

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/m³
 - Autres:
 - Électricité
 - Amortissements
 - Etc.
- Coût moyen **30 à 35 DT/Tonne de vapeur**

Production de vapeur = émissions de CO₂

- Selon la nature du combustible
 - Gaz naturel : 55,8 kg CO₂/GJ primaire (env. 200 g CO₂/kWh)
 - Gasoil : 73,3 kg CO₂/GJ primaire (env. 265 g CO₂/kWh)
 - Fuel extra-lourd : 76,6 kg CO₂/GJ primaire (env. 275 g CO₂/kWh)
 - Charbon : 92,7 kg CO₂/GJ primaire (env. 335 g CO₂/kWh)
- Exemple pour une **Tonne de vapeur** à 10 bars, produite avec du gaz naturel
 - Énergie : 2,852 GJ
 - Émissions : 160 kg de CO₂



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 CO₂ 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

....

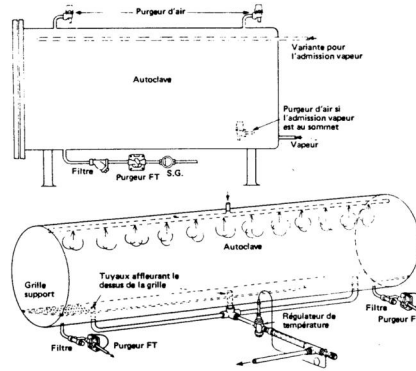
Pourquoi on utilise de la vapeur d'eau

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)

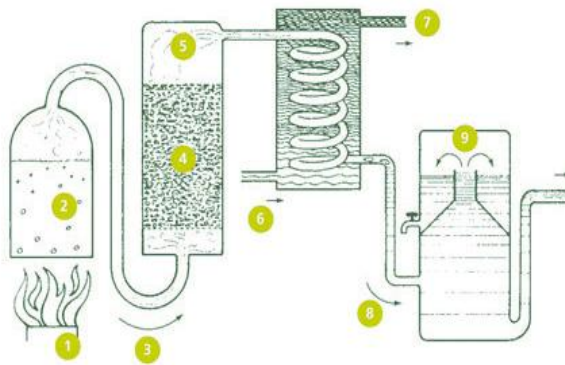
- A) Chauffage direct
 - La vapeur est en contact direct avec la matière à chauffer
 - Pas de récupération de condensat
 - Exemple : autoclaves dans les salles d'opérations



Utilisation de la vapeur : Exemple

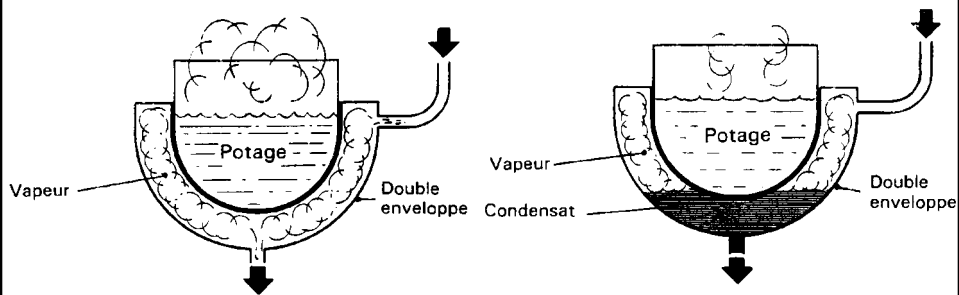
Extraction des huiles essentielles

- 1 feu
- 2 eau
- 3 vapeur d'eau
- 4 plantes aromatiques
- 5 vapeur d'eau chargée d'H.E.
- 6 eau froide
- 7 eau chaude
- 8 eau + H.E.
- 9 huile essentielle
- 10 hydrosol ou hydrolat



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

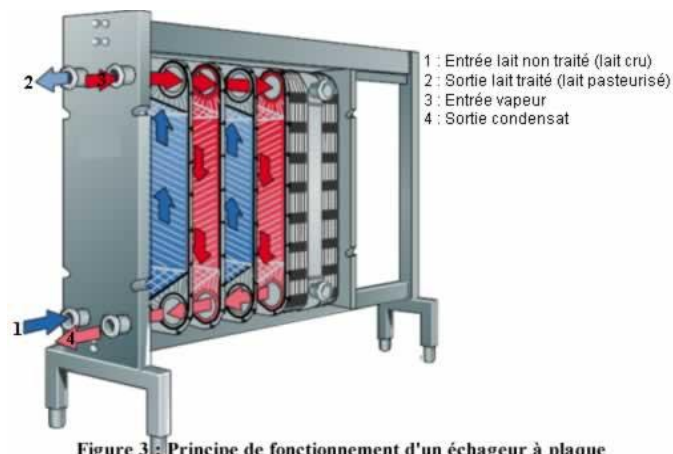


Figure 3: Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaque

INTRODUCTION

Tarification STEG du Gaz

Tarification STEG du Gaz

TARIFS DU GAZ NATUREL EN MOYENNE PRESSION à compter du 1^{er} Mai 2014 (HORS TAXES)

TARIF MOYENNE PRESSION	DEBIT SOUSCRIT (th/h)	REDEVANCE ^(*)		PRIX D'ENERGIE ^(*) (mill/th)
		D'ABONNEMENT (DT/ab-mois)	DE DEBIT (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

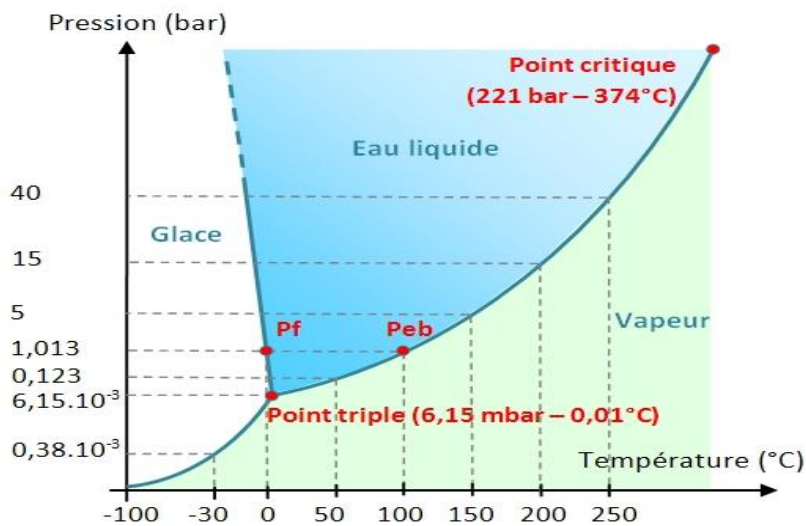
NOTIONS DE BASE

Les propriétés de la vapeur

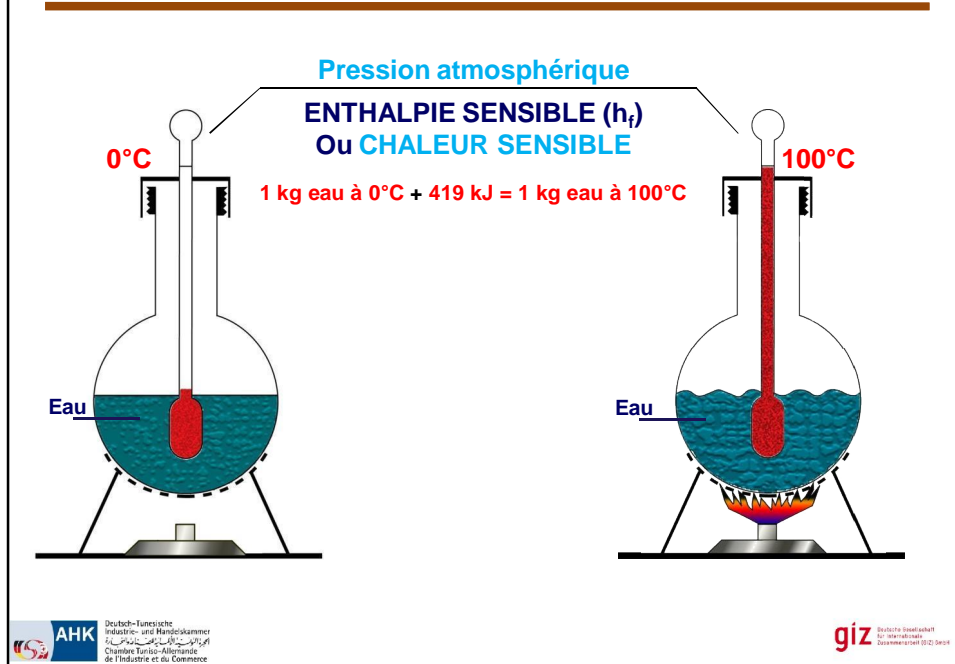
Les propriétés de la vapeur

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

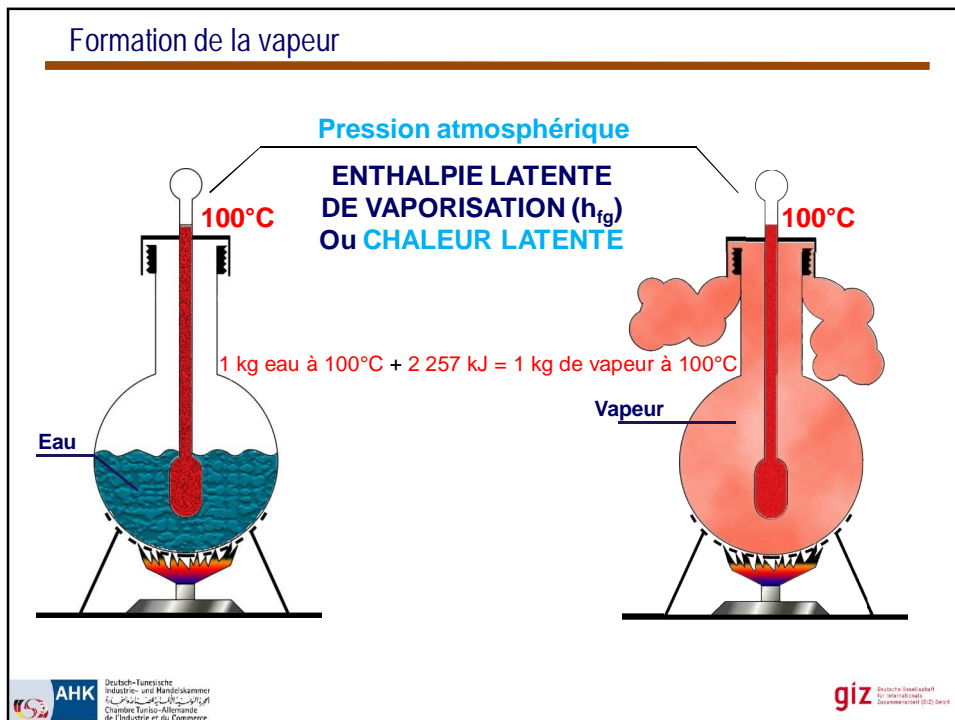
Diagramme des phases



Formation de la vapeur



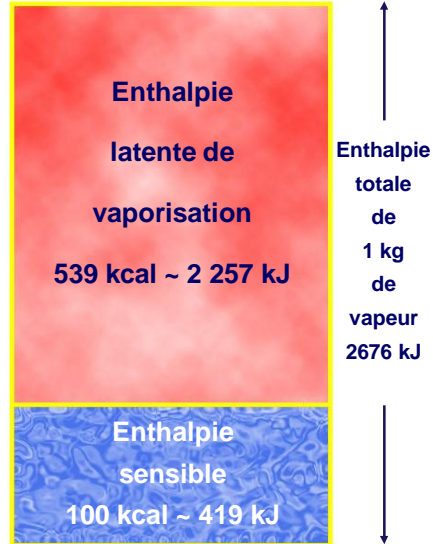
Formation de la vapeur



Formation de la vapeur

Pression atmosphérique

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

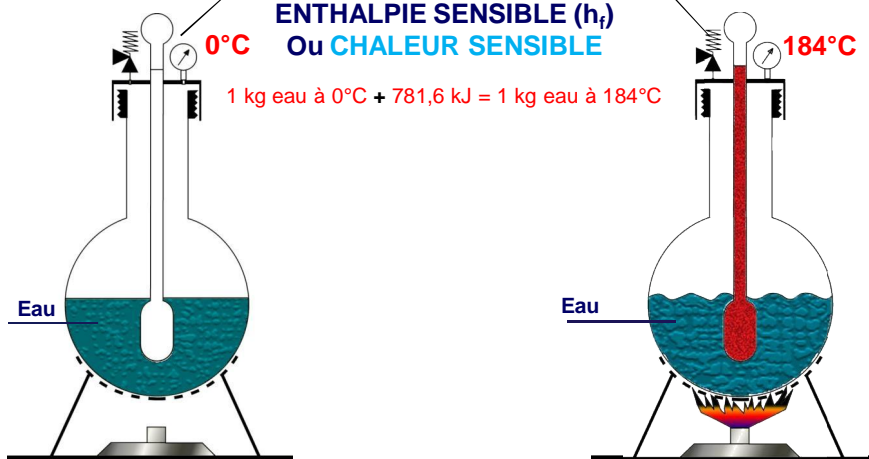


Formation de la vapeur

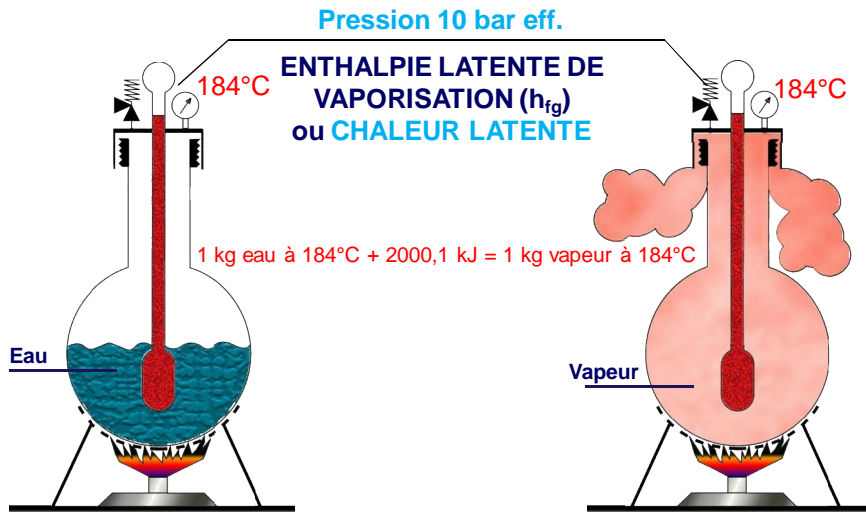
Pression 10 bar eff.

