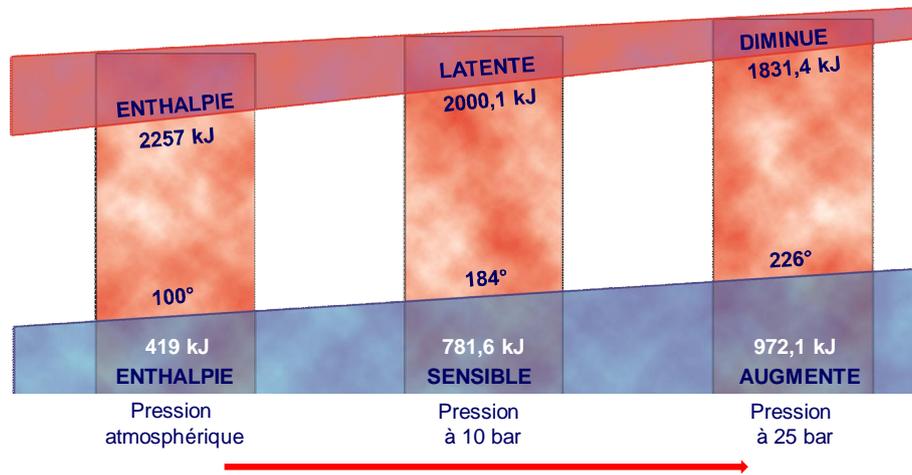
## Formation de la vapeur

**Pression 10 bar eff.**

$$h_g = h_f + h_{fg}$$



## Effet de l'augmentation de la pression



## Formation de la vapeur : **Intérêt industriel N°1**

### Intérêt industriel :

Vapeur d'eau = fluide caloporteur

**Utilisation de la vapeur à la plus basse pression possible**

*Paramètre limitant (exigence de production) :*

**La température à atteindre sur le fluide secondaire**

Température souhaitée : 160°C



Utilisation de la vapeur à 184°C



Pression nécessaire 10 bar eff

## Formation de la vapeur : **Intérêt industriel N°2**

### Intérêt industriel :

Diamètre de tuyauterie le plus faible possible



**Utilisation de la vapeur à la plus haute pression possible**

#### Antagonisme :

Utilisation      Distribution

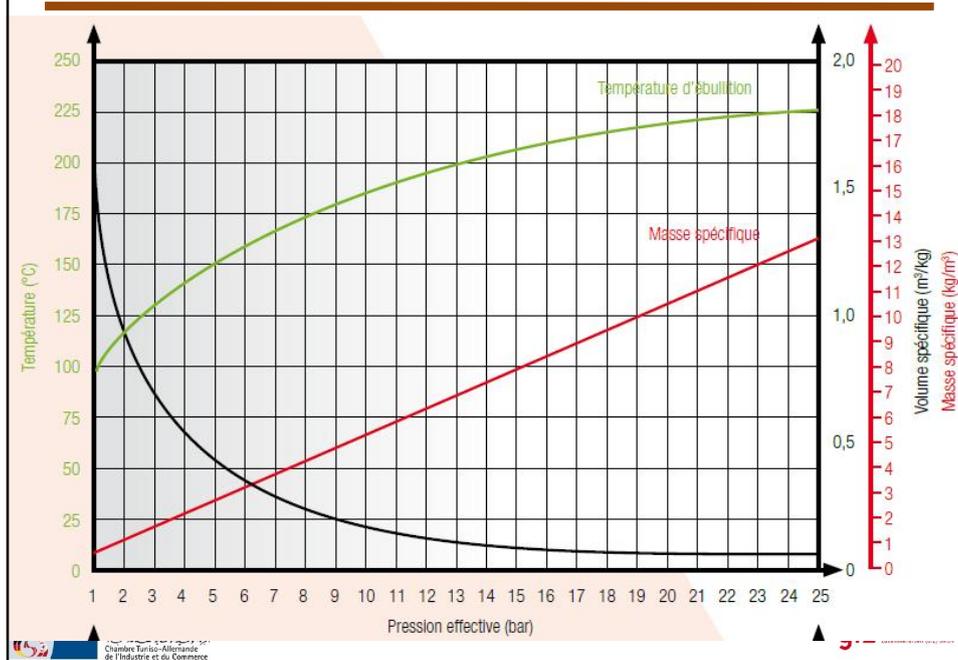
## Formation de la vapeur : **Tables de la vapeur**

| Pression effective | Température d'ébullition | Enthalpie sensible |        | Enthalpie latente |        | Enthalpie totale |        | Volume spécifique | Poids spécifique |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------|-------------------|--------|------------------|--------|-------------------|------------------|
|                    |                          | kcal/kg            | kJ/kg  | kcal/kg           | kJ/kg  | kcal/kg          | kJ/kg  |                   |                  |
| 0,0                | 100,00                   | 100,10             | 419,04 | 539,17            | 2257,0 | 639,27           | 2676,0 | 1,673             | 0,5977           |
| 0,2                | 105,10                   | 105,30             | 440,8  | 535,92            | 2243,4 | 641,23           | 2684,2 | 1,414             | 0,7072           |
| 0,4                | 109,55                   | 109,81             | 459,7  | 533,03            | 2231,3 | 642,85           | 2691,0 | 1,225             | 0,8163           |
| 0,6                | 113,56                   | 113,80             | 476,4  | 530,03            | 2220,4 | 644,24           | 2696,8 | 1,083             | 0,9233           |
| 0,8                | 117,14                   | 117,43             | 491,6  | 528,06            | 2210,5 | 645,50           | 2702,1 | 0,971             | 1,0298           |
| 1,0                | 120,42                   | 120,78             | 505,6  | 525,82            | 2201,1 | 646,60           | 2706,7 | 0,881             | 1,1350           |
| 1,5                | 127,62                   | 128,06             | 536,1  | 521,02            | 2181,0 | 649,09           | 2717,1 | 0,714             | 1,4005           |
| 2,0                | 133,69                   | 134,30             | 562,2  | 516,79            | 2163,3 | 651,09           | 2725,5 | 0,603             | 1,6583           |
| 2,5                | 139,02                   | 139,75             | 585,0  | 513,04            | 2147,6 | 652,79           | 2732,6 | 0,522             | 1,9157           |
| 3,0                | 143,75                   | 144,60             | 605,3  | 509,65            | 2133,4 | 654,25           | 2738,7 | 0,461             | 2,1691           |
| 3,5                | 148,02                   | 148,97             | 623,6  | 506,52            | 2120,3 | 655,49           | 2743,9 | 0,413             | 2,4213           |
| 4,0                | 151,96                   | 153,05             | 640,7  | 503,60            | 2108,1 | 656,66           | 2748,8 | 0,374             | 2,6737           |
| 4,5                | 155,55                   | 156,78             | 656,3  | 500,88            | 2096,7 | 657,66           | 2753,0 | 0,342             | 2,9239           |
| 5,0                | 158,92                   | 160,27             | 670,9  | 498,32            | 2086,0 | 658,60           | 2756,9 | 0,315             | 3,1746           |
| 5,5                | 162,08                   | 163,54             | 684,6  | 495,86            | 2075,7 | 659,41           | 2760,3 | 0,292             | 3,4246           |
| 6,0                | 165,04                   | 166,62             | 697,5  | 493,54            | 2066,0 | 660,17           | 2763,5 | 0,272             | 3,6764           |
| 6,5                | 167,83                   | 169,54             | 709,7  | 491,35            | 2056,8 | 660,89           | 2766,5 | 0,255             | 3,9215           |
| 7,0                | 170,50                   | 172,33             | 721,4  | 489,17            | 2047,7 | 661,51           | 2769,1 | 0,240             | 4,1666           |
| 7,5                | 173,02                   | 174,98             | 732,5  | 487,14            | 2039,2 | 662,13           | 2771,7 | 0,227             | 4,4052           |
| 8,0                | 175,43                   | 177,52             | 743,1  | 485,16            | 2030,9 | 662,68           | 2774,0 | 0,215             | 4,6511           |
| 8,5                | 177,75                   | 179,95             | 753,3  | 483,25            | 2022,9 | 663,21           | 2776,2 | 0,204             | 4,9019           |
| 9,0                | 179,97                   | 182,27             | 763,0  | 481,39            | 2015,1 | 663,66           | 2778,1 | 0,194             | 5,1546           |
| 9,5                | 182,10                   | 184,56             | 772,5  | 479,57            | 2007,5 | 664,11           | 2780,0 | 0,185             | 5,4054           |
| 10,0               | 184,13                   | 186,71             | 781,6  | 477,80            | 2000,1 | 664,52           | 2781,7 | 0,177             | 5,6497           |

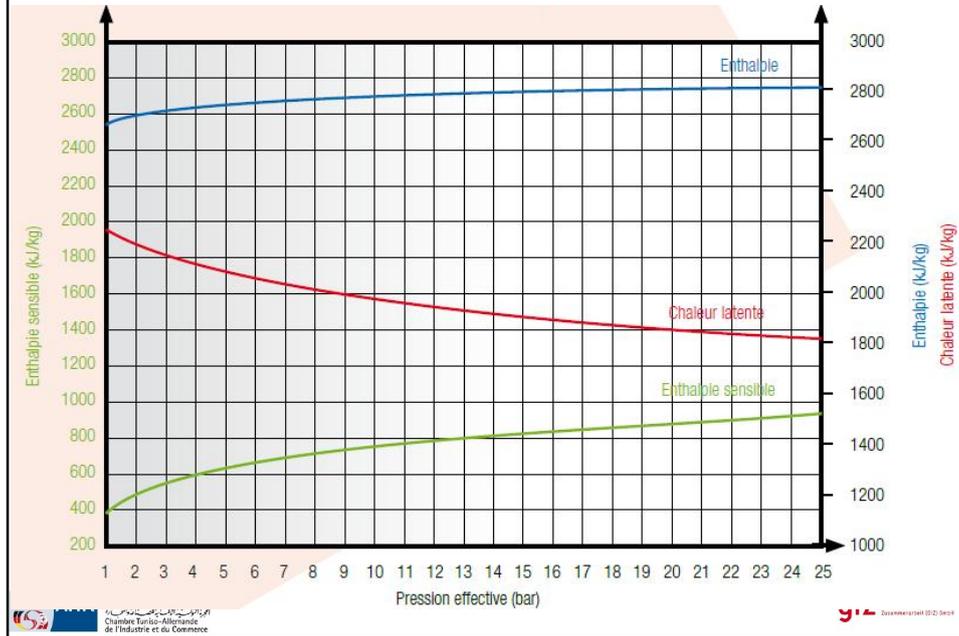
## Formation de la vapeur : Tables de la vapeur

| T     | Pression de vapeur saturante | Enthalpie spécifique ou Chaleur sensible | Chaleur massique (ou spécifique) |
|-------|------------------------------|--|----------------------------------|
| °C    | Pascal (Pa)                  | kJ/kg                                    | kJ/kg                            |
| 0.0   | 611                          | 0.06                                     | 4.217                            |
| 5.0   | 872                          | 21.11                                    | 4.202                            |
| 10.0  | 1227                         | 42.09                                    | 4.192                            |
| 15.0  | 1704                         | 63.04                                    | 4.186                            |
| 20.0  | 2337                         | 83.95                                    | 4.182                            |
| 25.0  | 3166                         | 104.86                                   | 4.180                            |
| 30.0  | 4242                         | 125.75                                   | 4.178                            |
| 35.0  | 5622                         | 146.64                                   | 4.178                            |
| 40.0  | 7375                         | 167.54                                   | 4.179                            |
| 45.0  | 9582                         | 188.43                                   | 4.180                            |
| 50.0  | 12335                        | 209.33                                   | 4.181                            |
| 55.0  | 15740                        | 230.24                                   | 4.183                            |
| 60.0  | 19919                        | 251.16                                   | 4.185                            |
| 65.0  | 25008                        | 272.09                                   | 4.187                            |
| 70.0  | 31161                        | 293.03                                   | 4.190                            |
| 75.0  | 38548                        | 313.99                                   | 4.193                            |
| 80.0  | 47359                        | 334.96                                   | 4.196                            |
| 85.0  | 57803                        | 355.95                                   | 4.200                            |
| 90.0  | 70108                        | 376.96                                   | 4.205                            |
| 95.0  | 84525                        | 398.00                                   | 4.210                            |
| 100.0 | 101325                       | 419.06                                   | 4.216                            |

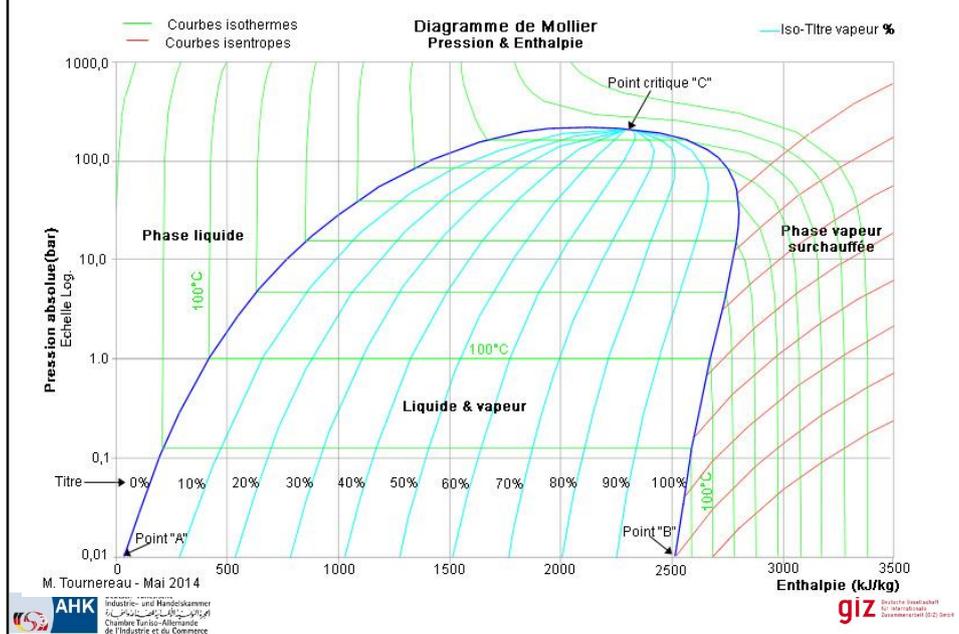
## Relations et courbes caractéristiques



## Relations et courbes caractéristiques



## Relations et courbes caractéristiques



## Relations et courbes caractéristiques

### Qualité de la vapeur

Les tables de vapeur pour la vapeur saturée montrent des propriétés de la vapeur saturée sèche. En pratique la vapeur provenant d'une chaudière contiendra une certaine proportion d'eau



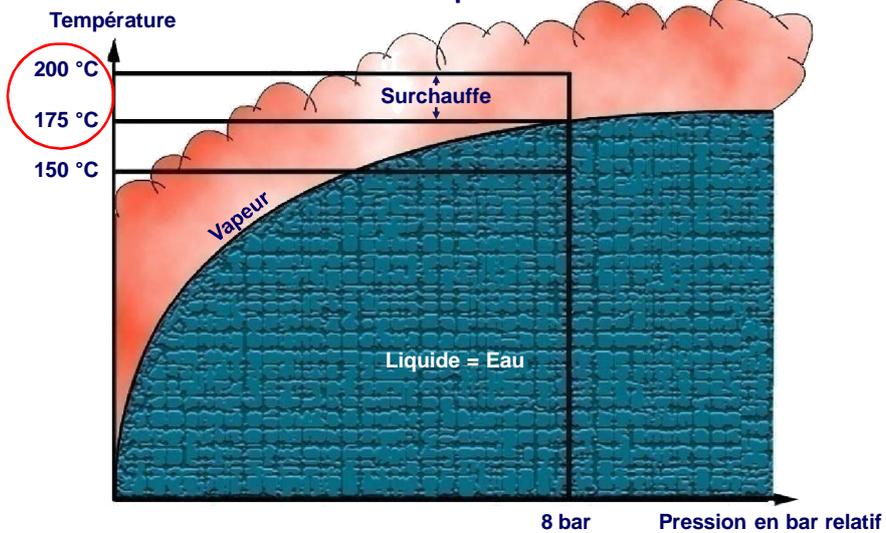
### Vapeur saturée humide

L'enthalpie "réelle" d'évaporation de la vapeur humide est le produit du titre (x) et de l'enthalpie de vaporisation ( $h_{fg}$ ) à partir des tables de la vapeur

$$\text{Enthalpie REELLE} = \text{Enthalpie d'évaporation } (h_{fg}) \times \text{titre } (x)$$

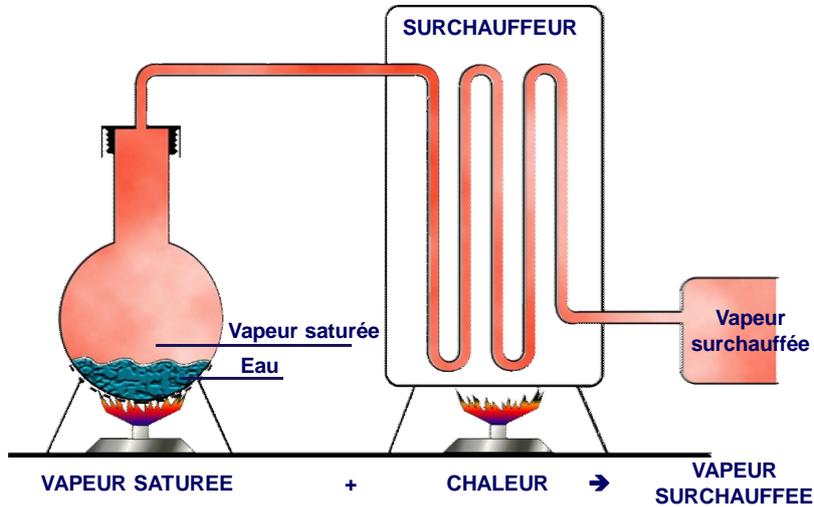
## Relations et courbes caractéristiques

### Courbe de la vapeur saturée



## Vapeur surchauffée

### Définition



## Vapeur surchauffée

### Transfert de chaleur

Vapeur surchauffée : 6 bar eff. à  $T = 175^{\circ}\text{C}$

Cette vapeur devra se refroidir à la température de saturation avant de se condenser :  $175^{\circ}\text{C} \rightarrow 165^{\circ}\text{C}$  (6 bar eff.)

La chaleur cédée par 1 kg de vapeur surchauffée est de :

$$1 \text{ kg} \times 1,7 \text{ kJ/kg } ^{\circ}\text{C} \times 10^{\circ}\text{C} = 17 \text{ kJ}$$

Vapeur saturée : 6 bar eff à  $T = 165^{\circ}\text{C}$

Cette vapeur en se condensant cède une quantité de chaleur équivalent à  $h_{fg}$

La chaleur cédée par 1 kg de vapeur est **2066 kJ** (*Table de la vapeur*)



**Le coefficient de transfert thermique de la vapeur surchauffée est très faible** : La vapeur surchauffée ne cède que de la chaleur sensible dans un échangeur

## Types de vapeur

- Vapeur surchauffée
  - difficulté de contrôler la température
  - transfert de chaleur plus lent
    - pas de changement de phase
- Vapeur saturée sèche
  - normalement utilisée
- Vapeur humide
  - présence de gouttelettes d'eau dans la vapeur, ce que l'on cherche en général à éviter (purgeurs des condensats)

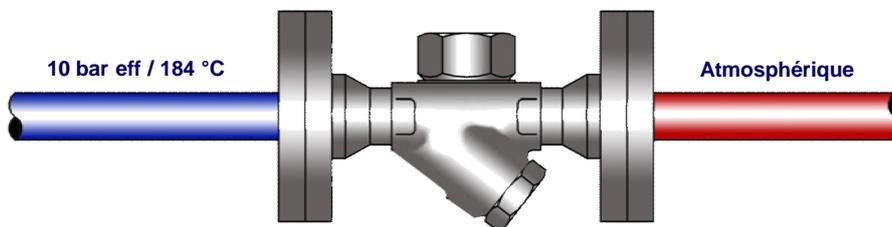
## Vapeur de revaporisation

### Principe

Passage de condensat chaud d'un système à **haute pression**  
dans un système à **basse pression**



**Revaporisation**



## Vapeur de revaporisation

### Exemple

10 bar – 184 °C → Atmosphérique – 100°C

A 10 bar – 184°C : Le condensat contient 781 kJ/kg ( $h_f$ )

A pression atmosphérique – 100°C :

Le condensat ne peut exister à l'état d'eau en ne contenant que 419 kJ/kg ( $h_f$ )

→ **Excédent enthalpique** = 781 – 419 = 362 kJ/kg

$$\% \text{ de revaporisation} = \frac{\text{Enthalpie excédentaire (kJ/kg)}}{\text{Enthalpie latente d'évaporation à la pression la plus basse (kJ/kg)}}$$

$$\% \text{ revaporisation} = ( 362 / 2257 ) \times 100 = 16 \%$$

## Vapeur de revaporisation

### Exemple

10 bar – 184 °C → Atmosphérique – 100°C

**Masse** 1 kg de condensat → 840 g de condensat  
→ 160 g de vapeur de revaporisation

Volume spécifique de l'eau liquide : 1 L/kg

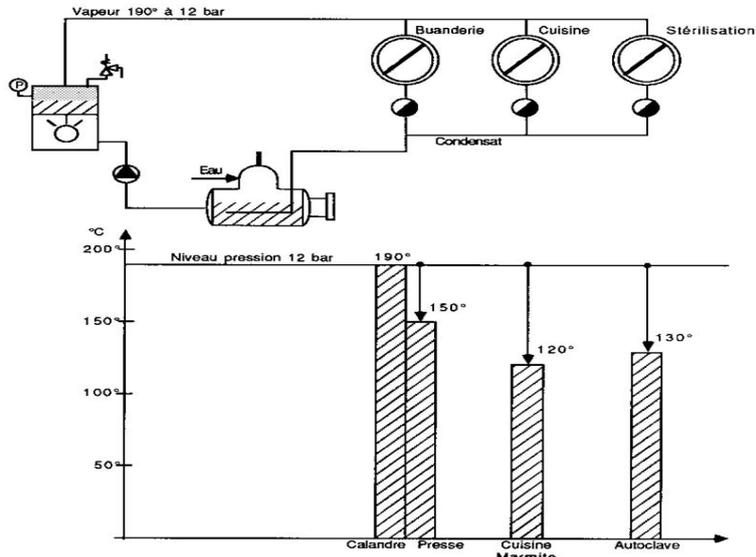
Volume spécifique de la vapeur à P atmosphère : 1 673 L/kg

**Volume** 1 kg de condensat → 0,84 L de condensat  
→ 267 L de vapeur de revaporisation

→ **300 fois plus de volume de revaporisation  
que de volume de condensat**

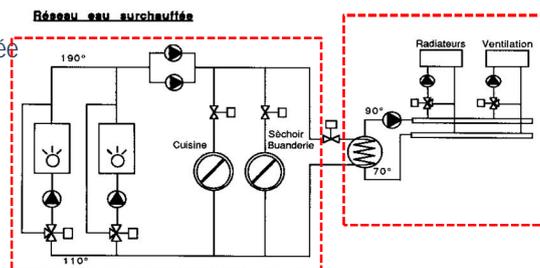
## Conception des installations : Exemple 1

- Production de vapeur : Chaleur technique

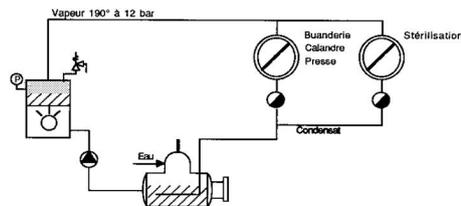


## Conception des installations : Exemple 2

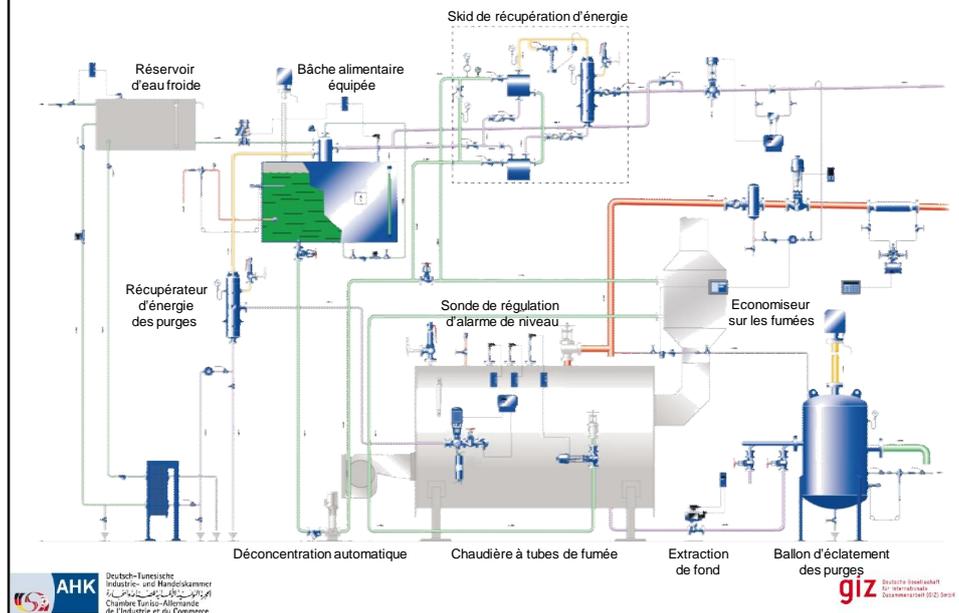
- Production de chaleur séparée
  - confort (eau surchauffée)
    - chauffage
    - ventilation
    - ECS
  - technique (vapeur)
    - processus



