

# LA CONDENSATION

La condensation

Les générateurs à condensation

Points d'attention

Point de rosée

**Rendement de combustion**

La condensation est un changement d'état qui correspond au passage de l'état vapeur à l'état liquide.

Exemples de phénomènes courants dus à la condensation de l'eau :



Le brouillard.

La rosée du matin.

La buée sur une vitre.

L'humidité sur les murs d'une pièce mal ventilée.

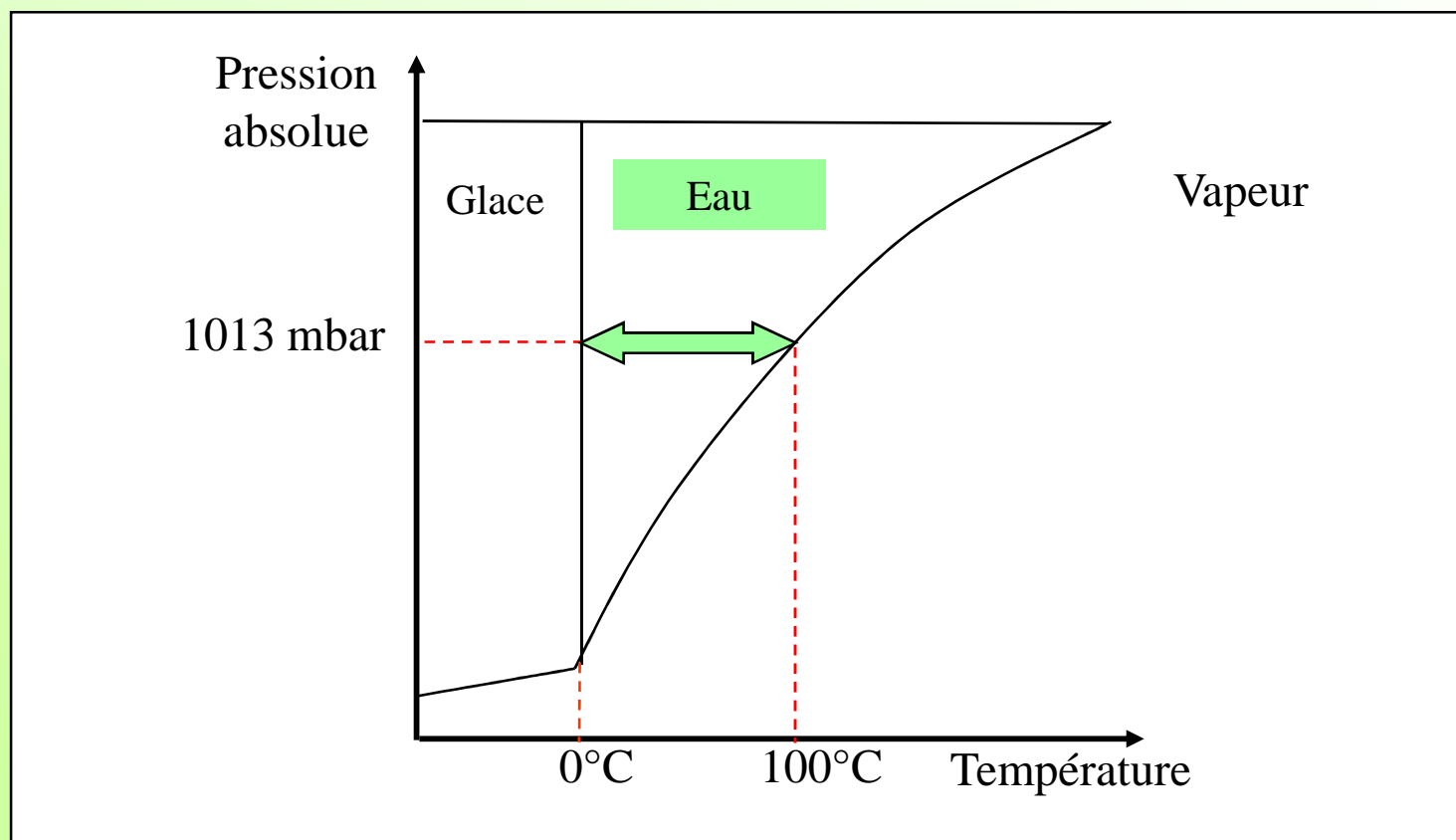
Le givrage des parois du congélateur.

La « vapeur » produite par la respiration en hiver.

Le panache blanc des refroidisseurs.

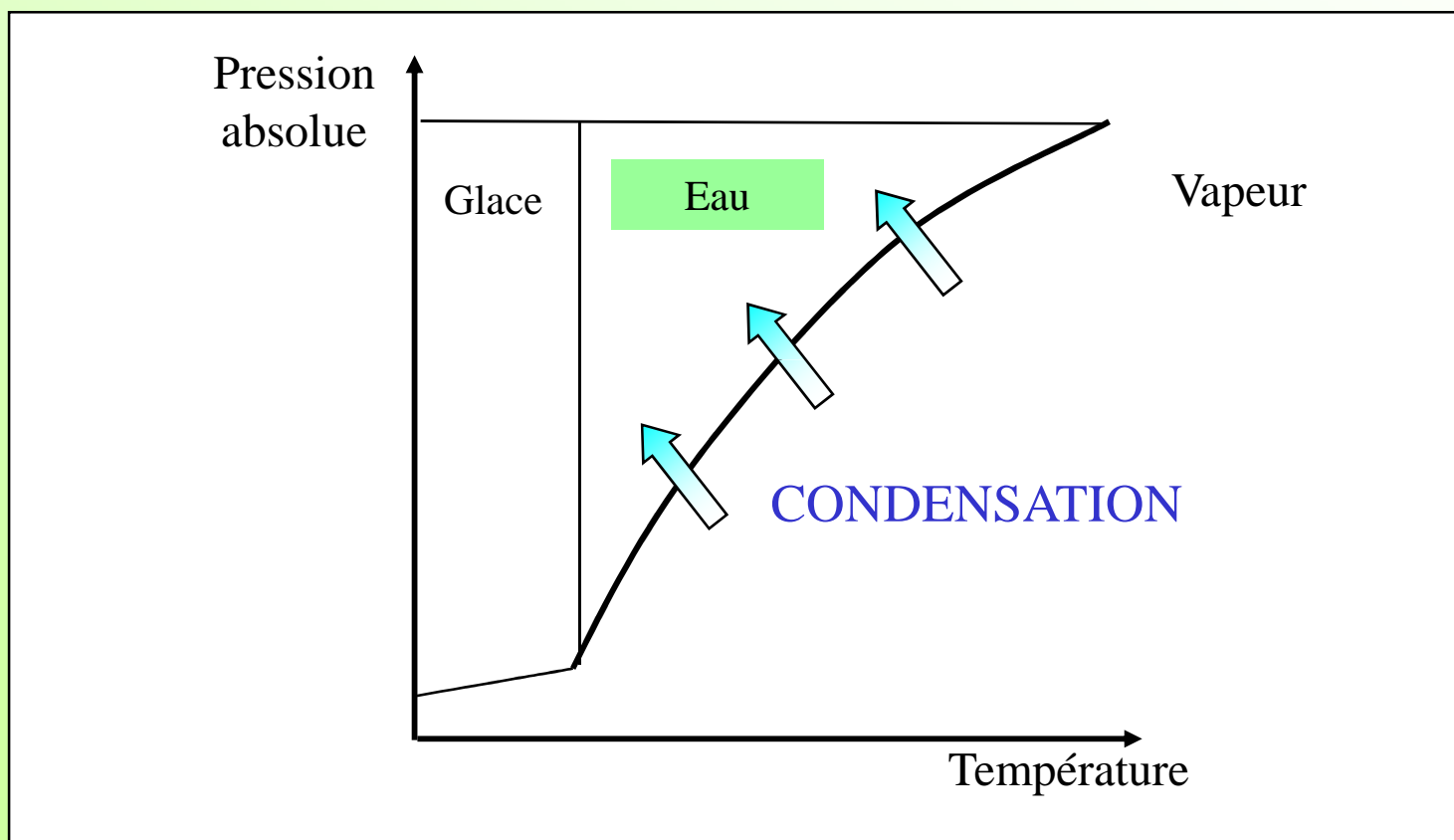
Le panache blanc des fumées en sortie de cheminée.

L'état de l'eau dépend de sa pression et de sa température.

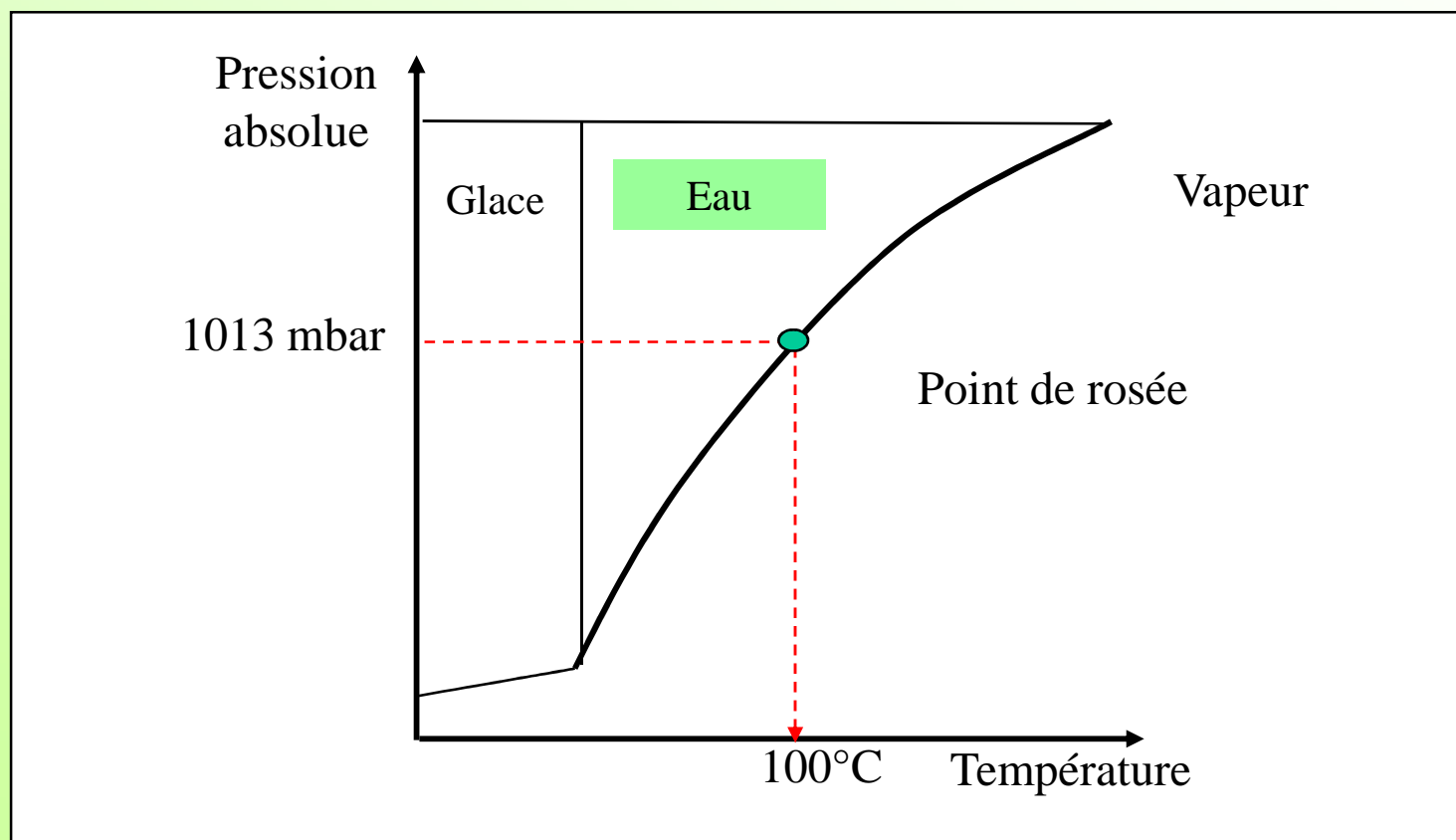


Par exemple à 1013 mbar de pression l'eau est à l'état liquide de 0 °C à 100°C.