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



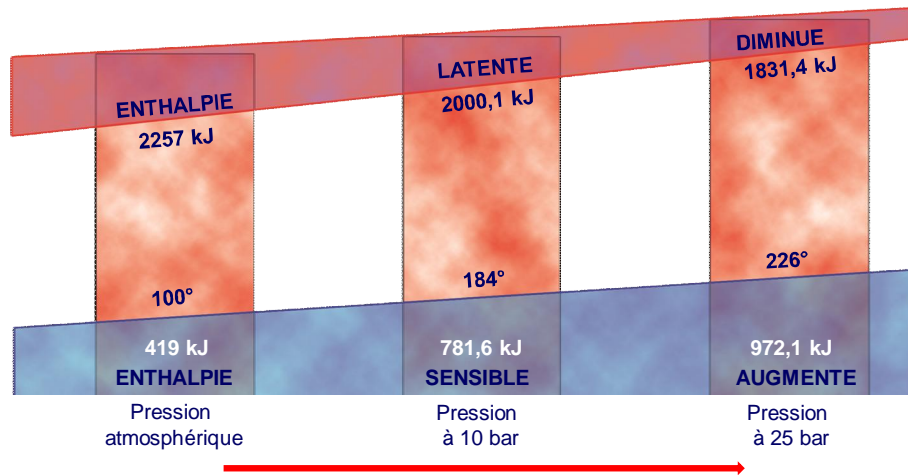
Formation de la vapeur

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

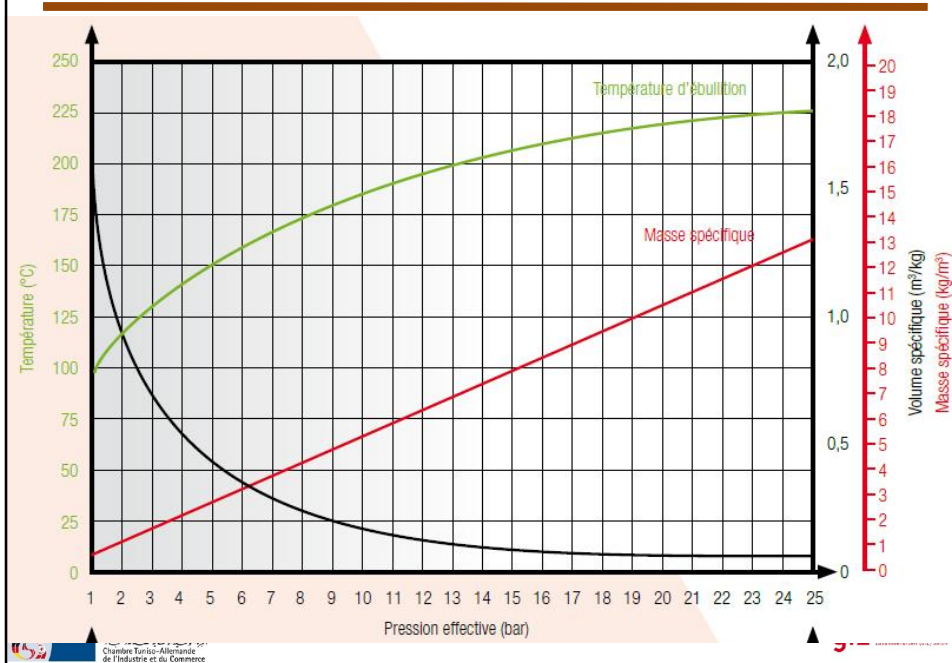
Formation de la vapeur : **Tables de la vapeur**

Pression effective bar	Température d'ébullition °C	Enthalpie sensible		Enthalpie latente		Enthalpie totale		Volume spécifique m³/kg	Poids spécifique kg/m³
		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

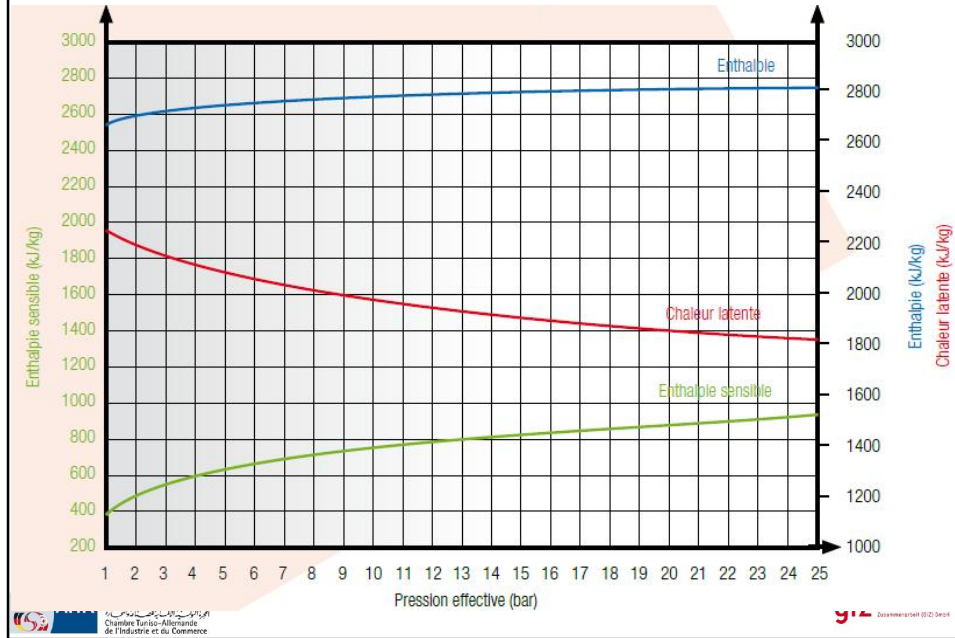
Formation de la vapeur : Tables de la vapeur

T	Pression de vapeur saturante	Enthalpie spécifique ou Chaleur sensible	Chaleur massique (ou spécifique)
	*C	Pascal (Pa)	kJ/kg
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

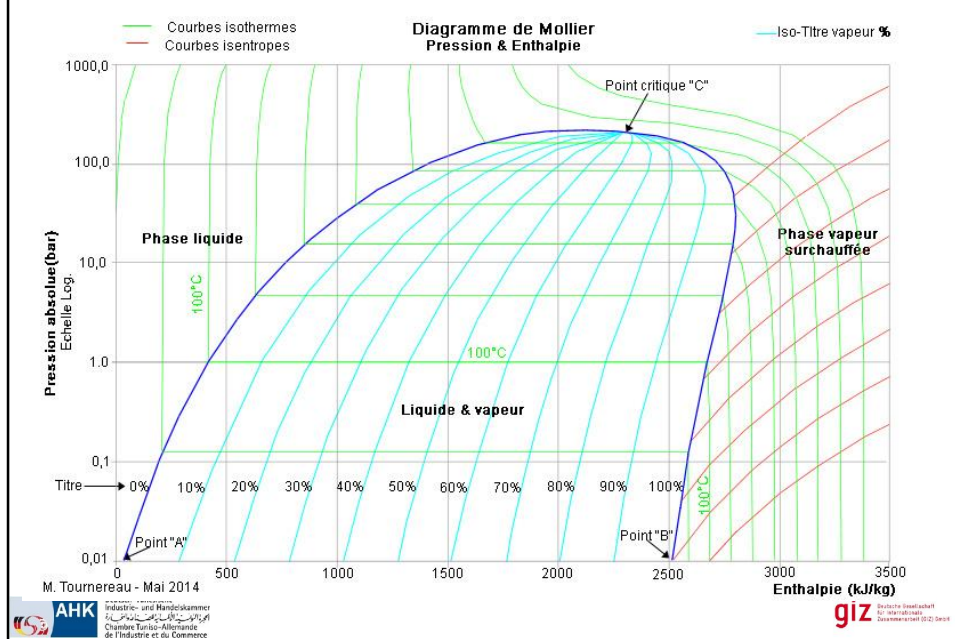
Relations et courbes caractéristiques



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



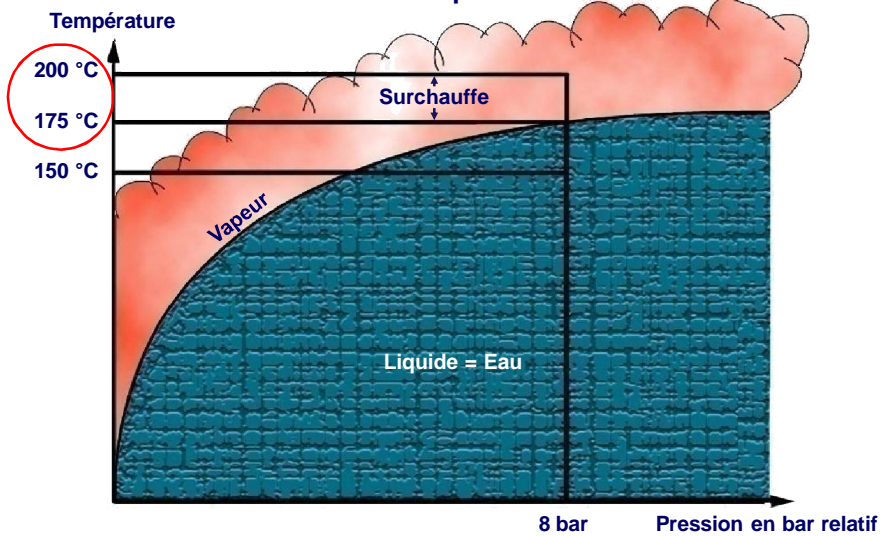
Vapeur saturée humide

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

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

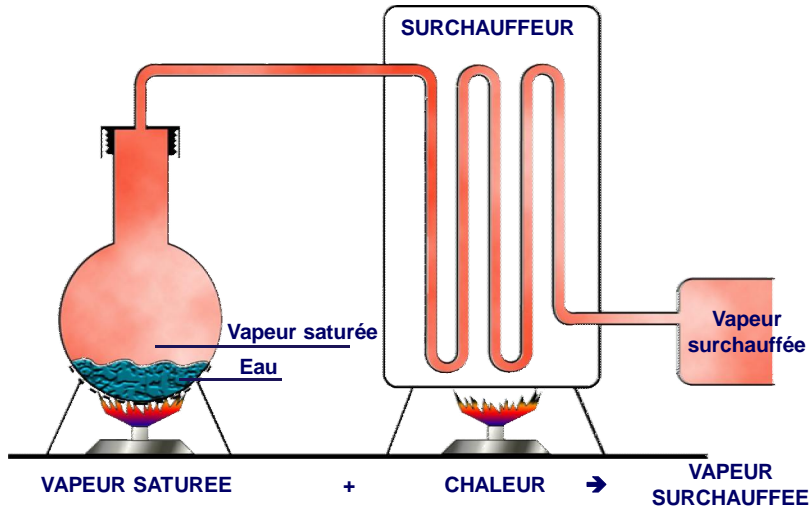
Relations et courbes caractéristiques

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)

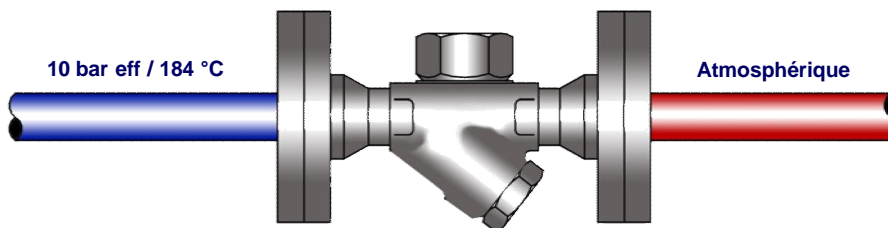
Vapeur de revaporisation

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

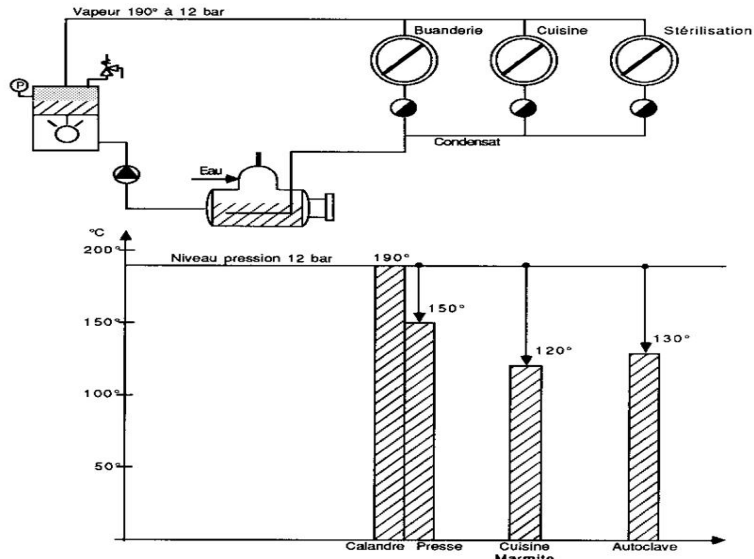
Volume spécifique de la vapeur à P atmosphère : 1 673 L/kg

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**

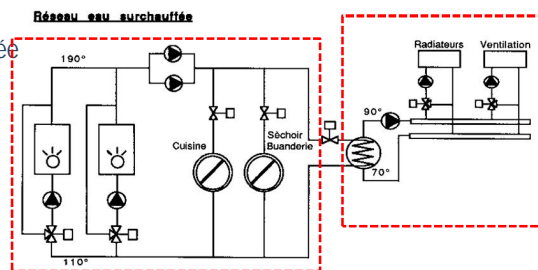
Conception des installations : Exemple 1

- Production de vapeur : Chaleur technique

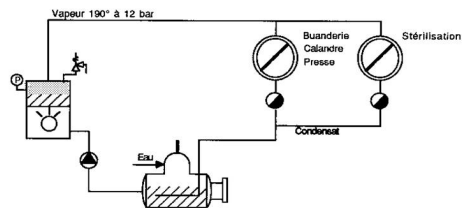


Conception des installations : Exemple 2

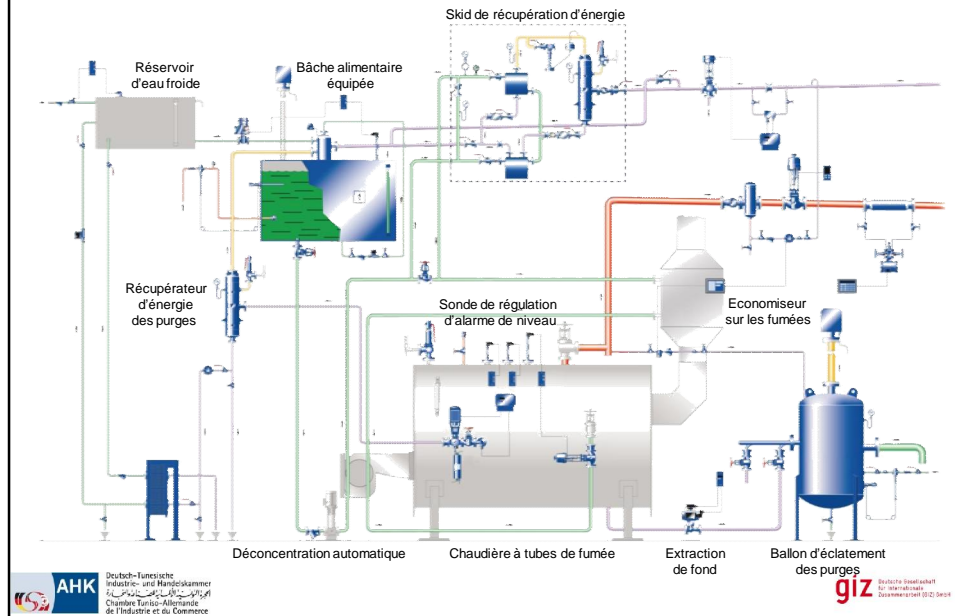
- Production de chaleur séparée
 - confort (eau surchauffée)
 - chauffage
 - ventilation
 - ECS
 - technique (vapeur)
 - processus



Réseau vapeur



Conception des installations : Exemple 4 - Industriel



Objectifs d'une installation de production de la vapeur

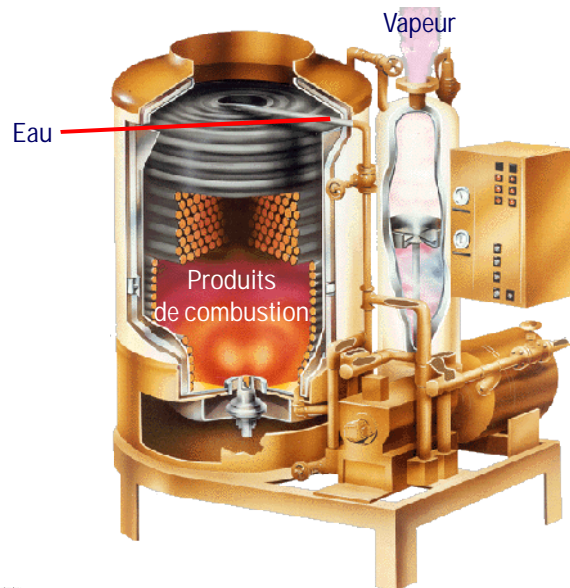
Vapeur de bonne qualité

- 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

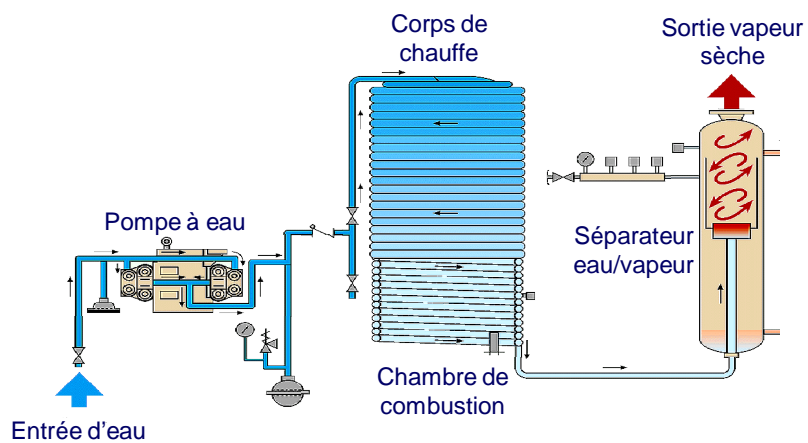


Avantages

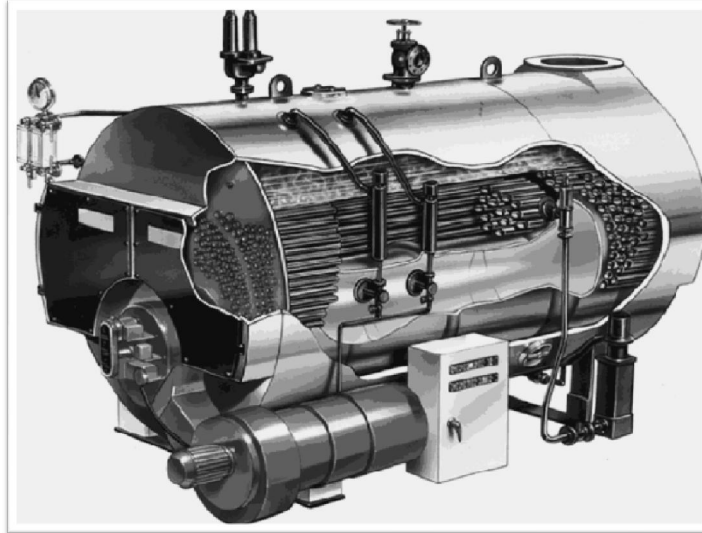
- Qualité
- Fiabilité
- Sécurité
- Rapidité
- Efficacité
- Rentabilité