### Réseau vapeur



## Conception des installations : Exemple 4 - Industriel



## Objectifs d'une installation de production de la vapeur

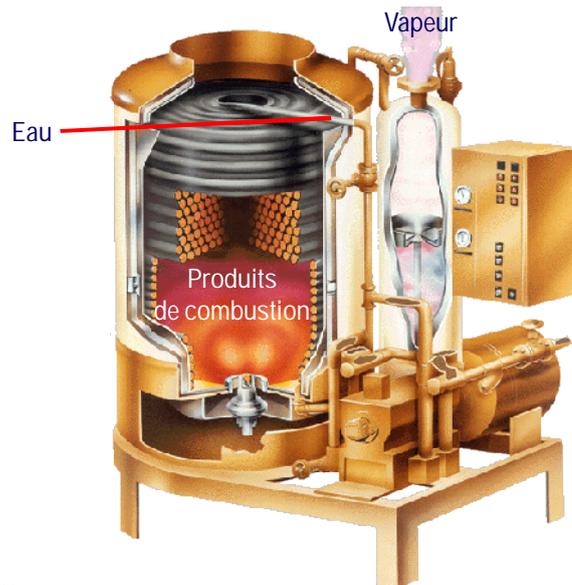
### Vapeur de bonne qualité

- Quantité suffisante
- Pression et température correctes
- Exempte d'air et de gaz incondensables
- Exempte de particules solides (oxyde de fer, etc...)
- Avoir un titre le plus élevé possible (vapeur sèche)

NOTIONS DE BASE

Les différents types de chaudières

Chaudière à production instantanée



## Chaudière à production instantanée

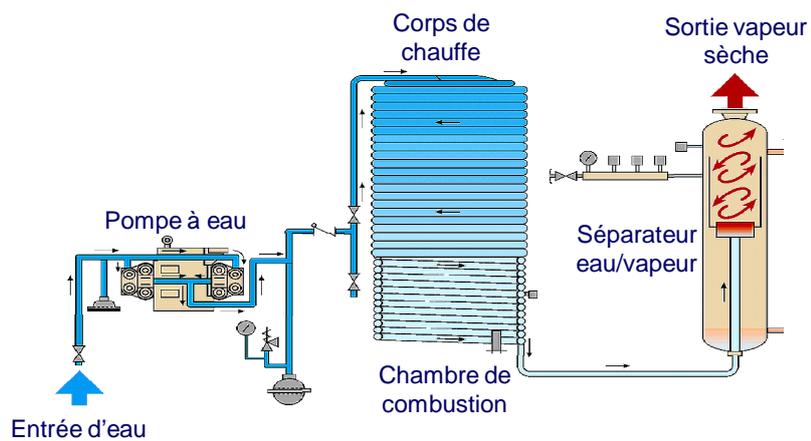


### Avantages

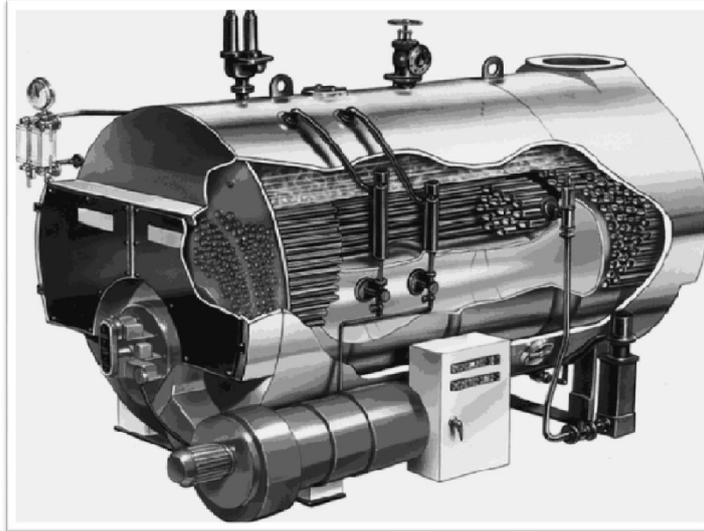
- Qualité
- Fiabilité
- Sécurité
- Rapidité
- Efficacité
- Rentabilité

## Chaudière à production instantanée

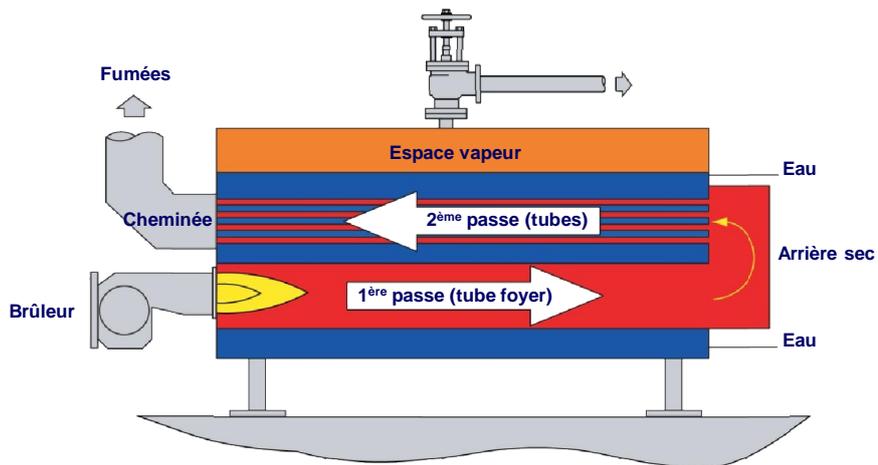
### Principe de fonctionnement



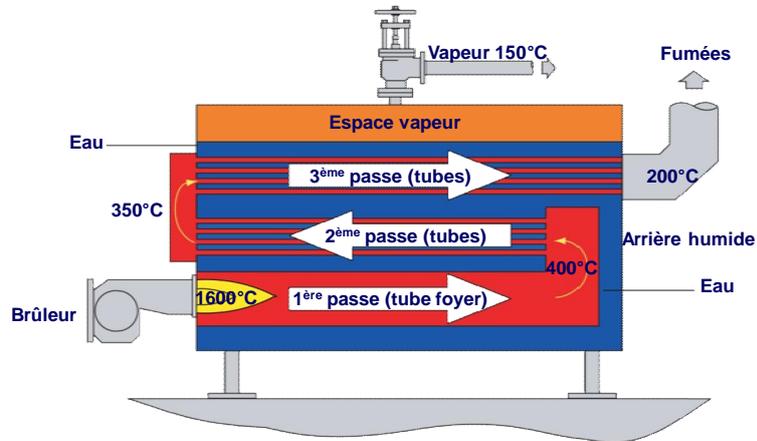
## Chaudière à tubes de fumée



## Chaudière à tubes de fumée : Chaudière 2 passes

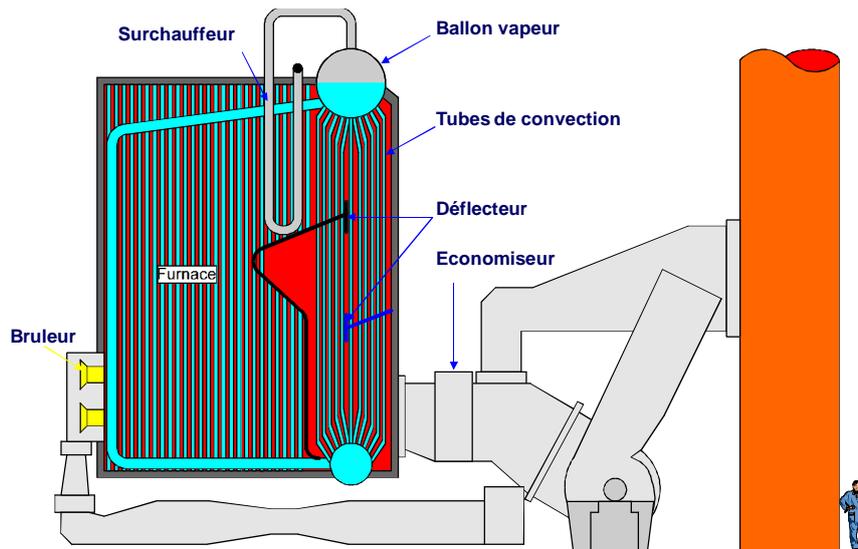


## Chaudière à tubes de fumée : Chaudière 3 passes

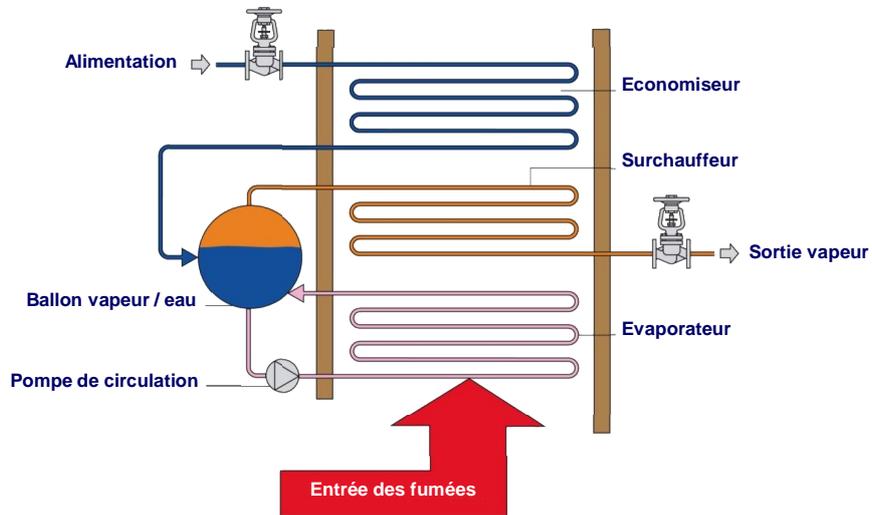


|                        |                                     | Surface d'échange en m <sup>2</sup> | Température fumée en °C | % de transfert de chaleur |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 <sup>ère</sup> Passe | Tube foyer et chambre de combustion | 11                                  | 1600                    | 65                        |
| 2 <sup>ème</sup> Passe |                                     | 43                                  | 400                     | 25                        |
| 3 <sup>ème</sup> Passe |                                     | 46                                  | 350                     | 10                        |

## Chaudière à tubes d'eau



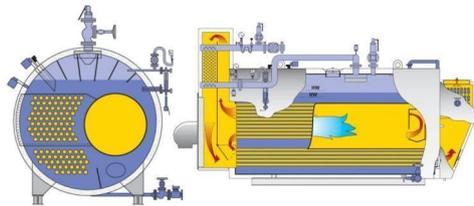
## Circulation forcée dans une chaudière à tubes d'eau



## Chaudière à tubes d'eau



## Les chaudières/ générateurs



Chaudière à vapeur



Générateur à vapeur

Le principal avantage des générateurs sur les chaudières est de pouvoir répondre très rapidement à des variations brusques de la demande en vapeur.

## Les chaudières/ générateurs

|           | Chaudières  | Générateurs   |
|-----------|---|---|
| Avantages | - stabilité de la production de vapeur et capacité de fournir des pointes de demande de courte durée                    | - très faible inertie, démarrage très rapide (5 à 20 minutes), possibilité de répondre rapidement à une augmentation brusque mais prolongée de la demande |
|           | - robustesse, durée de vie car fonctionnement très stable   | - rendement annuel moyen élevé en fonctionnement intermittent   |
|           | - très bon rendement instantané : plus de 95% avec économiseur  | - compacité et légèreté   |
|           | - moindre sensibilité à la qualité de l'eau (eau adoucie)   | - instabilité à bas régime, le brûleur ne peut être éteint que sous certaines conditions  |
|           | - possibilité de moduler sur toute la plage du brûleur et même de l'éteindre si la demande est inférieure à son minimum | - absence de risque d'explosion du côté vapeur (petit volume)   |
|           | - références et exemples d'application plus nombreux  | - possibilité de fonctionnement sans surveillance pendant une longue période, jusqu'à une semaine (168 h)   |
|           | - niveau de bruit relativement faible   |   |

## Les chaudières/ générateurs

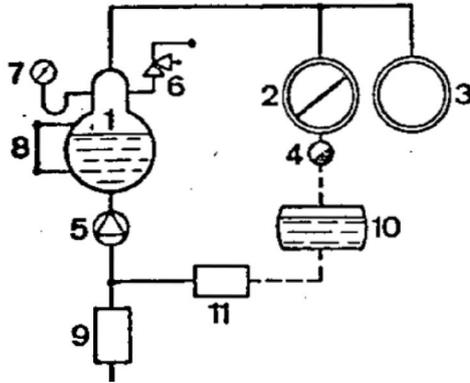
|               | Chaudières   | Générateurs  |
|---------------|--|--|
| Inconvénients | - inertie, démarrage lent depuis situation froide                                    | - moins robuste (mais possibilité plus souple de remplacement de certains composants)                                |
|               | - pertes liées aux extinctions-rallumages; pénalisant en fonctionnement intermittent | - plus grande sensibilité à la qualité de l'eau d'alimentation (eau déminéralisée requise si densité de flux élevée) |
|               | - poids et masse d'eau élevés, encombrement  | - niveau de bruit légèrement plus élevé  |
|               | - risque théorique d'explosion côté vapeur (grand volume)                            | - durée de vie plus réduite car fonctionnement moins stable  |
|               | - absence de surveillance durant 72 h au maximum, sous conditions                    |  |

## OPTIMISATION DES INSTALLATIONS

*Production de la Vapeur*

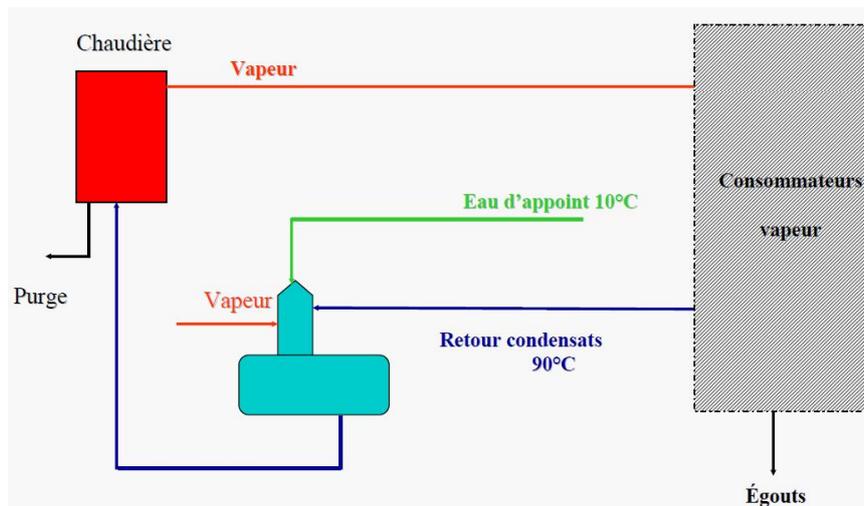
## Production et distribution de vapeur

### Circuit élémentaire de vapeur saturée



1. Chaudière (évent. échangeur de chaleur)
2. Consommateur de chaleur.
3. Consommateur de vapeur.
4. Purgeur d'eau condensée.
5. Pompe d'alimentation de la chaudière.
6. Soupape de sûreté
7. Manomètre.
8. Indicateurs de niveau.
9. Traitement d'eau.
10. Bâche d'alimentation.
11. Traitement de l'eau condensée.

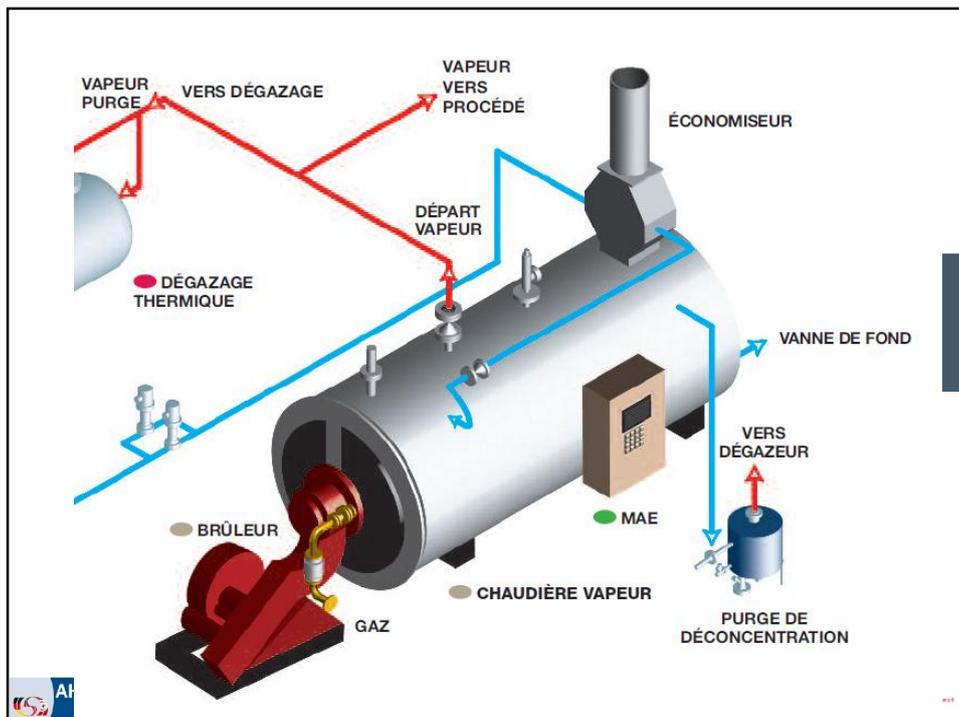
## La boucle de vapeur, schéma type



## Méthodologie d'optimisation de l'exploitation

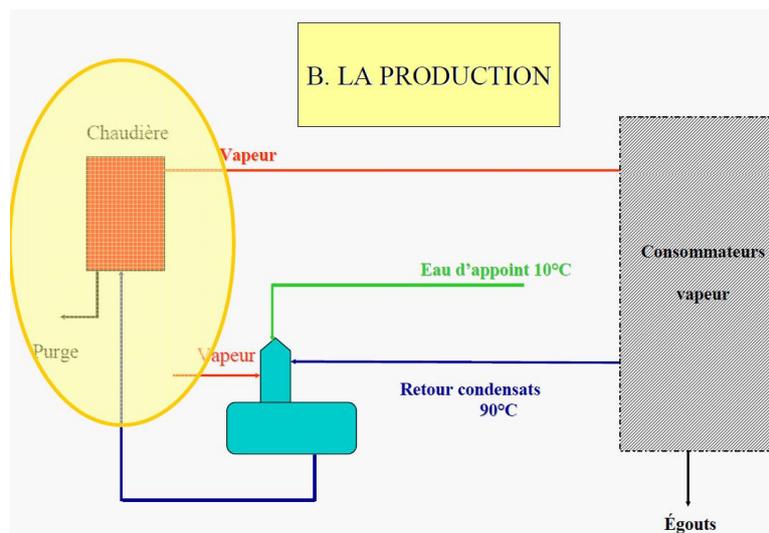
### 4 Niveaux d'optimisation

- Niveau de la production de la vapeur
- Niveau de la distribution de la vapeur
- Niveau de la consommation de la vapeur
- Niveau de retour des condensats



# LA PRODUCTION DE VAPEUR

## Optimisation de la boucle vapeur : Production



## Optimisation de la production de vapeur

---

### Paramètres à optimiser

- Les pertes par les purges (purges de déconcentration & purges de fond)
- Les pertes de combustion / pertes par les fumées
- Les pertes de maintien ( par rayonnement surfaciques)

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### Les pertes par les purges

## Traitement d'eau et déconcentration

- L'eau pure ( $H_2O$ ) n'existe pas à l'état naturel.
- Elle se charge après évaporation de gaz dissous comme l'oxygène, l'azote et le gaz carbonique ( $CO_2$ ).
- **Solides en suspension** : Particules organiques ou minérales en suspension (sable, roche, matières organiques...), pouvant **former des boues**. Peuvent-être éliminées par filtration.
- **Sels dissous** : Les principaux sont les bicarbonates/ sulfates/Chlorures et nitrates de calcium et de magnésium, ainsi que les sels de silicium. Ces substances peuvent former **des tartres dans les chaudières**.



Entartrage du tube foyer



Entartrage d'un tube d'alimentation



Percement tubes de fumées

## Traitement d'eau et déconcentration

- **Gaz dissous** : Les principaux sont l'oxygène et le gaz carbonique. Ces substances peuvent provoquer des corrosions.



Corrosion oxygène localisée



Corrosion oxygène



Corrosion oxygène

## Traitement d'eau et déconcentration

**Tableau des principales Impuretés**

| Nom                         | Symb.                              | Nom commun             | Effets                    |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Carbonate de Calcium        | CaCO <sub>3</sub>                  | Roche calcaire         | Tartre mou                |
| Bicarbonate de Calcium      | Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> |                        | Tartre mou                |
| Sulfate de Calcium          | CaSO <sub>4</sub>                  | Gypse, Plâtre de Paris | Tartre dur                |
| Chlorure de Calcium         | CaCl <sub>2</sub>                  |                        | Corrosion                 |
| Carbonate de Magnésium      | MgCO <sub>3</sub>                  |                        | Tartre mou                |
| Sulfate de Magnésium        | MgSO <sub>4</sub>                  | Magnésie               | Corrosion                 |
| Bicarbonate de Magnésium    | Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Sels d'Epsom           | Tartre, Corrosion         |
| Chlorure de Magnésium       | MgCl <sub>2</sub>                  |                        | Corrosion                 |
| Chlorure de Sodium          | NaCl                               | Sel commun             | Electrolyse               |
| Carbonate de Sodium         | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>    | Cristaux de soude      | Alcalinité                |
| Bicarbonate de Sodium       | NaHCO <sub>3</sub>                 | Soude calcinée         | Primage, mousse           |
| Hydroxyde de Sodium (soude) | NaOH                               | Levure chimique        | Alcalinité, Fragilisation |
| Sulfate de Sodium           | Na <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>    | Soude caustique        | Alcalinité                |
| Dioxyde de Silicium         | SiO <sub>2</sub>                   | Silice                 | Tartre dur                |

## Traitement d'eau et déconcentration

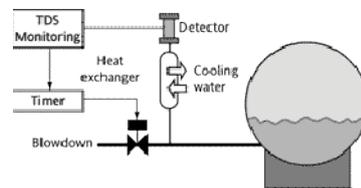
### TH (dureté de l'eau)

- Le TH (Titre Hydrotimétrique) : appelé dureté représente la **teneur en calcium et en magnésium** dans l'eau.
  - Le TH est exprimé en °f (degré français).
  - Le titre Hydrotimétrique (TH) définit la dureté de l'eau, il s'exprime souvent en degré français (°F).
  - 1°F est égal à une concentration globale en ions calcium et magnésium de 10<sup>-4</sup> mol.l<sup>-1</sup>. Il correspond à :
    - 4 mg/l de calcium ou à 2,4 mg/l de magnésium.
    - 10 mg de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>)
- Les normes habituelles classent les eaux de la façon suivante :
- eau très douce : 0 ≤ TH ≤ 5
  - eau douce : 5 ≤ TH ≤ 15
  - eau semi-dure : 15 ≤ TH ≤ 25
  - eau dure : au-delà de 25
  - Pour les eaux potables, il est souhaitable d'avoir TH ≤ 30, l'idéal étant de 12 à 15.

## Traitement d'eau et déconcentration

Le but du traitement d'eau est de :

- Minimiser les corrosions dans la chaudière, les réseaux vapeur et condensats.
- Eviter la formation de tartres dans la chaudière.
- Minimiser la formation de mousse et l'entraînement d'eau afin de garantir une qualité de vapeur optimale (primage).