La condensation est le passage de l'état vapeur à l'état liquide.

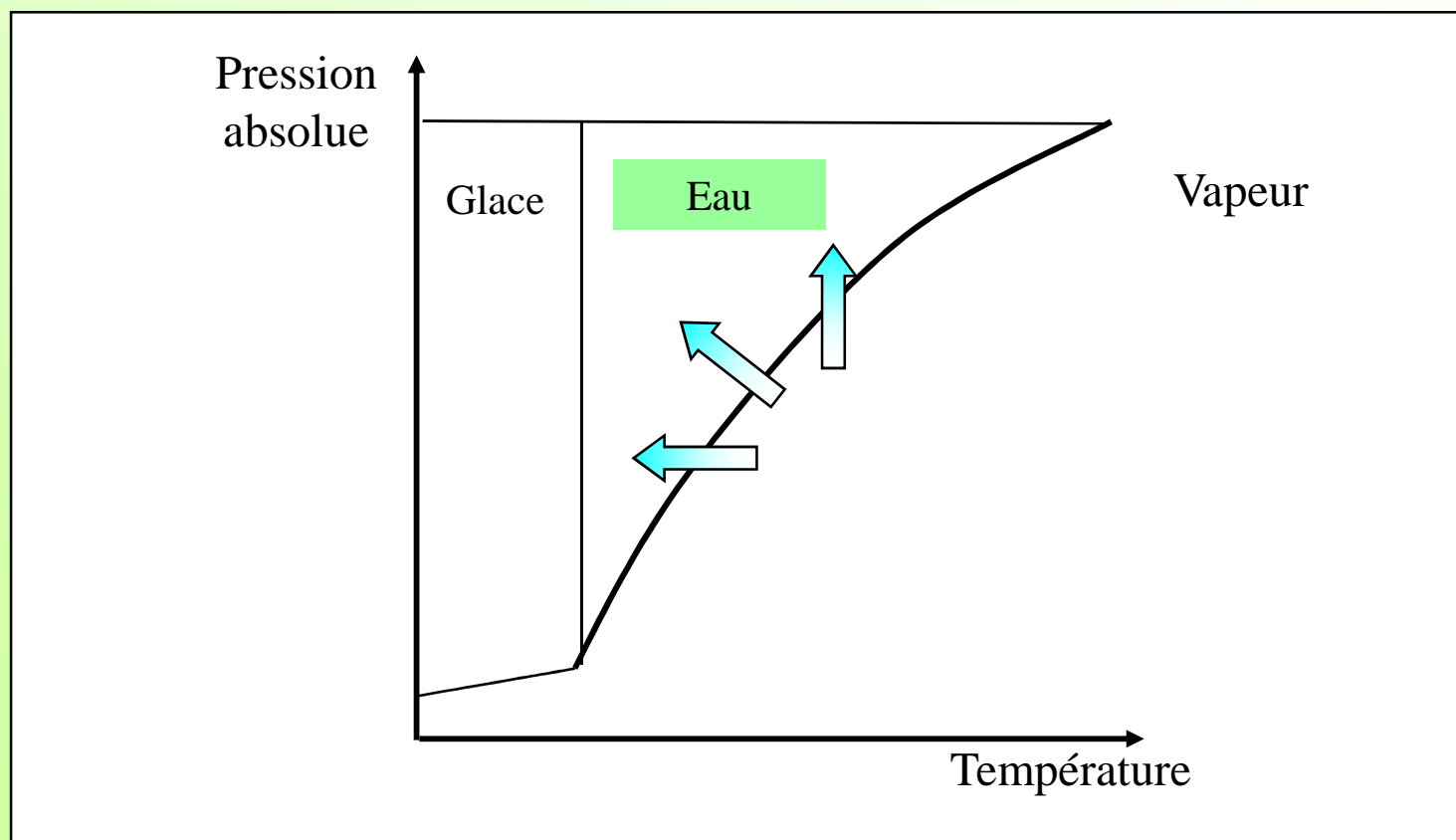


La température où s'effectue la condensation s'appelle « point de rosée »



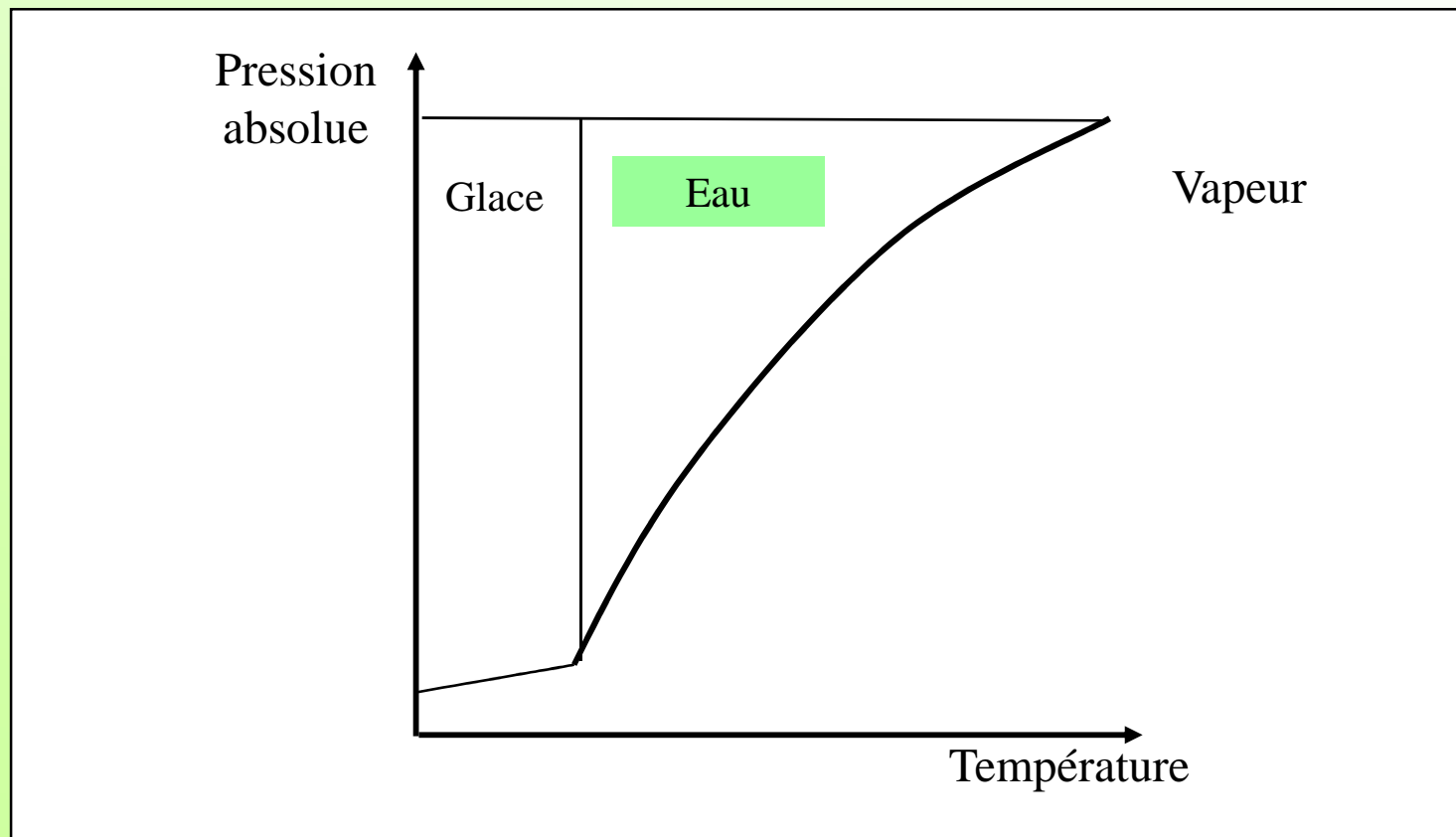
Par exemple à 1013 mbar de pression le point de rosée est de 100°C.

On peut condenser la vapeur en diminuant la température.