Chaudière à production instantanée

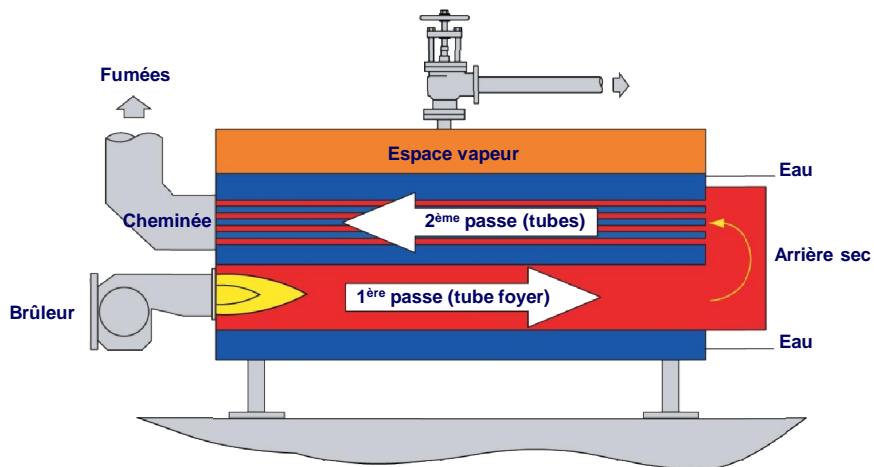
Principe de fonctionnement



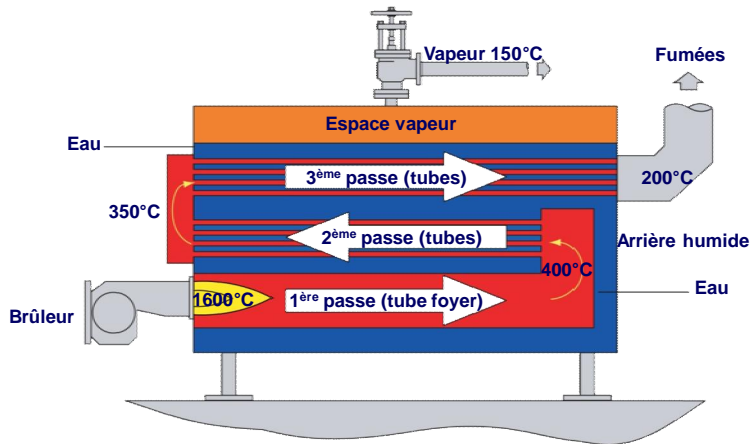
Chaudière à tubes de fumée



Chaudière à tubes de fumée : Chaudière 2 passes

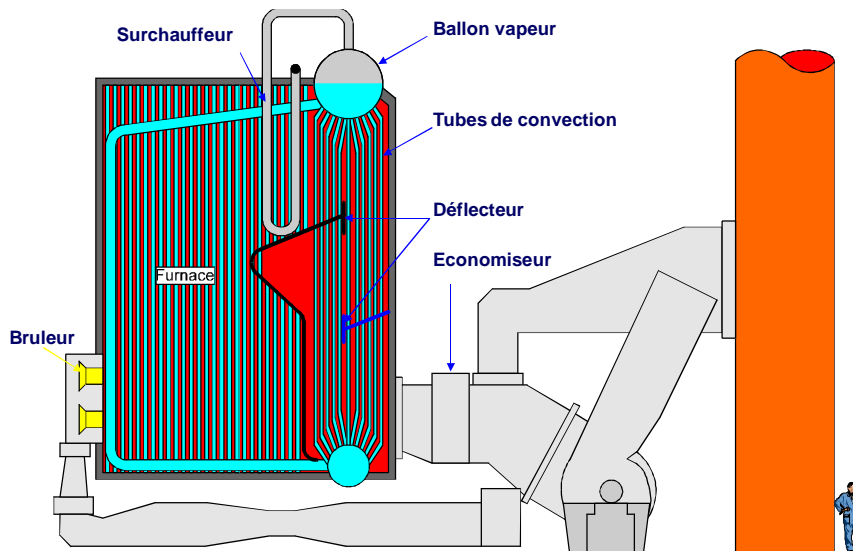


Chaudière à tubes de fumée : Chaudière 3 passes

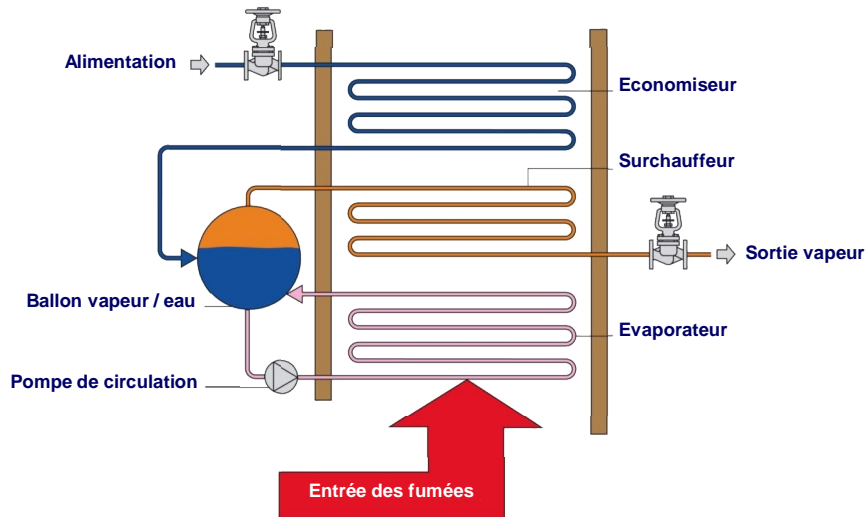


		Surface d'échange en m ²	Température fumée en °C	% de transfert de chaleur
1 ^{ère} Passe	Tube foyer et chambre de combustion	11	1600	65
2 ^{ème} Passe		43	400	25
3 ^{ème} Passe		46	350	10

Chaudière à tubes d'eau



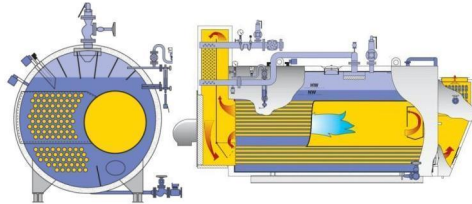
Circulation forcée dans une chaudière à tubes d'eau



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

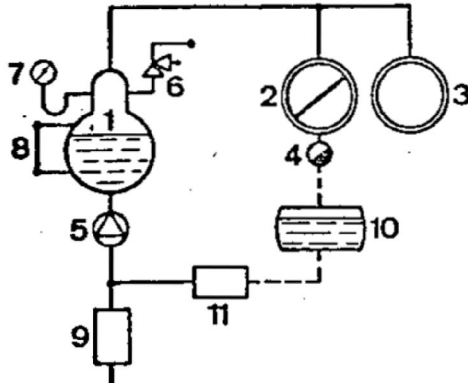
	Chaudières	Générateurs
Inconvénients	- inertie, démarrage lent depuis situation froide	- moins robuste (mais possibilité plus souple de remplacement de certains composants)
	- pertes liées aux extinctions-rallumages; pénalisant en fonctionnement intermittent	- plus grande sensibilité à la qualité de 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

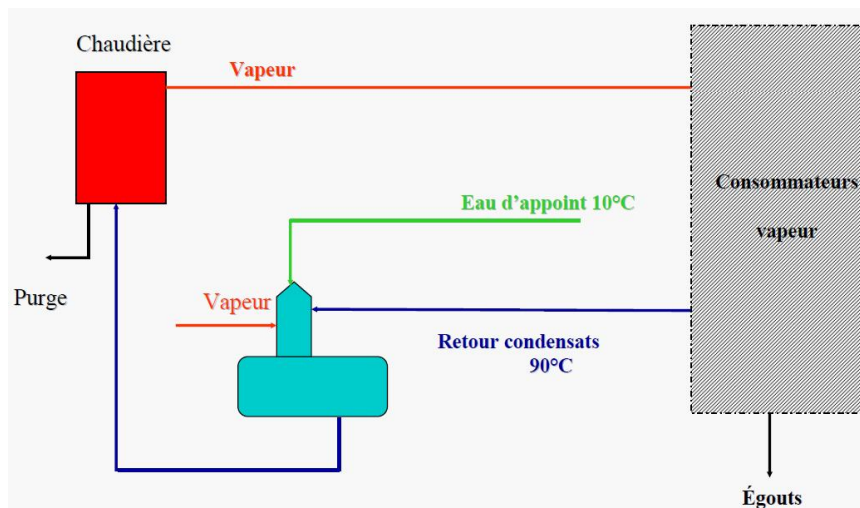
Production et distribution de vapeur

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.

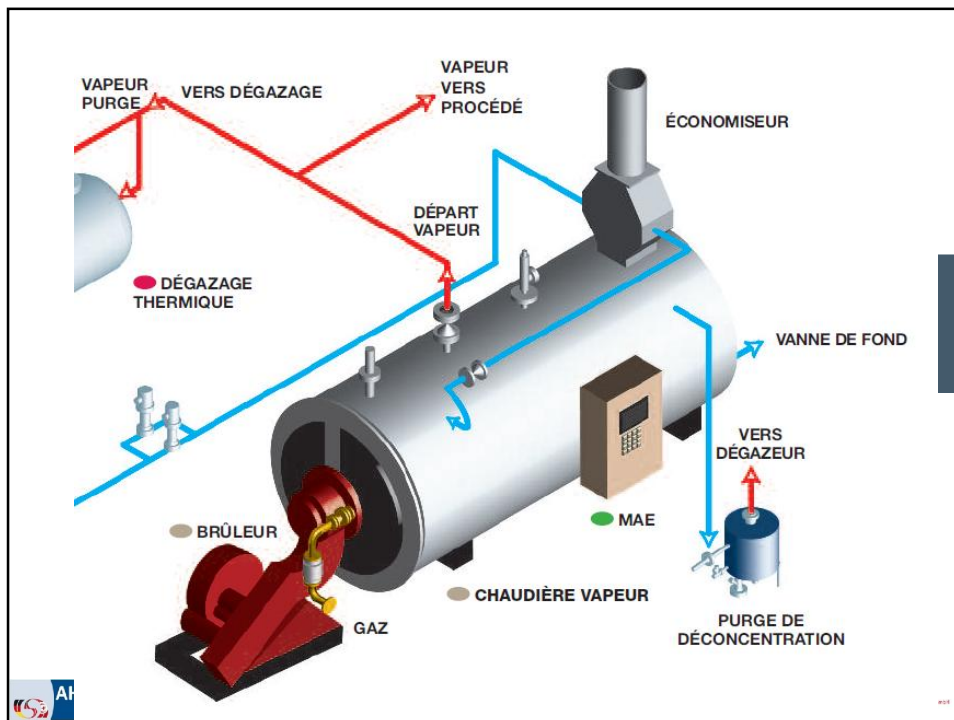
La boucle de vapeur, schéma type



Méthodologie d'optimisation de l'exploitation

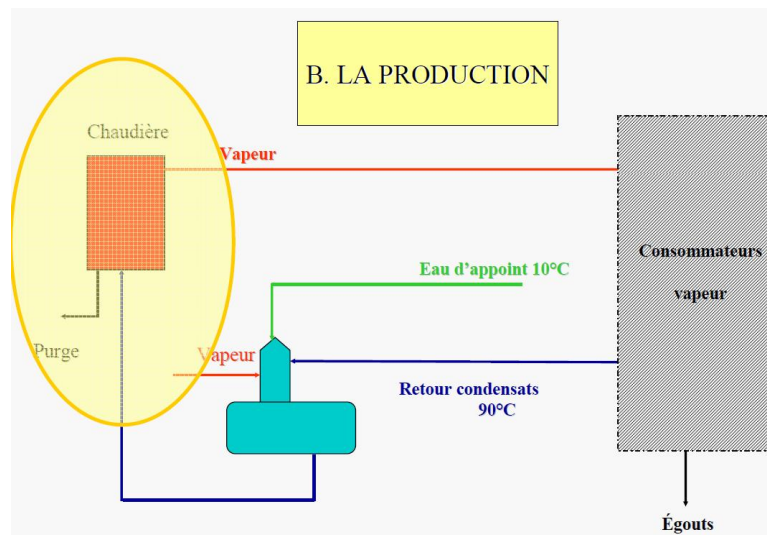
4 Niveaux d'optimisation

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

Traitement d'eau et déconcentration

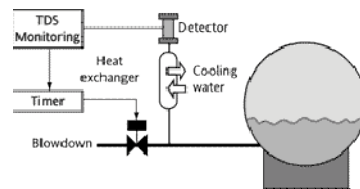
TH (dureté de l'eau)

- 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 10⁻⁴ mol.l⁻¹. Il correspond à :
 - 4 mg/l de calcium ou à 2,4 mg/l de magnésium.
 - 10 mg de carbonate de calcium (CaCO₃)
- 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 m³)
- 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

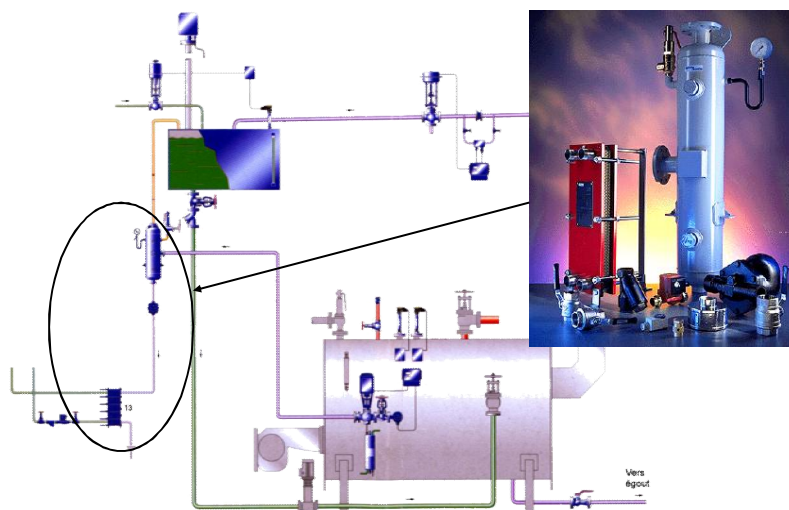
Avantages d'une déconcentration automatique

- 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

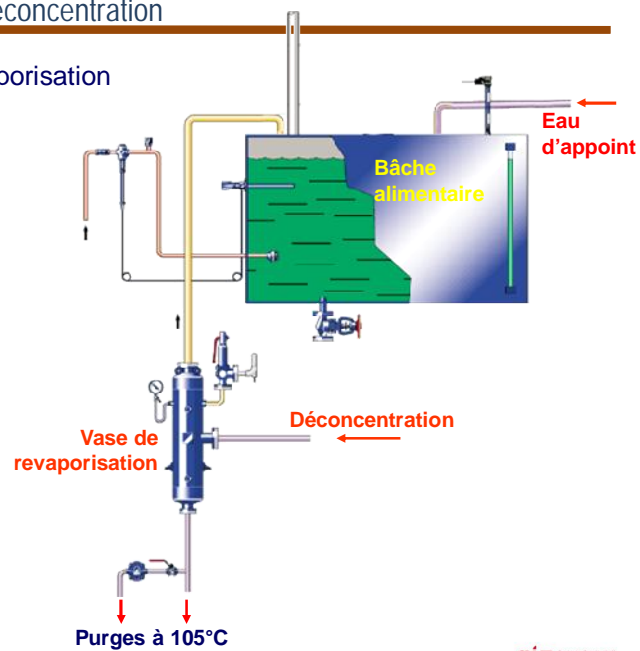
$$\frac{\text{Excédant d'énergie}}{\text{Enthalpie d'évaporation à 0,2 bar}} = \frac{375 \text{ kJ/kg}}{2251 \text{ kJ/kg}} = 0,166 \text{ ou } 16,6 \%$$

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

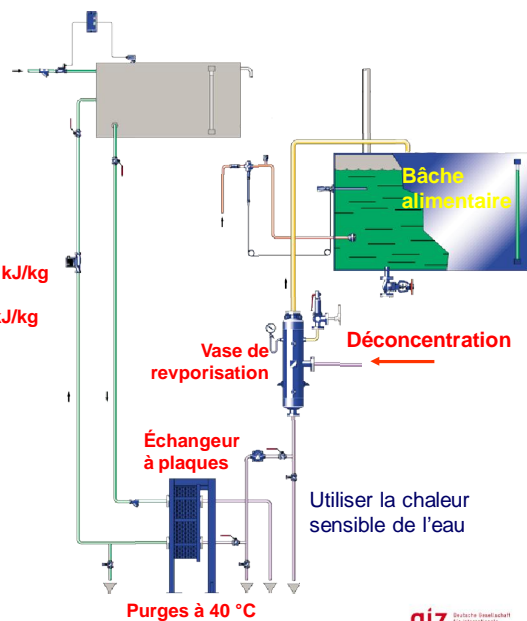
Traitement d'eau et déconcentration

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



Traitement d'eau et déconcentration

Récupération d'énergie des purges de chaudières

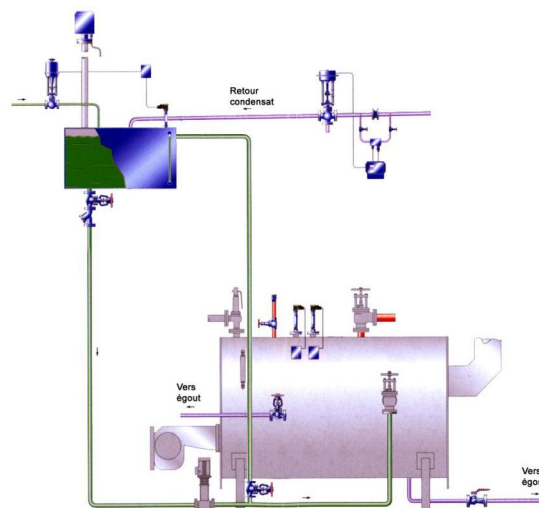
Récupération avec un vase et un échangeur

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.