## Traitement d'eau et déconcentration

- Une chaudière : 10 tonnes de vapeur par heure
- Durée de fonctionnement : 8000 heures par an
- Eau alimentaire de dureté 30 ° F
- Taux de retour des condensats : 50 %
- Eau d'appoint :  $10 \text{ T} / 2 = 5 \text{ T/h}$
- Quantité d'eau annuelle :  $5 \times 8000 = 40\,000 \text{ T}$  (40 000 m<sup>3</sup>)
- Quantité de tartre par tonne d'eau :  $30 \text{ °F} \times 10 \text{ mg par litre} = 300 \text{ mg / l} = 300 \text{ g / tonne} = 0,3 \text{ kg /tonne}$
- Quantité annuelle :  $0,3 \times 40\,000 = 12\,000 \text{ kg} = 12 \text{ tonnes de tartre}$

## Traitement d'eau et déconcentration

### Pourquoi faut-il déconcentrer ?

- ❖ TDS=Total dissolved solids
  - Afin de ne pas dépasser le TDS (la concentration en sels totalement dissous ) maxi donné par le fabricant de chaudière, il va falloir **DECONCENTRER**.
  - C'est à dire prendre une partie de l'eau de chaudière chargé en sels minéraux et l'évacuer de la chaudière et la remplacer par de l'eau alimentaire faiblement chargée.

Un TDS trop élevé engendre une détérioration de la chaudière ainsi que du primage chimique (entraînement d'eau chargée en sels → mousse).

## Traitement d'eau et déconcentration

### Calcul du débit de déconcentration

- F = TDS de l'eau d'appoint (ppm)
- B = TDS préconisé en chaudière (ppm)
- Qv = Débit de vapeur chaudière (kg/h)
- Qd = Débit de déconcentration (kg/h)

$$\text{Débit de déconcentration (Qd)} = \frac{F \times Qv}{B - F}$$

Il existe plusieurs systèmes de déconcentration d'eau :

- Déconcentration manuelle
- Déconcentration continue
- Déconcentration automatique

## Traitement d'eau et déconcentration

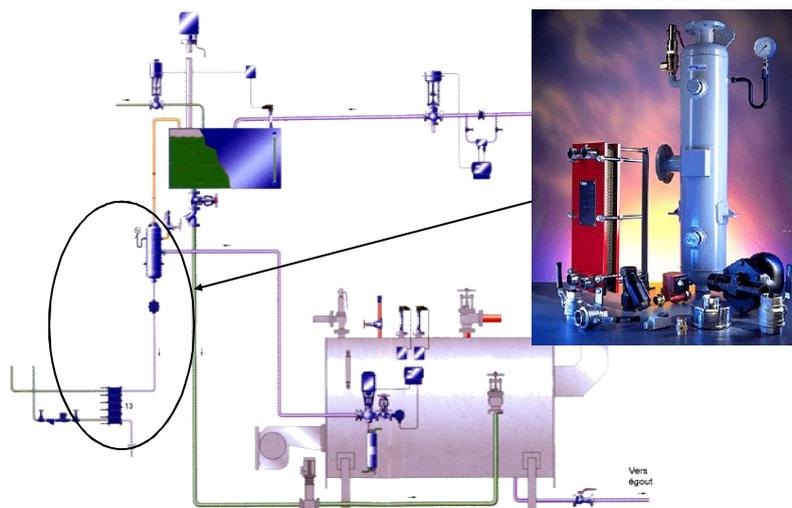
### Avantages d'une déconcentration automatique

- Economie d'eau, de combustible et de produits chimiques.
- Réduction du primage. Diminution des coûts d'entretien.
- Régulation automatique. Diminution du besoin de surveillance.
- Vapeur sèche et propre. Augmente le rendement de l'installation.
- Meilleur contrôle de la salinité et récupération de l'énergie permettant une plus grande efficacité.

**1 à 2 % de gain de combustible**

## Traitement d'eau et déconcentration

### La récupération d'énergie : La revaporisation de la déconcentration



## Traitement d'eau et déconcentration

Enthalpie du liquide à 12 bar = 814 kJ/kg

Enthalpie du liquide à 0,2 bar = 439 kJ/kg

Excédant d'énergie = 375 kJ/kg

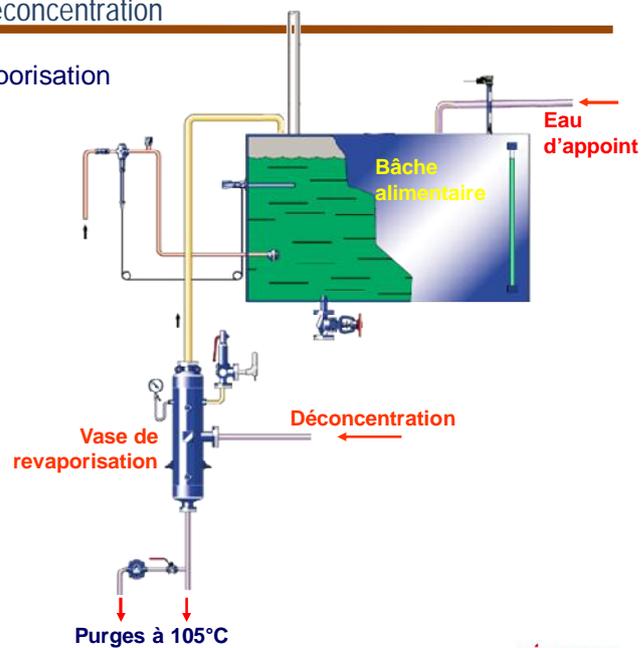
$$\frac{\text{Excédant d'énergie}}{\text{Enthalpie d'évaporation à 0,2 bar}} = \frac{375 \text{ kJ/kg}}{2251 \text{ kJ/kg}} = 0,166 \text{ ou } 16,6 \%$$

16% Energie  
récupérée

## Traitement d'eau et déconcentration

La vapeur de revaporisation

Utiliser la vapeur  
de revaporisation



## Traitement d'eau et déconcentration

### Récupération d'énergie des purges de chaudières

#### Récupération avec un vase

| Pression relative en bar | *% de vapeur flashée générée à 0,2 bar eff. | % d'énergie récupérée |
|--------------------------|---|-----------------------|
| 5                        | 10,5  | 43                    |
| 7                        | 12,7  | 47                    |
| 10                       | 15,4  | 53                    |
| 17                       | 20,0  | 61                    |
| 20                       | 21,6  | 63                    |

\*Base de calcul : Pression dans le vase de revaporisation 0,2 bar

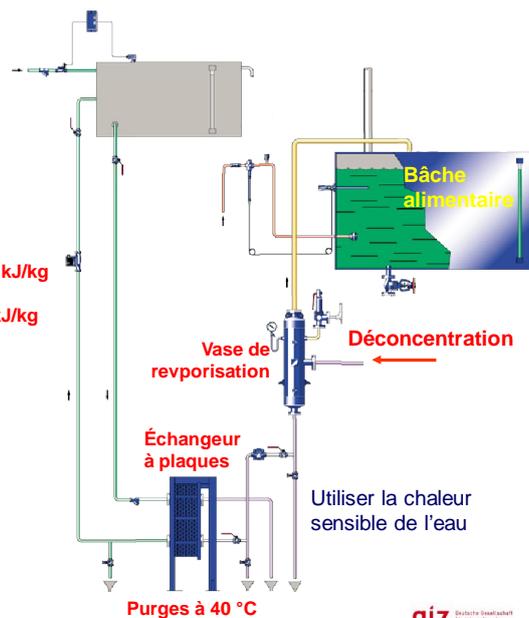
## Traitement d'eau et déconcentration

### Récupération d'énergie des purges de chaudières

Enthalpie du liquide à 0,2 bar 105°C = 439 kJ/kg

Enthalpie du liquide à 0,2 bar 40°C = 168 kJ/kg

Excédant d'énergie = 271 kJ/kg



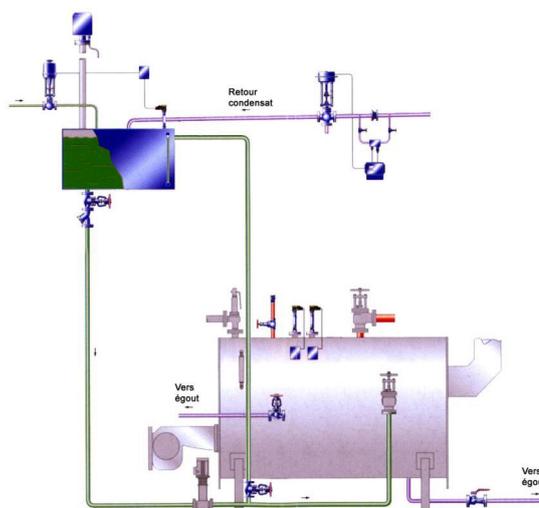
## Récupération d'énergie des purges de chaudières

### Récupération avec un vase et un échangeur

| Pression de la chaudière en bar | *Potentiel d'énergie récupérée en % |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 5                               | 78                                  |
| 7                               | 80                                  |
| 10                              | 82                                  |
| 17                              | 85                                  |
| 20                              | 86                                  |

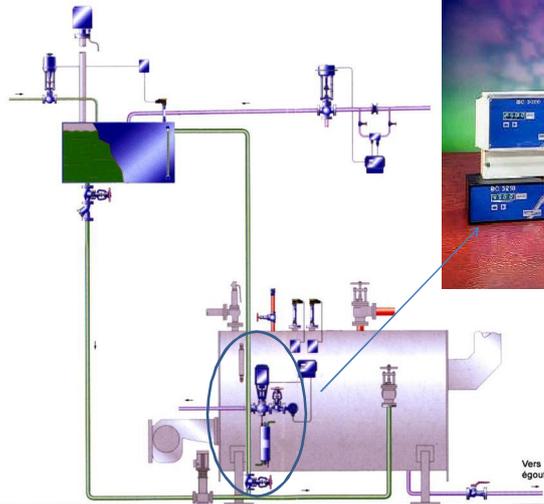
\*Base de calcul : Pression dans le vase de revaporation 0,2 bar.  
Température des purges en sortie de l'échangeur 40°C.

## Récupération d'énergie des purges de chaudières



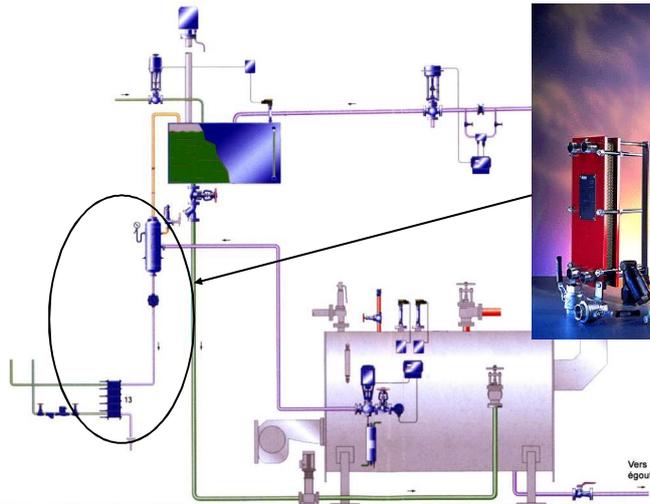
## Traitement d'eau et déconcentration

### Récupération d'énergie des purges de chaudières



## Traitement d'eau et déconcentration

### Récupération d'énergie des purges de chaudières



**0,5 à 1 % de gain de combustible**

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### La pression de la vapeur

## La pression de la vapeur

Réduire la pression vapeur en sortie chaudière :

Il est judicieux de vérifier que la vapeur produite à la chaudière n'a pas une pression trop élevée par rapport à la pression vapeur nécessaire auprès des consommateurs.

Application pratique :

### Economie engendrée par une réduction de la pression en sortie chaudière pour une chaudière au gaz naturel :

|   |                               |                    |
|---|-------------------------------|--------------------|
| chaleur totale vapeur 9 barg                                  | 2 778                         | kJ/kg              |
| chaleur totale vapeur 8 barg                                  | 2 774                         | kJ/kg              |
| différence énergie  | 4                             | kJ/kg              |
| Production vapeur   | 20 000                        | t/an               |
| → Réductions de l'énergie dans la vapeur                      | $4 * 20\ 000 = 80\ 000$ MJ/an | soit 23 MWh PCI/an |
| → Gain énergétique en gaz (rendement chaudière : 90% sur PCI) | 23/0,9 = 25                   | MWh PCI/an         |



Inventaire des pressions des consommateurs !!!

## La quantité de la vapeur

## La quantité de la vapeur

Installation d'un débitmètre vapeur pour : Valider l'énergie contenue dans la vapeur au moyen de 3 lectures de débit : **vapeur, gaz et eau d'appoint**

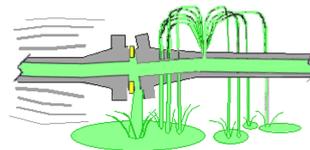
➤ Si les chaudières doivent produire de la vapeur à 9 bar saturée, cela signifie que la vapeur devrait avoir une chaleur totale de 2777,8 kJ/kg.

**Il est indispensable de le vérifier !**

➤ Si la vapeur contient **moins** d'énergie qu'annoncé par la table vapeur, cela signifie qu'elle contient **trop d'eau** ; ce qui peut être source **de coups de bélier** dans les installations ! **Et donc dangereux...**



Debitmètre vapeur type vortex  
Source : Endress & Hauser



## La quantité de la vapeur

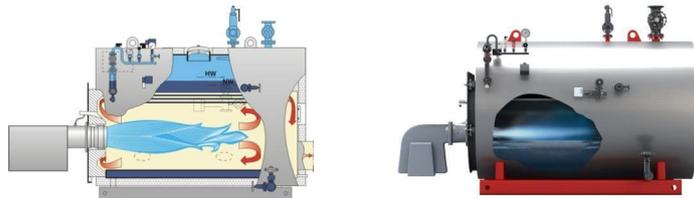
### Validation de l'énergie contenue dans la vapeur sur base des données des compteurs et débitmètre :

|   |               |
|---|---------------|
| ▪ chaleur totale vapeur à 9 bar (table vapeur) :          | 2 777,8 kJ/kg |
| ▪ débit vapeur à 9 bar (donnée débitmètre vapeur) :       | 10,0 t/h      |
| ▪ quantité d'eau d'appoint (donnée compteur eau) :        | 2,0 m³/h      |
| ▪ quantité de gaz consommée (donnée compteur gaz):        | 27 GJ/h       |
| ▪ rendement chaudière (donnée mesurée aux maintenances) : | 90%           |
| ▪ énergie condensats 105°C; 0 bar (donnée table) :        | 438,9 kJ/kg   |
| ▪ énergie eau d'appoint 15°C (donnée table) :             | 62,7 kJ/kg    |

- énergie eau entrant dans chaudière (80% condensats – 20% eau d'appoint) : **3,64 GJ/h**
- énergie vapeur 9 bar sortie chaudière :  $27 \times 90\% + 0,4 = 27,77$  GJ/h
- vérification énergie vapeur 9 bar sortie de la chaudière :  $27,77 / (10 \times 1000) = 2777,8$  kJ/kg

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### Les pertes par combustion



## Optimisation de la combustion : Pourquoi ? Comment ?

- Une combustion incomplète engendre une grande perte d'énergie
- Même une combustion complète engendre une perte d'énergie si elle n'est pas optimale
- Pour optimiser la combustion, il faut assurer les conditions permettant une combustion complète oxydante (combustion complète en excès d'air).



## Composition du gaz selon les provenances

|                    | NATURE DU GAZ     | HYDRO-GENE     | OXYDE DE CARBONE | HYDROCARBURES       |                                  |                                  |                                  |                                  |  |   |                                   |                                  |                | OXY-GENE       | INERTES         |     |
|--------------------|-------------------|----------------|------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|-----------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|-----|
|                    |                   | H <sub>2</sub> | CO               | C<br>H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub><br>H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub><br>H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub><br>H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub><br>H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub><br>H <sub>8</sub><br>I-n* | C <sub>4</sub><br>H <sub>10</sub><br>I-n* | C <sub>5</sub><br>H <sub>12</sub> | C <sub>n</sub><br>H <sub>m</sub> | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> |     |
| <b>GAZ NATUREL</b> | Lacq              | -              | -                | 97,3                | -                                | 2,1                              | -                                | 0,2                              | -  | 0,1                                       | -                                 | -                                | -              | -              | 0,3             | -   |
|                    | Algérie (Fos)     | -              | -                | 91,2                | -                                | 6,5                              | -                                | 1,1                              | -  | 0,2                                       | -                                 | -                                | -              | -              | 1,0             | -   |
|                    | Algérie (Montoir) | -              | -                | 88,6                | -                                | 8,2                              | -                                | 2,0                              | -  | 0,6                                       | traces                            | -                                | -              | -              | 0,6             | -   |
|                    | Mer du nord       | -              | -                | 88,2                | -                                | 5,4                              | -                                | 1,2                              | -  | 0,4                                       | 0,2                               | -                                | -              | -              | 3,2             | 1,4 |
|                    | U.R.S.S.          | -              | -                | 96,2                | -                                | 1,2                              | -                                | 0,3                              | -  | 0,1                                       | 0,1                               | -                                | -              | -              | 1,8             | 0,3 |
|                    | Groningue         | -              | -                | 83,5                | -                                | 3,6                              | -                                | 0,7                              | -  | 0,2                                       | 0,1                               | -                                | -              | -              | 10,8            | 1,1 |

## Les 4 types de combustion



- 1<sup>er</sup> type : Combustion neutre (stoechiométrique)
- 2<sup>ème</sup> type : Combustion complète en excès d'air (ou complète oxydante)
- 3<sup>ème</sup> type : Combustion incomplète oxydante (en excès d'air)
- 4<sup>ème</sup> type : Combustion incomplète réductrice (en défaut d'air)

## Grandeurs caractéristiques de la combustion

**Pouvoir calorifique:** c'est la quantité de chaleur produite par la combustion totale d'une quantité unitaire de combustible.

**Pouvoir calorifique supérieur PCS:** représente l'énergie dégagée par la combustion **complète** d'un kg ou d'un m<sup>3</sup> de combustible, **l'eau étant produite à l'état liquide** (unité kJ/kg ou kJ.m<sup>3</sup> selon que le combustible est ou non gazeux)

**Pouvoir calorifique inférieur PCI:** représente l'énergie dégagée par la combustion **complète** d'un kg ou d'un m<sup>3</sup> de combustible, **l'eau étant produite à l'état vapeur** (unité kJ/kg ou kJ.m<sup>3</sup> selon que le combustible est ou non gazeux)

**Pouvoir comburivore (Va):** c'est la quantité d'air nécessaire pour brûler une quantité unitaire de combustible **complète et neutre**, en kg d'air par kg de combustible (pour les solides) ou en Nm<sup>3</sup> d'air par Nm<sup>3</sup> de combustible (pour les gaz).

En pratique :

$$V_a = \frac{\text{PCI}}{4180} \quad \text{Nm}^3 \text{ d'air/kg de combustible}$$

le PCI est exprimé en kJ / kg

## Grandeurs caractéristiques de la combustion

**Pouvoir fumigène:** c'est la quantité de fumées produites par la combustion à l'air d'une quantité unitaire de combustible, en kg de fumées par kg de combustible ou Nm<sup>3</sup> de fumées par Nm<sup>3</sup> de combustible.

En pratique :

$$\begin{aligned} \text{Pouvoir fumigène sur fumées humides : } V_{fa} &= \frac{PCI}{3553} \text{ Nm}^3 \text{ de fumées/kg de combustible} \\ \text{Pouvoir fumigène sur fumées sèches : } V'_{fa} &= \frac{PCI}{4180} \end{aligned}$$

**Comburant :** c'est en général de l'air à l'état gazeux (20,8% O<sub>2</sub> en volume, 79,2% N<sub>2</sub> en volume, quelques gaz rares), parfois de l'oxygène pur O<sub>2</sub>.

**Excès d'air :** c'est la quantité d'air au delà de la **stoechiométrie** nécessaire à la combustion complète du combustible.

- Cet excès d'air est en général de 2 à 10% sur les équipements de chauffe industriels.
- **Un trop faible** excès d'air peut conduire à une combustion incomplète, des fumées noires, un étouffement du four ou de la chaudière.

**Un trop large** excès d'air conduit essentiellement à une perte de rendement.

## Étude d'une combustion réelle

Dans une combustion réelle :

- la réaction peut ne pas être **totale** ni **complète**.
- Elle peut, en outre, se faire avec un **excès** ou un **défaut d'air** (par rapport à la combustion « neutre »)
- Soit  $V'_a$  le volume d'air effectivement fourni et  $V_a$  le volume théoriquement nécessaire pour la combustion « neutre ».

Soit :

$$e = \frac{V'_a - V_a}{V_a}$$



L'excès d'air vaut :  $(V'_a - V_a) = e V_a$

Le volume de fumées effective :  $V_f''$  s'écrit :  $V_f + e V_a$

## Étude d'une combustion réelle

**Remarque 1 :** La combustion se fait avec un excès d'air si  $e > 0$  (on parle de combustion « oxydante »)

Dans ce cas, même si la combustion est complète, on retrouvera, dans les fumées, de l'air inutilisé de sorte que la teneur en dioxyde de carbone des fumées sera plus faible que dans la combustion « neutre ».

Si la combustion n'est pas complète, le taux de monoxyde de carbone viendra encore diminuer le taux de dioxyde de carbone.

**Remarque 2 :** La combustion se fait avec un défaut d'air si  $e < 0$  (on parle de combustion « réductrice »)

Dans ce cas, encore, la teneur en dioxyde de carbone des fumées sera plus faible que dans la combustion « neutre ». Ces fumées peuvent même contenir du dioxygène !...

**Remarque 3 :** C'est la combustion complète stœchiométrique qui est susceptible de fournir le taux de dioxyde de carbone le plus élevé, dans les fumées.

## Étude d'une combustion réelle

*Remarque :* On définit aussi le taux d'aération  $n$  : 
$$n = \frac{V'_a}{V_a} = e + 1$$

L'analyse des fumées consiste, alors, à déterminer les teneurs en :

- Dioxyde de carbone et dioxyde de soufre ( $\gamma_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2}$ )
- Dioxygène ( $\gamma_{\text{O}_2}$ )
- Monoxyde de carbone ( $\gamma_{\text{CO}}$ )

Pour alléger les notations, nous désignons  $\gamma_{\text{CO}_2 + \text{SO}_2}$  par  $\gamma'$ .

Le taux maximal de dioxyde de carbone sera désigné par  $\gamma'_{\text{max}}$ .

Le taux de dioxygène, dans les fumées, s'écrit : 
$$\gamma_{\text{O}_2} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V''_f}$$

## Étude d'une combustion réelle

- Le volume  $V_{O_2}$  représente le volume de dioxygène en excès soit environ 21 % du volume d'air en excès.
- L'excès d'air vaut :  $(V_a' - V_a) = e V_a$
- $V_f''$  s'écrit :  $V_f + e V_a$

$$\gamma_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_f''} = \frac{0,208 e V_a}{V_f + e V_a}$$

$$e = \frac{V_f}{V_a} \frac{\gamma_{O_2}}{(0,208 - \gamma_{O_2})}$$

- Si on utilise la teneur en dioxyde de carbone et en dioxyde de soufre, on a :

$$\gamma' = \frac{V_{CO_2 + SO_2}}{V_f + e V_a} \quad \Rightarrow \quad e = \frac{1}{V_a} \left[ \frac{V_{CO_2 + SO_2}}{\gamma'} - V_f \right]$$

## Étude d'une combustion réelle : CO<sub>2</sub> maximum



- Pour 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> il faut : 2 m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> et 7,52 m<sup>3</sup> de N<sub>2</sub> : c'est-à-dire 9,52 m<sup>3</sup> d'air.
- La combustion dégage : 1 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>, 2 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O et 7,52 m<sup>3</sup> de N<sub>2</sub>, on obtient ainsi 8,52 m<sup>3</sup> de fumée sèche ; c'est à dire sans eau ou vapeur d'eau.
- Dans ces 8,52 m<sup>3</sup> de fumée nous avons 1 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> =  $\frac{1}{8,52} \times 100 = 11,7\%$

est la valeur maximum que peut atteindre la quantité de CO<sub>2</sub> dans les fumées, on l'appellera : CO<sub>2</sub> maximum ou CO<sub>2</sub> max.



## Étude d'une combustion réelle : CO<sub>2</sub> maximum

Exemple : combustion complète avec excès d'air de 1 m<sup>3</sup>.