On peut condenser la vapeur en augmentant la pression.  
Ou en jouant à la fois sur la pression et sur la température

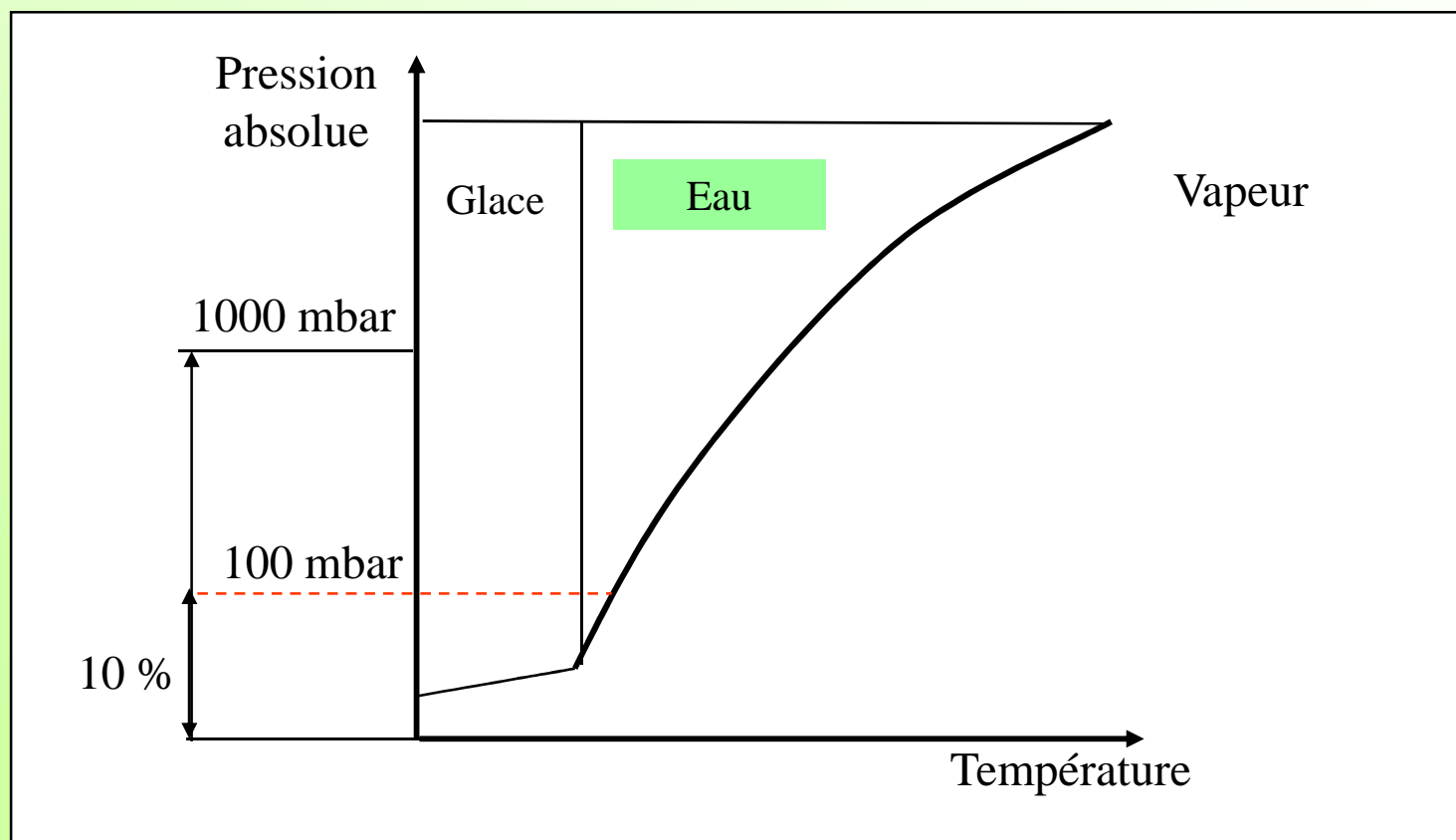
Dans un mélange gaz-vapeur, l'eau suit la même loi de changement d'état.



Son état dépend de sa température et de sa « pression partielle ».

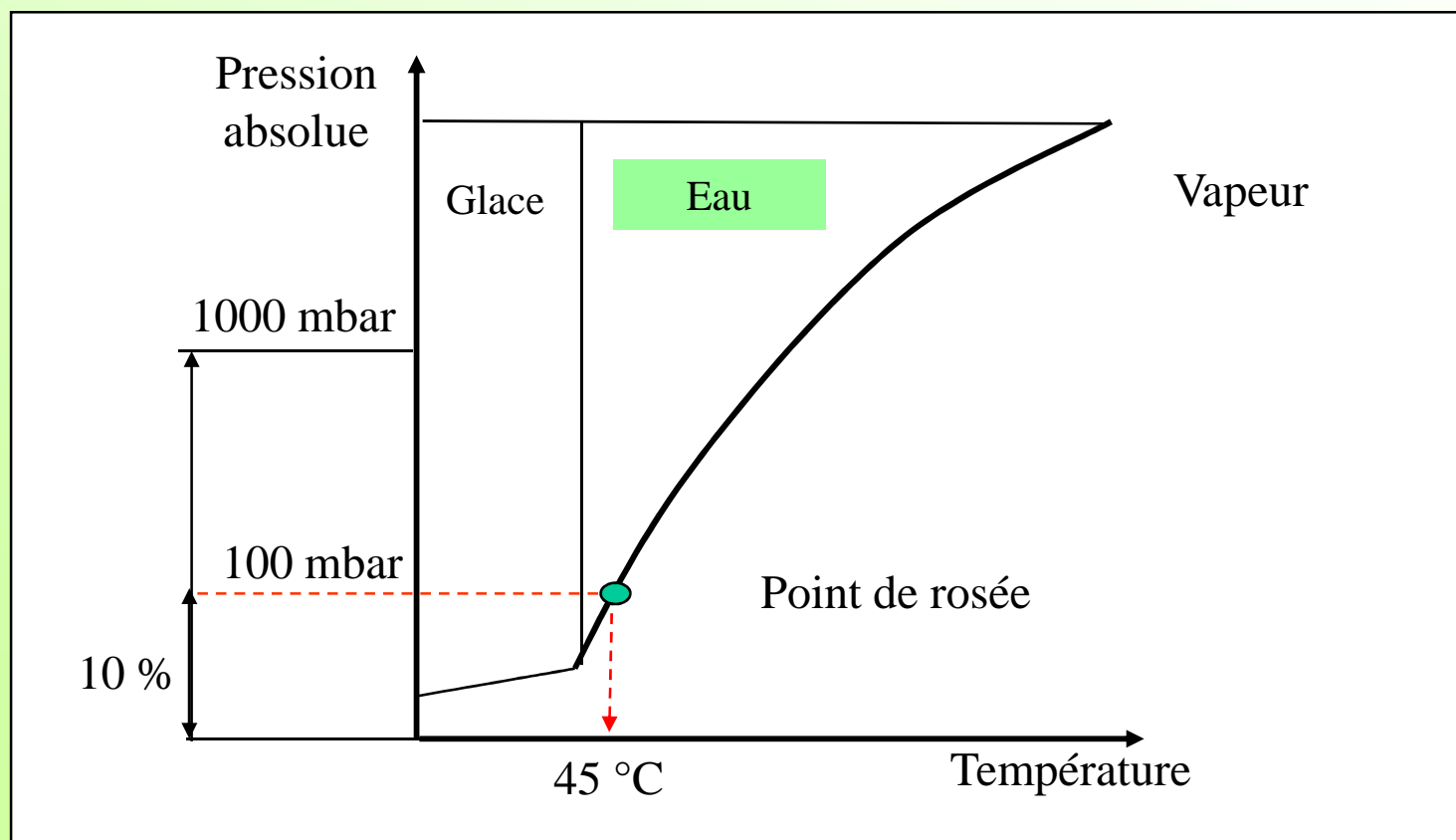


La pression partielle de la vapeur est proportionnelle à la teneur en « eau » du mélange.



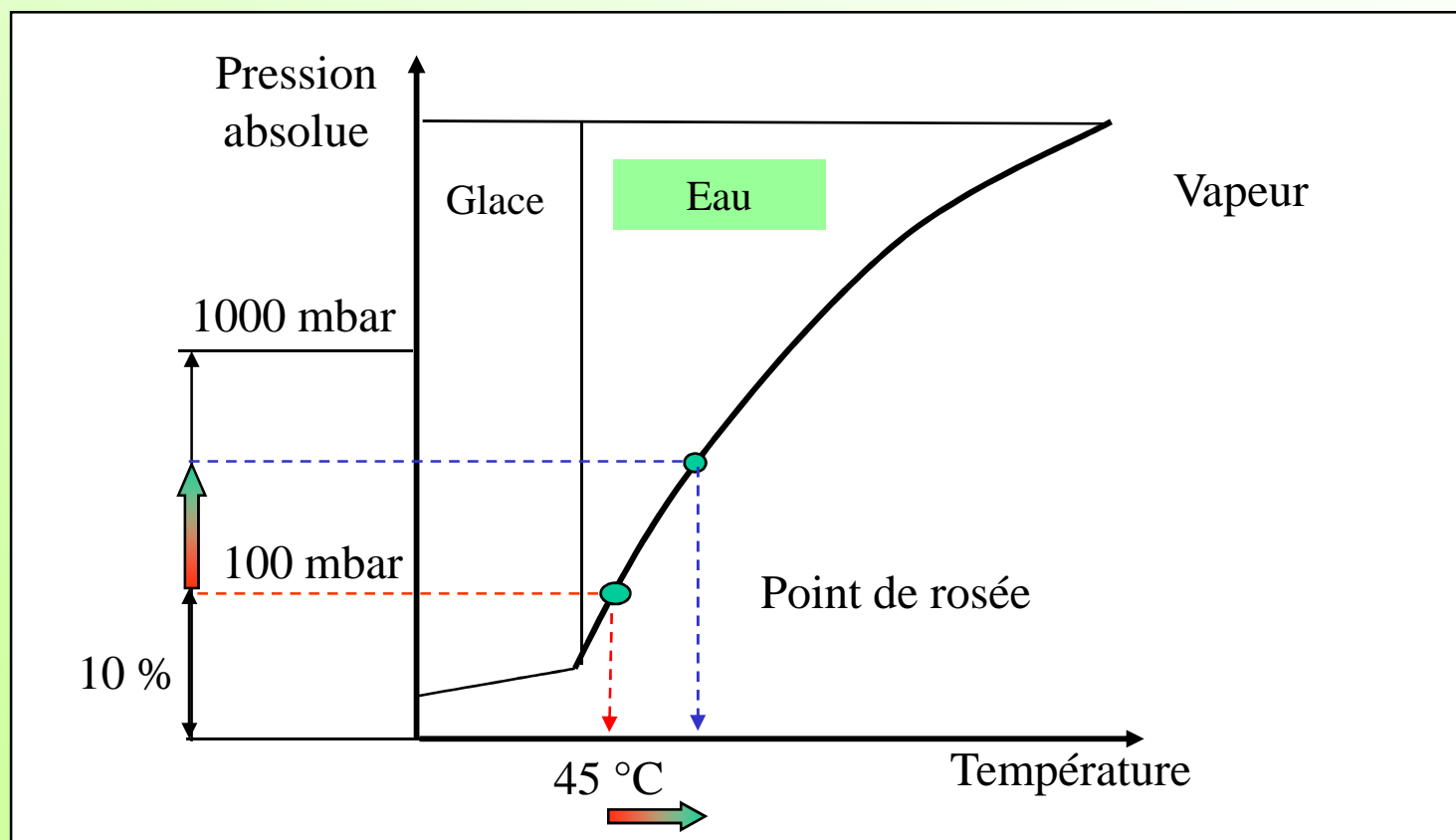
Exemple : si la teneur est de 10 % et la pression totale du mélange 1000 mbar, la pression partielle de la vapeur est de 100 mbar

Le point de rosée du mélange correspond à la température de changement d'état pour cette pression partielle de vapeur.