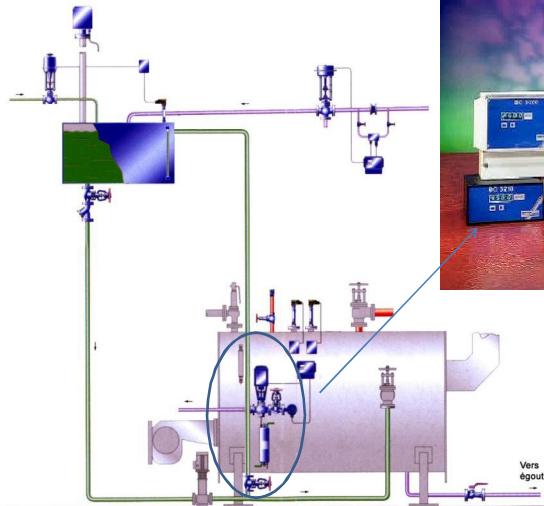
Traitement d'eau et déconcentration

Récupération d'énergie des purges de chaudières



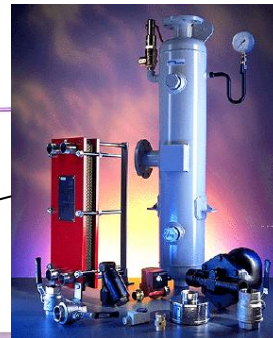
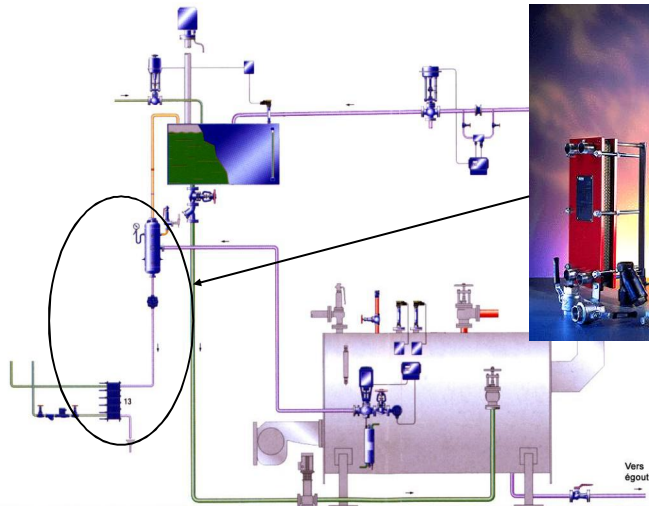
Traitement d'eau et déconcentration

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 PRODUCTION DE VAPEUR

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**

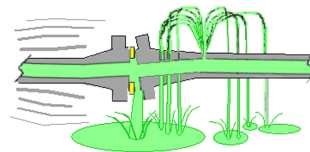
➤ Si les chaudières doivent produire de la vapeur à 9 bar saturée, cela signifie que la vapeur devrait avoir une chaleur totale de 2777,8 kJ/kg.

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

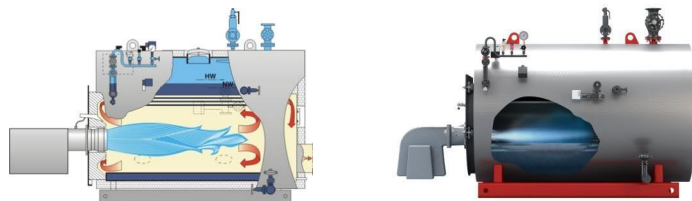
Validation de l'énergie contenue dans la vapeur sur base des données des compteurs et débitmètre :

▪ 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 ₂	CO	C H ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C _n H _m	O ₂	N ₂	CO ₂	
GAZ NATUREL	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^{er} type : Combustion neutre (stoechiométrique)
- 2^{ème} type : Combustion complète en excès d'air (ou complète oxydante)
- 3^{ème} type : Combustion incomplète oxydante (en excès d'air)
- 4^{ème} 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 m³ de combustible, **l'eau étant produite à l'état liquide** (unité kJ/kg ou kJ.m³ 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 m³ de combustible, **l'eau étant produite à l'état vapeur** (unité kJ/kg ou kJ.m³ 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 Nm³ d'air par Nm³ 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 Nm³ de fumées par Nm³ de combustible.

En pratique :

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

Comburant : c'est en général de l'air à l'état gazeux (20,8% O₂ en volume, 79,2% N₂ en volume, quelques gaz rares), parfois de l'oxygène pur O₂.

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 ($\gamma_{CO_2 + SO_2}$)
- Dioxygène (γ_{O_2})
- Monoxyde de carbone (γ_{CO})

Pour alléger les notations, nous désignons $\gamma_{CO_2 + SO_2}$ par γ' .

Le taux maximal de dioxyde de carbone sera désigné par γ'_{max} .

Le taux de dioxygène, dans les fumées, s'écrit :
$$\gamma_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V''_f}$$

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 :

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

Étude d'une combustion réelle : CO₂ maximum



- Pour 1 m³ de CH₄ il faut : 2 m³ de O₂ et 7,52 m³ de N₂ : c'est-à-dire 9,52 m³ d'air.
- La combustion dégage : 1 m³ de CO₂, 2 m³ de H₂O et 7,52 m³ de N₂, on obtient ainsi 8,52 m³ de fumée sèche ; c'est à dire sans eau ou vapeur d'eau.
- Dans ces 8,52 m³ de fumée nous avons 1 m³ de CO₂ = $\frac{1}{8,52} \times 100 = 11,7\%$

est la valeur maximum que peut atteindre la quantité de CO₂ dans les fumées, on l'appellera : CO₂ maximum ou CO₂ max.



Étude d'une combustion réelle : CO₂ maximum

Exemple : combustion complète avec excès d'air de 1 m³.

1 m³ CH₄ + 2 m³ (O₂ + 3.76N₂) + 1 m³ d'air → 1 m³ CO₂ + 2 m³ H₂O + 7,52 m³ N₂ + 1 m³ d'air

On obtient donc 1 m³ CO₂ pour 9,52 m³ de fumée sèche, soit $CO_2 = \frac{1}{9,52} \times 100 = 10,5\%$.

Cette valeur de CO₂ 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 CO₂ inférieure au CO₂max, 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).

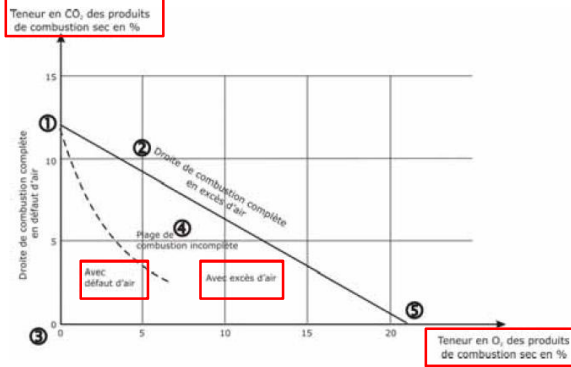


Teneur en O₂ et en CO₂

% O ₂ Oxygène	% CO ₂ Gaz Naturel	% CO ₂ Fioul	% Excès 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

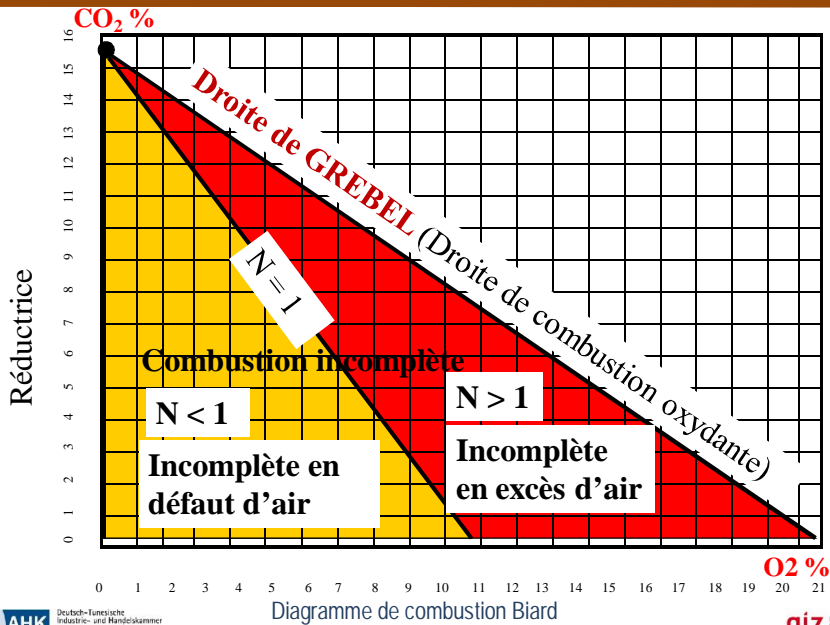
Diagrammes caractéristiques de la combustion

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 CO₂max. 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.

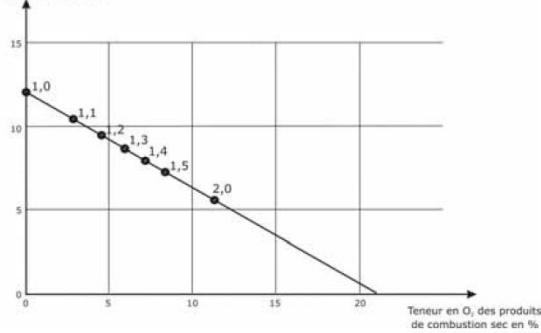
Diagrammes caractéristiques de la combustion



Diagrammes caractéristiques de la combustion

2) Diagramme d'Ostwald

Teneur en CO₂ des produits de combustion sec en %

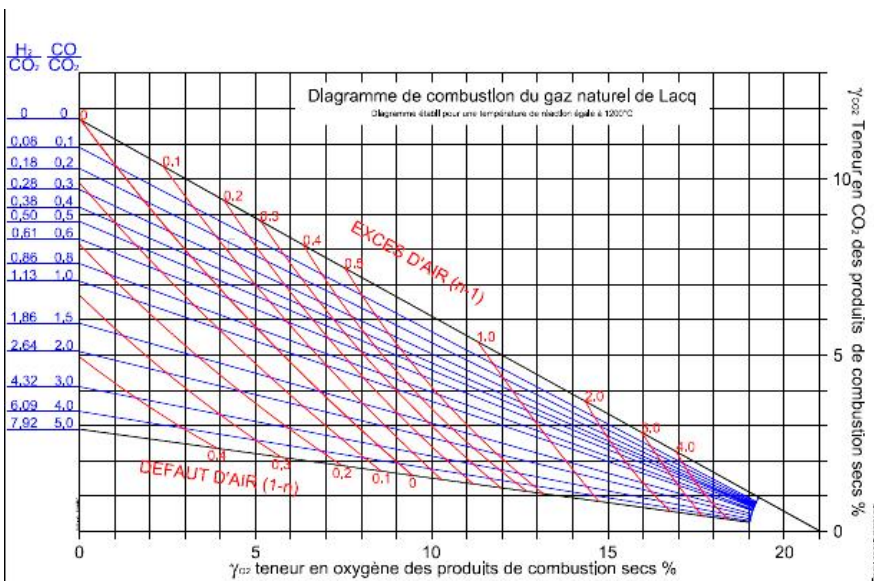


Le diagramme d'Ostwald, construit à partir du diagramme de Biard, est plus complet. Il fait apparaître sur la droite de Grebel les valeurs de l'excès d'air, que l'on peut déduire par la connaissance du taux de CO₂.

Exemple d'utilisation : taux de CO₂ : 10% (ou taux de O₂ : 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 CO₂, soit celle de l'O₂.

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 volumétrique	Pouvoir calorifique inférieur en milliers de calories par kilogramme	Equivalent en tonnes équivalent pétrole par tonne
— Pétrole brut			
• Qualité mélange zarzaitine.....	0.815	10300	1.030
• Qualité ashtar.....	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 groningen (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 (% CO₂),
- le pourcentage d'oxygène des fumées sèches (% O₂).

□ de déterminer X_a ou X'_a 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.

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

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

Exemple 2 :

Combustion oxydante de gaz naturel.

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

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

Rendement de combustion des chaudières à condensation

Une méthode :

- Calcul des pertes en chaleur sensible des fumées par mesure des températures et du CO₂ ou de l'O₂.
- 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 m³(n)/h (que nous appellerons « Q »).

Le rapport L/Q représente la masse réelle de condensats récupérée par kg ou par m³(n) de combustible brûlé.

Rendement de combustion des chaudières à condensation

Le pourcentage de gain maximal sur PCI est :

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

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

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

Les valeurs 100.(PCS/PCI)-1 et L/Q 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 ³ (n)
GN Russie	11,11	1,55 kg/m ³ (n)
GN mer du nord	11,11	1,71 kg/m ³ (n)
GN Groningue	12,36	1,40 kg/m ³ (n)
Butane commercial	8,69	3,87 kg/m ³ (n) 1,49 kg/kg
Propane commercial	8,69	3,03 kg/m ³ (n) 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 ₂ des fumées sèches	4 %
Volume de gaz lu au compteur en 2 minutes	1,5 m ³
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	litres	38,7
Charbon	0,63	5	tonnes	30,0
Gaz naturel	0,38	11	m ³	37,6

Autre définition du rendement de la combustion :

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

P'_f : les pertes par les fumées

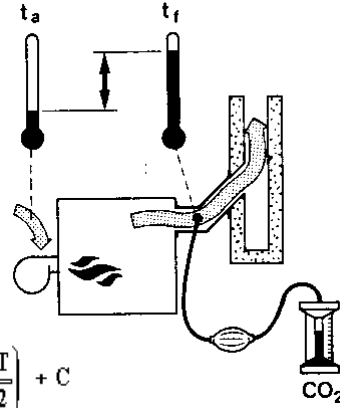
P'_i : les pertes par les imbrûlés dans les résidus solides

P'_r : 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 %
P. air	1,18
P. l.	0,19 l



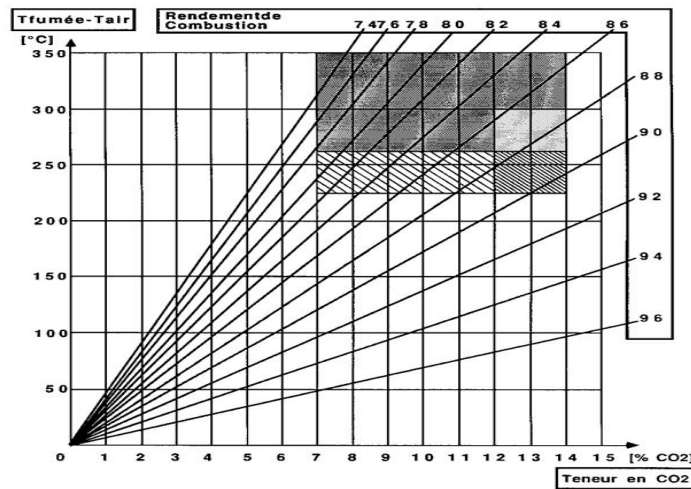
$$\text{Rendement (\%)} = 100 - \left(\frac{K \times \Delta T}{\% \text{ CO}_2} \right) + C$$

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)

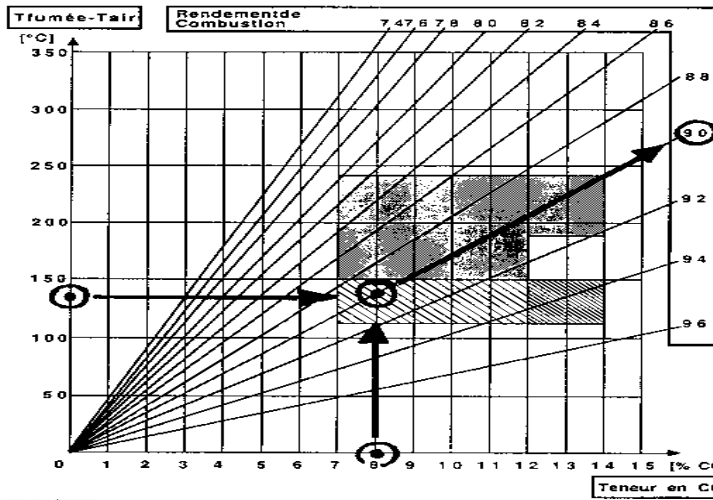
- Mauvais rendement dû à la trop haute température des gaz de fumée
- Acceptable mais peut être amélioré
- Assez bon mais l'excès d'air peut être réduit
- Bon



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 CO₂ 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.