1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> + 2 m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub> + 3.76N<sub>2</sub>) + 1 m<sup>3</sup> d'air → 1 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> + 2 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O + 7,52 m<sup>3</sup> N<sub>2</sub> + 1 m<sup>3</sup> d'air

On obtient donc 1 m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> pour 9,52 m<sup>3</sup> de fumée sèche, soit  $CO_2 = \frac{1}{9,52} \times 100 = 10,5\%$ .

Cette valeur de CO<sub>2</sub> correspond à un excès d'air de  $\frac{11,7 - 10,5}{11,7} \times 100 = 10,8\%$ .

En mesurant dans les fumées, une valeur de CO<sub>2</sub> inférieure au CO<sub>2</sub>max, nous pouvons affirmer que nous sommes en présence d'une combustion avec excès d'air.

**ATTENTION** : dans ce cas là, seule la mesure de la teneur en CO pourra nous indiquer si la combustion est complète (pas de CO) ou si elle est incomplète (présence de CO).

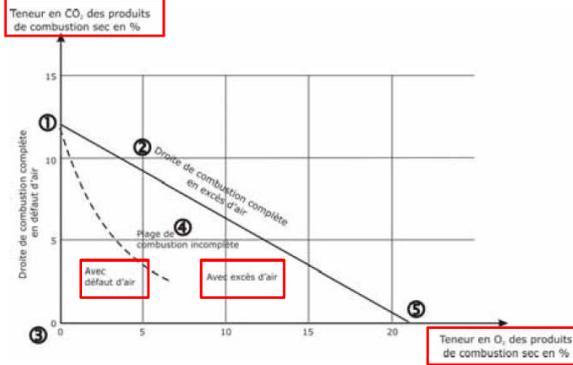


## Teneur en O<sub>2</sub> et en CO<sub>2</sub>

| % O <sub>2</sub><br>Oxygène | % CO <sub>2</sub><br>Gaz Naturel | % CO <sub>2</sub><br>Fioul | % Excès<br>d'air (~) |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 0                           | 11,8                             | 15,6                       | 0                    |
| 1                           | 11,2                             | 14,9                       | 5                    |
| 2                           | 10,6                             | 14,1                       | 10                   |
| 3                           | 10,1                             | 13,4                       | 16                   |
| 4                           | 9,5                              | 12,6                       | 23                   |
| 5                           | 9,0                              | 11,9                       | 28                   |
| 6                           | 8,3                              | 11,1                       | 36                   |
| 7                           | 7,9                              | 10,4                       | 45                   |
| 8                           | 7,3                              | 9,6                        | 55                   |
| 9                           | 6,7                              | 8,9                        | 68                   |
| 10                          | 6,1                              | 8,1                        | 80                   |
| 11                          | 5,6                              | 7,4                        | 100                  |
| 12                          | 5,0                              | 6,6                        | 122                  |
| 13                          | 4,5                              | 5,9                        | 150                  |
| 14                          | 3,9                              | 5,2                        | 186                  |
| 15                          | 3,3                              | 4,4                        | 234                  |

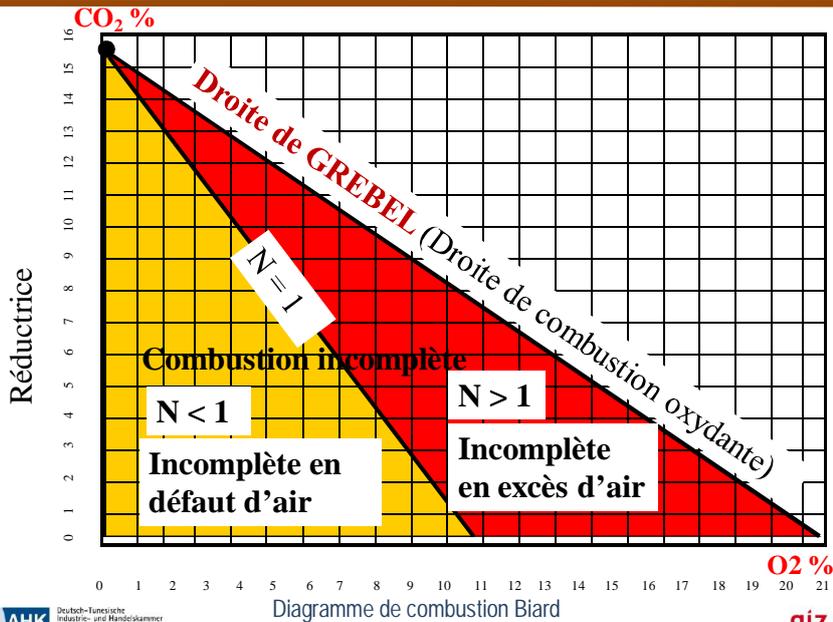
## Diagrammes caractéristiques de la combustion

### 1) Diagramme de Biard



Il est construit en indiquant sur l'axe horizontal les teneurs en oxygène, et sur l'axe vertical les teneurs en gaz carbonique. Ces deux teneurs sont exprimées en pourcentage des produits de combustion sec. Le point repéré ① correspond à la combustion stoechiométrique et qui donne la valeur de CO<sub>2</sub>max. Le point repéré ⑤ correspond à la valeur maximale du taux d'oxygène dans l'air, soit de 20,8%. Sur la droite qui relie le point ① au point ⑤, nous trouvons tous les points qui correspondent à la combustion complète en excès d'air. On l'appelle droite de Grebel.

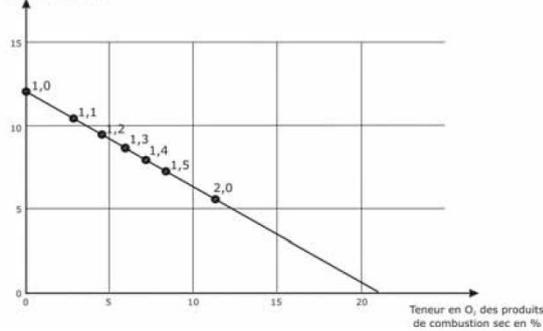
## Diagrammes caractéristiques de la combustion



## Diagrammes caractéristiques de la combustion

### 2) Diagramme d'Ostwald

Teneur en CO<sub>2</sub> des produits de combustion sec en %

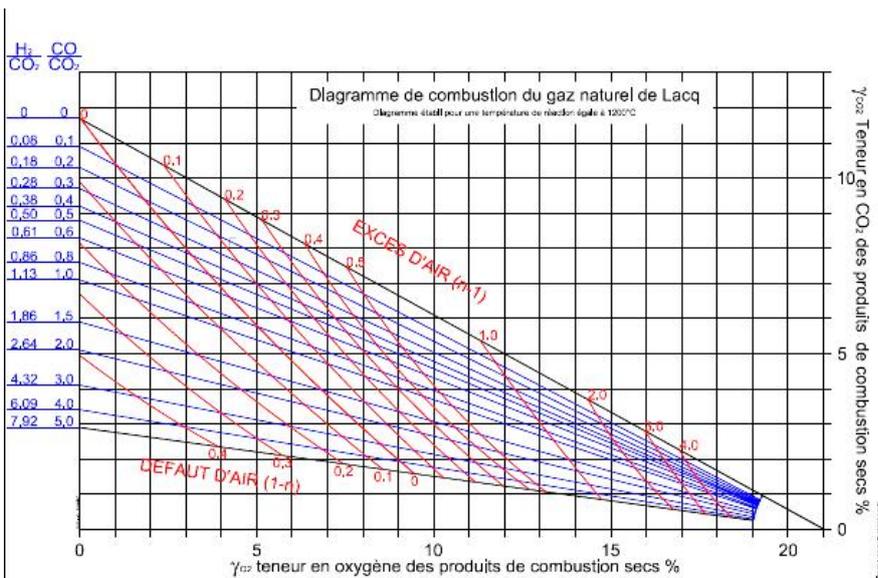


Le diagramme d'Ostwald, construit à partir du diagramme de Biard, est plus complet. Il fait apparaître sur la droite de Grebel les valeurs de l'excès d'air, que l'on peut déduire par la connaissance du taux de CO<sub>2</sub>.

Exemple d'utilisation : taux de CO<sub>2</sub> : 10% (ou taux de O<sub>2</sub> : 3,3%) facteur d'air 1,15 donc excès d'air 15%.

Nous pouvons dire en conclusion, que le diagramme d'Ostwald ne nous sert qu'à déterminer la valeur de l'excès d'air, quand on connaît la valeur de CO<sub>2</sub>, soit celle de l'O<sub>2</sub>.

## Diagramme de combustion du gaz naturel



## Le rendement de combustion : Pouvoir calorifique

➤ Le pouvoir calorifique est dit supérieur (abrégié : **PCS**) quand l'eau qui résulte de la combustion du gaz hydrogène et des hydrocarbures est supposée ramenée à l'état liquide dans les produits de combustion.

➤ Le pouvoir calorifique est dit inférieur (abrégié : **PCI**) quand l'eau qui résulte de la combustion du gaz hydrogène et des hydrocarbures est supposée à l'état vapeur dans les produits de combustion.

$$PCS = PCI + \text{Chaleur latente de condensation (ou de vaporisation) de l'eau}$$

## Le rendement de combustion : Pouvoir calorifique

Tableau des PCI des combustibles liquides

|                                   | Densité<br>volumétrique | Pouvoir calorifique<br>inférieur en milliers<br>de calories par kilogramme | Equivalent en tonnes<br>équivalent pétrole<br>par tonne |
|-----------------------------------|-------------------------|--|---|
| — Pétrole brut                    |                         |  |   |
| • Qualité mélange zarzaitine..... | 0.815                   | 10300  | 1.030   |
| • Qualité ashtart.....            | 0.879                   | 10080  | 1.008   |
| — Fuel lourd n° 2.....            | 0.965                   | 9790   | 0.979   |
| — Fuel oil domestique (98/2)..... | 0.846                   | 10170  | 1.017   |
| — Fuel oil léger (55/45).....     | 0.898                   | 10010  | 1.001   |
| — Gaz-oil.....                    | 0.844                   | 10270  | 1.027   |
| — Pétrole lampant.....            | 0.798                   | 10520  | 1.052   |
| — Essence normale.....            | 0.722                   | 10540  | 1.054   |
| — Essence super.....              | 0.755                   | 10450  | 1.045   |
| — Kérosène aviation.....          | 0.794                   | 10550  | 1.055   |
| — G. P. L.....                    | 0.56                    | 11060  | 1.106   |
| — Virgin naphte.....              | 0.72                    | 10540  | 1.054   |
| — Essence légère.....             | 0.66                    | 10670  | 1.067   |
| — White spirit.....               | 0.775                   | 10410  | 1.041   |
| — Bitumes.....                    | 1.02                    | 8000   | 0.800   |
| — Lubrifiant.....                 | 0.9                     | 10000  | 1.000   |

Journal Officiel de la République Tunisienne — 27 mars 1987

$$1 \text{ k cal} = 4,18 \text{ kJ}$$

## Le rendement de combustion : Pouvoir calorifique

Tableau des PCI des combustibles gazeux

|  | Densité par rapport à l'air | Pouvoir calorifique inférieur en million de calories par normal mètres cube | Equivalent en tonnes équivalent pétrole par milliers de normaux mètre cube |
|--|-----------------------------|---|--|
| — El Borma avec récupération de G.P.L..... | 0.69                        | 9.9   | 0.990  |
| — El Borma sans récupération de G.P.L..... | 0.75                        | 10.8  | 1.080  |
| — Gaz naturel algérien .....               | 0.656                       | 9.0   | 0.900  |
| — Gaz manufacturé (gaz de ville) .....     | 0.68                        | 4.27  | 0.427  |

1 k cal = 4,18 kJ

Journal Officiel de la République Tunisienne — 27 mars 1987

Tableau des PCI des combustibles solides

|   | Pouvoir calorifique inférieur en milliers de calories par kilogramme | Equivalent en tonnes équivalent pétrole par tonnes |
|---|--|--|
| — Charbons .....  | 7000   | 0.700  |
| — Combustibles traditionnels (bois grignons etc...) ..... | 3500   | 0.350  |

## Le rendement de combustion : Pouvoir calorifique

| Carburant                  | unité | PCS   |     | PCI   |     |
|----------------------------|-------|-------|-----|-------|-----|
|                            |       | kWh   | MJ  | kWh   | MJ  |
| Butane                     | kg    | 13,72 | 49  | 12,61 | 45  |
| Propane                    | kg    | 13,83 | 50  | 12,79 | 46  |
| Butane                     | m3    | 33,48 | 121 | 30,75 | 111 |
| Propane                    | m3    | 25,95 | 93  | 23,95 | 86  |
| Bois                       | kg    | 5,46  | 20  | 5,11  | 18  |
| Anthracite                 | kg    | 9,95  | 36  | 9,53  | 34  |
| Fioul domestique           | L     | 10,74 | 39  | 10,06 | 36  |
| Fioul lourd n°2            | kg    | 11,69 | 42  | 10,99 | 40  |
| Gaz de Lacq (méthane)      | m3    | 11,45 | 41  | 10,35 | 37  |
| Gaz de Groningue (méthane) | m3    | 9,76  | 35  | 8,79  | 32  |

## Rendement de combustion sur PCI

En pratique, on détermine le rendement de combustion par une méthode indirecte :

$$\eta_{\text{PCI}} (\%) = 100 \% - \text{pourcentage des pertes par fumées}^*$$

\* la combustion devra être complète en excès d'air (oxydante). Les pertes par une combustion incomplète devront donc être minimales et seront négligées dans les calculs professionnels. Seules les pertes par fumées sont prises en compte.

Le pourcentage des pertes par fumées dépend :

- du combustible utilisé : Le volume de fumée neutre diffère selon le combustible.
- du volume de fumée réellement produit : L'excès d'air de combustion augmente le volume de fumée.
- de l'élévation de la température des fumées: mesure de la température des fumées.

## Rendement de combustion sur PCI

Pour effectuer le calcul du pourcentage de pertes par les fumées, il sera nécessaire :

□ de mesurer :

- la température de l'air comburant au brûleur (temp air),
- la température des fumées à la buse sortie chaudière (temp fumées),
- le pourcentage de dioxyde de carbone des fumées sèches (% CO<sub>2</sub>),
- le pourcentage d'oxygène des fumées sèches (% O<sub>2</sub>).

□ de déterminer X<sub>a</sub> ou X'<sub>a</sub> en fonction du combustible utilisé,

□ d'utiliser les formules de Ser suivantes.

$$\text{Si l'on a mesuré le CO}_2: \text{ Pertes fumées} = X_a \frac{(T_{\text{fumées}} - T_{\text{air}})}{\% \text{ CO}_2}$$

$$\text{Si l'on a mesuré l'O}_2: \text{ Pertes fumées} = X'_a \frac{(T_{\text{fumées}} - T_{\text{air}})}{21 - \% \text{ O}_2}$$

## Rendement de combustion sur PCI

Valeurs usuelles de  $X_a$  et de  $X'_a$  (combustion neutre)

| Combustible        | $X_a$ | $X'_a$ |
|--------------------|-------|--------|
| 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   |

Valeurs de  $X_a$  pour différents excès d'air

| Combustible      | 10 %  | 20 %  | 30 %  |
|------------------|-------|-------|-------|
| Fioul lourd      | 0,640 | 0,621 | 0,615 |
| Fioul domestique | 0,585 | 0,565 | 0,558 |
| Butane/propane   | 0,530 | 0,519 | 0,510 |
| Gaz naturel      | 0,482 | 0,471 | 0,461 |

## Rendement de combustion sur PCI

### Exemple 1 :

Combustion oxydante de fioul domestique.

$CO_2 = 12,5 \%$ ,  $T_{air} = 20 \text{ }^\circ C$ ,  $T_{fumées} = 250 \text{ }^\circ C$

$$\eta_{PCI} = 100 - 0,57 \frac{(250 - 20)}{12,5} = \underline{89,5 \%}$$

### Exemple 2 :

Combustion oxydante de gaz naturel.

$O_2 = 3,5 \%$ ,  $T_{air} = 22 \text{ }^\circ C$ ,  $T_{fumées} = 210 \text{ }^\circ C$

$$\eta_{PCI} = 100 - 0,84 \frac{(210 - 22)}{(21 - 3,5)} = \underline{90,9 \%}$$

## Rendement de combustion des chaudières à condensation

### Une méthode :

- Calcul des pertes en chaleur sensible des fumées par mesure des températures et du  $\text{CO}_2$  ou de l' $\text{O}_2$ .
- Calcul du gain en chaleur latente par mesure des condensats.

$$\eta_{\text{PCI}} = (100 - \text{pertes fumées}) + \text{gain}$$

- Le calcul des pertes par fumées est celui utilisé pour les appareils classiques
- Pour le calcul du gain, il y aura besoin de mesurer :
  - le débit de condensats produits en kg/h (que nous appellerons « L »),
  - le débit de combustible en kg/h ou en  $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$  (que nous appellerons « Q »).

Le rapport  $L/Q$  représente la masse réelle de condensats récupérée par kg ou par  $\text{m}^3(\text{n})$  de combustible brûlé.

## Rendement de combustion des chaudières à condensation

Le pourcentage de gain maximal sur PCI est :

$$\% \text{ gain max} = \frac{(\text{PCS} - \text{PCI})}{\text{PCI}} \cdot 100$$

Le gain réalisé sur la chaleur latente dépend de  $L/Q$  réel, de  $L/Q$  max et du rapport  $\text{PCI}/\text{PCS}$  du combustible.

$$\text{gain} = 100 \cdot \left( \frac{\text{PCS}}{\text{PCI}} - 1 \right) \cdot \frac{L/Q \text{ réel}}{L/Q \text{ max}}$$

Les valeurs  $100 \cdot ((\text{PCS}/\text{PCI}) - 1)$  et  $L/Q \text{ max}$  dépendent de la teneur en hydrogène du combustible.

## Rendement de combustion des chaudières à condensation

| Combustible        | 100.((PCS/PCI)-1) | L/Q max                                  |
|--------------------|-------------------|--|
| GN Algérie         | 11,11             | 1,73 kg/m <sup>3</sup> (n)               |
| GN Russie          | 11,11             | 1,55 kg/m <sup>3</sup> (n)               |
| GN mer du nord     | 11,11             | 1,71 kg/m <sup>3</sup> (n)               |
| GN Groningue       | 12,36             | 1,40 kg/m <sup>3</sup> (n)               |
| Butane commercial  | 8,69              | 3,87 kg/m <sup>3</sup> (n)<br>1,49 kg/kg |
| Propane commercial | 8,69              | 3,03 kg/m <sup>3</sup> (n)<br>1,53 kg/kg |

## Rendement de combustion des chaudières à condensation

### Exercice :

Calculez le rendement de combustion PCS du cas suivant.

Une chaudière à condensation fonctionne au gaz d'Algérie.

|   |                    |
|---|--------------------|
| Température de l'air comburant              | 20 °C              |
| Température des fumées                      | 60 °C              |
| Teneur en O <sub>2</sub> des fumées sèches  | 4 %                |
| Volume de gaz lu au compteur en 2 minutes   | 1,5 m <sup>3</sup> |
| Température du gaz au compteur              | 15 °C              |
| Pression du gaz au compteur                 | 300 mbar           |
| Pression atmosphérique                      | 1 010 mbar         |
| Volume de condensats récupérés en 5 minutes | 4 litres           |

## Rendement de combustion des chaudières à condensation

### Pertes en chaleur sensible par les fumées :

$$0,84 \left( (60 - 20) / (21 - 4) \right) = \underline{1,97 \%}$$

### Débit de condensats récupérés :

$$L = (4 \text{ kg} \cdot 60 \text{ min/h}) / 5 \text{ min} = \underline{48 \text{ kg/h}}$$

### Débit de gaz lu au compteur :

$$(1,5 \text{ m}^3 \cdot 60 \text{ min/h}) / 2 \text{ min} = \underline{45 \text{ m}^3/\text{h}}$$

### Débit normal de gaz :

$$Q = (45 \cdot 1310 \cdot 273) / (1013 \cdot 288) = \underline{55,16 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h}}$$

### Rapport L/Q réel :

$$48 \text{ kg/h} / 55,16 \text{ m}^3(\text{n})/\text{h} = \underline{0,87 \text{ kg/ m}^3(\text{n})}$$

### Gain sur chaleur latente :

$$\text{Gain} = 11,11 \% \cdot (0,87 \text{ kg/ m}^3(\text{n}) / 1,73 \text{ kg/ m}^3(\text{n})) = \underline{5,59 \%}$$

### Rendement de combustion sur PCI :

$$(100 - 1,97) + 5,59 = \underline{103,62 \%}$$

### Rendement de combustion sur PCS :

$$103,62 \% \cdot 0,9 = \underline{93,26 \%}$$

## Le rendement de combustion : la formule de Seigert

Le rendement de combustion est déterminé à l'aide de la formule de Seigert :

$$\text{Rendement (\%)} = 100 - \left( \frac{K \times \Delta T}{\% \text{ CO}_2} \right) + C$$

| Type de combustible | K    | C   | unités         | MJ/unité |
|---------------------|------|-----|----------------|----------|
| Mazout n°2          | 0,56 | 6,5 | littres        | 38,7     |
| Charbon             | 0,63 | 5   | tonnes         | 30,0     |
| Gaz naturel         | 0,38 | 11  | m <sup>3</sup> | 37,6     |

### Autre définition du rendement de la combustion :

$$R = 100 - (P'_f + P'_i + P'_r)$$

P'<sub>f</sub> : les pertes par les fumées

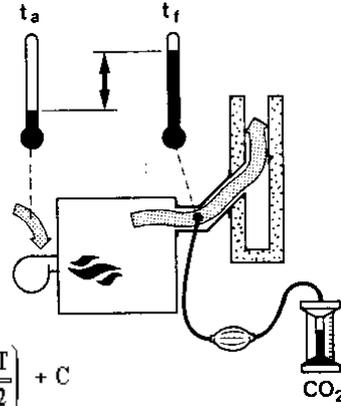
P'<sub>i</sub> : les pertes par les imbrûlés dans les résidus solides

P'<sub>r</sub> : les pertes vers l'extérieur par rayonnement et convection

## Rendement de combustion : Mesures pratiques



|           |         |
|-----------|---------|
| T. Air    | 21 °C   |
| T. Gaz    | 240 °C  |
| I. Chaud. | 70 °L   |
| O2        | 6,8 %   |
| LU        | 182 ppm |
| CO2       | 6,9 %   |
| Rend.     | 88,1 %  |
| Perles    | 11,6 %  |
| F. air    | 1,18    |
| F. l.     | 0,19 l  |



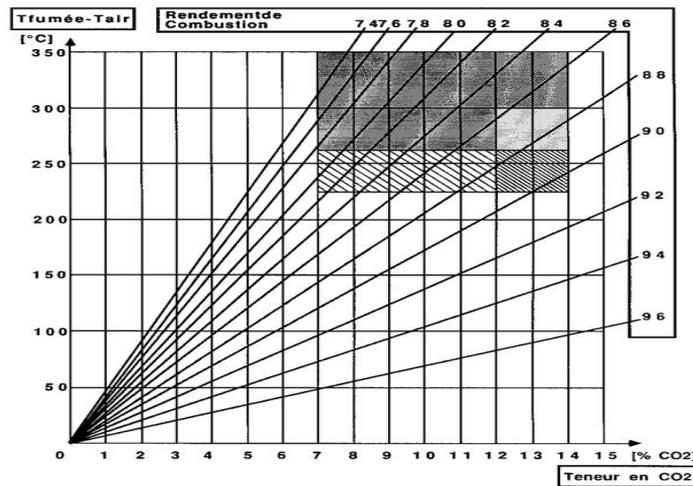
$$\text{Rendement (\%)} = 100 - \left( \frac{K \times \Delta T}{\% \text{ CO}_2} \right) + C$$

| Type de combustible | K    | C   | unités | MJ/unité |
|---------------------|------|-----|--------|----------|
| Mazout n°2          | 0,56 | 6,5 | litres | 38,7     |
| Charbon             | 0,63 | 5   | tonnes | 30,0     |
| Gaz naturel         | 0,38 | 11  | m³     | 37,6     |

## Abaque pour estimation du rendement de combustion

### RENDEMENT DE COMBUSTION D'UNE CHAUDIERE A VAPEUR OU A EAU SURCHAUFFEE A 200°C (MAZOUT)

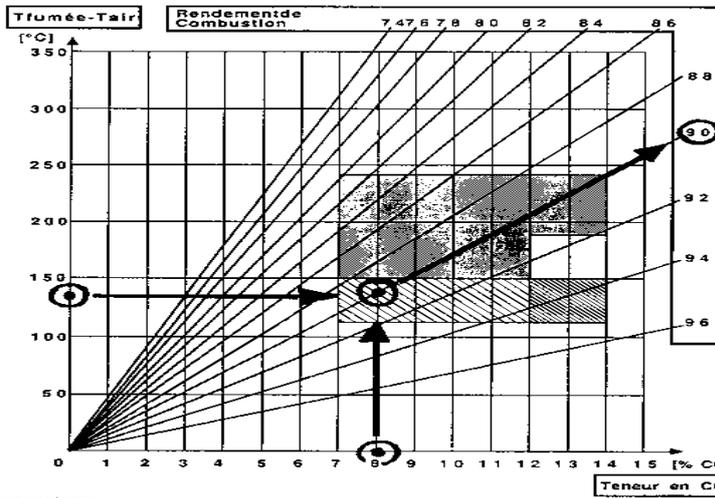
- Mauvais rendement dû à la trop haute température des gaz de fumée
- Acceptable mais peut être amélioré
- Assez bon mais l'excès d'air peut être réduit
- Bon



## Exemple : Rendement de combustion

### RENDEMENT DE COMBUSTION D'UNE CHAUDIERE FONCTIONNANT A 80°C (MAZOUT)

-  Mauvais rendement dû à la trop haute température des gaz de fumée
-  Acceptable mais peut être amélioré
-  Assez bon mais l'excès d'air peut être réduit
-  Bon



## En Conclusion

Température de fumée :

- ce paramètre dépend de la technologie de la chaudière et des allures de la combustion.
- En général, on note la température de fumée dans le journal de la chaudière comme valeur comparative, si la **température d'une chaudière monte** au cours du temps avec le même réglage, même allure et même excès d'air, on peut penser à un **encrassement des tubes de la chaudière** par le tartre, les sels ou le noir de carbone. **Cet encrassement réduit l'échange thermique** entre l'eau et la fumée, la température de fumée monte et le rendement de la combustion chute.