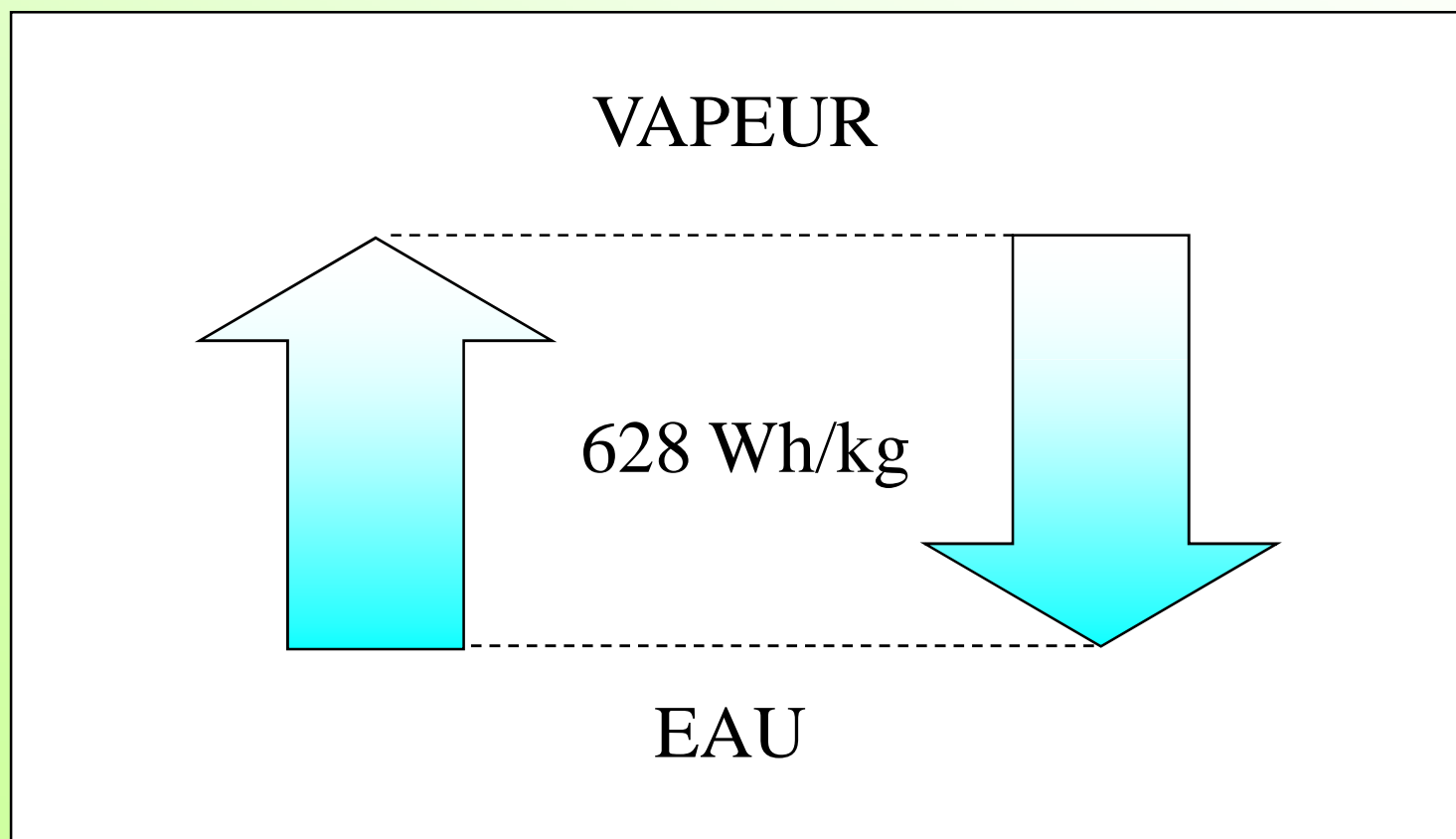


Pour une pression partielle de 100 mbar il est d'environ 45 °C

Si la teneur en eau augmente la pression partielle augmente et le point de rosée du mélange augmente aussi.



L'évaporation de l'eau nécessite de la chaleur dite « chaleur latente d'évaporation » (628 Wh/kg).



En se condensant, l'eau restituera la même quantité de chaleur.

## Application de la condensation aux générateurs de chauffage.

La condensation de la vapeur d'eau des fumées issue de la combustion de l'hydrogène (  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  ) peut permettre de récupérer une partie de cette chaleur et d'utiliser au mieux l'énergie contenue dans le combustible.

Des appareils spécifiques de production de chaleur par combustion appelés « générateurs à condensation » sont conçus pour permettre la condensation de la vapeur d'eau des fumées et la récupération des condensats et de la chaleur latente.

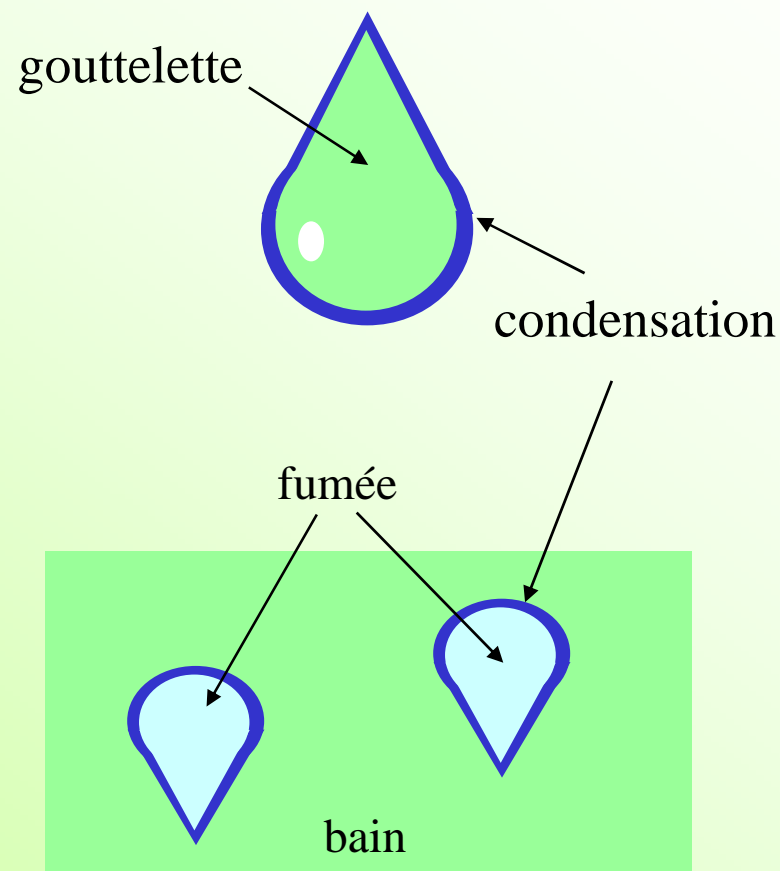
Il existe deux grands principes de générateurs à condensation :

**Les générateurs à voie humide**, utilisés en industrie ou en piscine, dans lesquels les fumées condensent en traversant un rideau d'eau devant être maintenu en permanence à une température inférieure au point de rosée.

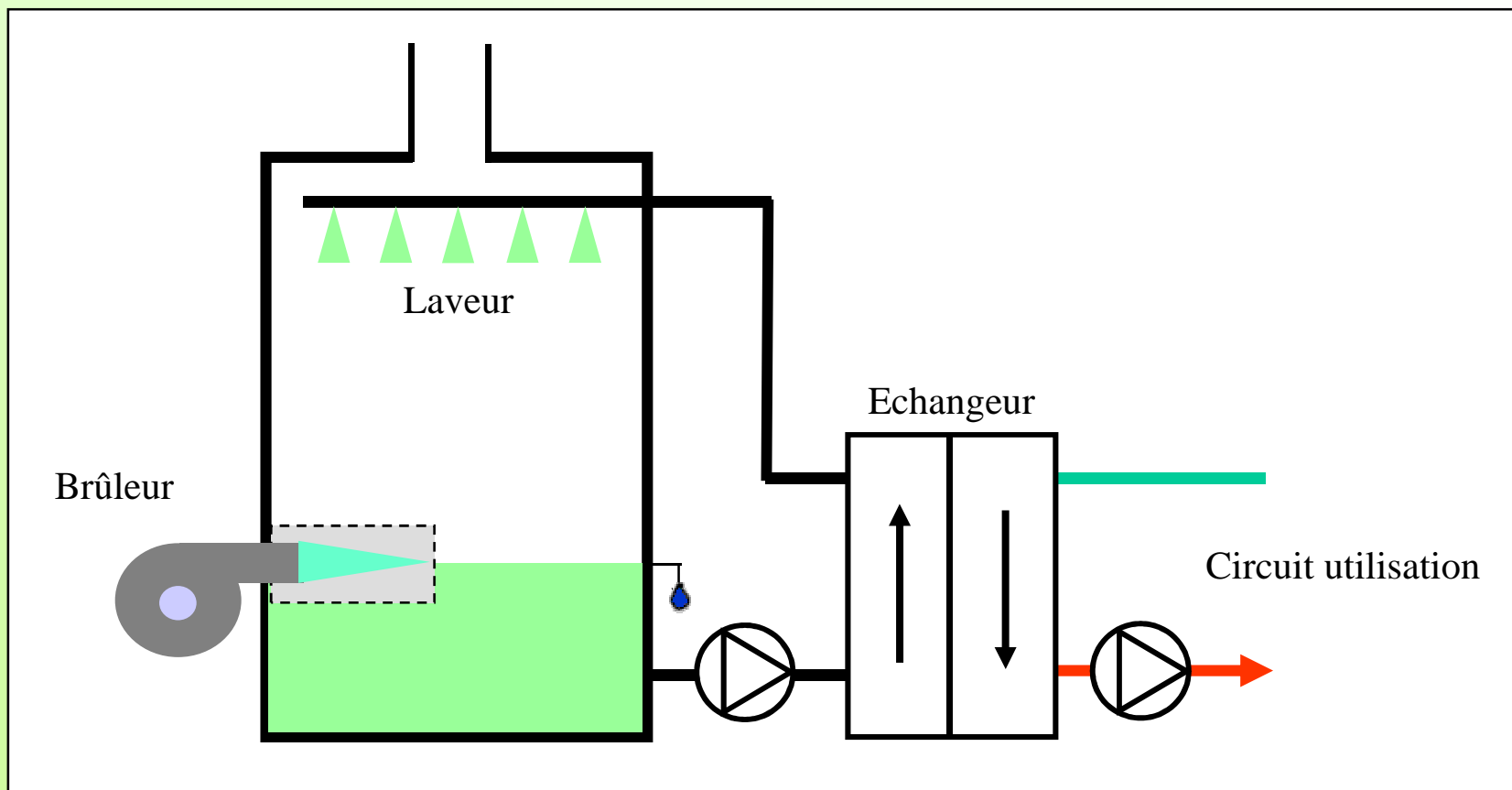
**Les générateurs à voie sèche**, plus utilisés, dans lesquels les fumées condensent sur les parois d'un échangeur si la température de paroi est inférieure au point de rosée.