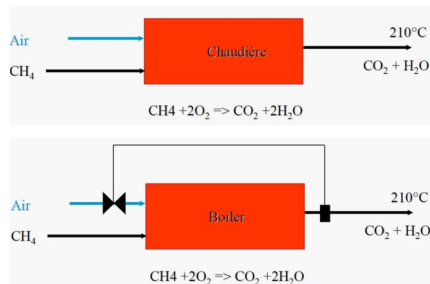
Préchauffe de l'air de combustion: Economie de l'ordre 0,5% (Assez faible)

LA PRODUCTION DE VAPEUR

Régulation de l'air de combustion

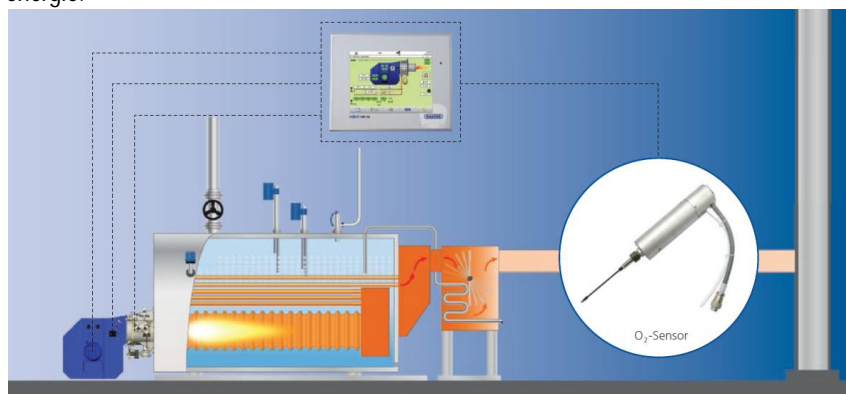
Régulation de l'air entrant (combustion)

- 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'O₂ 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

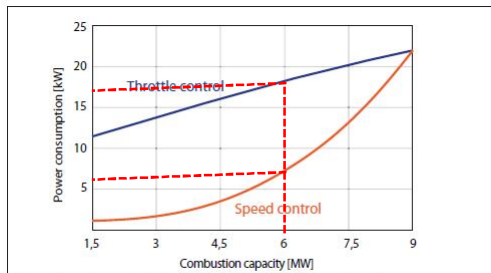
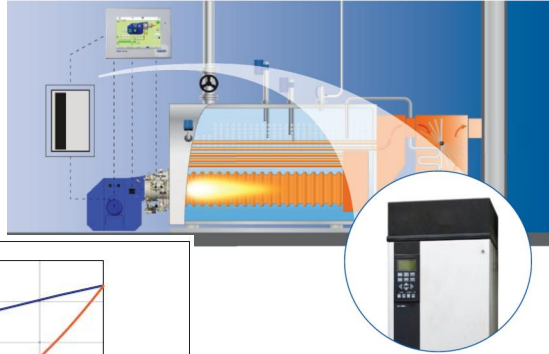
Sans variateur de vitesse, les ventilateurs d'air de combustion tournent toujours à plein régime, même lorsque le brûleur fonctionne à petite charge. **Consomme une grande quantité d'énergie électrique.**

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 Turco-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 MW	Operating hours 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
Amount	6,500	74.910	9.738

For further information, please visit: www.saacke.com



AHK Deutsch-Tunesische
Industrie- und Handelskammer
المندوبية العامة للتعاون
الاقتصادي والتجارة
Chambre Turco-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'O₂
- 2,4% avec une régulation combinée O₂ / 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

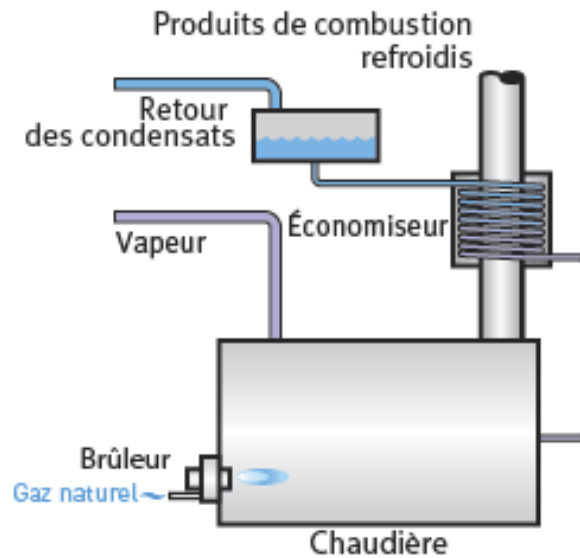
Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

- 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

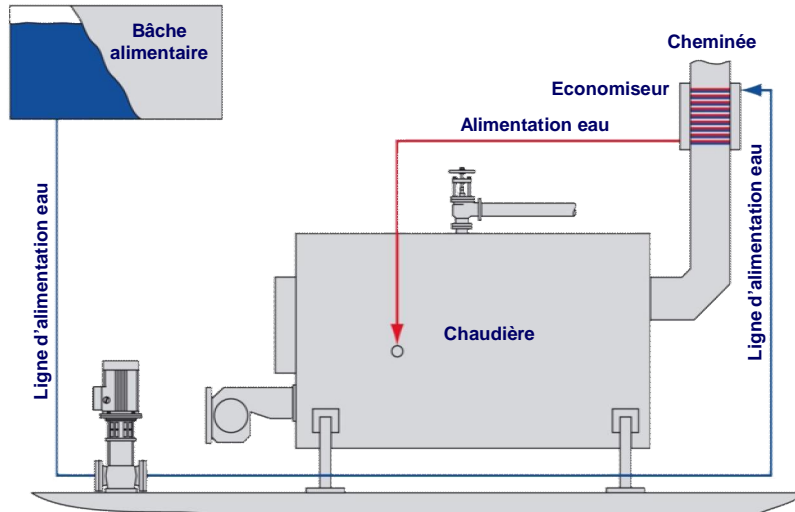
Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées



Les pertes par les fumées : Economiseur sur les fumées

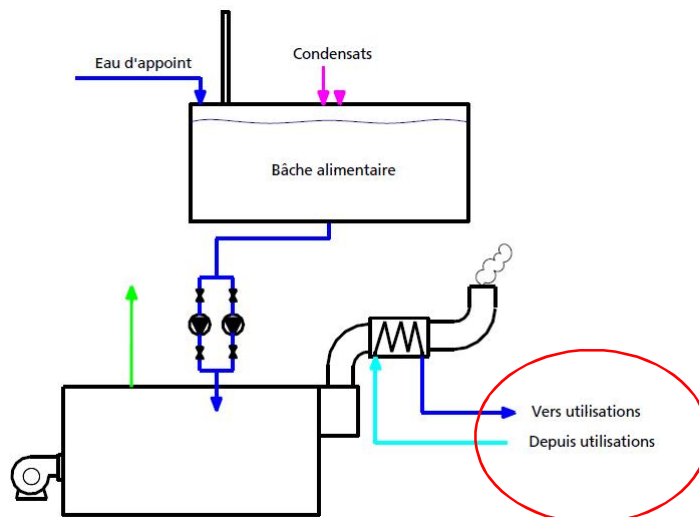
- Les économies d'énergie réelles générées par un économiseur proviennent de la chute de température des gaz de combustion circulant dans l'économiseur, multipliée par leur débit massique.
- La température des gaz de combustion d'une chaudière classique sans condensation est de 170 °C.
- Un économiseur 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

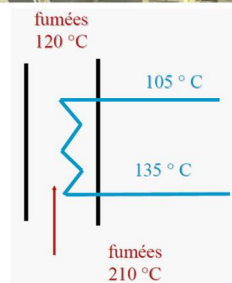
Exemple :

- 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

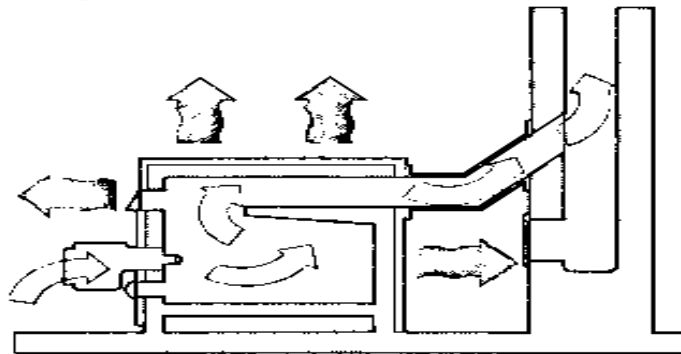


LA PRODUCTION DE VAPEUR

Les pertes de maintien

Les pertes de maintien / Pertes par l'ambiance

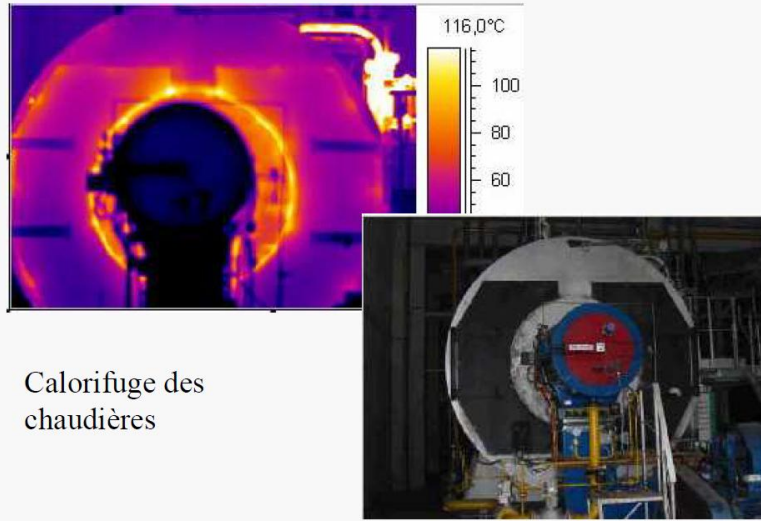
Les pertes pour le maintien en température



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%

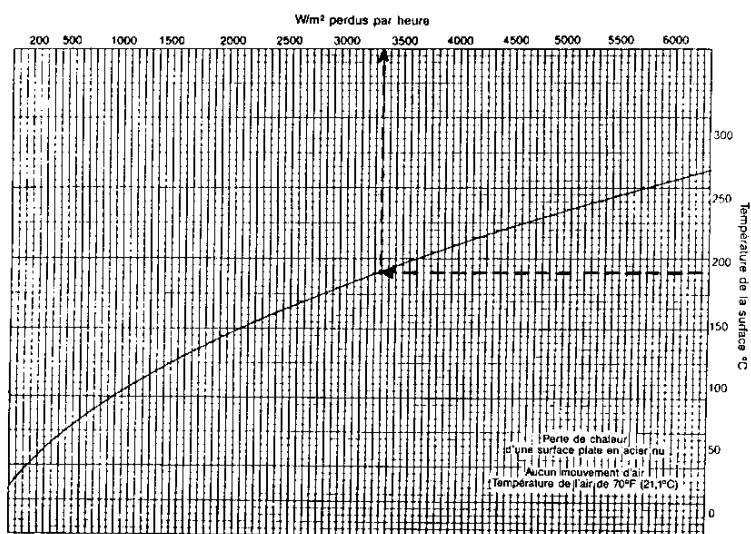
Exemple de diagnostic par thermographie



Calorifuge des chaudières

Les pertes de maintien

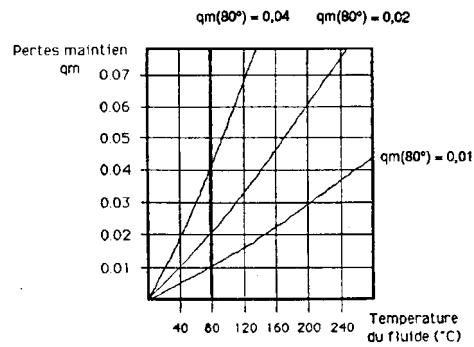
Abaque pour estimation des pertes de surfaces **non-isolées**
(par exemple portillon de visite sur une chaudière)



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
 - $q_m(80) = 0,01$

valeur de q_m pour une température de service supérieure à 80°C



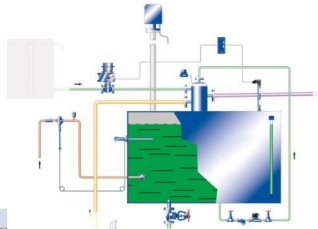
Rendements

Différents rendements sont définis selon les pertes considérées :

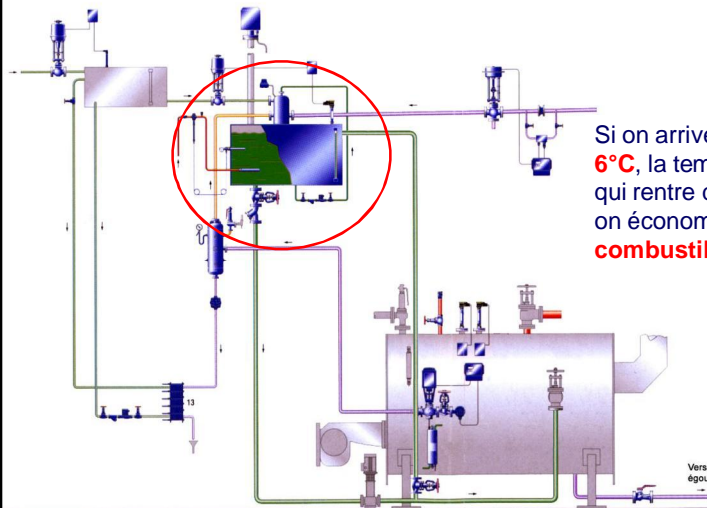
- **Le rendement de combustion** qui tient compte des pertes par les fumées, chaleur sensible et imbrûlés.
- **Le rendement instantané de la chaudière** qui considère en plus les pertes par rayonnement de la chaudière.
- **Le rendement annuel** qui tient compte aussi du fonctionnement intermittent et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