## En Conclusion

---

### Concentration en oxygène et excès d'air :

l'**excès d'air** est nécessaire pour obtenir une réaction combustion complète du carburant, en même temps l'air qui est injecté dans le foyer d'une chaudière ne contribuant pas à la combustion, **réduit le rendement** parce qu'il entre à la température ambiante, il s'échauffe et sort à la température de fumée.

### La valeur type de l'excès d'air :

dépend du type de combustible et de sa pulvérisation, à titre indicatif, il est conseillé d'avoir un excès d'air **inférieur à 15% pour les combustibles gazeux**, 25% pour les combustibles liquides claires, et **40% d'excès d'air pour le fioul et les combustibles solides**.

### Pour augmenter ou réduire l'excès d'air :

dans une chaudière, on agit sur les volets d'air du brûleur ou sur le débit de carburant.

## En Conclusion

---

### Concentration en CO :

- Le CO se produit surtout lorsqu'il n'y a pas **suffisamment d'excès d'air**.
- Au cas où on a en même temps un **excès d'air** et une **forte concentration en CO**, il faut revoir la pulvérisation du carburant et le mécanisme de mélange air carburant du brûleur.

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### Préchauffage de l'air de combustion

### Préchauffage de l'air de combustion

---

- On essaie d'exploiter des rejets de chaleur (fréquents sur une installation de vapeur) pour préchauffer l'air de combustion et ainsi améliorer le rendement de la chaudière
- Pour un préchauffage de 5°C
  - **Économies env. 0,5%**
  - Soit 18 000 euro/an
  - Réduction de la consommation d'énergie 3 200 GJ/an (890 MWh/an)
  - Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> 180 Tonne/an

## Préchauffe de l'air de combustion

Le préchauffage de l'air comburant par récupération de la chaleur des fumées constitue un moyen pour augmenter le rendement de combustion.



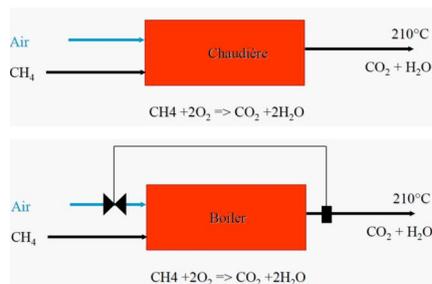
Préchauffe de l'air de combustion: Economie de l'ordre 0,5% (Assez faible)

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### Régulation de l'air de combustion

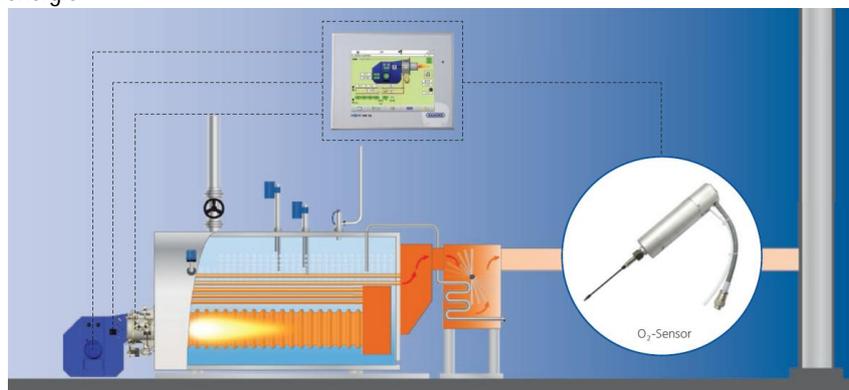
## Régulation de l'air entrant (combustion)

- Constats :
  - La masse volumique de l'air change avec les conditions météo
  - La pression du gaz peut changer
  - Le PCI du gaz change selon ses origines
- La mise en place d'une régulation de l'air entrant permet d'optimiser le rendement de combustion de manière automatique et continue
  - Économies env. 3%
  - Soit 94 000 euro/an
  - Investissements max. 150 000 euro
  - ROI < 2 ans



## Régulation de l'air de combustion

La régulation électronique d'O<sub>2</sub> vise essentiellement à compenser les paramètres de perturbation ayant un impact sur le processus de combustion qui joue sur la consommation du gaz ou sur la consommation de fuel et donc sur les économies d'énergie.



## Variation de la vitesse

### Variateur de vitesse

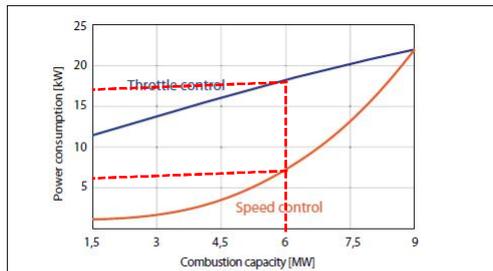
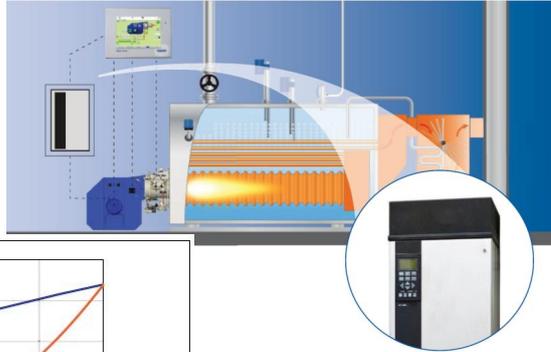
Sans variateur de vitesse, les ventilateurs d'air de combustion tournent toujours à plein régime, même lorsque le brûleur fonctionne à petite charge. **Consomme une grande quantité d'énergie électrique.**

Si des installations de combustion fonctionnent à charge partielle ou à petite charge, un variateur de vitesse peut avoir ses atouts : il réduit la vitesse de rotation du ventilateur d'air de combustion lorsque le brûleur ne nécessite pas le débit d'air max : **économiser de l'énergie.**



## Variateur de vitesse : Exemple

Soit une chaudière avec un brûleur à gaz de puissance 10 MW.



The advantage in efficiency becomes particularly evident in the lower capacity range

**Exemple :**  
 Sans variateur : 17kW  
 Avec Variateur : 6 kW  
 Gain : 65%



Chambre Turiso-Allemande de l'Industrie et du Commerce

**giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

## Variateur de vitesse : Exemple

### Example calculation for payback with a typical 10 MW gas burner and speed control

| Burner output<br>MW | Operating hours<br>h/a | Saving*       |              |
|---------------------|------------------------|---------------|--------------|
|                     |                        | Energy kWh/a  | Costs EUR/a  |
| 9.0                 | 500                    | 3.850         | 2.738        |
| 7.2                 | 1,000                  | 11.000        | 3.601        |
| 5.4                 | 1,500                  | 19.470        | 2.294        |
| 3.6                 | 2,000                  | 25.080        | 913          |
| 1.8                 | 1,500                  | 15.510        | 192          |
| <b>Amount</b>       | <b>6,500</b>           | <b>74.910</b> | <b>9.738</b> |

For further information, please visit: [www.saacke.com](http://www.saacke.com)



**AHK** Deutsch-Tunesische Industrie- und Handelskammer  
 اتحاد الصناعة والتجارة الألمانية التونسية  
 Chambre Turiso-Allemande de l'Industrie et du Commerce

**giz** Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

## Les Brûleurs

## Les Brûleurs

### Brûleur haut rendement micro-modulant

Comparée à un brûleur 2 débits ou faiblement modulant, l'utilisation d'un brûleur haut rendement micro-modulant représente un gain de rendement moyen de l'ordre de :

- 2% avec une régulation d'O<sub>2</sub>
- 2,4% avec une régulation combinée O<sub>2</sub> / CO



Ces chiffres sont néanmoins très variable en fonction de l'utilisation de la chaudière :

- plus le fréquence d'arrêt/redémarrage sera élevée
- plus la charge moyenne sera faible,
- plus le brûleur remplacé sera de technologie ancienne,
- plus le gain de rendement moyen sera élevé,

## Les pertes par les fumées

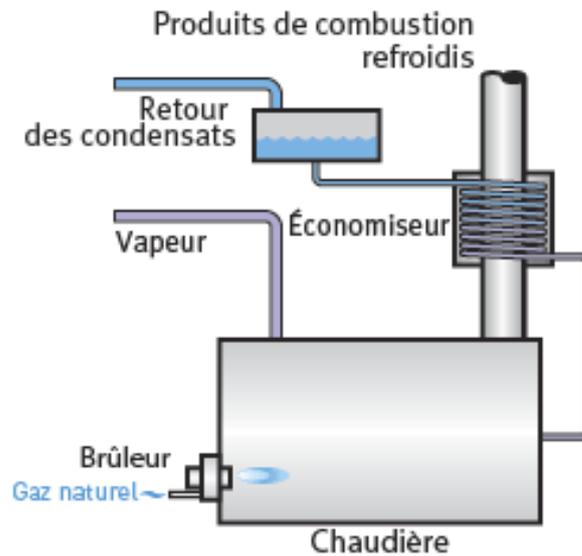
### Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

- Un économiseur de chaleur de cheminée est un échangeur de chaleur air-eau conçu pour utiliser la chaleur des gaz de combustion chauds d'une chaudière afin de préchauffer de l'eau.
- Depuis de nombreuses décennies, les économiseurs sont utilisés sur les chaudières à vapeur pour préchauffer l'eau d'alimentation de la chaudière en utilisant la chaleur récupérée de la cheminée.



Economiseur sur chaudière à production instantanée

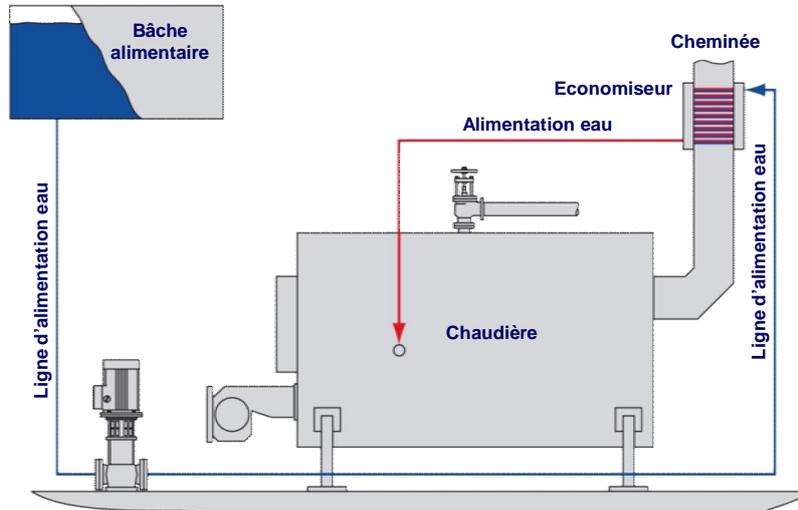
## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées



## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

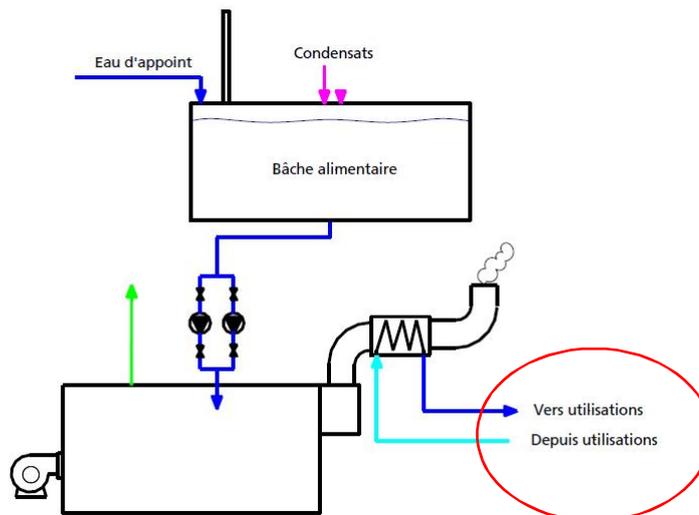
- Les économies d'énergie réelles générées par un économiseur proviennent de la chute de température des gaz de combustion circulant dans l'économiseur, multipliée par leur débit massique.
- La température des gaz de combustion d'une chaudière classique sans condensation est de 170 °C.
- Un économiseur de taille appropriée fera chuter la température des gaz de combustion d'environ 30 °C en transférant la chaleur absorbée dans l'eau en circulation.
- L'économiseur peut faire passer le rendement thermique saisonnier réel de ces chaudières de moins de 85% à près de 90%.
- Soit une économie de 5 à 6 %

## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées



Economiseur sur chaudière à tubes de fumée : 5 à 6% de gain en combustible

## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées



## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

L'étape d'identification des rejets relatives à **la source de chaleur** :

- Les flux de chaleur mis en jeu : puissances, débits
- Les températures disponibles
- Le régime d'émission des rejets (continu ou intermittent)
- La nature des rejets liquides et leurs propriétés (état gazeux, liquide ou diphasique, pression, propriétés thermocinétiques)
- Les caractéristiques des effluents (corrosivité, encrassement, etc.)
- Le lieu de disponibilité et le positionnement de la source de chaleur sur le site industriel
- Les données géométriques (distances, etc) entre le rejet et le besoin

## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

Les informations relatives à l'environnement du **site de production** :

- La présence d'autres sites de production à proximité, les besoins de ces sites en sources de chaleur et les niveaux de températures requis
- Les données géographiques
- Les données climatiques



## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

Critères de sélection d'un économiseur des fumées

- Puissance de la chaudière
- Consommation énergétique de la chaudière
- Charges minimale, moyenne et maximale de la chaudière, pression de la vapeur
- Température et pourcentage d'oxygène des fumées aux différentes charges
- Dimension et hauteur de la cheminée, pression des fumées
- Diamètre de la tuyauterie et pression d'eau d'alimentation
- Température de l'eau d'alimentation
- Accès pour l'inspection et l'entretien
- Poids de l'économiseur
- Combustible d'appoint
- Conception pour prévenir la corrosion avec contrôle de la température de l'eau d'alimentation et des fumées.

## Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

Points de rosée en combustion stœchiométrique avec de l'air sec.

|                    |                      |        |
|--------------------|----------------------|--------|
| Gaz naturel        |                      | 59 °C  |
| Butane commercial  |                      | 53 °C  |
| Propane commercial |                      | 54 °C  |
| Fioul domestique   | Point de rosée eau   | 50 °C  |
|                    | Point de rosée acide | 120 °C |
| Fioul lourd        | Point de rosée eau   | 50 °C  |
|                    | Point de rosée acide | 130 °C |



## Les pertes par les fumées : Exemple

|  |        |            |
|--|--------|------------|
| Puissance entrée chaudière                 | 9,66   | MW         |
| T° fumées à grande flamme                  | 208    | °C         |
| T° fumées à petite flamme                  | 185,8  | °C         |
| Rendement moyen sans économiseur           | 90,05% |            |
| T° fumées avec économiseur à grande flamme | 130    | °C         |
| Rendement moyen avec économiseur           | 94,19% |            |
| Economie gaz                               | 810    | MWh PCI/an |

Installation d'un économiseur :  
Economies de combustible  
jusque 5,5 %



## Les pertes par les fumées : Application Pratique



## Optimisations d'une installation de production/distribution de vapeur

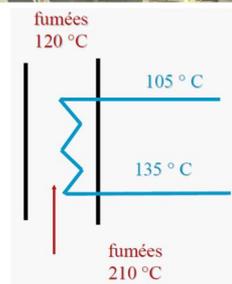
### Exemple :

- Caractéristiques de l'usine :
  - Consommation 25 Tonne/h
  - 8000 h/an
  - Énergie 628000 GJ/an, soit 174 444 MWh/an
  - Coûts env. 3 340 000 euro/an



## Installation d'un économiseur

- **Économies env. 4%**
- Soit 125 000 euro/an
- Investissements max. 50 000 euro
- **ROI < 6 mois**
- Réduction de la consommation d'énergie 25000 GJ/an (7000 MWh/an)
- Réduction des émissions de CO2 1400 Tonne/an

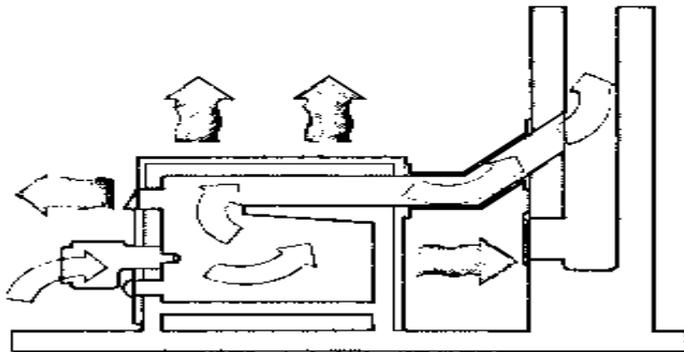


## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### Les pertes de maintien

### Les pertes de maintien / Pertes par l'ambiance

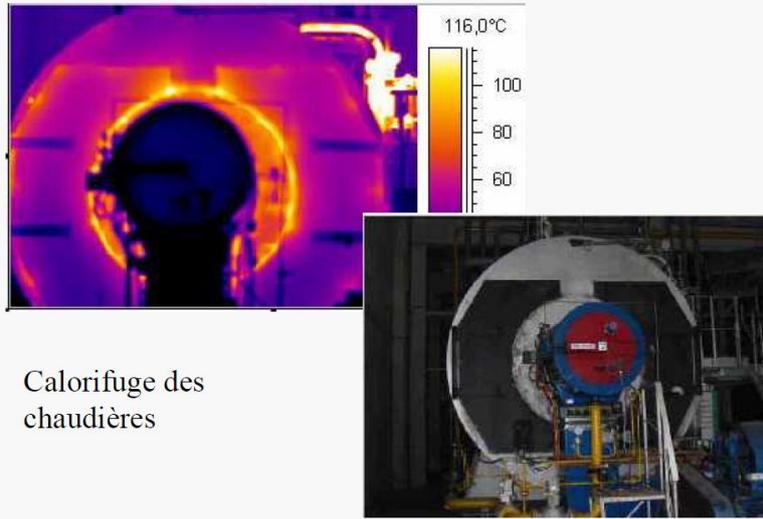
#### Les pertes pour le maintien en température



Les pertes annuelles pour le maintien en température sont influencées essentiellement par le dimensionnement de la chaudière. Pour des chaudières anciennes de petit modèle, elles se situent entre 2 et 5% de leur puissance nominale; par contre, par rapport à la consommation de mazout, ces pertes sont annuellement les suivantes:

- chaudière bien dimensionnée: 4 à 10%
- chaudière deux fois trop grande: 8 à 20%
- chaudière trois fois trop grande: 12 à 30%

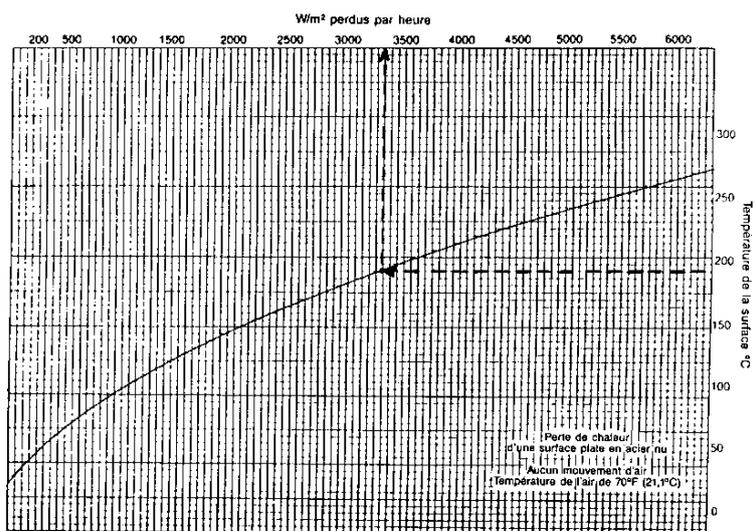
## Exemple de diagnostic par thermographie



Calorifuge des chaudières

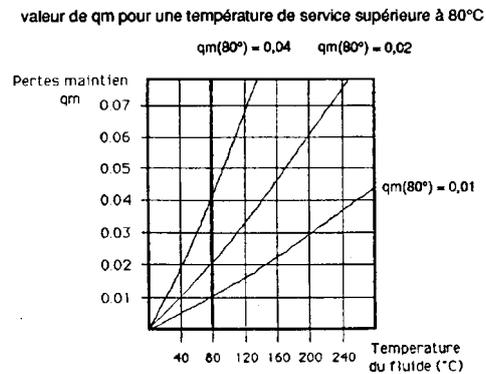
## Les pertes de maintien

Abaque pour estimation des pertes de surfaces **non-isolées**  
 (par exemple portillon de visite sur une chaudière)



## Abaque pour estimation des pertes de maintien

- Estimation des pertes de maintien
  - Anciennes chaudières en fonte mal isolées
    - Puissances <100kW  $\Rightarrow q_m(80) = 0,04$
    - Puissances >100kW  $\Rightarrow q_m(80) = 0,03$
  - Chaudières à surpression mal isolées
    - $q_m(80) = 0,02$
  - Chaudières modernes, bien isolées
    - $q_m(80) = 0,01$



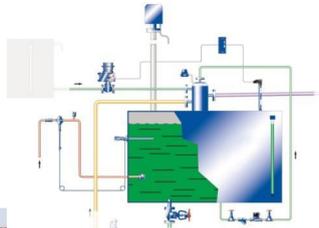
## Rendements

Différents rendements sont définis selon les pertes considérées :

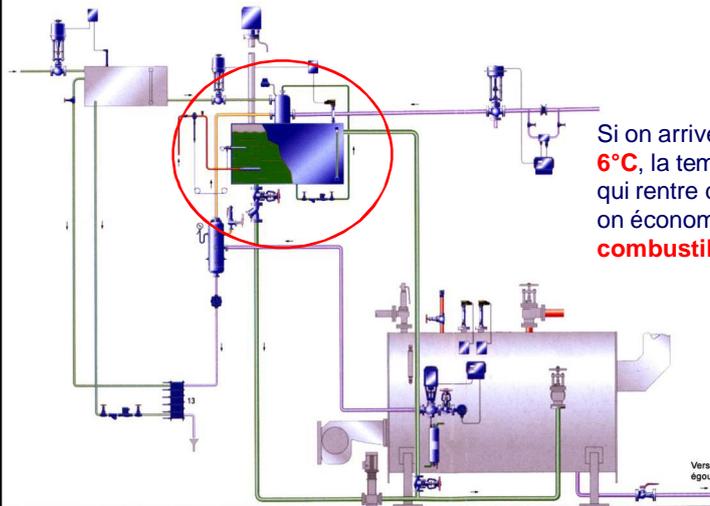
- **Le rendement de combustion** qui tient compte des pertes par les fumées, chaleur sensible et imbrûlés.
- **Le rendement instantané de la chaudière** qui considère en plus les pertes par rayonnement de la chaudière.
- **Le rendement annuel** qui tient compte aussi du fonctionnement intermittent et des pertes de maintien en température de la chaudière en attente.