**Dans les générateurs à voie humide,** la vapeur d'eau contenue dans les fumées va condenser :

- autour des gouttelettes d'eau d'un laveur qui devront toujours être maintenues à une température inférieure au point de rosée,
- ou sur les parois intérieures des bulles de fumées traversant un bain d'eau qui devra également être maintenu à une température inférieure au point de rosée.



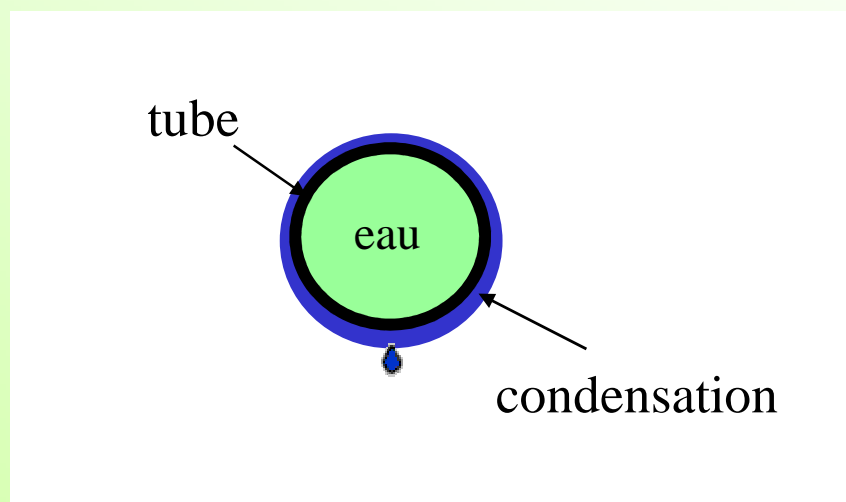
## Principe du générateur à voie humide de type laveur



La température de l'eau du laveur devant toujours être inférieure au point de rosée, ce système ne s'applique qu'aux installations ayant en permanence des retours très froids.

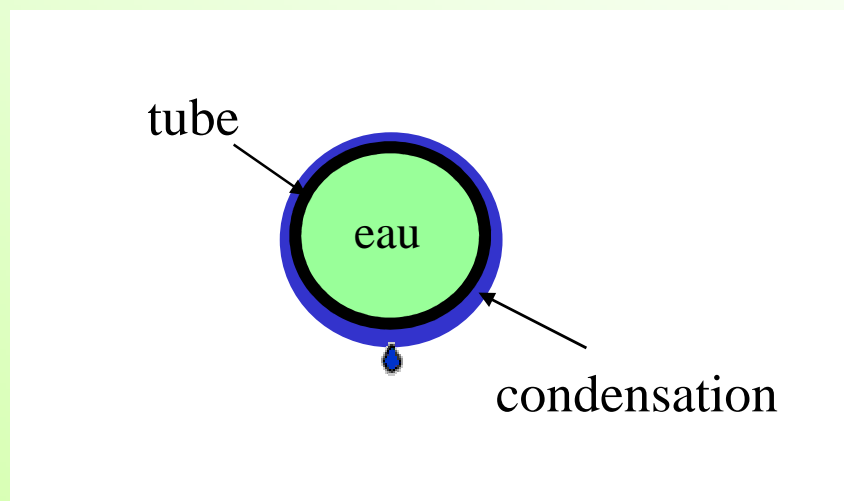


**Dans les générateurs à voie sèche** , la vapeur d'eau contenue dans les fumées va condenser sur les parois d'échangeurs lorsque celles-ci seront à une température inférieure au point de rosée.



Pour faciliter la condensation et l'écoulement des condensats :  
les fumées circulent dans l'échangeur du haut vers le bas,  
et la circulation de l'eau dans l'échangeur se fait du bas vers le haut.

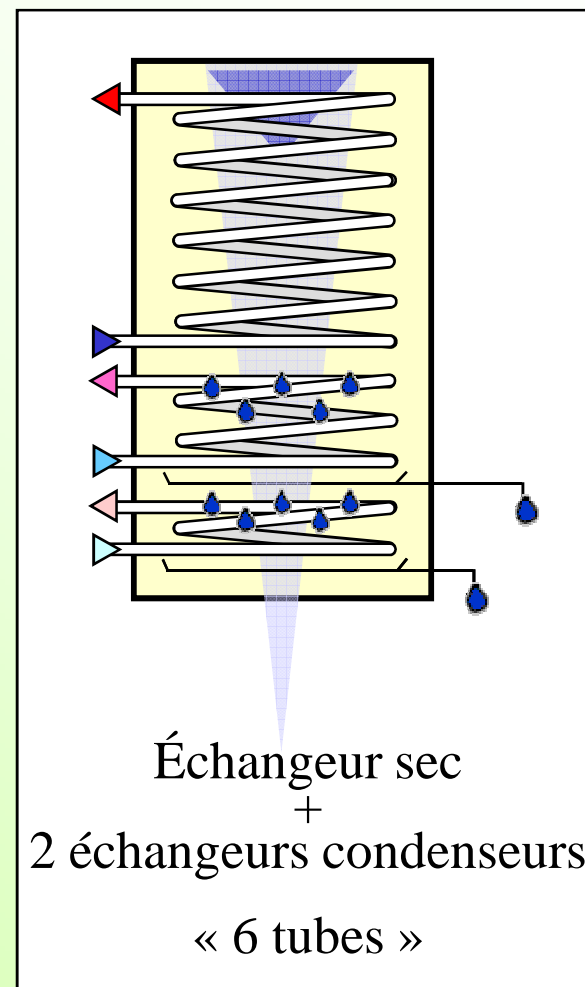
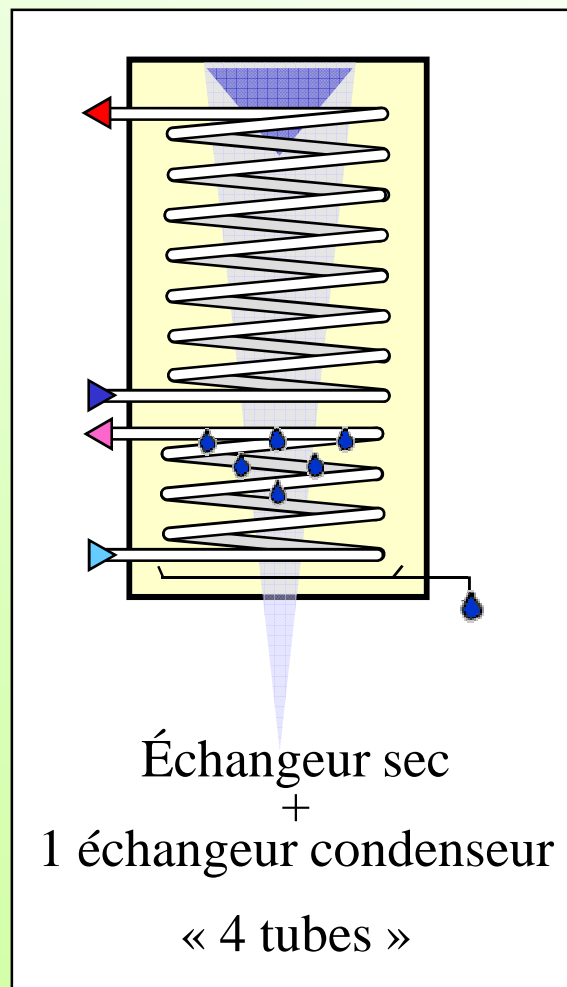
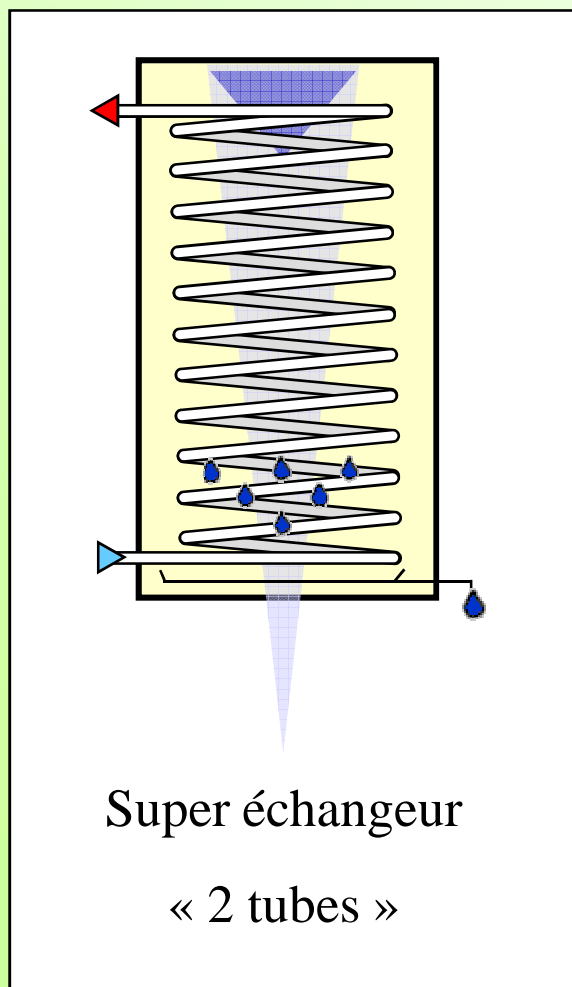
**Dans les générateurs à voie sèche** , la vapeur d'eau contenue dans les fumées va condenser sur les parois d'échangeurs lorsque celles-ci seront à une température inférieure au point de rosée.



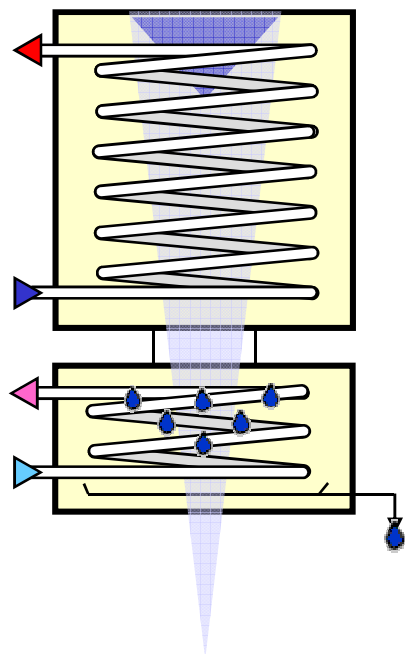
Ces échangeurs appelés « échangeurs condenseurs » sont conçus pour résister à l'acidité des condensats et faciliter l'écoulement de ceux-ci vers le bac de récupération.