LA PRODUCTION DE VAPEUR

La bête alimentaire - Stockage

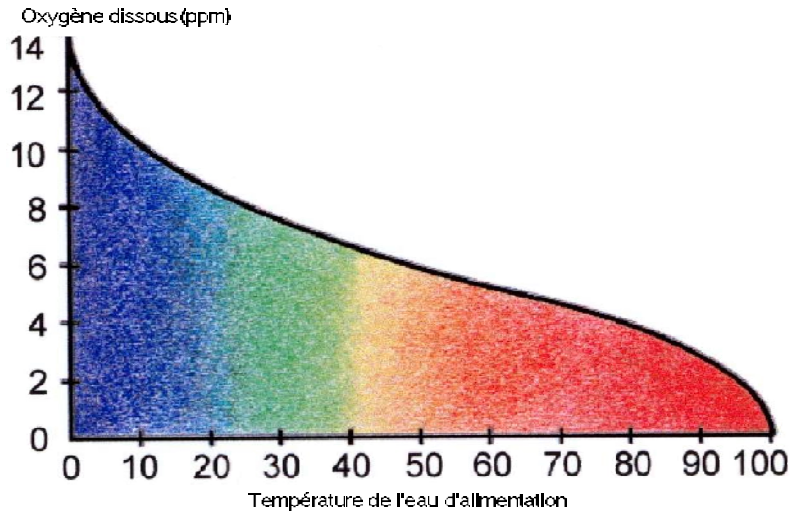


Gain énergétique



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

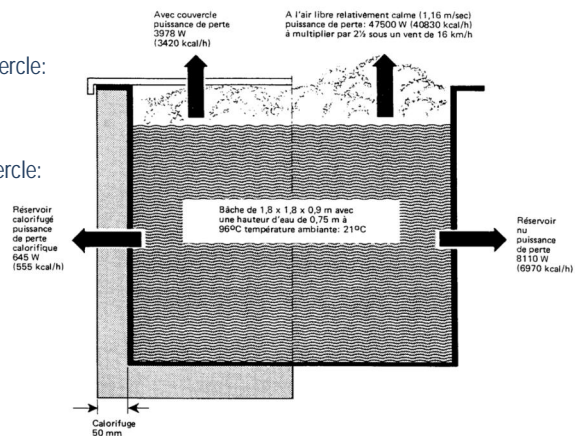


Pertes thermiques et de vapeur

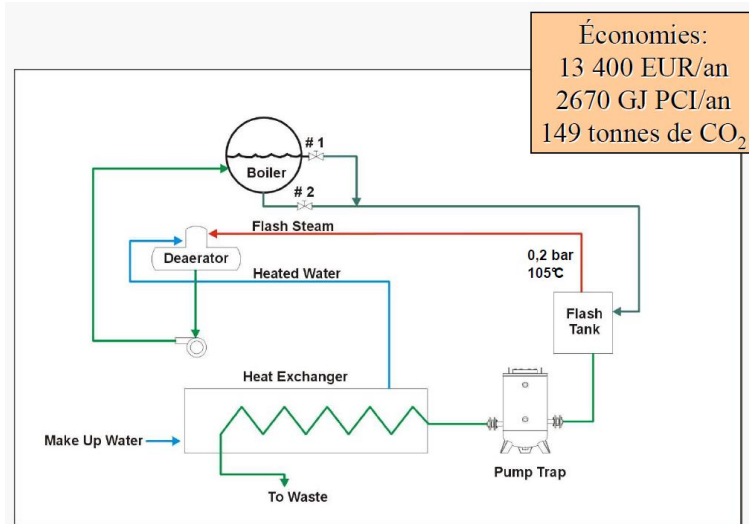
- Exemple de pertes pour une bache alimentaire

– 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

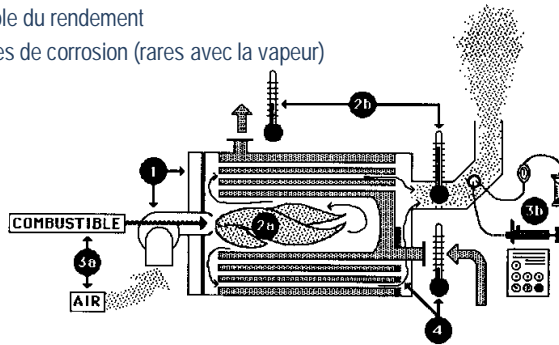


Résumé des économies possibles en chaufferie : Production

- 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)



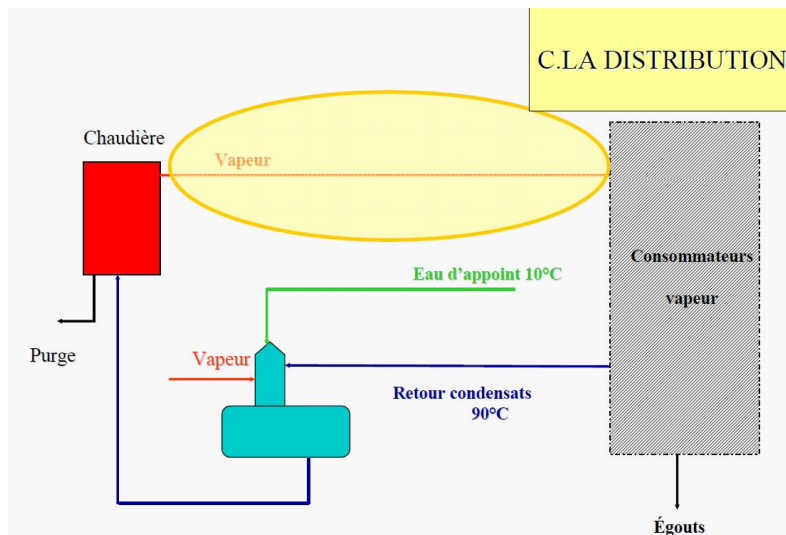
Exploitation optimale de la production de vapeur

- 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

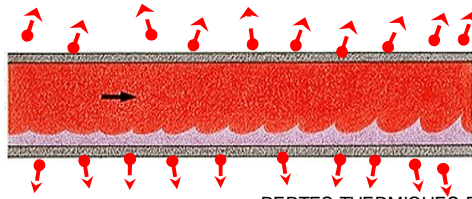
Les pertes thermiques sur les conduites

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

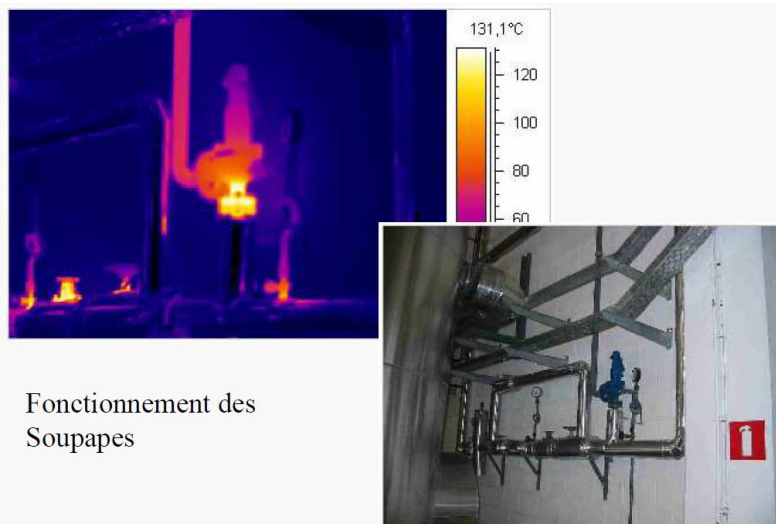
Différence de température Vapeur/air °C	Diamètre DN (mm)									
	15	20	25	32	40	50	65	80	100	150
	W									
56	540	650	790	1030	1080	1320	1550	1880	2330	3240
67	680	820	1000	1220	1360	1680	1980	2360	2960	4100
78	830	1000	1220	1490	1660	2030	2410	2980	3600	5000
89	990	1200	1460	1790	2050	2460	2890	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



Deutsches
Industrie- und Handelskammer
Chambre Turco-Allemande
de l'Industrie et du Commerce



Exemple de diagnostic par thermographie



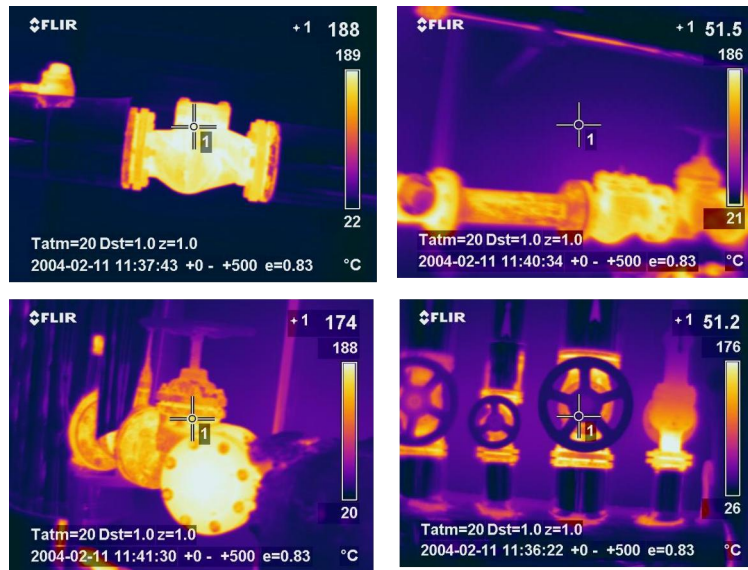
Fonctionnement des Soupapes



Deutsches
Industrie- und Handelskammer
Chambre Turco-Allemande
de l'Industrie et du Commerce



Exemple de diagnostic par thermographie



Abaque pour estimation des pertes des conduites non-isolées

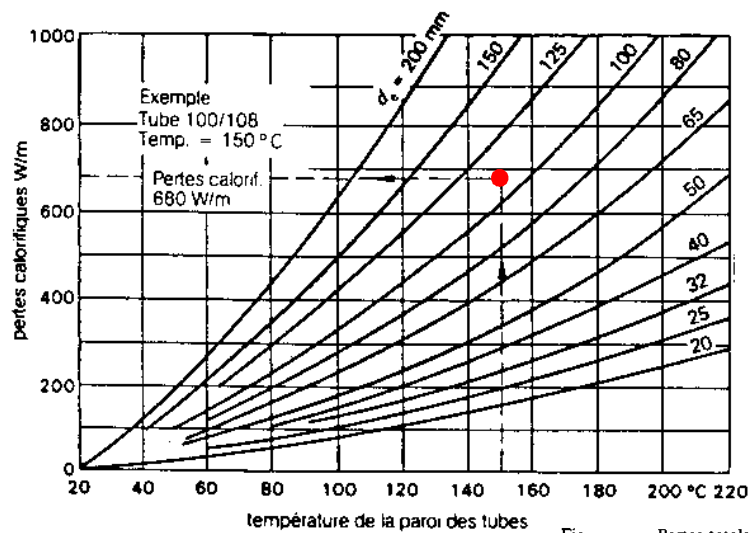
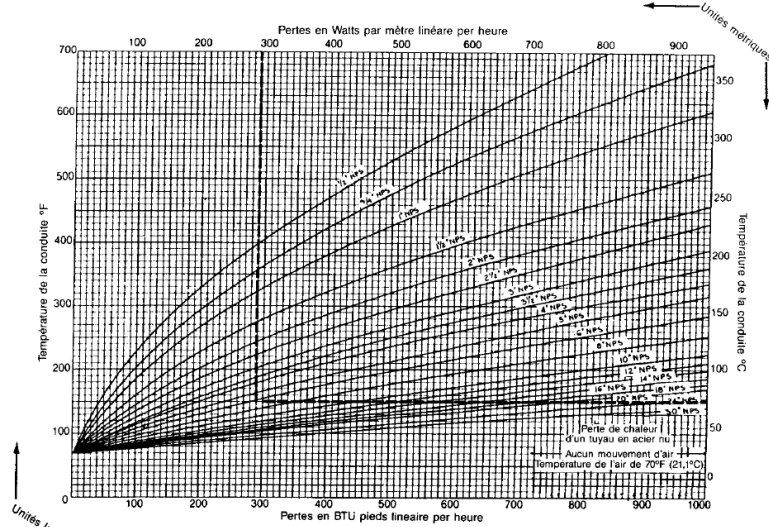


Fig. Pertes totales d'une conduite non isolée en air calme à 20 °C (coefficient de rayonnement $C=4,65 \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

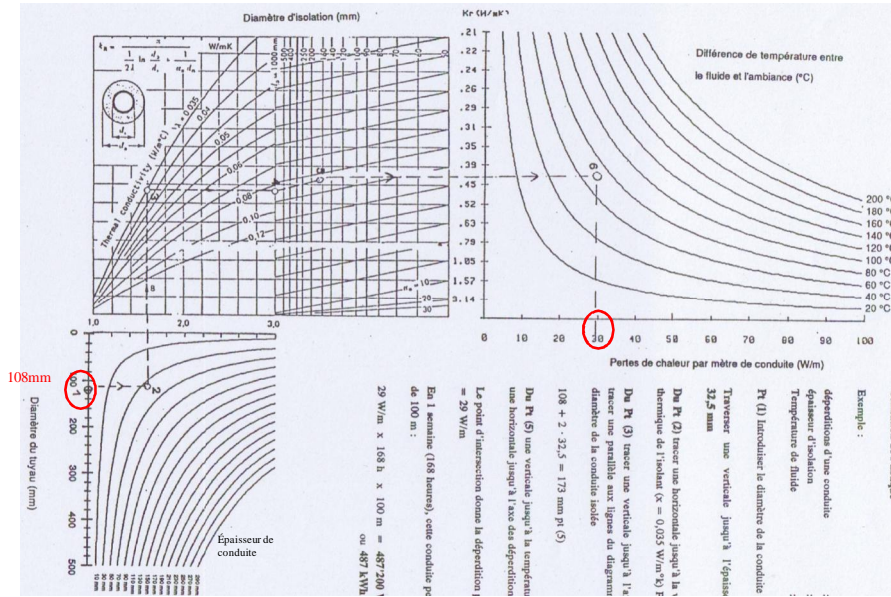
Abaque pour estimation des pertes des conduites non-isolées

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
(l) (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_v
 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	2 833,06	DT /an

PERTES THERMIQUES DES APPAREILS

Différence de température Vapeur/air °C	Taille des appareils									
	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	7860	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.