## LA PRODUCTION DE VAPEUR

### La bête alimentaire - Stockage

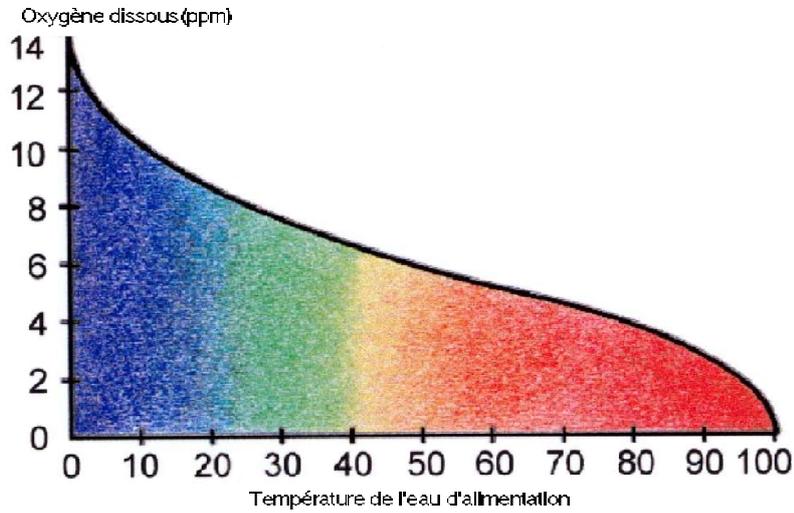


## Gain énergétique



Si on arrive à augmenter de **6°C**, la température de l'eau qui rentre dans la chaudière, on économise **1% de combustible**

## Réchauffage de la bache alimentaire

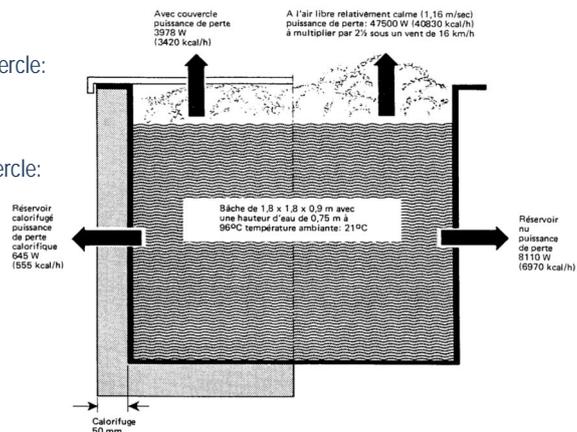


## Pertes thermiques et de vapeur

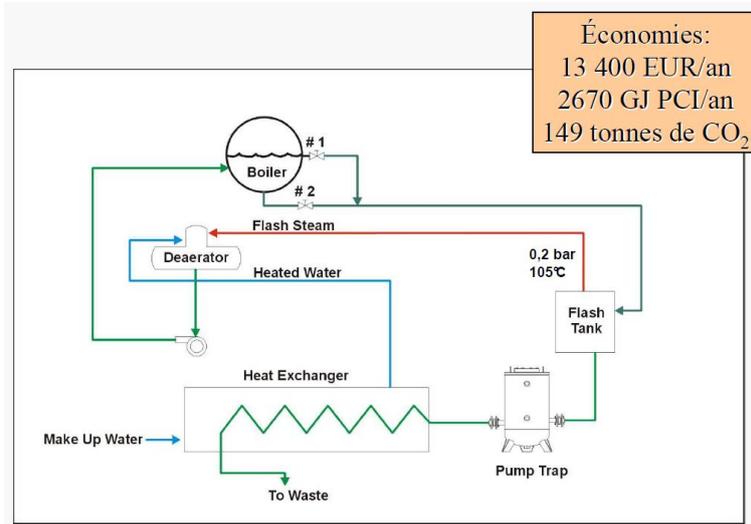
- Exemple de pertes pour une bache alimentaire

– Total sans isolation, ni couvercle:  
55,6 [kW] - 100%

– Total avec isolation et couvercle:  
4,6 [kW] - 8.2%



## Principe et résultats du système : Economies env. 0.5 % sur le gaz

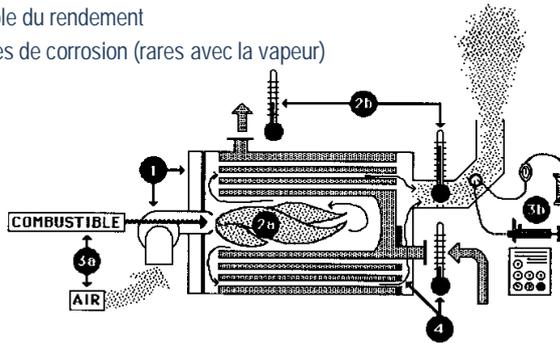


## Résumé des économies possibles en chaufferie : Production

- Installation d'un économiseur : 4 % gaz
- Régulation de la quantité d'air entrant : 3 % sur le gaz
- Préchauffer l'air de combustion : 0.5 % sur le gaz
- Réduire la purge : 1.2 % sur le gaz
- Revaporiser la purge : 0.5 % sur le gaz
- TOTAL : 9 % d'économie sur le gaz

## Production de chaleur

- Conditions idéales de fonctionnement d'une chaudière
  - 1) Puissance adaptée
  - 2a) Réglage de la flamme correct
  - 2b) Température des gaz brûlés
  - 3a) Brûleur réglé soigneusement
  - 3b) Contrôle du rendement
  - 4) Risques de corrosion (rares avec la vapeur)



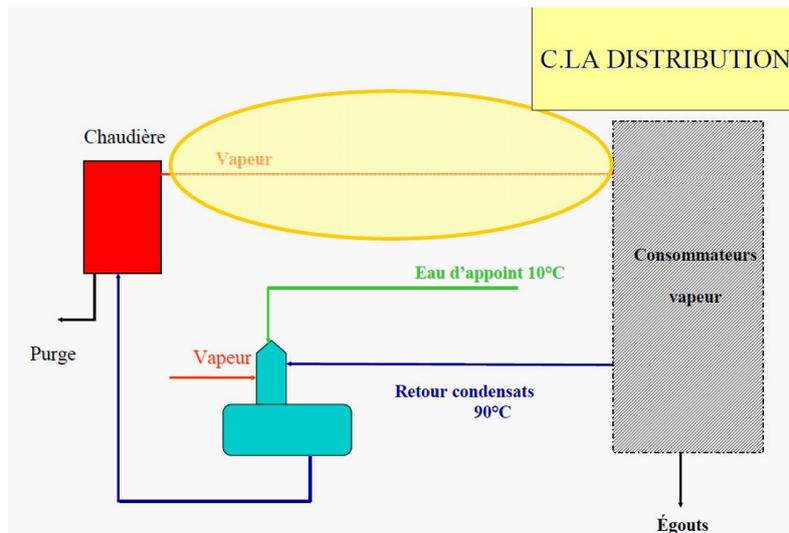
## Exploitation optimale de la production de vapeur

- Contrôles et modifications de l'exploitation
  - Vérifier régulièrement la température des gaz de fumée et les comparer chaque semaine à vos valeurs
  - Vérifier à différentes heures d'une journée la pression de vapeur à la chaudière
  - Contrôler périodiquement si le niveau d'eau dans la chaudière est stable
  - Effectuer régulièrement les procédures relatives au traitement d'eau
  - Contrôler la fréquence des purges d'ébouage de la chaudière
  - Essayer de réduire les variations de charge et planifier s'il y a lieu la demande pour maximiser le rendement de la chaudière
  - Fonctionner à la pression de vapeur la plus basse répondant aux exigences des utilisateurs (jour, nuit, week-end)
  - S'assurer que la qualité de vapeur convient aux utilisateurs
  - Arrêt des équipements non utilisés

# LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

Production de la Vapeur

## Optimisation de la boucle vapeur : Distribution



## LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

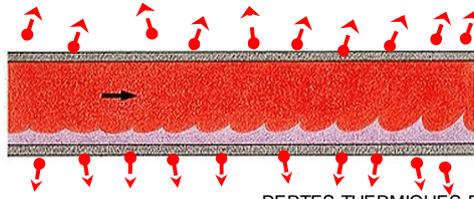
### Les pertes thermiques sur les conduites

## Réduire les pertes thermiques en ligne

- Détection et réparation les fuites de vapeur qui représentent une perte pure
  - On répare les joints ou presse-étoupe qui fuient
  - Etc.
- Détection et élimination les pertes thermiques de la distribution
  - Isolation des parties non-isolées
  - Renforcement/Réparation de l'isolation si nécessaire
  - L'identification de ces pertes peut se faire si nécessaire par thermographie...
  - ...mais le plus souvent un simple contrôle visuel suffit !



## Réduire les pertes thermiques en ligne

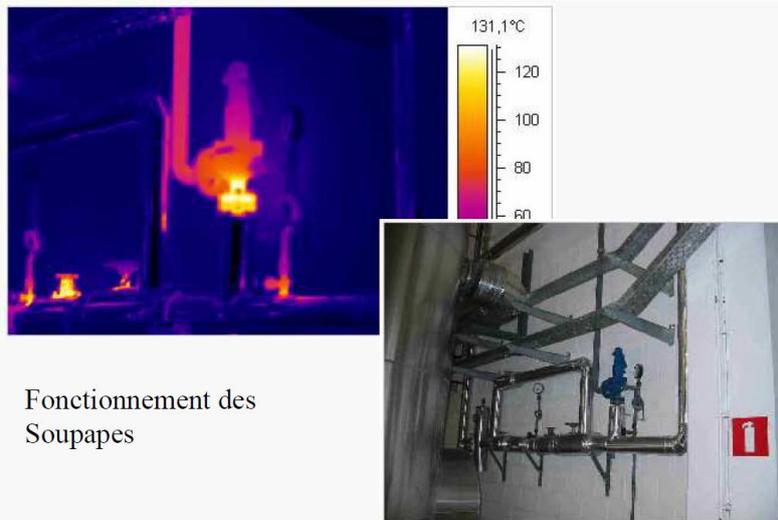


| Diamètre      | Surface par mètre |
|---------------|-------------------|
| 50 (50/60)    | 0,188             |
| 100 (102/114) | 0,356             |

PERTES THERMIQUES DES APPAREILS

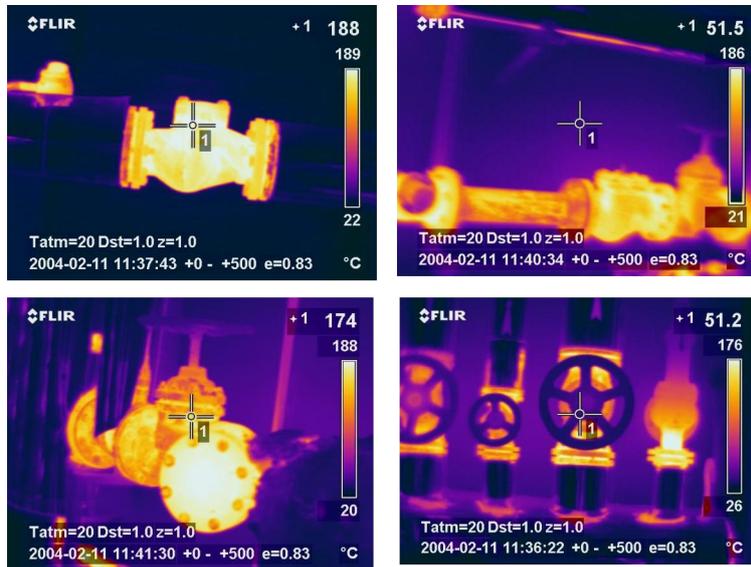
| Différence de température<br>Vapeur/air<br>°C | Diamètre DN (mm) |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|   | 15               | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80   | 100   | 150   |
|   | W                |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 56  | 540              | 650  | 790  | 1030 | 1080 | 1320 | 1550 | 1880 | 2330  | 3240  |
| 67  | 680              | 820  | 1000 | 1220 | 1360 | 1680 | 1980 | 2360 | 2960  | 4100  |
| 78  | 830              | 1000 | 1220 | 1490 | 1660 | 2030 | 2410 | 2980 | 3600  | 5000  |
| 89  | 990              | 1200 | 1460 | 1790 | 2050 | 2460 | 2890 | 3460 | 4340  | 6010  |
| 100   | 1160             | 1400 | 1690 | 2080 | 2340 | 2850 | 3370 | 4000 | 5010  | 6960  |
| 111   | 1340             | 1640 | 1980 | 2410 | 2710 | 3340 | 3920 | 4690 | 5980  | 8160  |
| 125   | 1590             | 1910 | 2330 | 2850 | 3210 | 3940 | 4640 | 5550 | 6980  | 9690  |
| 139   | 1840             | 2240 | 2720 | 3330 | 3730 | 4580 | 5400 | 6220 | 8150  | 11330 |
| 153   | 2100             | 2550 | 3120 | 3820 | 4290 | 5280 | 6230 | 7470 | 9390  | 13050 |
| 167   | 2410             | 2920 | 3570 | 4370 | 4890 | 6020 | 7130 | 8380 | 10930 | 14920 |
| 180   | 2740             | 3290 | 4080 | 4940 | 5560 | 6760 | 8080 | 9590 | 11900 | 16600 |

## Exemple de diagnostic par thermographie



Fonctionnement des Soupapes

## Exemple de diagnostic par thermographie



## Abaque pour estimation des pertes des conduites non-isolées

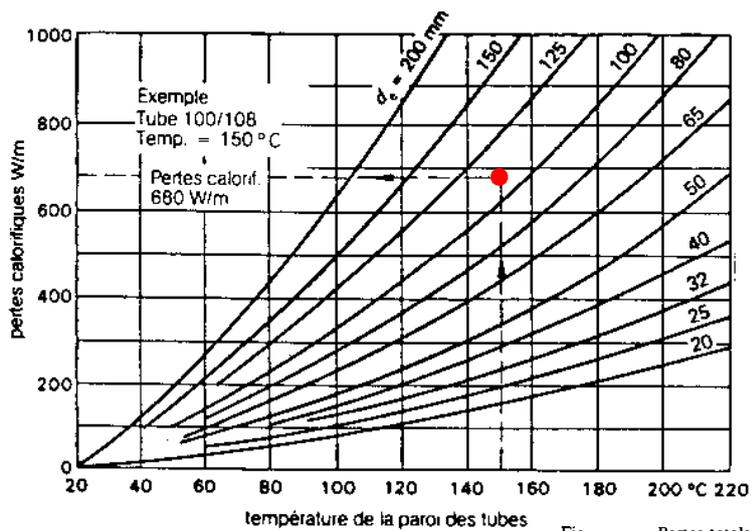
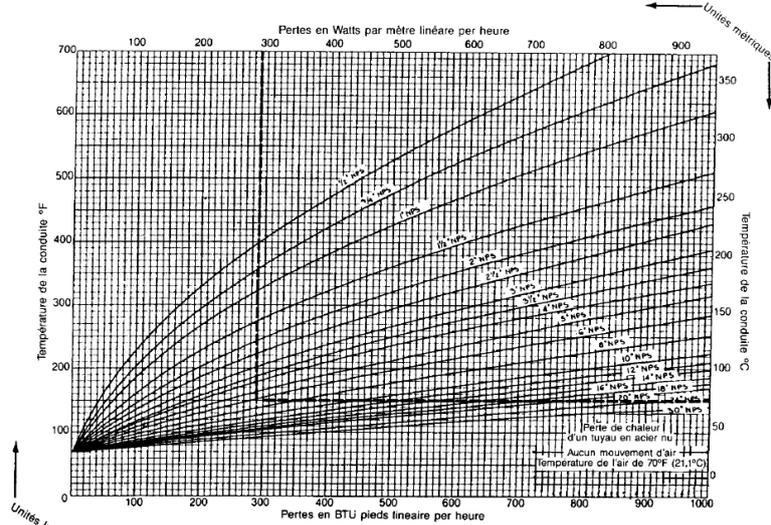


Fig. Pertes totales d'une conduite non isolée en air calme à 20 °C (coefficient de rayonnement  $C=4,65 \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ).

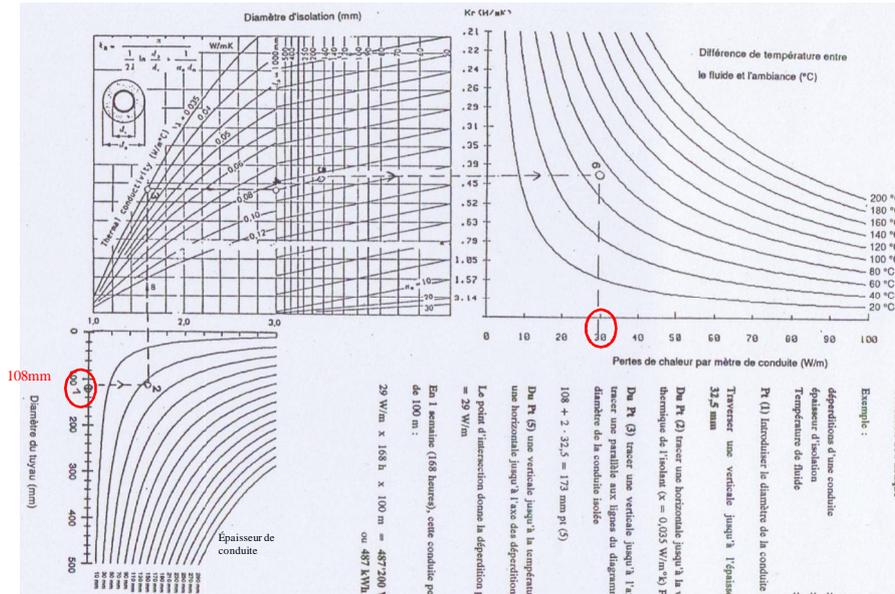
## Abaque pour estimation des pertes des conduites non-isolées

### PERTE DE CHALEUR D'UN TUYAU EN ACIER NU

TABLE 6



## Abaque pour estimation des pertes des conduites isolées



## Pertes thermiques des conduites : méthode de calcul

### Isolation de la tuyauterie

Entreprise: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

Endroit: \_\_\_\_\_ Par: \_\_\_\_\_

Pression de la vapeur = \_\_\_\_\_ kPa(eff.) (1)

Diamètre du tuyau = \_\_\_\_\_ (2)

Perte de chaleur des tuyaux nus = \_\_\_\_\_ Wh/(m·h) (3)

Longueur du tuyau = \_\_\_\_\_ m (4)

Perte de chaleur des tuyaux isolés  
(données du fabricant d'isolants) = \_\_\_\_\_ Wh/(m·h) (5)

Temps de service total = \_\_\_\_\_ h/an (6)

Chaleur latente de la vapeur à la pression  
(1) (Tableau de vapeur) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (7)

Coût de la vapeur = \_\_\_\_\_ D / 1 000 kg (8)

Perte d'énergie des tuyaux nus  
= (3) x (4) x (6) = \_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ Wh/an (9)

## Pertes thermiques des conduites : méthode de calcul

Perte d'énergie des tuyaux isolés  
= (5) x (4) x (6) = \_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_ x \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ Wh/an (10)

Économie totale d'énergie = (9) - (10)  
= \_\_\_\_\_ Wh/an x 36 = \_\_\_\_\_ kJ/an (11)

Économie totale de vapeur =  $\frac{(11)}{(7)}$  = \_\_\_\_\_ = \_\_\_\_\_ kg/an (12)

Économie d'énergie =  $\frac{(12) \times (8)}{1\ 000}$   
=  $\frac{\text{_____} \times \text{_____}}{1\ 000}$  = \_\_\_\_\_ D/an (13)

Mise de fonds = \_\_\_\_\_ D/an (14)

Période de rentabilité =  $\frac{(14)}{(13)}$  = \_\_\_\_\_ an(s) (15)

## Pertes Thermiques par des appareils

### Il y a deux manières de minimiser les pertes

- Il faut calorifuger



- Il faut réduire la taille des composants afin que leurs surfaces de déperdition thermique soient le plus petites possible (et les calorifuger, mais à partir d'une certaine taille, le calorifugeage n'est plus économiquement rentable)

### Conséquences financières des pertes thermiques :

Prix de la surconsommation :

$$P_s = \frac{E \times 3,6 \times H \times J}{Ent \times 1000} \times P_v$$

Energie dissipée par appareil : E  
 Nb de jours travaillés /an : J  
 Nb d'heures par jour travaillé : H  
 Prix de la tonne Vapeur : P<sub>v</sub>  
 Enthalpie de vaporisation : Ent

## Pertes Thermiques : Robinet

TABLEAU D'EQUIVALENCE DE SURFACES  
 ROBINET / TUYAUTERIE NUE

| DN (mm) | Équivalence en m linéaire |
|---------|---------------------------|
| 15      | 1,39                      |
| 20      | 1,35                      |
| 25      | 1,25                      |
| 32      | 1,39                      |
| 40      | 1,38                      |
| 50      | 1,37                      |
| 65      | 1,50                      |
| 80      | 1,50                      |
| 100     | 1,55                      |
| 125     | 1,66                      |
| 150     | 1,75                      |
| 200     | 2,14                      |
| 250     | 2,42                      |
| 300     | 2,69                      |
| 350     | 3,09                      |
| 400     | 3,43                      |

(source : Carbone+)

## Pertes Thermiques

Robinet de départ DN 100



### Conséquences financières :

|                                |     |                 |               |
|--------------------------------|-----|-----------------|---------------|
| Energie dissipée par appareil  | E   | 10930           | W             |
| Nb de jours travaillés /an     | J   | 300             | j             |
| Nb d'heures par jour travaillé | H   | 16              | h             |
| Prix de la tonne Vapeur        | Pv  | 30              | DT /tonne     |
| Enthalpie de vaporisation      | Ent | 2000            | kJ/Kg         |
| Prix de la surconsommation     | Ps  | <b>2 833,06</b> | <b>DT /an</b> |

#### PERTES THERMIQUES DES APPAREILS

| Différence de température<br>Vapeur/air<br>°C | Taille des appareils<br>W |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|---|---------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|   | 15                        | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65   | 80    | 100   | 150   |
| 56  | 540                       | 650  | 790  | 1030 | 1080 | 1320 | 1550 | 1880  | 2380  | 3240  |
| 67  | 680                       | 820  | 1000 | 1220 | 1360 | 1680 | 1980 | 2360  | 2960  | 4100  |
| 78  | 830                       | 1000 | 1220 | 1490 | 1660 | 2030 | 2410 | 2980  | 3600  | 5000  |
| 89  | 990                       | 1200 | 1460 | 1790 | 2050 | 2460 | 2890 | 3460  | 4340  | 6010  |
| 100   | 1160                      | 1400 | 1690 | 2080 | 2340 | 2850 | 3370 | 4000  | 5010  | 6960  |
| 111   | 1340                      | 1640 | 1980 | 2410 | 2710 | 3340 | 3920 | 4690  | 5880  | 8160  |
| 125   | 1590                      | 1910 | 2330 | 2850 | 3210 | 3940 | 4640 | 5550  | 6980  | 9690  |
| 139   | 1840                      | 2240 | 2720 | 3330 | 3730 | 4580 | 5400 | 6220  | 8160  | 11330 |
| 153   | 2100                      | 2550 | 3120 | 3820 | 4290 | 5280 | 6230 | 7470  | 9390  | 13050 |
| 167   | 2410                      | 2920 | 3570 | 4370 | 4990 | 6020 | 7130 | 8500  | 10930 | 14920 |
| 180   | 2740                      | 3290 | 4080 | 4940 | 5560 | 6760 | 8080 | 9590  | 11900 | 16600 |
| 194   | 3090                      | 3720 | 4610 | 5660 | 634  | 7580 | 9090 | 10800 | 13030 | 18520 |

## LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

### Les déperditions thermiques et les condensats

## Les déperditions thermiques et les condensats

- Le transport de vapeur d'eau saturée dans les canalisations donne lieu à des déperditions thermiques qui se traduisent par la formation de condensats.
- le débit  $q$  de condensats dû aux déperditions thermiques est donné par :

$$q \text{ (kg/s)} = \frac{C}{r}$$

$C$  : pertes thermiques en kW

$r$  : chaleur latente de vaporisation kJ / kg.

## LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

### Les Fuites de vapeur

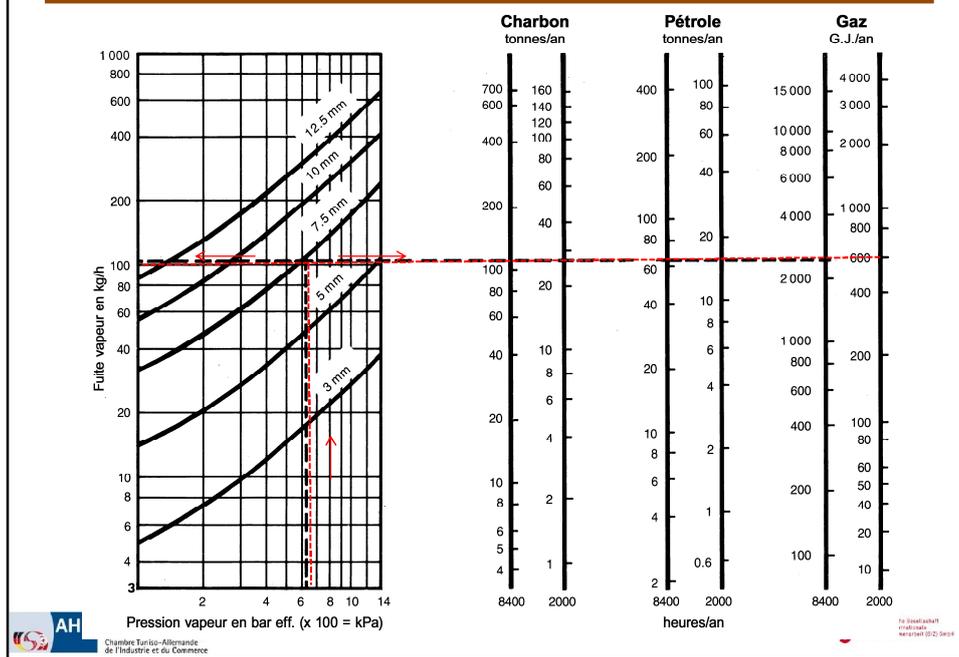
## Fuites de vapeur



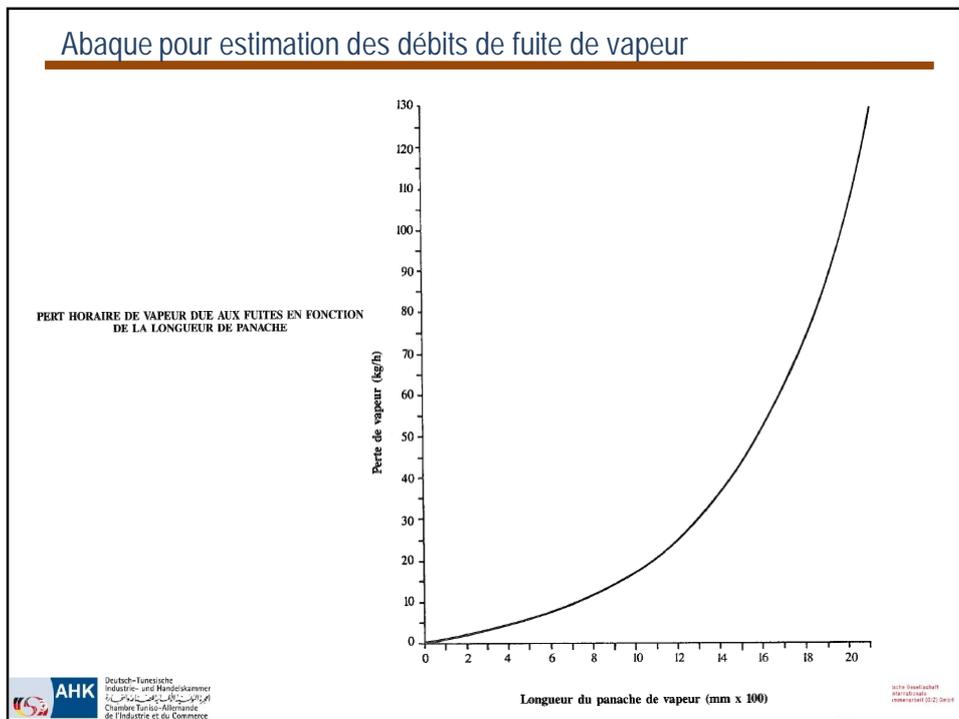
## Exemple de diagnostic par thermographie



## Abaque pour estimation des débits de fuite de vapeur



## Abaque pour estimation des débits de fuite de vapeur



## Exemple de coûts de fuites de vapeur

- Exemple : fuite à un presse-étoupe d'une vanne :
  - Diamètre fuite estimé : 3 mm
  - Pression vapeur : 6 bars
  - Débit fuite horaire : 17 kg / h
  - Débit annuel (8760 h) : 147 900 kg / an ce qui représente 11 tonnes de mazout/an

### • Comment estimer le taux de fuite d'un purgeur

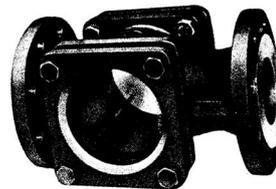
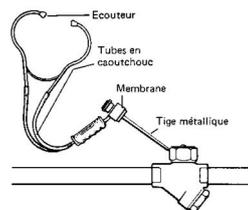
| DN du DN moyen<br>purgeur du siège | Perte de vapeur (kg/h) |            |            |
|------------------------------------|------------------------|------------|------------|
|                                    | 6 bar eff              | 14 bar eff | 32 bar eff |
| DN 15 3,0 mm                       | 17                     | 38         | 86         |
| DN 20 5,0 mm                       | 48                     | 107        | 239        |
| DN 25 7,5 mm                       | 110                    | 242        | 539        |
| DN 40 10,0 mm                      | 195                    | 429        | 956        |
| DN 50 12,5 mm                      | 305                    | 670        | 1494       |

### Exemple :

- Les purgeurs de notre installation ont un DN moyen de 20 mm
- Il y a 12 purgeurs en fuite
- Fuite moyenne à 6 bar par purgeur : 48 kg/h
- Soit  $48 \times 12 = 576$  kg/h

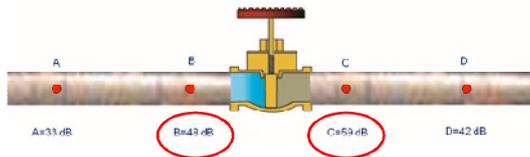
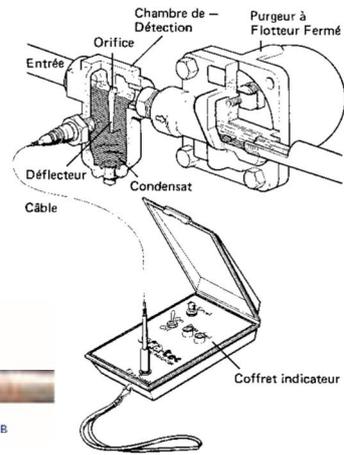
## Détection des fuites des purgeurs

- Quatre méthodes sont disponibles pour discerner les fuites d'un purgeur
  - a) Stéthoscope
    - Une évacuation continue se reconnaît normalement par le bruit que fait la vapeur qui traverse le purgeur, à grande vitesse
  - b) Mesures de température
    - Cette méthode n'est donc pas applicable
  - c) Regard-contrôleur
    - permet de voir ce qui se passe dans la conduite de retour des condensats
    - Il ne permet pas d'établir un jugement indubitable sur le comportement du purgeur



## Détection des fuites des purgeurs

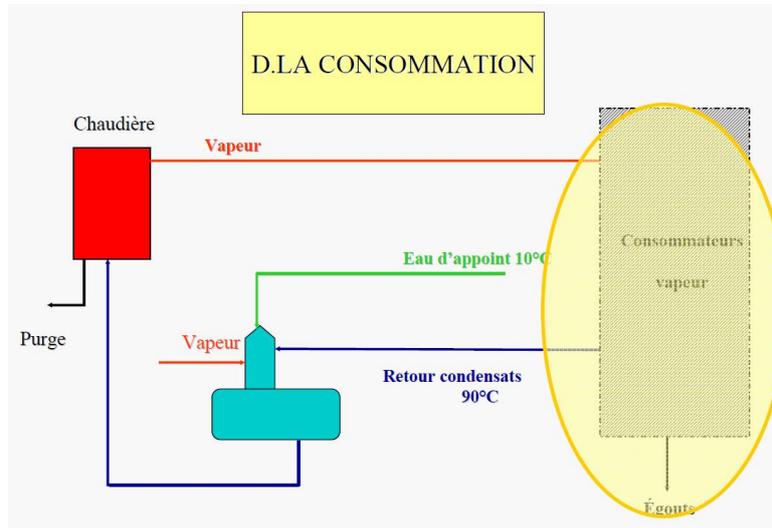
– d) Détecteur ultrasonique



## LA CONSOMMATION DE VAPEUR

*Production de la Vapeur*

## Optimisation de la boucle vapeur : Consommateurs



## Optimisation de la consommation: Méthodologie

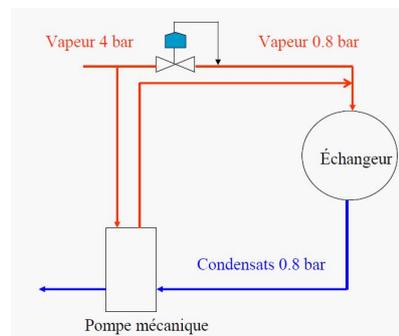
- Connaître et analyser les besoins
  - En général, la vapeur est liée à la demande des différents processus industriels
  - La vapeur peut dans certains cas aussi être utilisée pour le «simple» chauffage des locaux et/ou de l'eau chaude sanitaire
- Connaître et analyser les installations techniques
  - Schéma de principe
  - Dimensionnement et caractéristiques des différents équipements
  - Paramètres de régulation
  - Fonctionnement
- Enfin, adapter le fonctionnement des installations au plus près des besoins réels des consommateurs

## Besoins de chaleur ?

- Besoins et exigences
  - Niveau de température (ou de pression pour la vapeur)
  - Puissance
  - Profil de la demande en fonction du temps
  - Profil de pression en fonction du temps (vapeur)
- Diminuer la demande
  - Adaptation des consignes
  - Isolation
  - Diminution des fuites et des pertes de vapeur
  - Exploitation des rejets de chaleur, retour des condensats
  - .....

## Optimisation des consommateurs

- De manière générale, on recherche les équipements les plus efficaces
- On analyse les besoins réels des consommateurs (pression et/ou température)
- On adapte les consignes de vapeur au plus près de ces besoins
- Exemple : utilisation d'échangeurs basse pression



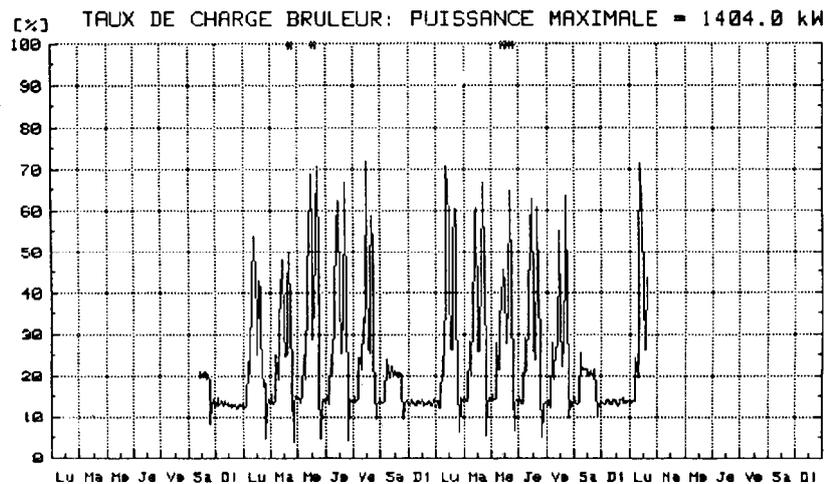
## Installation de vapeur

- Consommateurs de vapeur
  - Les processus industriels et les appareils consomment de la vapeur à des niveaux de pression différents et à des heures souvent bien définies
  - La seule manière de les connaître est de discuter avec les gens de la production...
  - Exemple dans les hôpitaux

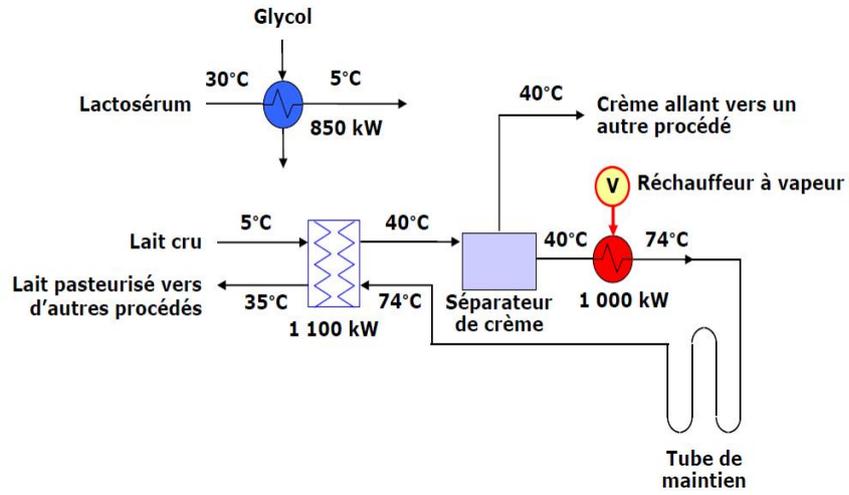
| NIVEAUX DE TEMPERATURE ET PRESSION USUELS  |                   |             |          |
|--|-------------------|-------------|----------|
| Secteur et appareils   |                   | Température | Pression |
| <b>CHALEUR TECHNIQUE</b><br><br><b>BUAND.</b> | - Calandre        | 190°C       | 12 bars  |
|  | - Presse          | 150°C       | 4 bars   |
|  | - Machine à laver |             |          |
|  | -                 |             |          |
| <br><b>CUISINE</b>                            | - Marmites        | 120°C       | 1 bars   |
|  | - Steamer         | 120°C       | 1 bars   |
|  | -                 |             |          |
|  | -                 |             |          |
| <br><b>STERIL.</b>                            | - Autoclaves      | 130°C       | 1.7 bars |
|  |                   |             |          |

## Profil de consommation de vapeur : Exemple dans les hôpitaux

- Evolution du soutirage de vapeur dans un hôpital de 350 lits



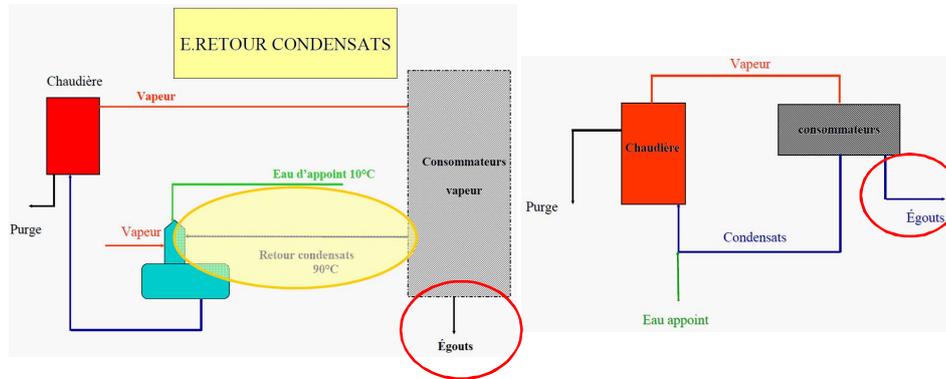
## Profil de consommation de vapeur : Exemple unité de pasteurisation



## RETOUR DES CONDENSATS

*Production de la Vapeur*

## Optimisation de la boucle vapeur : Retour des condensats



La purge des condensats des réseaux et des procédés contient une quantité importante d'énergie qui sera fonction de la pression de vapeur utilisée ainsi que de la consigne de température des procédés.

### RETOUR DES CONDENSATS

La purge des condensats/ récupération

## Condensats

---

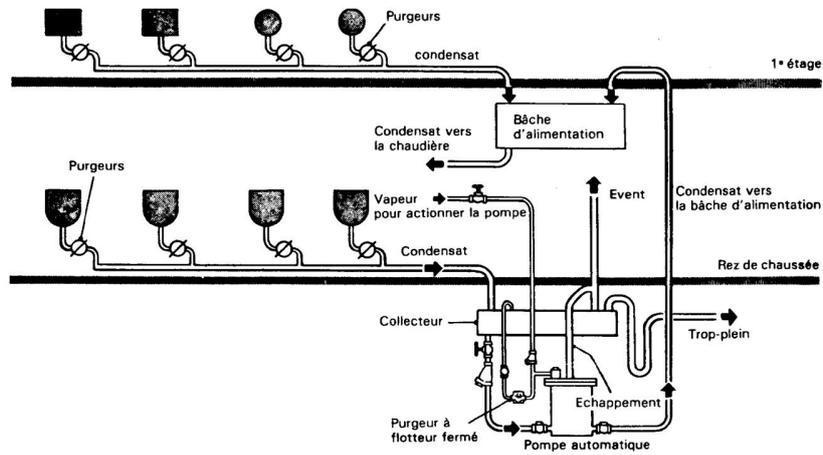
- La récupération des condensats et le contrôle des purgeurs revêtent une importance primordiale dans un système de vapeur
- Les purgeurs (d'eau condensée)
  - Lorsqu'un appareil est chauffé à la vapeur, celle-ci lui cède sa chaleur latente et se condense à l'état liquide
  - Cette eau ainsi condensée se rassemble au bas de l'appareil, ce qui a pour conséquence de réduire toujours plus la surface d'échange de chaleur
  - Laisser sortir que l'eau liquide, à l'exclusion de vapeur
  - L'eau condensée évacuée sur le purgeur a une température correspondant à la pression de la vapeur alimentant l'appareil

## Condensats

---

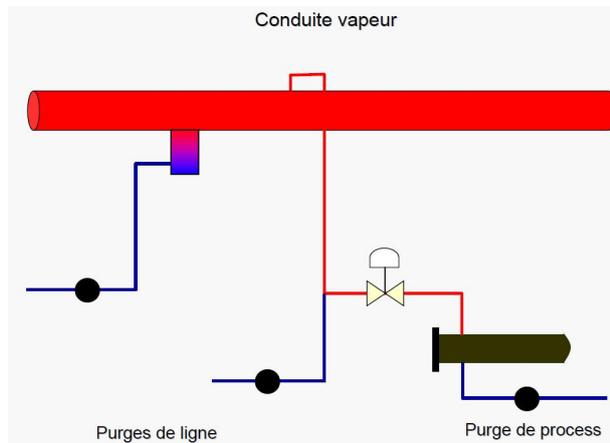


## Retour des condensats



## Réduire les pertes des purgeurs

- Rappels :
  - Le but d'un purgeur est de laisser passer les condensats et d'empêcher la vapeur de passer



## Purgeur d'eau condensée

- Fonctions du purgeur d'eau condensée
  - A) Laisser passer l'eau condensée
  - B) Empêcher le passage de la vapeur
  - C) Permettre le passage de l'air et des gaz
- Principaux types de purgeurs d'eau condensée
  - A) à flotteur fermé
  - B) à flotteur ouvert (ou à seuil)
  - C) à flotteur inversé ouvert (ou à cloche)
  - D) à élément thermostatique
  - E) à labyrinthes
  - F) thermodynamique

## Purgeur d'eau condensée



### THERMODYNAMIQUE

Ne retient pas de condensat  
Compact  
Robuste  
Pas adapté aux process régulés  
Pas calorifugeable  
Perte 0,25



### THERMOSTATIQUE A CAPSULE

Retient le condensat  
Compact  
Pas adapté aux process régulés  
Pas calorifugeable  
Perte 0,5



### FLOTTEUR FERME

Ne retient pas de condensat  
Pas compact  
Evacuation instantanée  
Adapté aux process régulés  
Calorifugeable  
Perte 1,4  
Perte si calorifugé 0,28



### THERMOSTATIQUE BIMETALLIQUE

Retient beaucoup le condensat  
Compact  
Pas adapté aux process régulés  
Pas calorifugeable  
Perte 0,5



### FLOTTEUR INVERSE OUVERT

Ne retient pas de condensat  
Pas compact  
Robuste  
Evacuation cyclique du condensat  
Fuite interne de vapeur par l'évent  
Pas adapté aux process régulés  
Pas calorifugeable  
Perte 1,2

## Récupération des condensats (alimentation) : Evaluation des gains

### Récupération des condensats

Entreprise: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

Endroit: \_\_\_\_\_ Par: \_\_\_\_\_

Débit de condensat mesuré = \_\_\_\_\_ kg/h (1)

Chaleur spécifique du condensat  
(4,14 à la pression atmosphérique) = \_\_\_\_\_ kJ/(kg·°C) (2)

Température du condensat = \_\_\_\_\_ °C (3)

Température de l'eau d'appoint = \_\_\_\_\_ °C (4)

Temps de service total = \_\_\_\_\_ h/an (5)

Pression de la vapeur = \_\_\_\_\_ kPa(eff.) (6)

Chaleur latente de la vapeur à la pression  
(1) (Tableau de vapeur) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (7)

Coût de la vapeur = \_\_\_\_\_ D /1 000 kg (8)

## Récupération des condensats : Evaluation des gains

Quantité de condensat à récupérer

$$= (1) \times (2) \times [(3) - (4)] \times (5)$$

$$= \text{_____} = \text{_____ kJ/an} \quad (9)$$

$$\text{Économie totale de vapeur} = \frac{(9)}{(7)} = \text{_____} = \text{_____ kg/an} \quad (10)$$

$$\text{Économie d'énergie} = \frac{(10) \times (8)}{1\,000}$$

$$= \frac{\text{_____}}{1\,000} = \text{_____ D /an} \quad (11)$$

$$\text{Mise de fonds} = \text{_____ D} \quad (12)$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{(12)}{(11)}$$

$$= \text{_____} = \text{_____ an(s)} \quad (13)$$

## Récupération des condensats (utilisation) : Evaluation des gains

### Récupération de la chaleur des condensats

Entreprise: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

Endroit: \_\_\_\_\_ Par: \_\_\_\_\_

Pression de la vapeur = \_\_\_\_\_ kPa(eff.) (1)

Débit de l'eau chaude rejetée = \_\_\_\_\_ kg/h (2)

Chaleur spécifique du condensat (4,14 à la pression atmosphérique) = \_\_\_\_\_ kJ/kg.°C (3)

Température du condensat à l'entrée l'échangeur de chaleur = \_\_\_\_\_ °C (4)

Température du condensat à la sortie l'échangeur de chaleur = \_\_\_\_\_ °C (5)

Temps de service total = \_\_\_\_\_ h/an (6)

Efficacité de l'échangeur de chaleur = \_\_\_\_\_ % (7)

Chaleur latente de la vapeur à la pression (1) (table 1) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (8)

## Récupération des condensats (utilisation) : Evaluation des gains

Coût de la vapeur = \_\_\_\_\_ D /1 000 kg (9)

Quantité de chaleur rejetée récupérée =  $(2) \times (3) \times [(4) - (5)] \times (6) \times \frac{(7)}{100}$   
= \_\_\_\_\_ kJ/an (10)

Vapeur totale économisée par année =  $\frac{(10)}{(8)}$   
= \_\_\_\_\_ kg/an (11)

Économie d'énergie =  $\frac{(11) \times (9)}{1\ 000}$   
= \_\_\_\_\_ D /an (12)

Mise de fonds = \_\_\_\_\_ D (13)

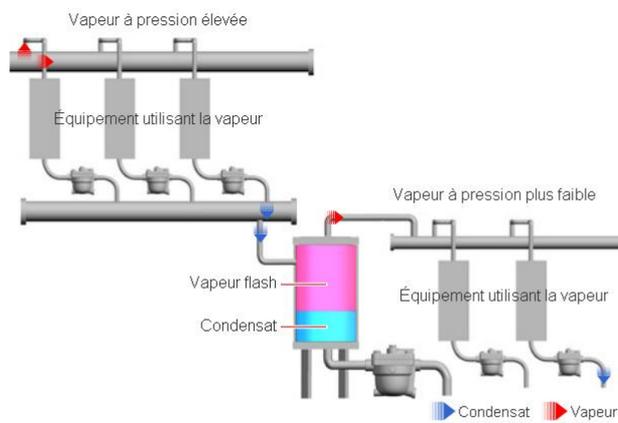
Période de rentabilité =  $\frac{(13)}{(12)}$  = \_\_\_\_\_ ans (14)

## RETOUR DES CONDENSATS

### La revaporisation

## Revaporisation

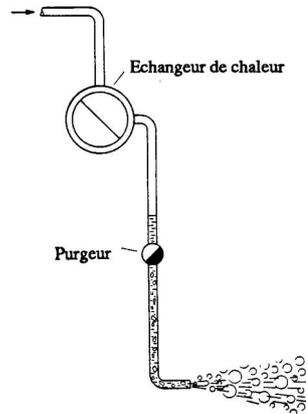
### Exemple d'un système de récupération de vapeur flash



La vapeur flash d'un système à haute pression est récupérée et utilisée pour servir un système à pression plus faible.