Ils peuvent fonctionner sans risque avec des températures d'eau supérieures au point de rosée.

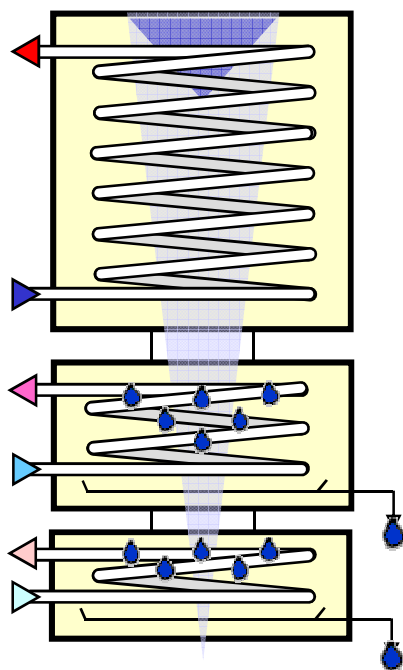
## Principe des générateurs à voie sèche



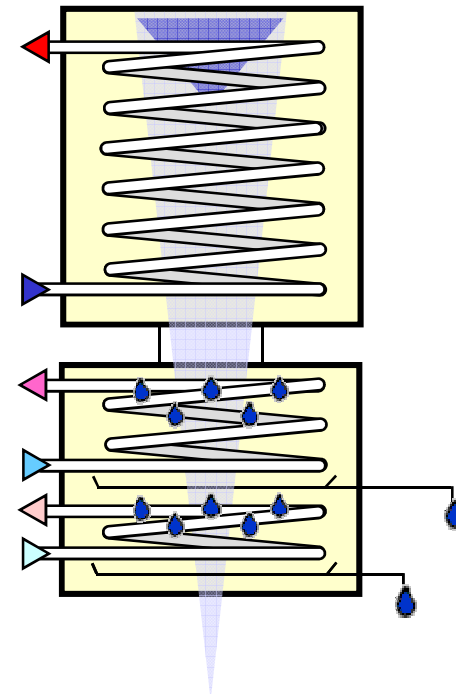
## Principe des générateurs à voie sèche



Chaudière classique  
+  
1 récupérateur  
condenseur

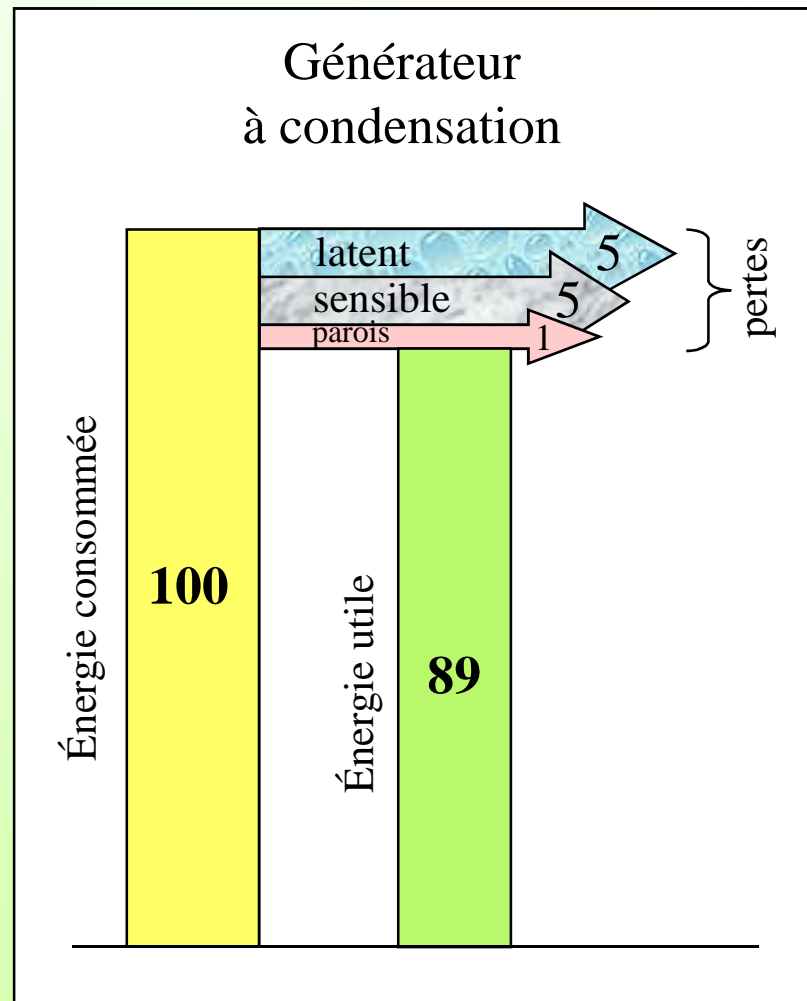
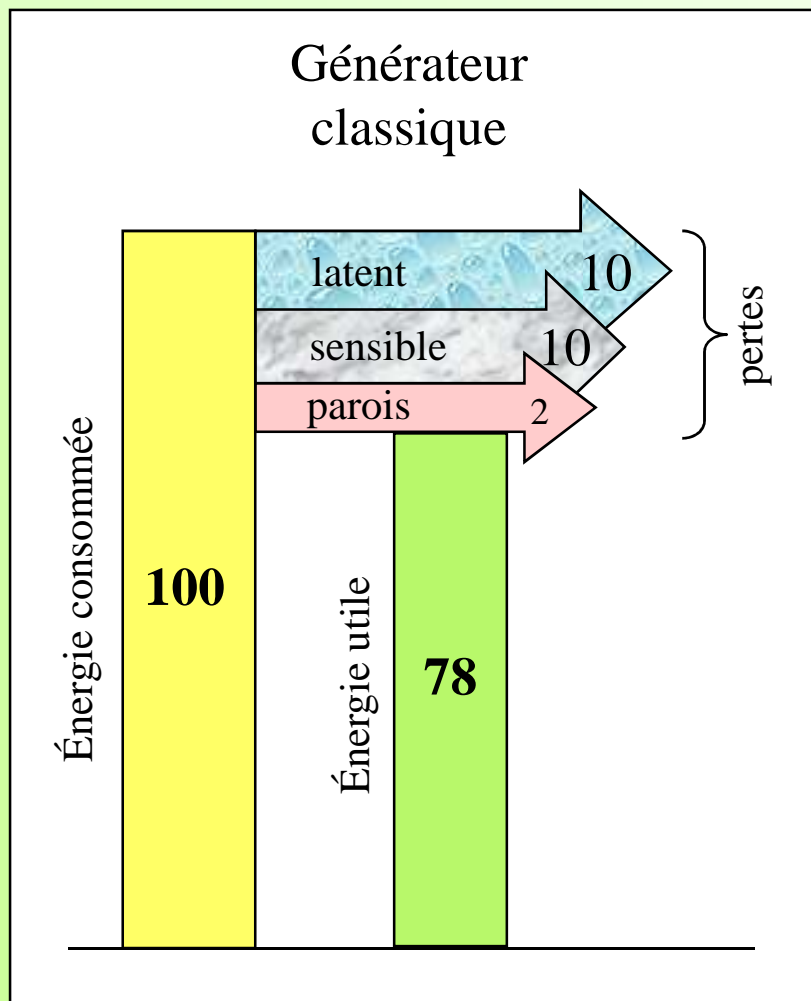


Chaudière classique  
+  
2 récupérateurs  
condenseurs



Chaudière classique  
+  
1 récupérateur condenseur  
à 2 étages

## Rendements comparés des générateurs classiques et des générateurs à condensation



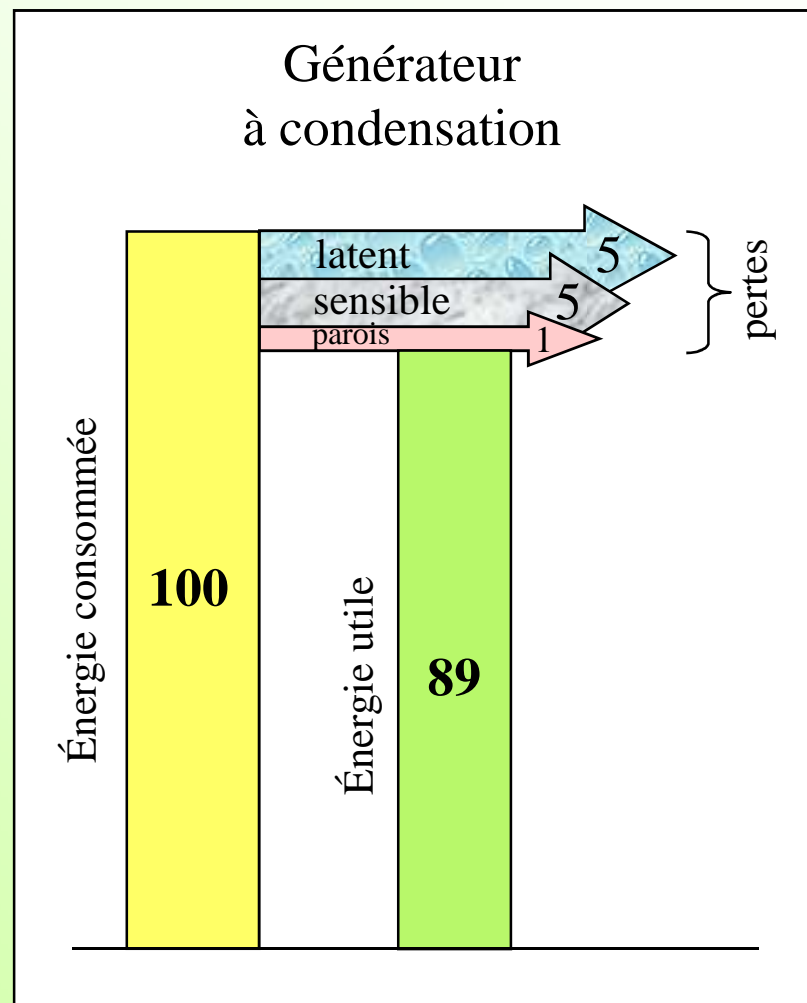
## Rendements comparés des générateurs classiques et des générateurs à condensation

Les pertes par chaleur latente sont diminuées par la récupération plus ou moins grande des condensats.