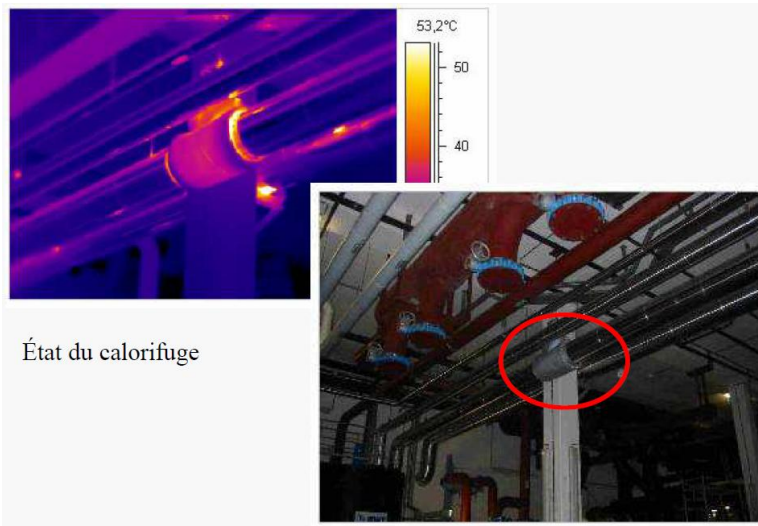
LA DISTRIBUTION DE LA VAPEUR

Les Fuites de vapeur

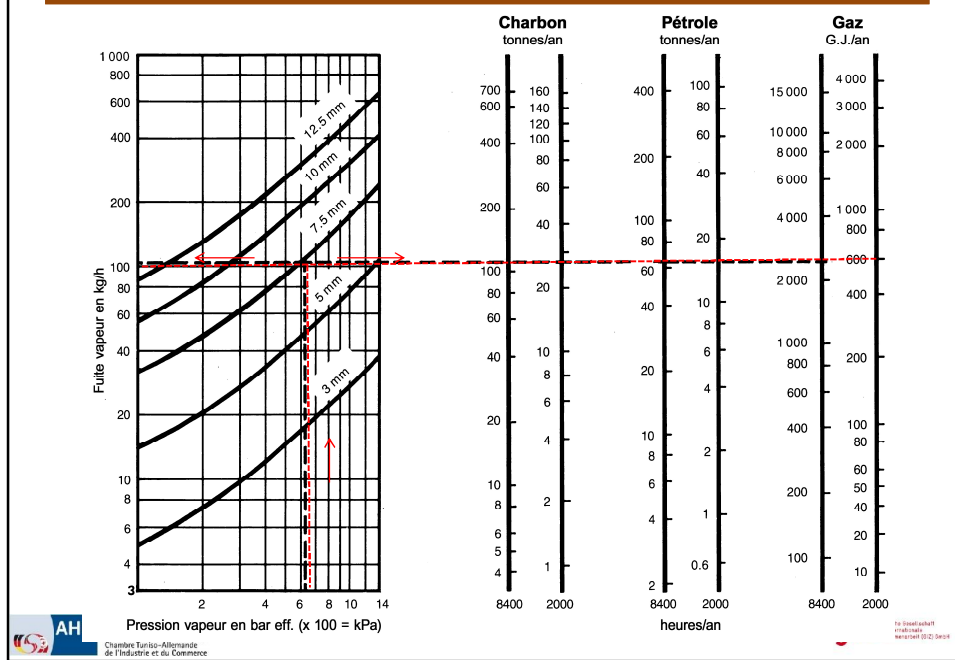
Fuites de vapeur



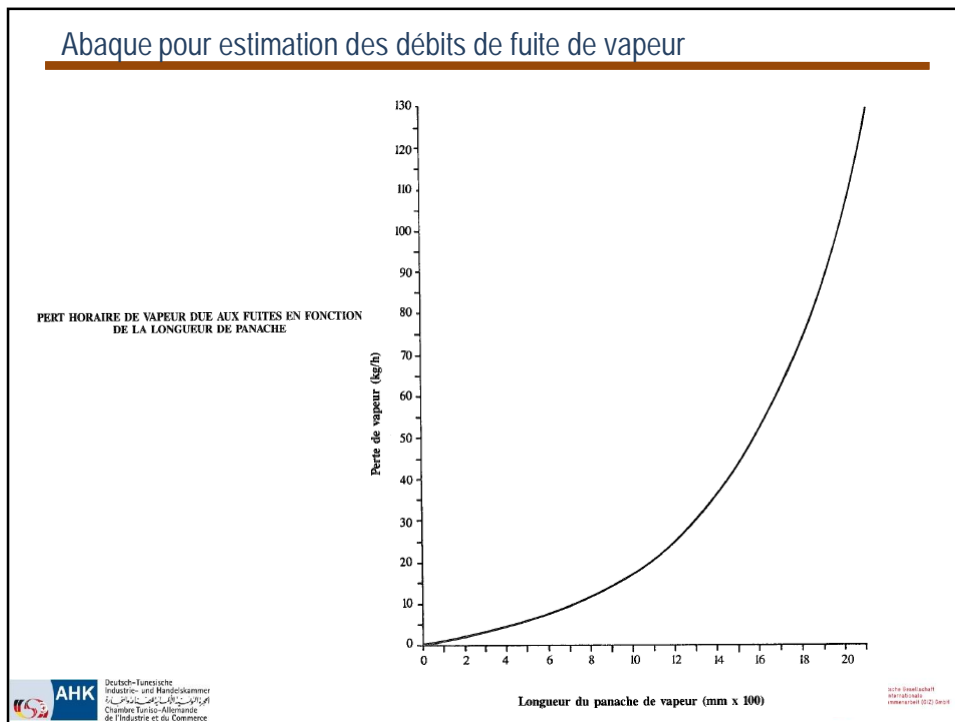
Exemple de diagnostic par thermographie



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

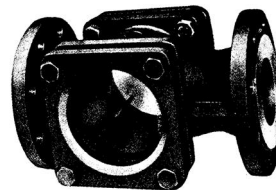
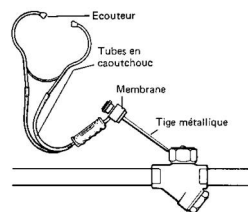
DN du DN moyen purgeur du siège	Perte de vapeur (kg/h)		
	6 bar eff	14 bar eff	32 bar eff
DN 15 3,0 mm	17	38	86
DN 20 5,0 mm	48	107	239
DN 25 7,5 mm	110	242	539
DN 40 10,0 mm	195	429	956
DN 50 12,5 mm	305	670	1494

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

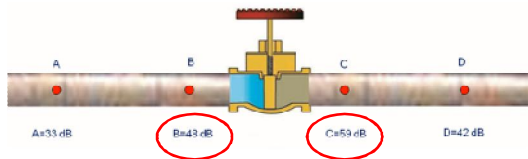
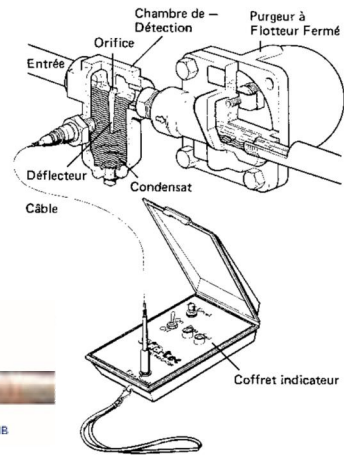
Détection des fuites des purgeurs

- 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

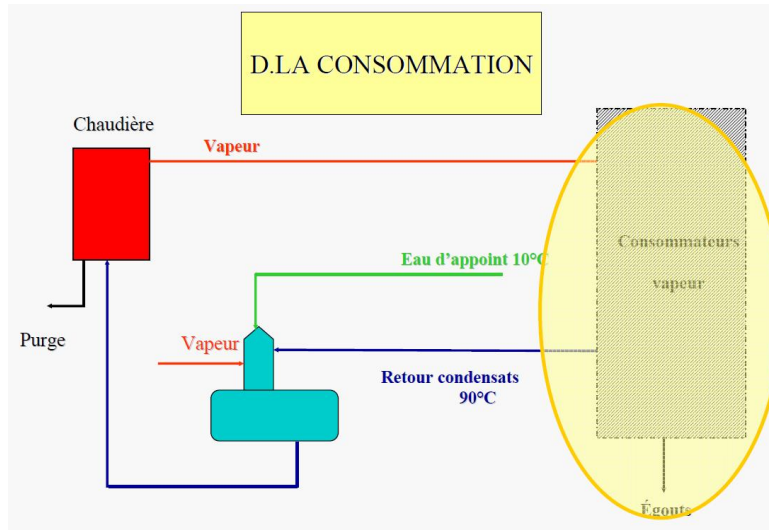
– d) Détecteur ultrasonique



LA CONSOMMATION DE VAPEUR

Production de la Vapeur

Optimisation de la boucle vapeur : Consommateurs



Optimisation de la consommation: Méthodologie

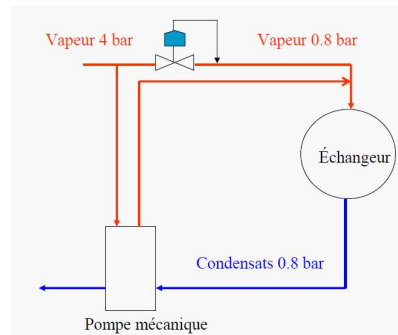
- Connaître et analyser les besoins
 - En général, la vapeur est liée à la demande des différents processus industriels
 - La vapeur peut dans certains cas aussi être utilisée pour le «simple» chauffage des locaux et/ou de l'eau chaude sanitaire
- Connaître et analyser les installations techniques
 - 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



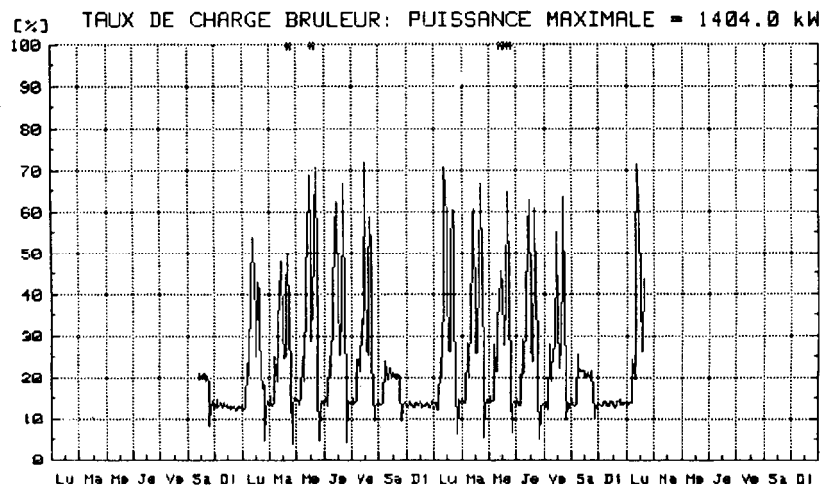
Installation de vapeur

- 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

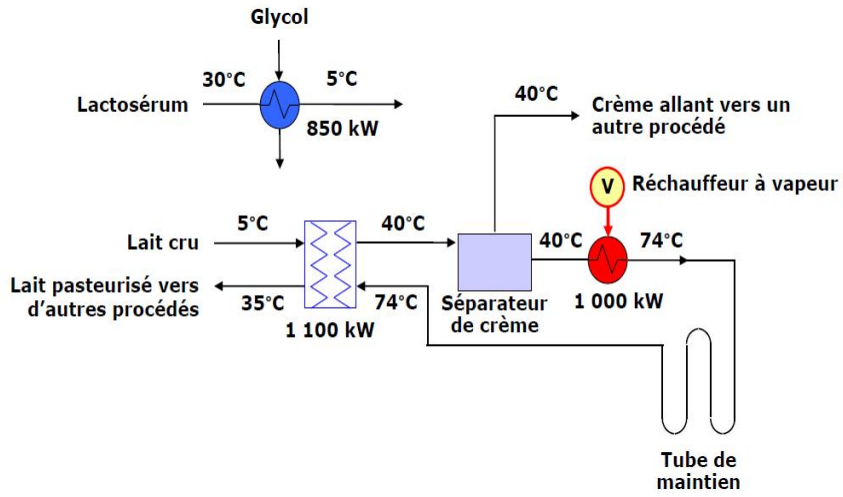
NIVEAUX DE TEMPERATURE ET PRESSION USUELS			
Secteur et appareils		Température	Pression
CHALEUR TECHNIQUE  BUAND.	- Calandre	190°C	12 bars
	- Presse	150°C	4 bars
	- Machine à laver		
	-		
 CUISINE	- Marmites	120°C	1 bars
	- Steamer	120°C	1 bars
	-		
	-		
 STERIL.	- Autoclaves	130°C	1.7 bars

Profil de consommation de vapeur : Exemple dans les hôpitaux

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



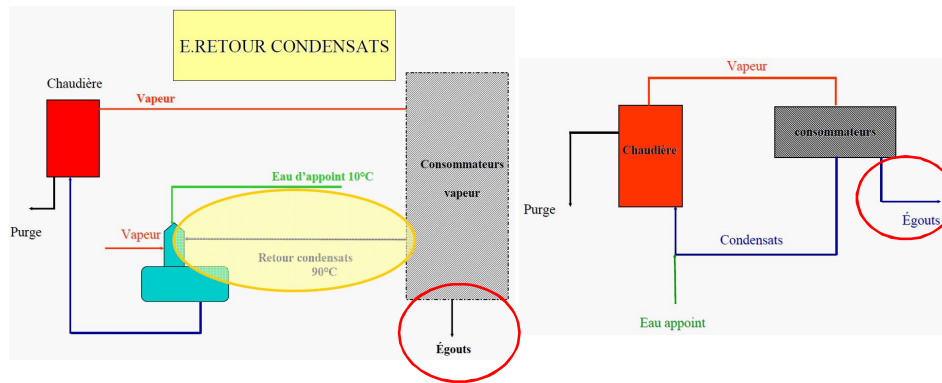
Profil de consommation de vapeur : Exemple unité de pasteurisation



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

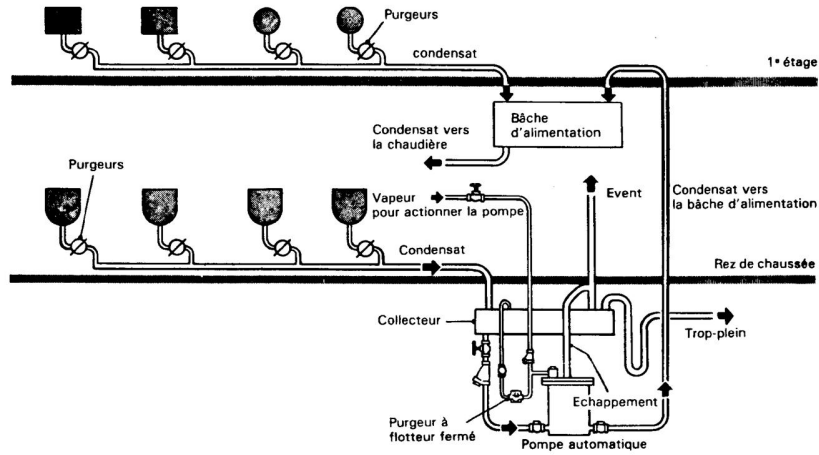
Condensats

- 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

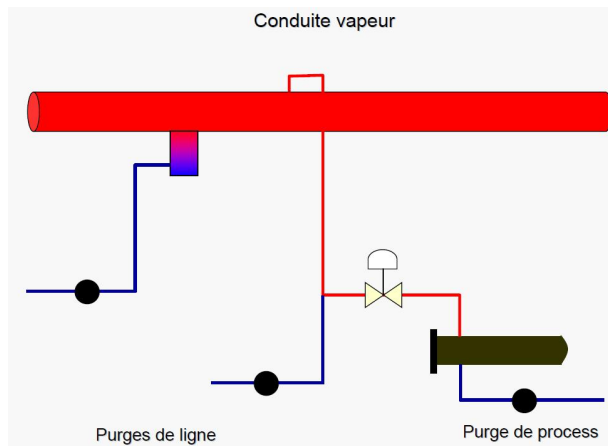


Retour des condensats



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) x (3) x [(4) - (5)] x (6) x $\frac{(7)}{100}$
= _____ = _____ 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)

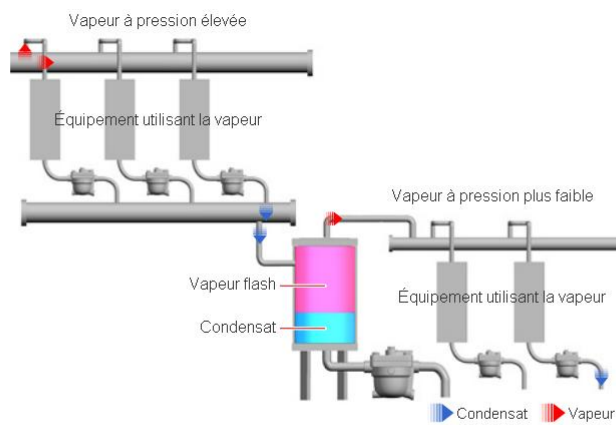
Période de rentabilité = $\frac{(13)}{(12)}$ = _____ = _____ ans (14)

RETOUR DES CONDENSATS

La revaporisation

Revaporisation

Exemple d'un système de récupération de vapeur flash

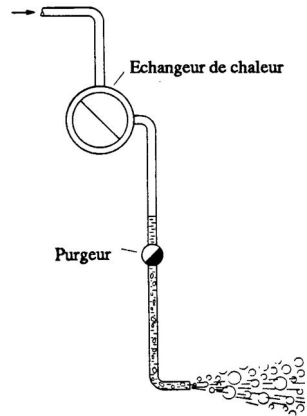


Copyright TLV CO., LTD.