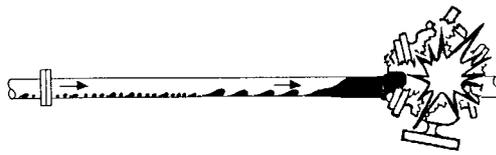
## Revaporisation

- Nature du phénomène
  - Lorsqu'un purgeur de condensat fonctionne correctement il ne laisse sortir que le condensat
  - Cette eau condensée sort du purgeur à une température correspondant à la pression de la vapeur se trouvant avant le purgeur
  - Si la sortie du purgeur débouche à l'air libre ou dans une conduite de condensat où règne la pression atmosphérique
    - Le condensat sortant à une température supérieure à la température de saturation correspondant à la pression atmosphérique (100 °C) va en partie se revaporiser dans la tuyauterie de condensat



## Conséquence de la revaporisation

- Lorsque la revaporisation du condensat n'est pas maîtrisée :
  - a) Coup de bélier
- b) Une perte de chaleur importante pouvant être dans certains cas de l'ordre de 10 %
- c) Une perte d'eau traitée importante d'où une augmentation des coûts de traitement d'eau
- d) Formation d'un panache de vapeur à l'évent de la bache d'alimentation pouvant avoir des conséquences néfastes pour les toitures



## Apparition de coups de bélier



### Apparition de coups de bélier

mélange bi-phasique

### Conséquences:

Destruction des joints

Destruction des clapets anti-retour

Destruction des purgeurs

Danger

## Les signes visibles d'un gaspillage de la vapeur de revaporisation...



## La récupération d'énergie par revaporisation

### La revaporisation :

Lorsque le condensat est évacué à haute température par le purgeur dans un réseau de retour à une pression inférieure, une partie de ce condensat est revaporisé par l'énergie contenu dans celui-ci.

Exemple :

#### 1 kg de condensat à 4 bar

- Température de saturation : 152°C
- Chaleur sensible : 641 kJ/kg
- Chaleur latente : 2108 kJ/kg

#### A la pression atmosphérique :

- Température saturation : 100°C
- Chaleur sensible : 419 kJ/kg
- Chaleur latente : 2257 kJ/kg

- Différence de chaleur sensible :  $641 - 419 = 222$  kJ/kg
- Taux de revaporisation :

$$\frac{222}{2257} \times 100 = 9,83 \%$$

## Calcul du % de revaporisation / vapeur flash

Le pourcentage de vapeur flash généré par du condensat (ratio de vapeur flash) se calcule comme suit :

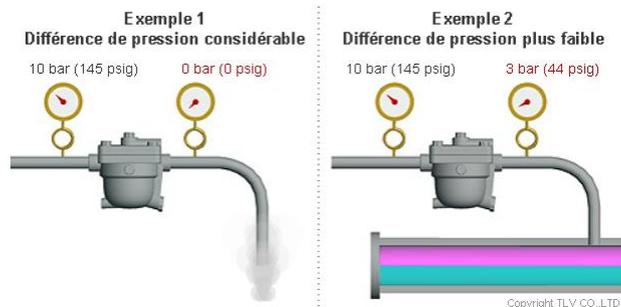
$$\% \text{ de vapeur flash} = \frac{h_{f1} - h_{f2}}{h_{fg2}}$$

Avec :

hf1 = Enthalpie spécifique de l'eau saturée en amont du purgeur

hf2 = Enthalpie spécifique de l'eau saturée en aval du purgeur

hfg2 = Chaleur latente de la vapeur saturée en aval du purgeur



## Calcul du % de revaporisation / vapeur flash

**Calculs**

**Exemple 1**

$$\frac{781.4 - 419.0}{2256.6} \times 100 = 16.1 \text{ [%]}$$

**Exemple 2**

$$\frac{781.4 - 605.2}{2133.0} \times 100 = 8.3 \text{ [%]}$$

**Table de vapeur (système métrique)**

| Press. (bar) | Temp. (°C) | Enthalpie spécifique (kJ/kg) |                 |                |                         |
|--------------|------------|------------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|
|              |            | h <sub>f</sub>               | h <sub>fg</sub> | h <sub>g</sub> |                         |
| -1           | 11.1       | 46.8                         | 2474.5          | 2521.3         |                         |
| -0.1         | 97.1       | 406.8                        | 2264.1          | 2671.0         | Côté aval (ex.1)        |
| 0            | 100.0      | 419.0                        | 2256.6          | 2675.6         |                         |
| 0.5          | 111.6      | 468.2                        | 2225.3          | 2693.5         | Côté aval (ex.2)        |
| 1            | 120.4      | 505.6                        | 2200.0          | 2706.5         |                         |
| 2            | 133.7      | 562.1                        | 2163.0          | 2725.1         |                         |
| 3            | 143.7      | 605.2                        | 2133.0          | 2738.2         |                         |
| 4            | 151.9      | 640.6                        | 2107.6          | 2748.2         |                         |
| 10           | 184.1      | 781.4                        | 1999.3          | 2780.7         | Côté amont (ex.1 and 2) |

= h<sub>f1</sub>   
   = h<sub>f2</sub>   
   = h<sub>fg2</sub>

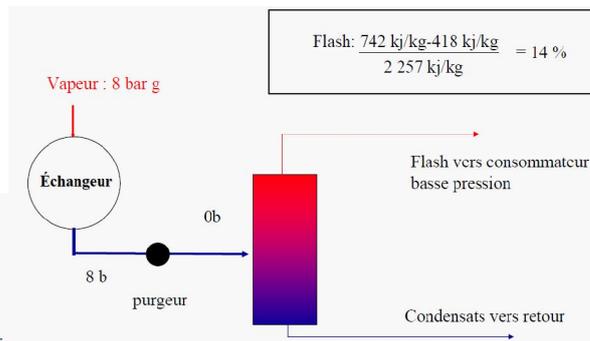
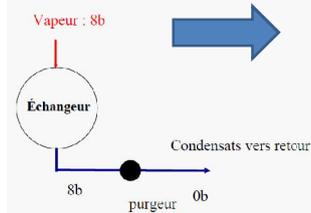
**AHK** Deutsches Institut für Wirtschaftszusammenarbeit  
 German-Turkish Chamber of Industry and Commerce

**giz** Deutsche Gesellschaft für Wirtschaftszusammenarbeit  
 German-Turkish Chamber of Industry and Commerce

## Récupérer la vapeur de revaporisation

**Condensats 8 bar g**  
 température: 175.4 °C  
 chaleur sensible: 742 kJ/kg

**Condensats 0 bar g**  
 température: 100 °C  
 Chaleur sensible: 418 kJ/kg  
 Chaleur latente: 2257 kJ/kg



## La récupération d'énergie

### Avantages :

- Énergie "gratuite".
- Grande souplesse quand au choix de la pression de revaporisation.
- Le coût des équipements nécessaire est modeste et permet un retour sur investissement très court.

### Contraintes :

- Obligation d'un besoin de vapeur synchronisé avec la production de condensats.

## La récupération d'énergie par revaporisation : Méthode de calcul

### Récupération de la vapeur instantanée

Entreprise: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

Endroit: \_\_\_\_\_ Par: \_\_\_\_\_

Pression de la vapeur = \_\_\_\_\_ kPa(eff.) (1)

Pression à laquelle peut être utilisée la vapeur instantanée = \_\_\_\_\_ kPa(eff.) (2)

Consommation mesurée de la vapeur = \_\_\_\_\_ kg/h (3)

Temps de service total = \_\_\_\_\_ h/an (4)

Enthalpie du condensat à la pression (1) (table 1) ( $h_f$ ) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (5)

Enthalpie du condensat à la pression (2) (table 1) ( $h_f$ ) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (6)

Chaleur latente de la vapeur à la pression (2) (table 1) ( $h_{fg}$ ) = \_\_\_\_\_ kJ/kg (7)

Coût de la vapeur = \_\_\_\_\_ ¢ /1 000 kg (8)

## La récupération d'énergie par revaporisation : Méthode de calcul

Production totale de vapeur

$$= (3) \times (4) = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg/an} \quad (9)$$

$$\% \text{ de vapeur instantanée} = \frac{(5) - (6)}{(7)} \times 100$$

$$= \underline{\hspace{2cm}} \times 100 = \underline{\hspace{2cm}} \% \quad (10)$$

Vapeur instantanée totale disponible

$$= \frac{(9) \times (10)}{100} = \frac{x}{100} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kg/an} \quad (11)$$

$$\text{Économie d'énergie} = \frac{(11) \times (8)}{1\,000}$$

$$= \frac{x}{1\,000} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ D /an} \quad (12)$$

Mise de fonds

$$= \underline{\hspace{2cm}} \text{ D} \quad (13)$$

$$\text{Période de rentabilité} = \frac{(13)}{(12)} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ an(s)} \quad (14)$$

RETOUR DES CONDENSATS

La maintenance

## La maintenance



## RECOMMANDATIONS DE LA MISE EN PLACE DES RÉSEAUX VAPEUR

*Production de la Vapeur*

## Débit et perte de charge

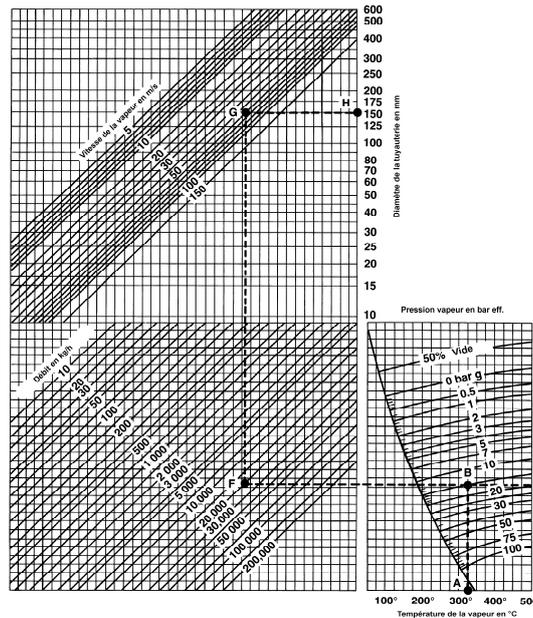


$$\frac{P_1 - P_2}{L} = F$$

F = Facteur de perte de charge

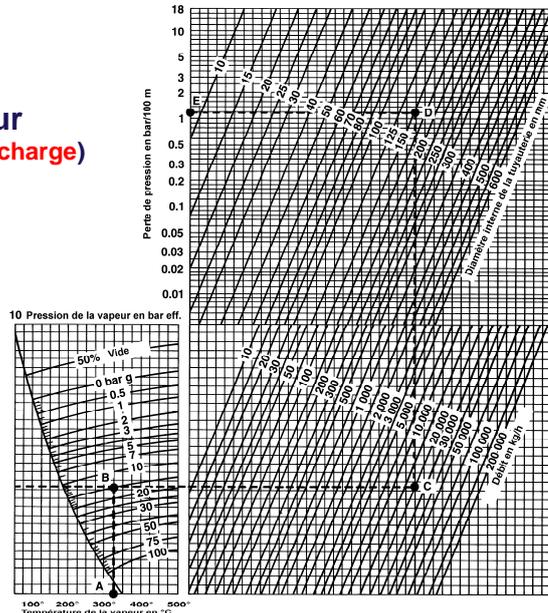
## Dimensionnement des tuyauteries

**Abaque de dimensionnement des tuyauteries pour vapeur surchauffée et saturée**  
**(Méthode utilisant la vitesse)**

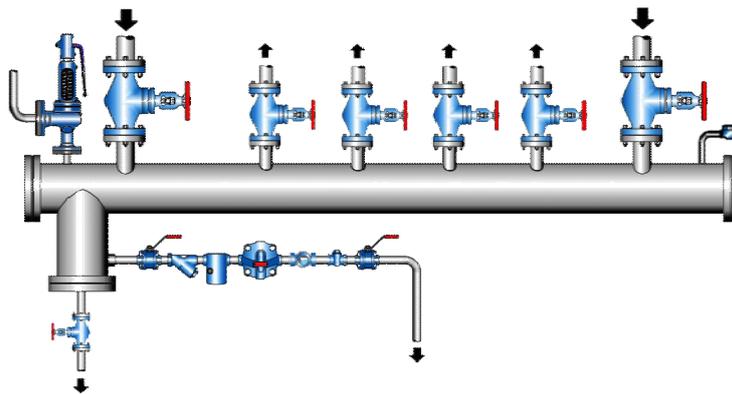


## Dimensionnement des tuyauteries

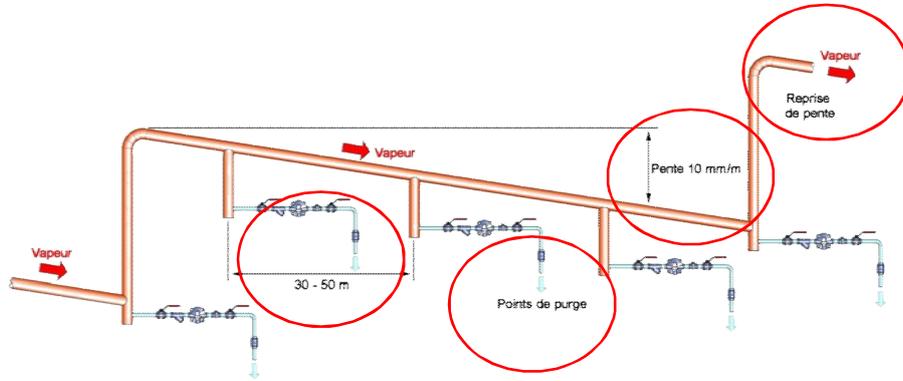
### Abaque de dimensionnement des tuyauteries pour vapeur (Méthode utilisant la perte de charge)



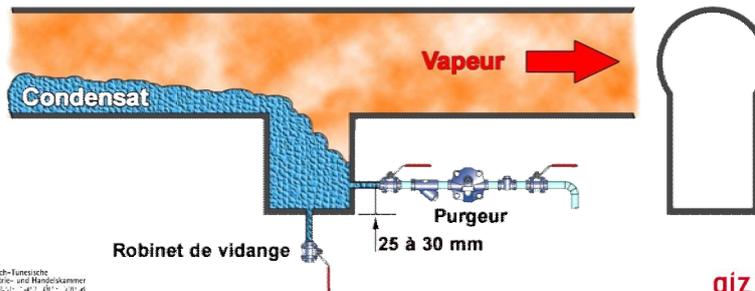
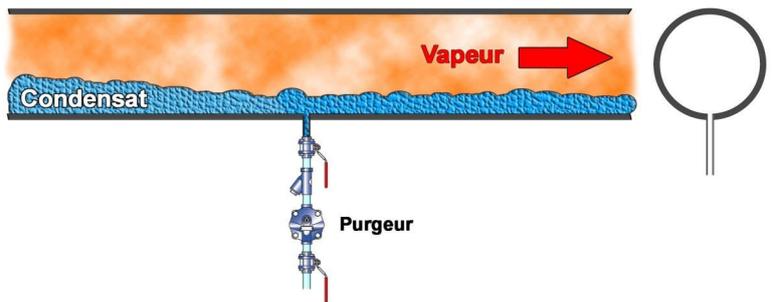
## Barillet départ chaudière



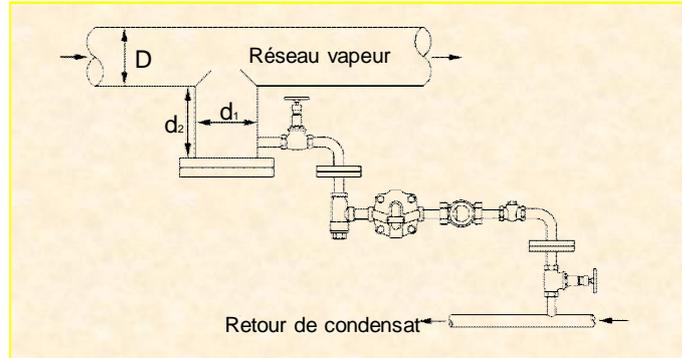
## Circuit de Vapeur



## Points de purge

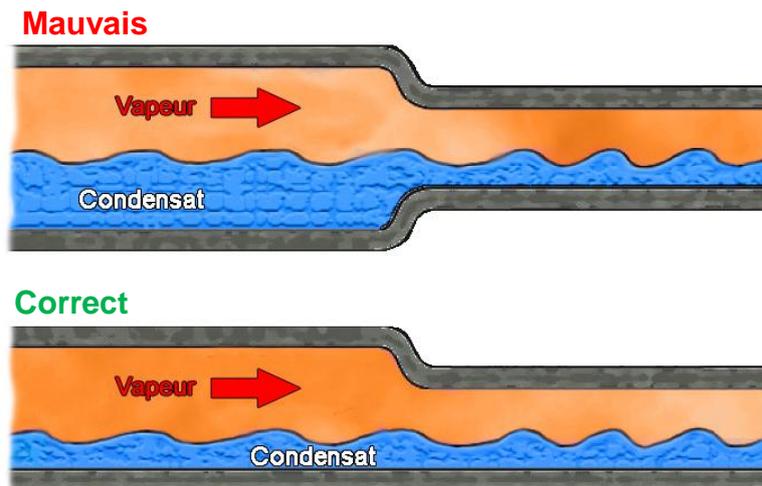


## Purges des réseaux vapeur

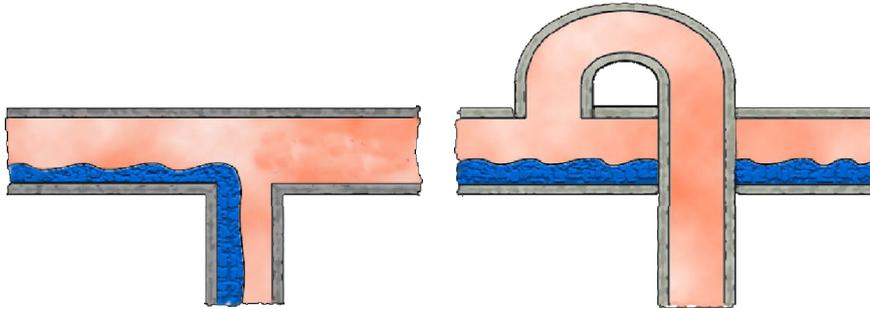


| $D = \varnothing$ du réseau | $d_1 = \varnothing$ du pot de purge | $d_2 = \text{Prof. du pot de purge}$ |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| jusqu'à 100 mm              | $d_1 = D$                           | Minimum $d_2 = 100$ mm               |
| 125 - 200 mm                | $d_1 = 100$ mm                      | Minimum $d_2 = 150$ mm               |
| 250 mm et au-dessus         | $d_1 = D/2$                         | Minimum $d_2 = D$                    |

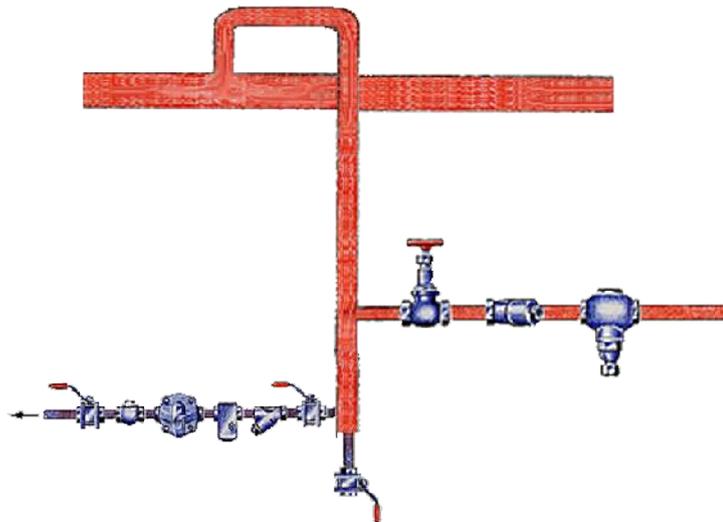
## Réductions de tuyauteries



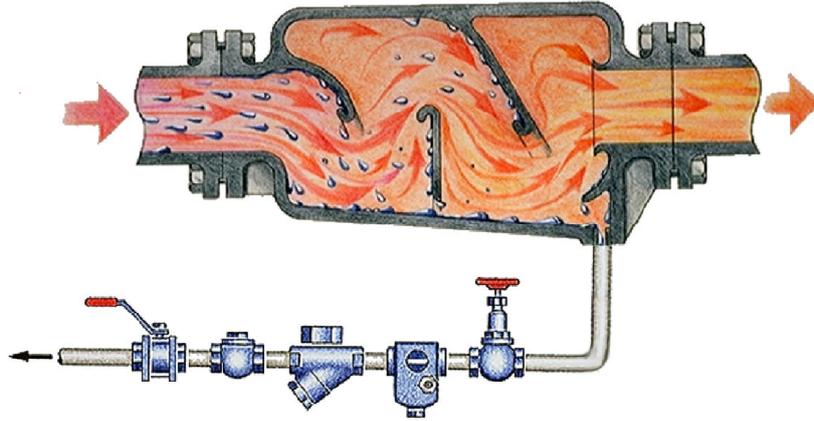
## Raccordements de distribution



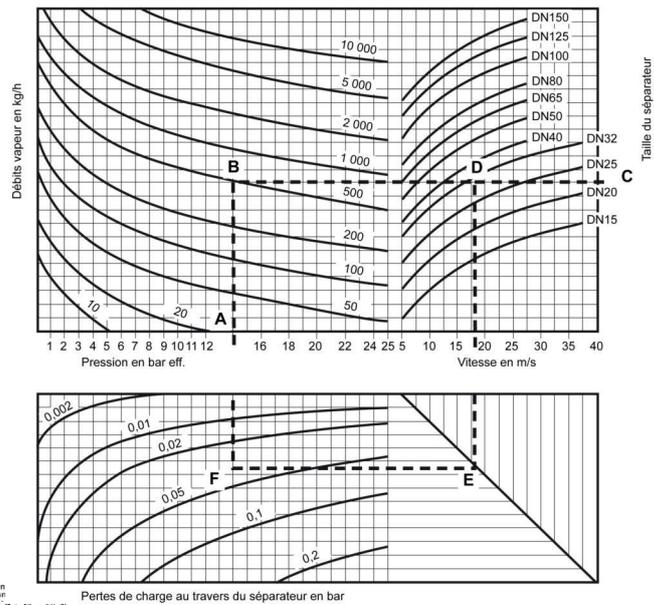
## Piquages et points bas

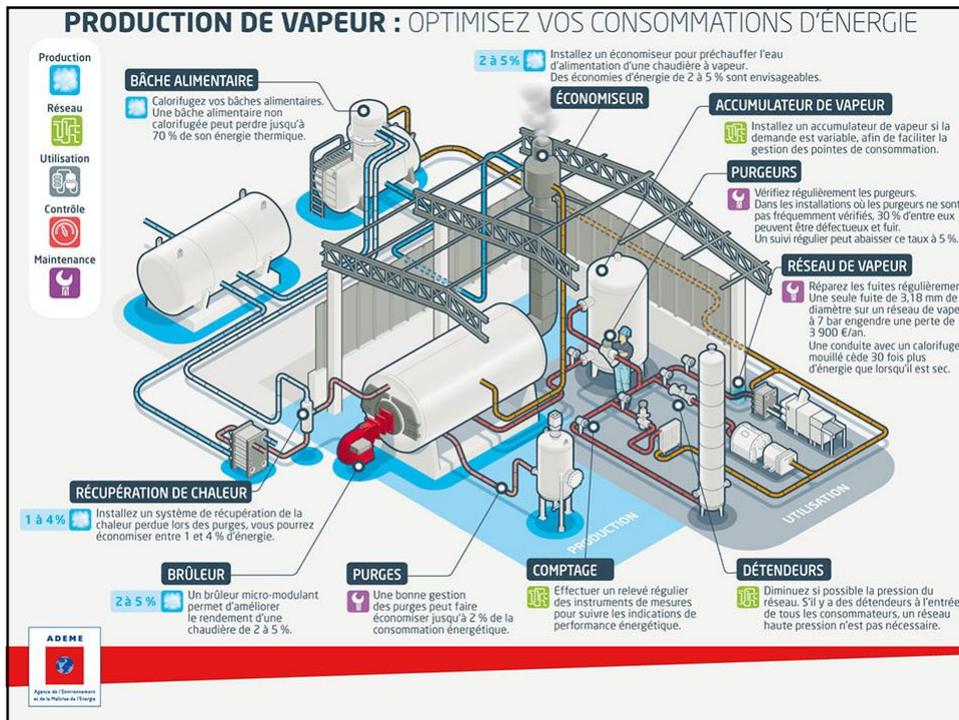


## Alignement de tuyauterie et point de purge



## Abaque de dimensionnement des séparateurs





# Merci pour votre attention...