Les pertes par chaleur sensible sont diminuées car les fumées sont plus froides.

Les pertes par les parois du générateur sont diminuées car les températures d'eau sont plus basses.

Même lorsqu'il ne condense pas, un générateur à condensation a un meilleur rendement qu'un générateur classique.



### Points d'attention pour l'utilisation des générateurs à condensation.

Le ou les condenseurs doivent impérativement être irrigués en permanence.

Pour un meilleur rendement, les condenseurs doivent être irrigués avec l'eau la plus froide possible.

La partie classique du générateur doit être maintenue à une température supérieure au point de rosée.

Pour obtenir un point de rosée élevé qui favorisera la condensation, il est nécessaire de limiter l'excès d'air lors des réglages de combustion.

Les fumées étant saturées et à basse température, les conduits utilisés doivent être étanches, être isolés, être en matériau résistant aux condensats et présenter le minimum de perte de charge.

Les siphons des évacuations de condensats doivent avoir une garde d'eau suffisante et permanente.

Points d'attention pour l'utilisation des générateurs à condensation.

(cas particuliers des chaufferies composées)

Points d'attention particuliers pour les chaufferies disposant de générateurs classiques et à condensation :

Le générateur à condensation, possédant un meilleur rendement, est prioritaire et doit donc être utilisé en permanence.

S'il existe plusieurs générateurs à condensation, ils doivent fonctionner en cascade.

Il est préférable d'installer deux récupérateurs condenseurs sur un seul générateur classique plutôt qu'un récupérateur par générateur.

Les générateurs classiques sont en relève du générateur à condensation. Lorsque leur fonctionnement n'est pas nécessaire, ils doivent être mis à l'arrêt et ne doivent plus être irrigués.



Le point de rosée est la température au dessous de laquelle la vapeur d'eau contenue dans les produits de combustion va se condenser.

Ce changement d'état suit la relation pression-température. La température de condensation de l'eau contenue dans les fumées dépend de la pression partielle de la vapeur d'eau qui elle même variera en fonction :

- de la teneur en hydrogène et en eau du combustible et de l'humidité absolue de l'air comburant qui tendront à augmenter le point de rosée,
- de l'excès d'air qui tendra à abaisser le point de rosée.

L'acide sulfurique condense à une température plus élevée que la vapeur d'eau. C'est pourquoi, pour les combustibles soufrés, on parle de « point de rosée acide » qui augmente avec la teneur en soufre et est toujours supérieur au « point de rosée eau ».

Le tableau suivant donne la valeur des points de rosée des combustibles courants en combustion stœchiométrique avec de l'air sec.

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

*Le point de rosée augmente lorsque la teneur en eau de l'air augmente.*

Points de rosée en combustion oxydante avec divers excès d'air.

<i>Nature du gaz</i>	<i>Excès d'air</i>			
	<i>0 %</i>	<i>20 %</i>	<i>40 %</i>	<i>60 %</i>
Lacq	59.2	55.6	52.7	50.2
Algérie (Fos)	59.1	55.6	52.7	50.1
Algérie (Montoir)	59.0	55.5	52.6	50.0
Mer du Nord	59.1	55.6	52.7	50.1
Russie	59.2	55.6	52.7	50.2
Groningue	58.8	55.5	52.5	50.0
Propane commercial	53.9	50.5	48.0	45.5
Butane commercial	53.6	48.5	47.5	45.0

*Le point de rosée diminue lorsque l'excès d'air augmente.*

Pouvoir calorifique

Rendement de combustion sur PCI

Rendement de combustion sur PCS

Rendement de combustion des appareils à condensation

Rendement de combustion des chaufferies composées

La quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète d'un matériau est appelée « chaleur de combustion » ( $\text{kJ/kg}$  ou  $\text{kJ/m}^3(\text{n})$ ).

Pour les matériaux combustibles qui contiennent de l'hydrogène et par conséquent pour lesquels on retrouve de la vapeur d'eau dans les produits de combustion, on distingue le « pouvoir calorifique supérieur » et le « pouvoir calorifique inférieur » suivant que l'on prend en compte ou non la chaleur de vaporisation de l'eau des fumées.

Le pouvoir calorifique est dit **supérieur** (abrégé : 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** (abrégé : 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.

La détermination des pouvoirs calorifiques des combustibles solides et liquides ne peut se faire avec précision qu'à partir de mesures calorimétriques.

L'estimation du pouvoir calorifique inférieur peut se calculer à partir de formules empiriques si l'on connaît la composition pondérale du combustible.

$$\text{PCI (MJ/kg)} = 34,8 c + 93,9 h + 10,5 s + 6,3 n - 10,8 o - 2,5 w$$

(c, h, s, n, o et w sont respectivement les teneurs en kg/kg de carbone, hydrogène, soufre, azote, oxygène et eau du combustible solide ou liquide considéré.)

Dans les applications thermiques de notre secteur, on ne connaît jamais la composition exacte du combustible utilisé.

Dans la pratique, on utilise la plupart du temps les valeurs PCI et PCS données directement par les distributeurs de combustibles ou les valeurs moyennes données dans les tableaux suivants.

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

*Ces valeurs sont des valeurs moyennes*

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

*Ces valeurs sont des valeurs moyennes*



Dans la profession, on détermine le rendement de combustion par une méthode indirecte :

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

*\* L'émission d'imbrûlés solides (suie) ou gazeux (CO) étant très strictement réglementée, 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.

*« Chauffer les oiseaux » est une perte d'énergie.*

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 ( $\% \text{CO}_2$ ),
  - le pourcentage d'oxygène des fumées sèches ( $\% \text{O}_2$ ).
- de déterminer  $X_a$  ou  $X'_a$  en fonction du combustible utilisé,
- d'utiliser les formules de Ser suivantes.

## Formules de Ser

Si l'on a mesuré le  $\text{CO}_2$  :

$$\text{Pertes fumées} = X_a \cdot \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{\% \text{ CO}_2}$$

Si l'on a mesuré l' $\text{O}_2$  :

$$\text{Pertes fumées} = X'_a \cdot \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{21 - \% \text{ O}_2}$$

## Valeurs usuelles de $X_a$ et de $X'_a$

<i>Combustible</i>	$X_a$	$X'_a$
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

*Ces valeurs dépendent de l'excès d'air. Pour le fioul domestique par exemple,  $X_a = (0,008 \cdot CO_2) + 0,48$*

## Valeurs de Xa pour différents excès d'air

<i>Combustible</i>	<i>10 %</i>	<i>20 %</i>	<i>30 %</i>
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

Formules de rendement de combustion sur PCI

( formules de Siegert )

$$\eta \text{ comb PCI} = 100 - X_a \cdot \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{\% \text{ CO}_2}$$

$$\eta \text{ comb PCI} = 100 - X'_a \cdot \frac{(\text{temp fumées} - \text{temp air})}{21 - \% \text{ O}_2}$$

## Exemples de détermination de rendements de combustion

### *Exemple 1 :*

Combustion oxydante de fioul domestique.

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

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

### *Exemple 2 :*

Combustion oxydante de gaz naturel.

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

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



### Remarques

- Le rendement de combustion sur PCI peut être déterminé en utilisant la réglette de calculs fournie dans les coffrets d'analyseurs de combustion « manuels ».
- Le rendement de combustion sur PCI peut être donné directement par les analyseurs de combustion électroniques.
- Ne pas confondre rendement de combustion et rendement chaudière.

$$\eta_{\text{comb PCS}} = \eta_{\text{comb PCI}} \cdot \frac{\text{PCI}}{\text{PCS}}$$

<i>Combustible</i>	<i>PCI / PCS</i>
Gaz manufacturés	0,89
Gaz naturels L	0,89
Gaz naturels H	0,90
Butane - Propane	0,92

### Remarques

- Le rendement sur PCS est toujours inférieur à 100 %.
- Le rendement sur PCS est toujours inférieur au rendement sur PCI.
- Seuls les appareils à condensation peuvent avoir un rendement de combustion sur PCI supérieur à 100 %.
- Le rendement sur PCS est surtout utilisé pour les combustibles gazeux.

1<sup>ère</sup> méthode :

- Calcul des pertes en chaleur sensible des fumées par mesure des températures et du CO<sub>2</sub> ou de l'O<sub>2</sub>.
- Calcul du gain en chaleur latente par mesure des condensats.

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

Le calcul des pertes par fumées est celui utilisé pour les appareils classiques, la température fumée étant prise après le condenseur.

Pour le calcul du gain, il y aura besoin de mesurer :

- le débit de condensats produits en kg/h (que nous appellerons « L »),
- le débit de combustible en kg/h ou en  $\text{m}^3(\text{n})/\text{h}$  (que nous appellerons « Q »).

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

*Si l'on récupère toute l'eau produite par la combustion, le gain en chaleur latente est maximal.*

*Si l'on récupère  $x \%$  de l'eau produite par la combustion, le gain est de  $x \%$  du gain maximal.*

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

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

## Exercice :

Calculez le rendement de combustion PCS du cas suivant.

Une chaudière à condensation fonctionne au gaz d'Algérie.