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

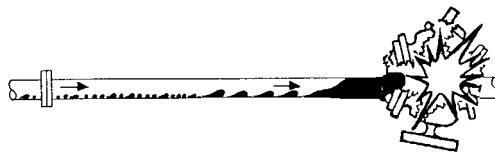
Revaporisation

- 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 :

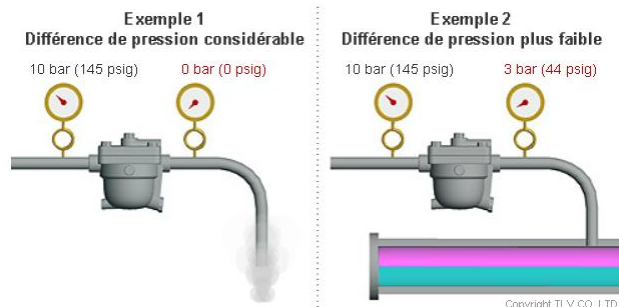
$$\% \text{ de vapeur flash} = \frac{h_{f1} - h_{f2}}{h_{fg2}}$$

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 _f	h _{fg}	h _g	
-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_{f1}
 = h_{f2}
 = h_{fg2}

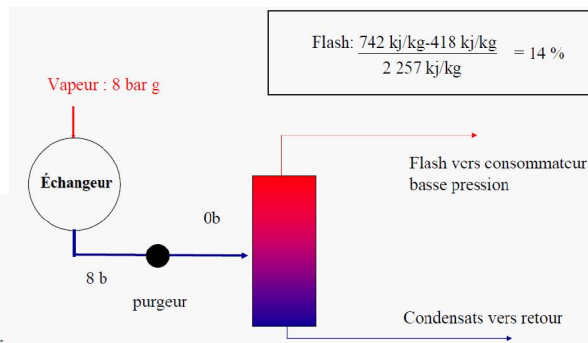
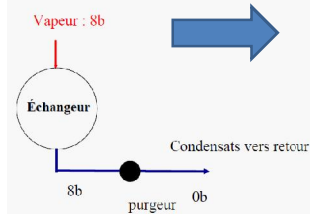
AHK Deutsches Institut für Wirtschaftsprüfung
Chambre Turco-Allemande de l'Industrie et du Commerce

giz Deutsche Gesellschaft für Wirtschaftsprüfung
Gesamtwirtschaftsprüfung

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

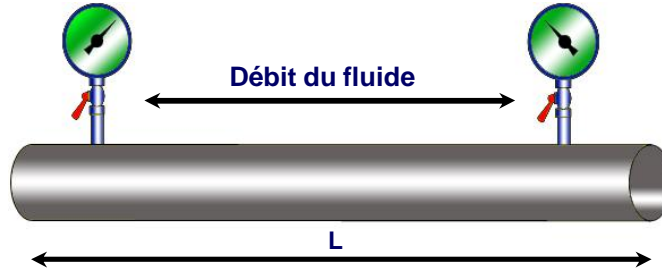
La maintenance



RECOMMANDATIONS DE LA MISE EN PLACE DES RÉSEAUX VAPEUR

Production de la Vapeur

Débit et perte de charge

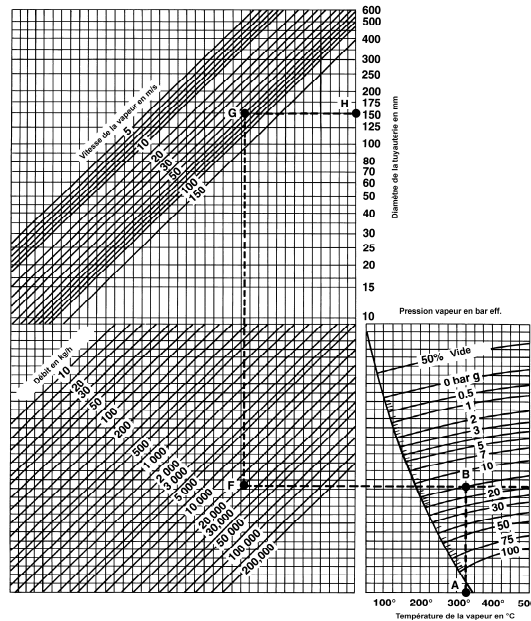


$$\frac{P_1 - P_2}{L} = F$$

F = Facteur de perte de charge

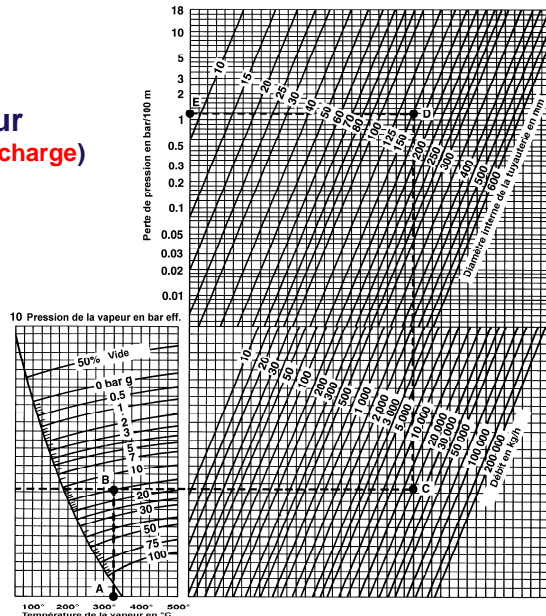
Dimensionnement des tuyauteries

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

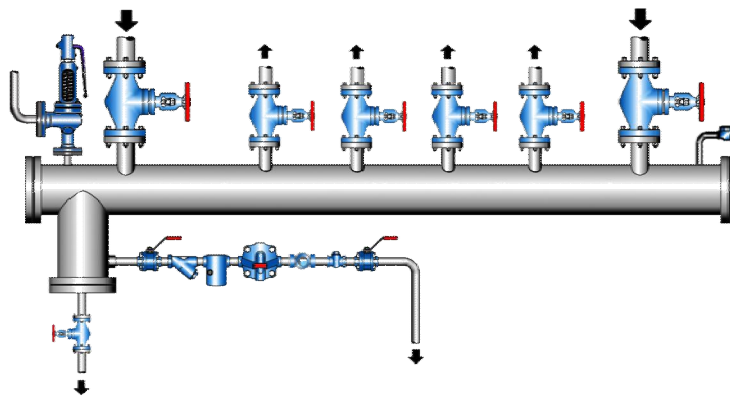


Dimensionnement des tuyauteries

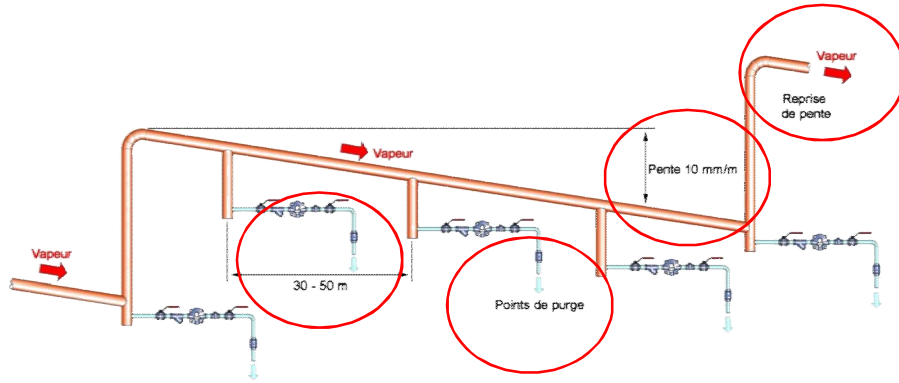
Abaque de dimensionnement des tuyauteries pour vapeur (Méthode utilisant la perte de charge)



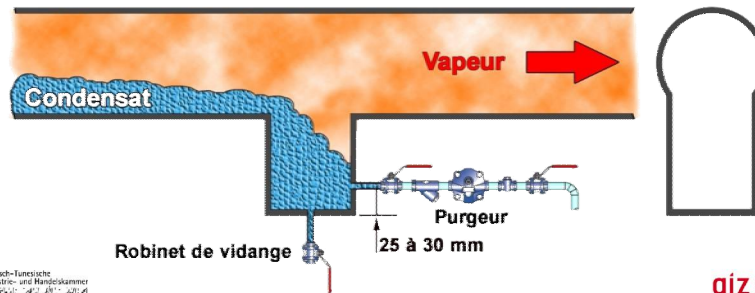
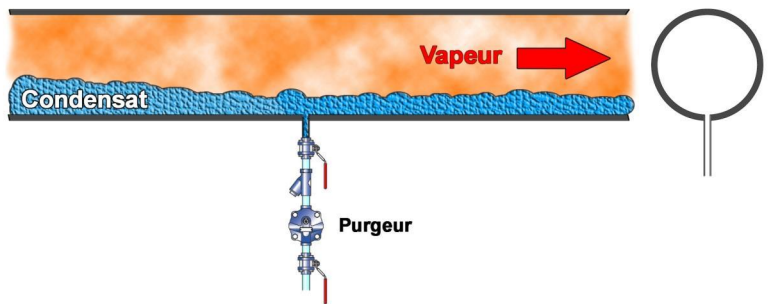
Barillet départ chaudière



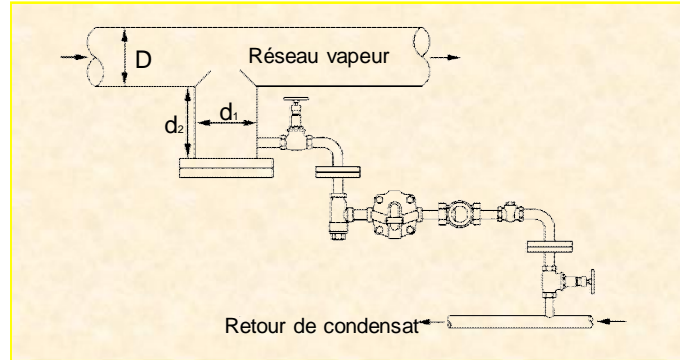
Circuit de Vapeur



Points de purge

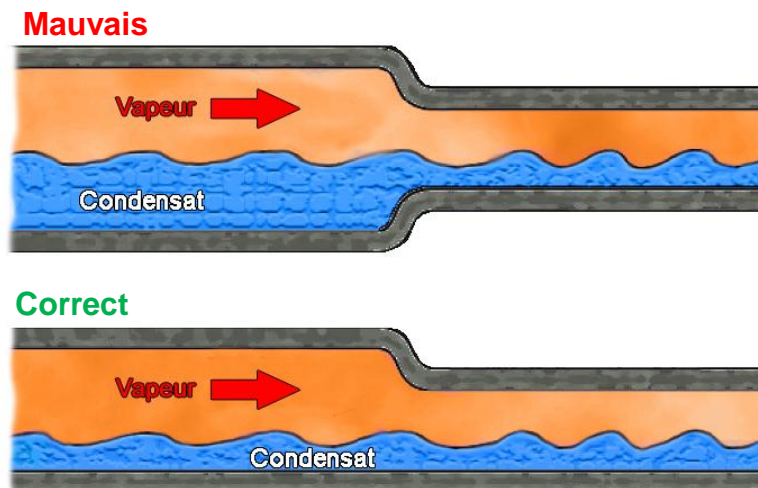


Purges des réseaux vapeur

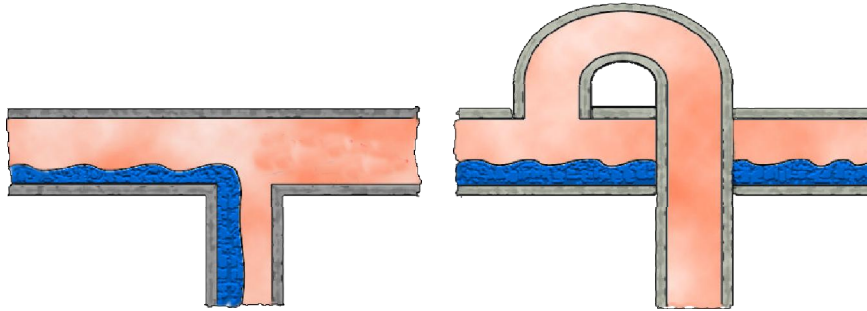


D = Ø du réseau	d ₁ = Ø du pot de purge	d ₂ = Prof. du pot de purge
jusqu'à 100 mm	d ₁ = D	Minimum d ₂ = 100 mm
125 - 200 mm	d ₁ = 100 mm	Minimum d ₂ = 150 mm
250 mm et au-dessus	d ₁ = D/2	Minimum d ₂ = D

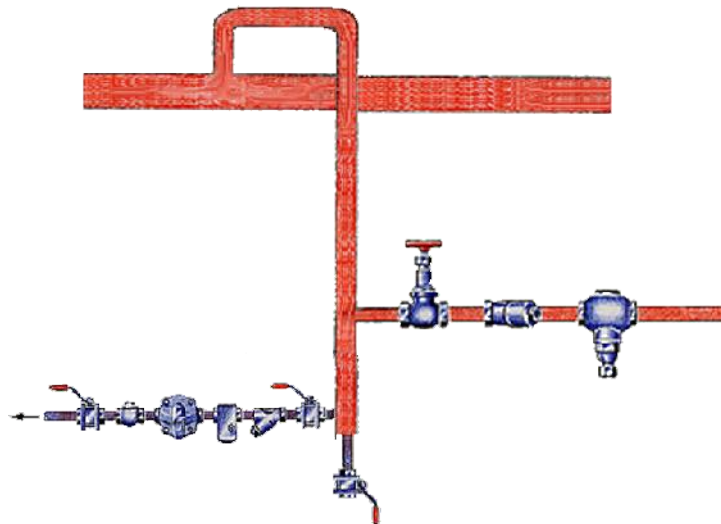
Réductions de tuyauteries



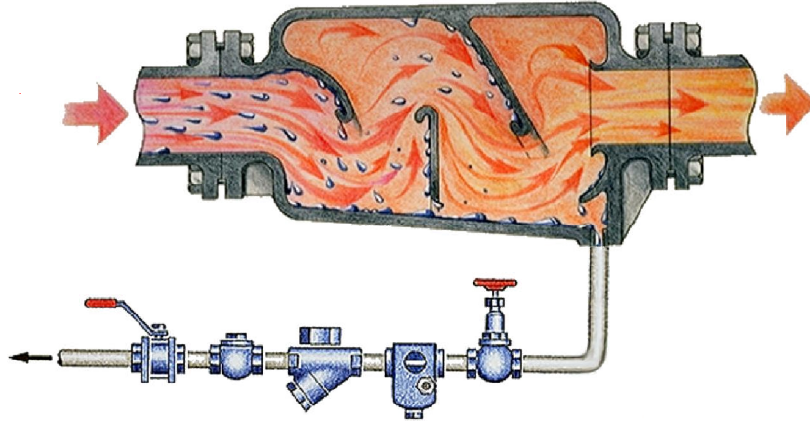
Raccordements de distribution



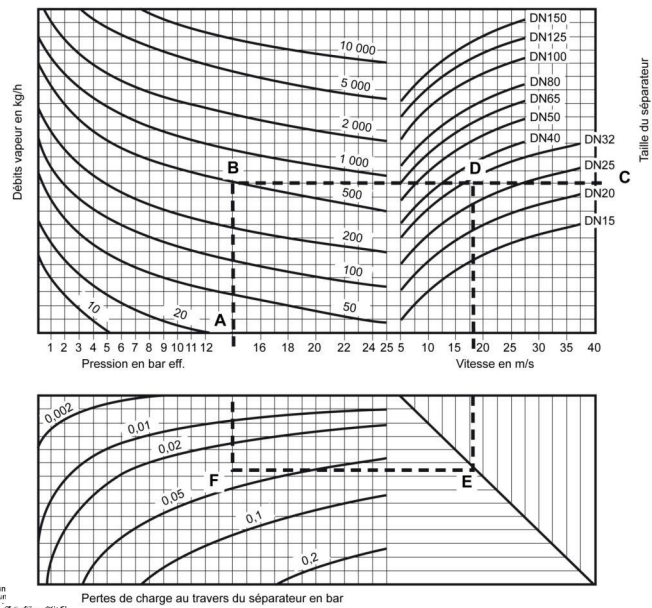
Piquages et points bas

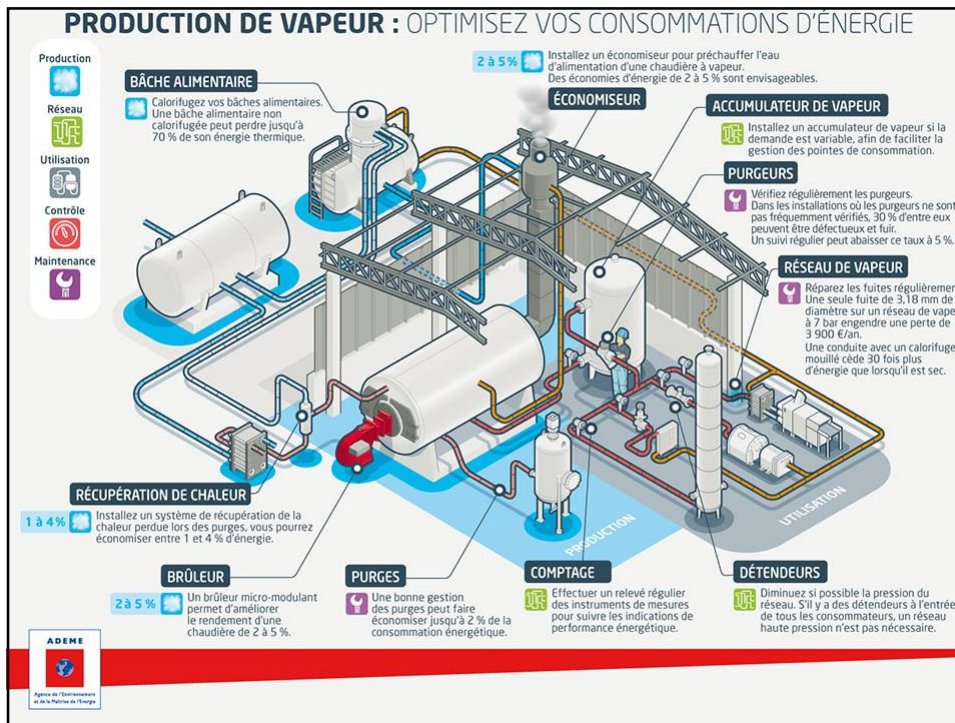


Alignement de tuyauterie et point de purge



Abaque de dimensionnement des séparateurs





Merci pour votre attention...

... l'efficacité énergétique est sans limites

Deutsch-Tunesische
Industrie- und Handelskammer
المندوبية الألمانية-التونسية
Chambre Tuniso-Allemande
de l'Industrie et du Commerce

giz
Growth Intelligence Zone
www.giz.de