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



Pertes en chaleur sensible par les fumées :

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

Débit de condensats récupérés :

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

Débit de gaz lu au compteur :

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

Débit normal de gaz :

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

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 :

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

Rendement de combustion sur PCI :

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

Rendement de combustion sur PCS :

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

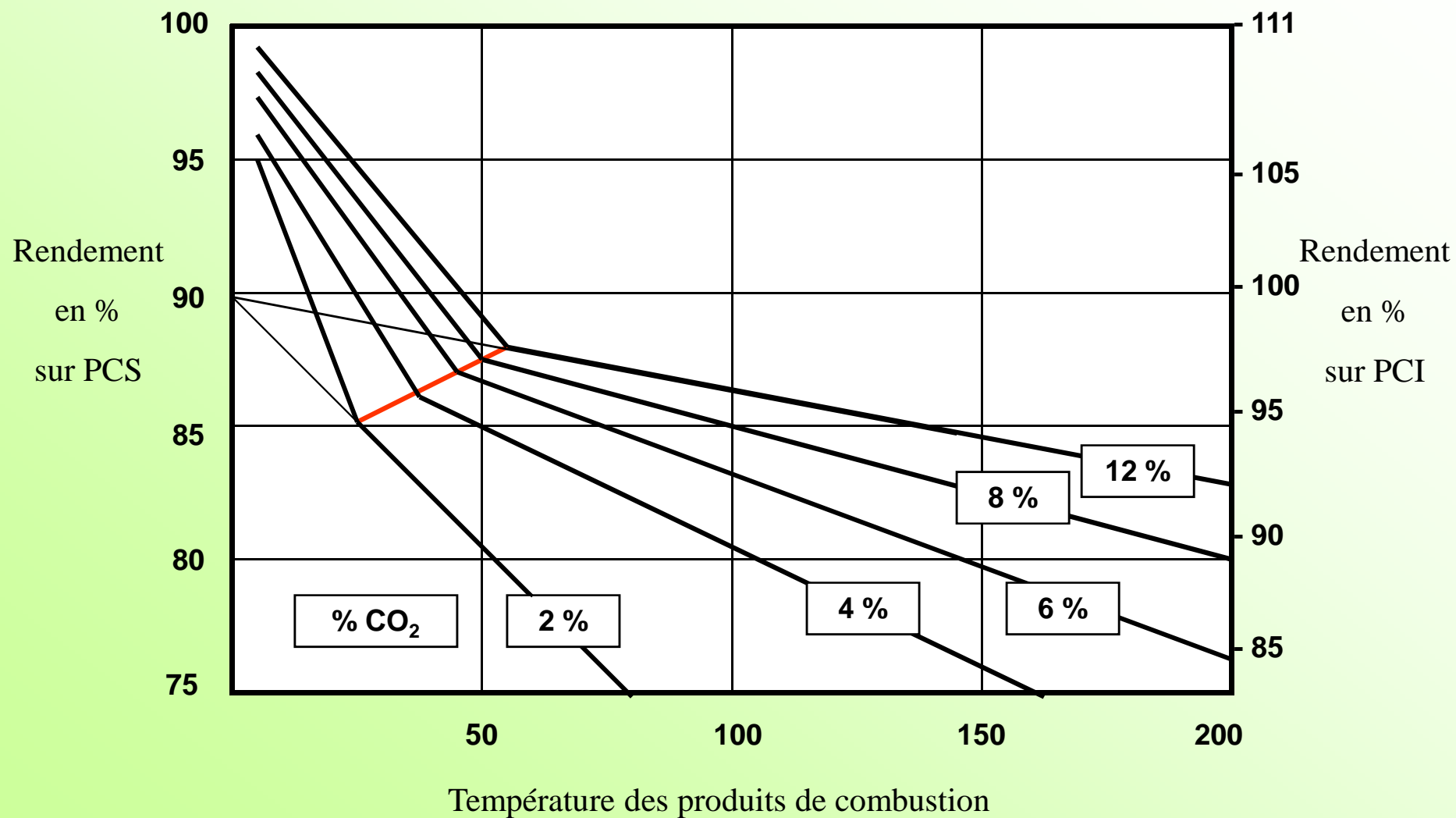
## 2<sup>ème</sup> méthode :

Lecture directe sur un diagramme défini pour le combustible utilisé, des rendements de combustion sur PCI et sur PCS à partir des données suivantes :

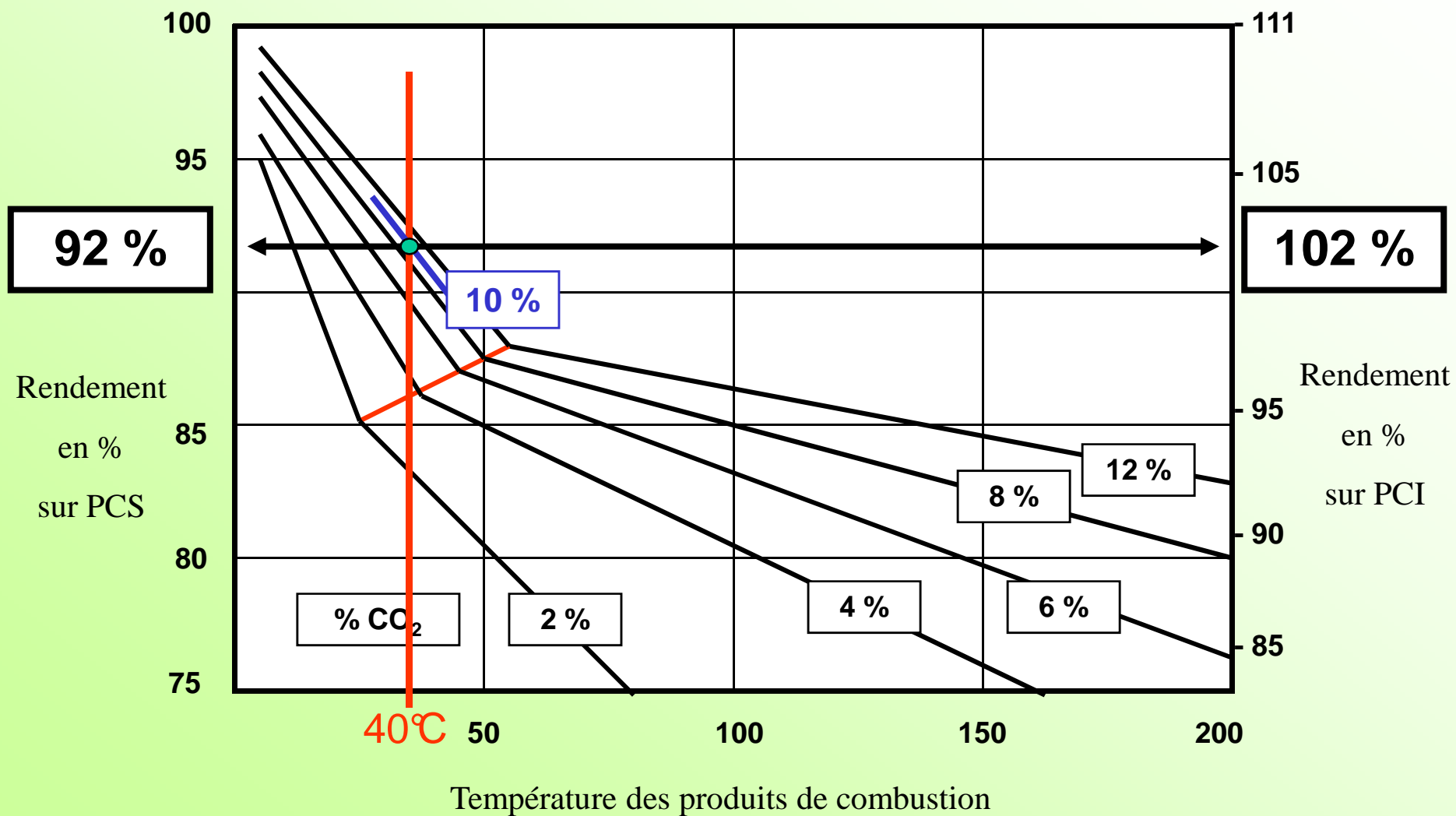
- température des fumées,
- excès d'air par mesure du pourcentage de  $\text{CO}_2$  ou de  $\text{l'O}_2$ .

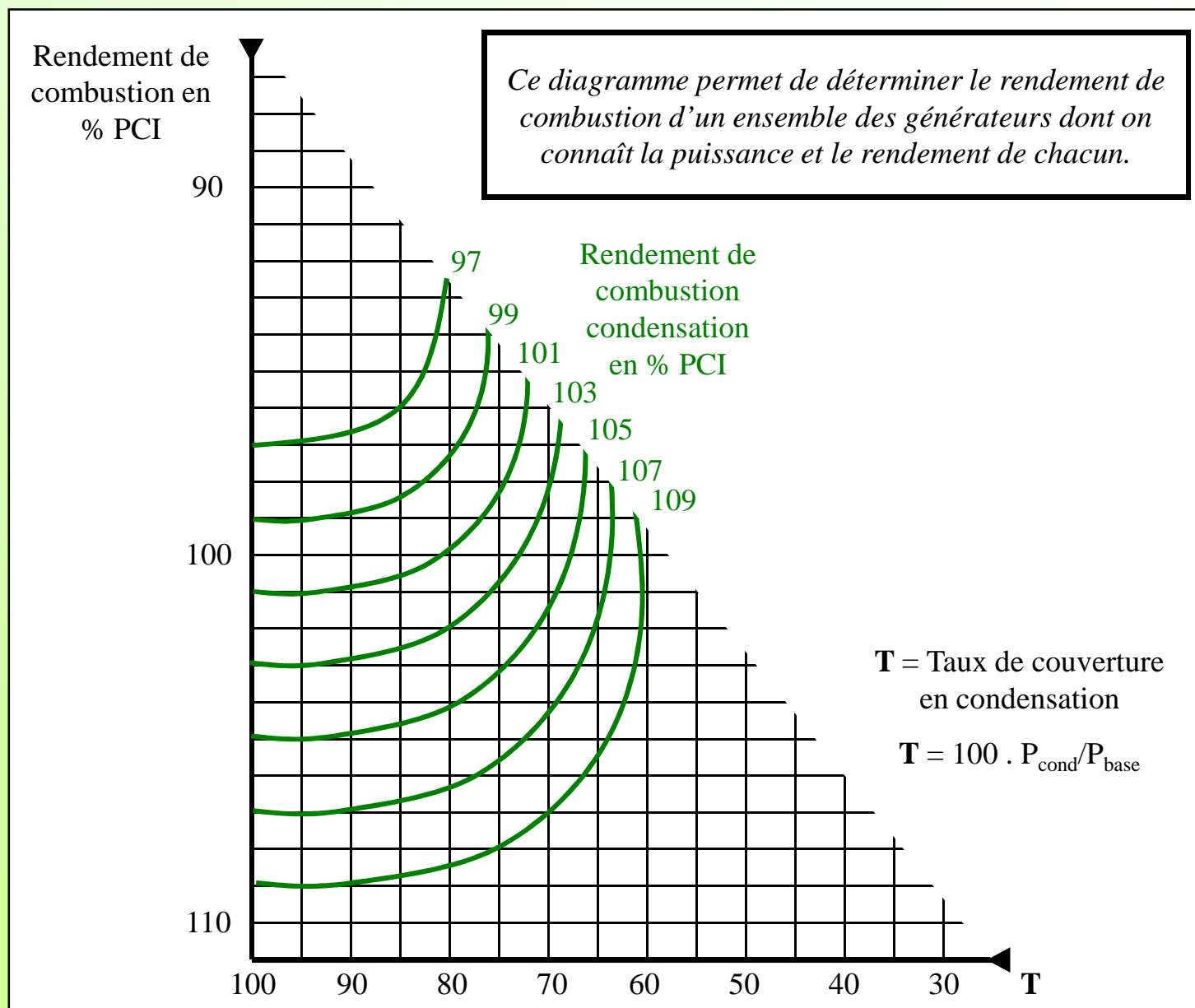
*Remarque :*

*L'abaque utilisé pages suivantes ne sert qu'à la démonstration.*



Température fumée 40 °C, teneur en CO<sub>2</sub> 10 %





# Rendement de combustion des chaufferies composées

